DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251016008
引用格式: 贾旺琪, 马婧怡, 吕欣. 小麦胚芽羊乳干酪开发及成熟过程的品质变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 187–196.
JIA WQ, MA JY, LV X. Development of wheat germ goat milk cheese and quality changes during its ripening process [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 187–196. (in Chinese with English abstract).

小麦胚芽羊乳干酪开发及成熟过程的品质变化

贾旺琪[1], 马婧怡[1,2], 吕　欣[1*]

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 杨凌　712100; 2. 广水市公共检验检测中心, 广水　432700)

摘　要: 目的　开发小麦胚芽羊乳干酪(wheat germ goat milk cheese, WGC)产品并探讨其成熟过程的品质变化。**方法**　采用凯氏定氮法、顶空固相微萃取法和扫描电子显微镜等方法对成熟过程 WGC 的理化品质、风味特性、蛋白水解和微观结构进行分析, 并对产品进行了电子舌分析。**结果**　成熟过程中 WGC 的水分含量无显著差异(P>0.05), 脂肪含量由 26.12 g/100 g 升高至 27.88 g/100 g, 蛋白质含量由 20.64 g/100 g 升高至 22.96 g/100 g, pH 由 4.35 显著降低至 4.17 (P<0.05)。WGC 成熟期间酮类是主要挥发性风味物质(占比高于 48%), 赋予乳香、奶油味, 成熟 56 d 时丁酸未检出, 己酸及辛酸含量仅为 33.91 μg/kg 和 25.60 μg/kg。成熟期间 WGC 的 pH 在 4.6 条件下可溶性氮含量、12% (m:V)三氯乙酸可溶性氮含量、5% (m:V)磷钨酸可溶性氮含量分别由 0 d 的 12.06%、6.00%和 2.20%显著增长至第 56 d 的 21.11%、14.23%和 4.57% (P<0.05)。WGC 的酸味处于相对适中的水平, 其苦味、涩味、苦味回味及咸味均低于两款市售羊乳干酪, 整体滋味更为柔和、协调。**结论**　与羊乳干酪相比, WGC 成熟过程中水分流失减弱、不良风味减少且蛋白水解度增强, 可见小麦胚芽可以应用于羊乳干酪中, 以有效改善其成熟期的品质和风味。

关键词: 小麦胚芽; 羊乳干酪; 成熟过程; 品质变化

Development of wheat germ goat milk cheese and quality changes during its ripening process

JIA Wang-Qi[1], MA Jing-Yi[1,2], LV Xin[1*]

(1. *College of Food Science and Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *China*;
2. *Guangshui Public Inspection and Testing Center*, *Guangshui* 432700, *China*)

ABSTRACT: Objective　To develop new products of wheat germ goat milk cheese (WGC) and explore its quality changes during maturation process. **Methods**　The physicochemical properties, flavor characteristics, proteolysis and microstructure of WGC during ripening were analyzed using the Kjeldahl method, headspace solid-phase microextraction and scanning electron microscopy. In addition, an electronic tongue was employed to evaluate the taste profile of the product. **Results**　There was no significant difference in the moisture content of WGC during the

收稿日期: 2025-10-16
基金项目: 陕西省重点研发计划项目重点产业创新链项目(2023-ZDLNY-35, 2024NC-ZDCYL-03-10); 新疆优势农畜产品质量安全预警技术及多级追溯体系研发项目(2022A02006); 陕西省科技创新团队项目(2024RS-CXTD-75)
第一作者: 贾旺琪(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养与健康。E-mail: 9305277@qq.com
***通信作者:** 吕欣(1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品发酵工程。E-mail: xinlu@nwsuaf.edu.cn

ripening process (P>0.05). The fat content increased from 26.12 g/100 g to 27.88 g/100 g, and the protein content increased from 20.64 g/100 g to 22.96 g/100 g. The pH decreased significantly from 4.35 to 4.17 (P<0.05). Ketones (percentage higher than 48%) were the main volatile flavor substances during ripening of WGC, imparting lactic, creamy flavor, while butyric acid was not detected at 56 d of ripening, and hexanoic acid and octanoic acid were only 33.91 μg/kg and 25.60 μg/kg. The pH 4.6 value soluble nitrogen, 12% (m:V) trichloroacetic acid soluble nitrogen and 5% (m:V) phosphotungstic acid soluble nitrogen content of WGC increased significantly from 12.06%, 6.00% and 2.20% at 0 d to 21.11%, 14.23% and 4.57% at 56 d respectively (P<0.05). The sourness of WGC was at a relatively moderate level, while its bitterness, astringency, bitter aftertaste and saltiness were all lower than those of the 2 commercial ewe milk cheeses, resulting in an overall taste that was milder and more harmonious. **Conclusion** Compared with goat cheese, WGC exhibits reduced water loss, fewer undesirable flavors and increased protein hydrolysis during ripening, indicating that wheat germ can be used in goat cheese to improve its quality during ripening.

KEY WORDS: wheat germ; goat milk cheese; ripening process; quality change

0 引 言

以羊乳为原料的干酪因其易消化、致敏性低、营养价值高等特性受到关注[1], 克罗汀、瓦朗塞、罗卡马杜尔、皮科多都是著名的法国羊乳干酪(goat milk cheese, GC), 此外西班牙和希腊的 GC 也受到关注。干酪在成熟期间会发生复杂的生物化学变化, 以形成其特有的风味与质地, 并提升营养价值。成熟期间, 干酪中的碳水化合物(主要为乳糖与柠檬酸)会被乳酸菌代谢, 降低干酪 pH 并促进干酪风味形成; 蛋白质在蛋白酶作用下被水解为多肽和游离氨基酸, 更易于人体吸收利用; 脂肪会在脂肪酶的作用下分解生成短链脂肪酸(如乙酸、丁酸、己酸等), 赋予干酪辛辣、酸香及典型“奶酪味”等特征风味, 并作为前体物质进一步转化为甲基酮、仲醇、酯类和内酯等芳香成分, 从而丰富干酪的整体香气[2]。有研究表明, 以山羊乳为原料制成的 GC 中均不同程度地出现“山羊般的”风味特征[3], 这种典型的风味主要与其中的己酸、辛酸和癸酸等物质有关, 其中己酸被描述为“具有刺激性气味”, 辛酸被描述为“汗味”及“蜡味”, 癸酸被描述为“腐臭味”[4], 对于有 GC 消费习惯的西方消费者而言, 这种风味常被表述为 GC 在成熟过程中产生的特征风味, 但这种风味往往令我国多数消费者难以接受[5]。

小麦作为我国重要的粮食作物, 是仅次于玉米和大米的第三大消费谷物。小麦胚芽是小麦制粉的副产物之一, 是小麦籽粒中最具营养的部分, 主要营养成分为蛋白质(26.0%~31.5%)、脂类(8.9%~13.5%)和碳水化合物(42.0%~47.0%), 此外还有甾醇、生育酚和类胡萝卜素等多种功能性成分[6]。小麦胚芽中高酶活性与高不饱和脂肪酸含量导致脂肪极易酸败[7], 因此这一副产品大多被当成废物丢弃, 并未得到高效利用。烘烤处理作为一种简单易行的加工手段, 对小麦胚芽中脂肪酶和脂肪氧化酶具有良好的灭活效果, 并提升小麦胚芽的色泽及风味[8], 使小麦胚芽有望成为一种易获得且低成本的食品添加成分, 为产品提供独特风味以及健康益处。

前期已初步确定小麦胚芽对 GC 的改进作用并探究了小麦胚芽羊乳干酪(wheat germ goat milk cheese, WGC)的最优工艺[9], 本研究以此为基础制备 WGC 与 GC, 并在成熟期的 0、7、14、28、42、56 d 分别对其理化品质、风味特性、蛋白水解程度及微观结构进行分析, 探究 GC 成熟期间品质变化规律, 以及添加小麦胚芽对 GC 成熟过程中品质的影响, 旨在表明小麦胚芽对 GC 成熟过程的品质改良作用。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

羊乳(西北农林科技大学种羊场); 小麦胚芽(山东枣庄市食用农产品农庄); 乳酸菌酸奶发酵粉 5 菌型(保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌、干酪乳杆菌)(北京川秀科技有限公司)。

食品级氯化钙(分析纯, 江苏锐康莱科技有限公司); 凝乳酶(分析纯, 河北顺势生物科技有限责任公司); 2-辛醇、乙酸钠、乙酸、三氯乙酸、硫酸、磷钨酸(分析纯, 上海阿拉丁试剂有限公司); 无水乙醇、磷酸盐、三氯甲烷、戊二醛(分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司)。

AL104 电子天平(精度 0.1 mg, 梅特勒-托利多仪器有限公司); DGG-9030A 电热恒温干燥箱(上海森信实验仪器有限公司); HH-S4A 电热恒温水浴锅(北京科伟永兴仪器有限公司); UV-1900 双光束紫外分光光度计(上海佑科仪器仪表有限公司); D-37520 高速冷冻离心机、Trace1610-TSQ9610 气质联用仪、TraceGOLD™ TG-WAXMS 气相色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国赛默飞世尔科技有限公司); IS128 精密 pH 计(上海仪迈仪器科技有限公司); Kjeltec8400 全自动凯氏定氮仪、SCINOST310 索氏抽提仪(瑞典福斯公司); TM3000 台式扫

描电子显微镜(日本日立公司); FJ200 高速分散均质机(沪析实验仪器有限公司); ASTREE 电子舌(法国 ALPHA MOS 公司)。

1.2 方　法

1.2.1 小麦胚芽羊乳干酪的制备

小麦胚芽粉制备: 生小麦胚芽平铺 1 cm 厚在锡箔纸上, 烘箱 180 ℃烘烤 10 min, 冷却至室温后打粉过 50 目筛即得小麦胚芽粉[水分(2.47±0.03) g/100 g, 脂肪(9.86±0.08) g/100 g, 蛋白质(30.35±0.08) g/100 g, 灰分(4.87±0.08) g/100 g, 总糖(71.10±0.02) g/100 g, 粗纤维(6.70±0.21) g/100 g]。

干酪制备: 将原料生羊乳与 4.5% (*m*:*m*)小麦胚芽粉混匀, 在 63 ℃条件下杀菌 30 min, 然后冷却至 38 ℃。加入 0.2% (*m*:*m*)乳酸菌发酵剂菌粉并搅匀, 在 38 ℃条件下发酵, 发酵至 pH 为 6.0 时加入 0.03% (*m*:*m*)氯化钙和 0.06% (*m*:*m*)凝乳酶, 静置 30 min 等待凝乳, 待凝块形成后切割凝块。静置等待凝块收缩, 待 pH 为 4.80 时排出乳清, 将凝块入模, 压制成型 4 h 后切分, 再用 3.5% (*m*:*m*)氯化钠盐渍 40 min, 沥干表面水分后进行真空包装, 并在 4 ℃条件下保存成熟, 得到 WGC。以相同的方法制备未添加小麦胚芽粉的 GC 作为对照。在干酪成熟期的 0、7、14、28、42、56 d 分别对其品质进行测定。

1.2.2 理化指标的测定

水分含量的测定参考 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中直接干燥法; 蛋白质含量的测定参考 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中自动凯氏定氮仪法; 脂肪含量的测定参考 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中索氏抽提法; pH 的测定: 取 1 g 干酪加入 10 mL 去离子水, 以 8000 r/min 的速度均质 1 min 得干酪浆后用 pH 计直接测定; 乳酸菌活菌数的测定参考 GB 4789.35—2023《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》; 菌落总数的测定参考 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》。

1.2.3 干酪中挥发性风味物质的测定

参照 ZHENG 等[10]的方法稍作修改, 准确称取 5.00 g 干酪样品放入萃取瓶中加盖盖紧, 内标为质量浓度为 10 mg/L 的 2-辛醇溶液, 采用顶空固相微萃取法(headspace solid-phase microextraction, HS-SPME), 每个样品重复测定 3 次。气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)条件: 色谱柱为 TraceGOLD™ TG-WAXMS 气相色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 进样口温度 250 ℃, 载气为氦气(He), 载气流速 1 mL/min, 不分流进样; 程序升温: 初始 40 ℃, 保持 3 min, 以 4 ℃/min 的速率升至 140 ℃, 保持 2 min, 6 ℃/min 升至 240 ℃, 保持 12 min。离子源温度 230 ℃, 电子轰离能 70 eV, 质量扫描范围设置在 *m*/*z* 40~450 u 之间。

1.2.4 干酪中蛋白水解的测定

(1) pH 4.6 条件下可溶性氮含量的测定

准确称取 3.00 g 干酪加入离心管中, 加入 40 mL pH 为 4.6 的乙酸-乙酸钠缓冲溶液 8000 r/min 均质 2 min 制备匀浆, 在 4 ℃下 4000 r/min 离心 20 min, 取上清液至消化管中消化, 进行自动凯氏定氮, pH 4.6 条件下可溶性氮(pH 4.6-soluble nitrogen, pH 4.6-SN)计算方法如式(1)所示:

$$X_1/\% = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_1 为 pH 4.6-SN 含量, %; m_1 为 pH 为 4.6 的溶液中上清液含氮量, mg/100 mL; m_2 为干酪总含氮量, mg/100 mL。

(2) 12%三氯乙酸中可溶性氮含量的测定

参照万俊等[11]的方法, 准确称取 3.00 g 干酪加入离心管中, 加入 25 mL 12% (*m*:*V*)三氯乙酸溶液 8000 r/min 均质 2 min 制备匀浆, 在 4 ℃下 4000 r/min 离心 20 min, 取上清液至消化管中消化, 进行自动凯氏定氮, 12%三氯乙酸中可溶性氮(trichloroacetic acid-soluble nitrogen, TCA-SN)计算方法如式(2)所示:

$$X_2/\% = \frac{m_3}{m_4} \times 100\% \quad (2)$$

式中: X_2 为 12% TCA-SN 含量, %; m_3 为 12% (*m*:*V*)三氯乙酸溶液中上清液含氮量, mg/100 mL; m_4 为干酪总含氮量, mg/100 mL。

(3) 5%磷钨酸中可溶性氮含量的测定

准确量取 pH 4.6-SN 溶液 5 mL, 加入 3.5 mL 4 mol/L 的硫酸溶液和 1.5 mL 333 g/L 的磷钨酸溶液混匀, 4 ℃下静置 24 h, 取上清液过滤后移至消化管中消化, 进行自动凯氏定氮, 5%磷钨酸中可溶性氮(phosphotungstic acid-soluble nitrogen, PTA-SN)计算方法如式(3)所示:

$$X_3/\% = \frac{m_5}{m_6} \times 100\% \quad (3)$$

式中: X_3 为 5% PTA-SN 含量, %; m_5 为 5% (*m*:*V*)磷钨酸溶液中上清液含氮量, mg/100 mL; m_6 为干酪总含氮量, mg/100 mL。

1.2.5 干酪微观结构的测定

参照 NASSER 等[12]的方法, 用灭菌刀片将干酪切成(1 mm×1 mm×1 mm)薄片, 浸泡在 2.5% (*m*:*m*)的戊二醛溶液中, 置于 4 ℃冰箱中固定 4 h。之后用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH 7.2)清洗 3 次, 每次约 15 min。再用体积分数为 30%、50%、70%、90%、100%的乙醇溶液进行梯度脱水, 每次约 15 min。然后使用三氯甲烷对干酪样品浸泡脱脂 3 次, 每次 15 min。脱脂后用 100%乙醇溶液清洗 3 次, 每次 15 min, 使样品呈脱水状态。最后, 将处理好的样品放置在–40 ℃冰箱预冷冻 2 h, 取出放入真空冷冻干燥机中干燥 36 h。采用离子溅射的方式对干燥后的样品进行镀金, 置于扫描电子显微镜下扫描, 以 1500 倍的放大率观察样品。

1.2.6 电子舌测试仪及分析方法

参考 LIPKOWITZ 等[13]的方法, 称取 5 g 奶酪样品进行

充分研磨, 置于 100 mL 去离子水中, 均质后在 5000 r/min、20 min、20 ℃条件下离心。取上层清液进行过滤, 过滤后液体静置 20 min, 等待澄清后倒入电子舌专用烧杯中, 等待上机检测。

1.3 数据处理

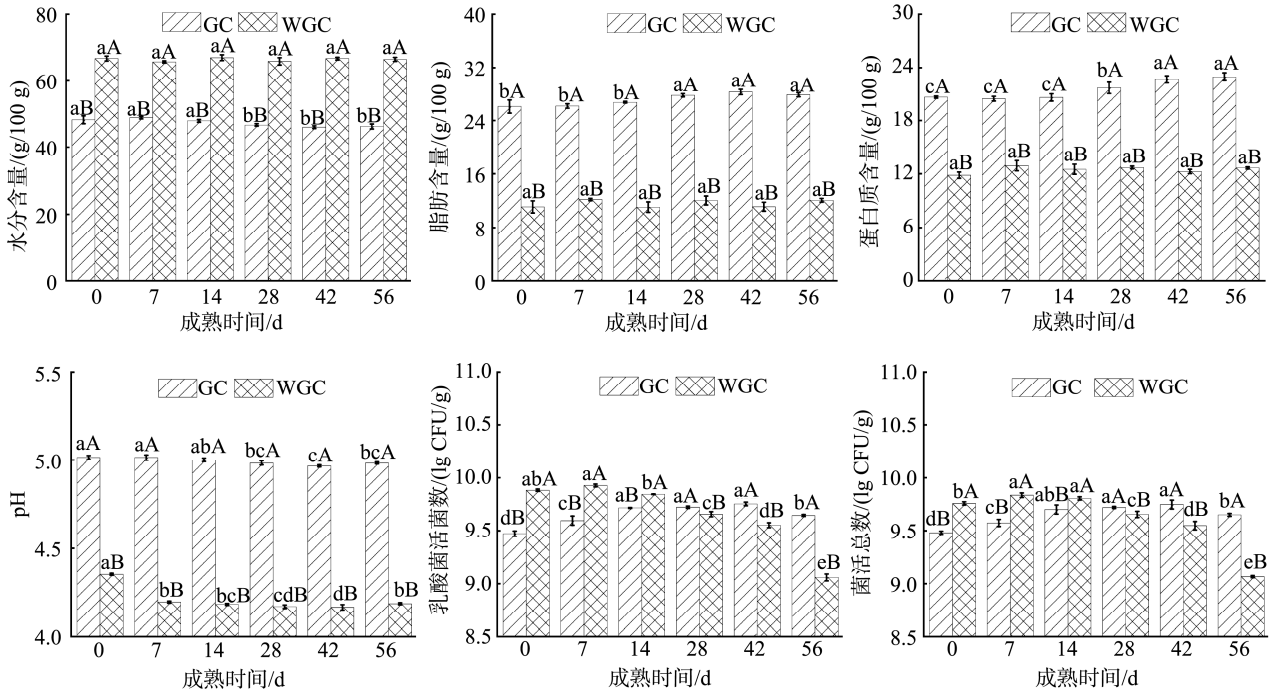
所有试验均重复 3 次, 结果以平均值±标准偏差计。使用 IBM SPSS Statistics 27 进行单因素方差分析, 用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 成熟期间干酪理化品质变化

成熟期间 GC 及 WGC 的理化品质变化如图 1 所示, WGC 的水分含量显著高于 GC (P<0.05), 脂肪、蛋白质则显著低于 GC (P<0.05), 并且在整个成熟期间一直保持这一趋势, WGC 中脂肪和蛋白质含量的降低可能与水分含量升高起到的稀释作用有关, 小麦胚芽本身富含蛋白质和脂类, 同时含有较高比例的膳食纤维及非淀粉多糖, 且具有较强的吸水能力, 水吸收率可达约 200%[14], 植物膳食纤维的引入通常会提高体系的持水性和成品含水量, 从而增加干酪得率; 但在以“干酪质量(湿基)”为基准计算时, 总固形物和蛋白质的相对百分含量反而呈下降趋势[15]。结果表明在 GC 中添加小麦胚芽粉提高了干酪的水分含量, DALIA 等[16]的研究发现将胡萝卜粉添加至水牛乳中制备益生菌干酪, 结果表明胡萝卜粉增加了持水能力, 提高了干酪中的水分含量。RIBEIRO 等[17]也发现在小瑞士奶酪中添加燕麦麸皮减少了干酪的脱水收缩, 显著提升干酪中水分含量, 在添加量为 6% (m:m)时获得了最佳的感官品质。但也有研究表明在干酪中添加葡萄渣粉末时, 干酪的水分含量显著降低[18], 这可能与不同干酪独特的制备工艺有关, 该研究在凝块形成后添加葡萄渣粉末, 而非在凝乳酶添加前将葡萄渣粉末添加至乳中一同凝乳。在 56 d 成熟期内, GC 的水分由 48.25 g/100 g 显著降低至 46.24 g/100 g (P<0.05), 脂肪、蛋白质含量由 26.12 g/100 g、20.64 g/100 g 显著提高至 27.88 g/100 g、22.96 g/100 g (P<0.05), 而 WGC 的水分含量在成熟期内并未发现显著变化(P>0.05)。WGC 在成熟期间水分流失这一现象并不显著(P>0.05), 这表明小麦胚芽的添加有利于防止水分流失以提高成熟期间干酪理化品质的稳定性。

成熟期间, 添加小麦胚芽显著降低了 GC 的 pH (P<0.05)。28 d 时 WGC 中 pH 由最初的 4.35 显著降低至 4.18 (P<0.05), 成熟期间 28 d 时 GC 的 pH 由 5.01 降低至 4.98。这表明, 小麦胚芽的添加可能通过提供额外氮源和碳源促使乳酸菌生长和发酵产酸, 侯银臣等[19]的研究也发现将酸奶与麦胚结合制备脱脂麦胚酸奶, 麦胚的添加可以促进发酵酸化的现象, 结果显示脱脂麦胚酸奶产品的酸度显著高于原味酸奶。在成熟初期乳酸菌快速繁殖, 成熟第 0 d 时 WGC 中乳酸菌活菌数为 9.88 lg CFU/g 而 GC 中仅为 9.47 lg CFU/g, WGC 中乳酸菌活菌数显著高于 GC (P<0.05), 此时糖类物质被分解, 乳酸大量生成, 而随着



注: 不同小写字母表示相同样品不同成熟时间下具有显著差异(P<0.05); 不同大写字母表示相同成熟时间下不同样品间具有显著差异(P<0.05), 图 4 同。

图 1 成熟期间干酪的理化品质

Fig.1 Physicochemical properties of cheeses during ripening

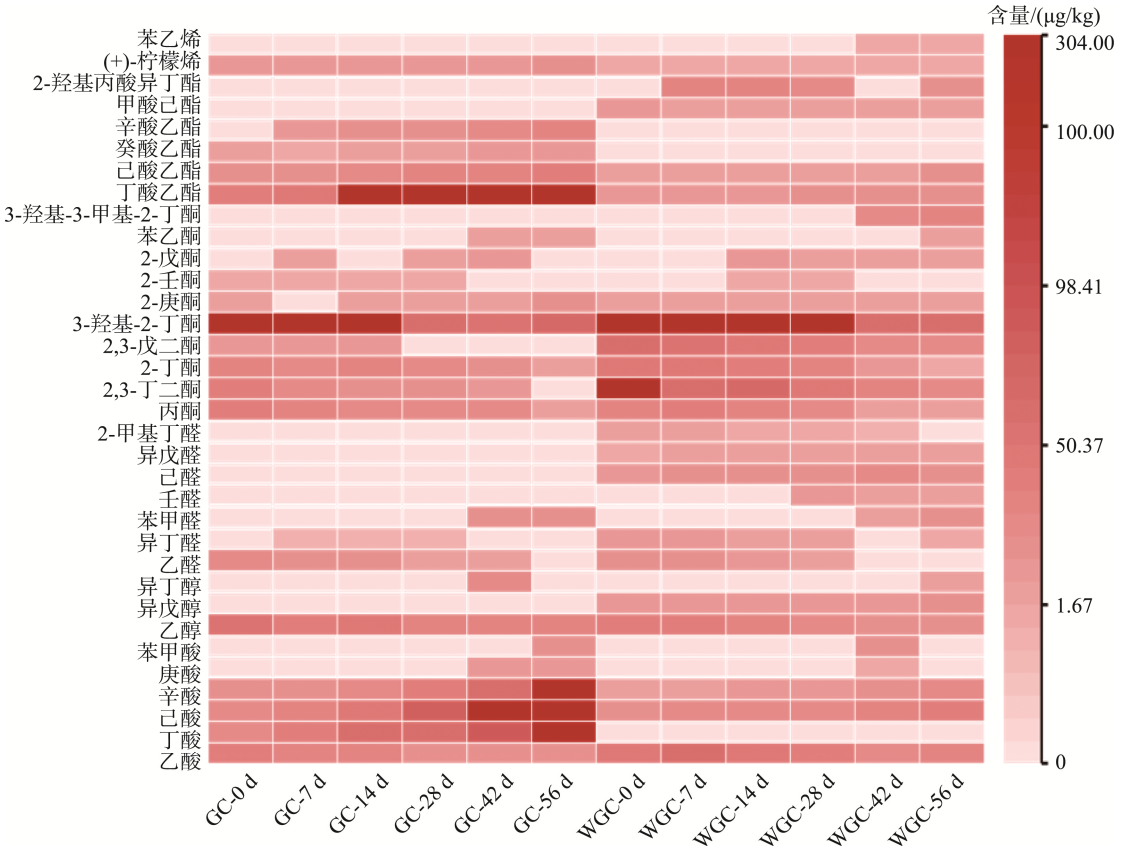
成熟时间的延长，14 d 时 WGC 中出现乳酸菌活菌数显著下降的现象(P<0.05)，而 GC 中 42 d 后乳酸菌活菌数开始显著降低(P<0.05)，在成熟 56 d 时 WGC 中乳酸菌活菌数为 9.06 lg CFU/g 显著低于 GC 中的 9.64 lg CFU/g (P<0.05)。在李培培等[20]的研究中也发现发酵乳中酸度下降快的发酵乳在贮藏末期活菌数更低的现象，这可能与酸度会影响菌体细胞膜结构完整性，使得细胞通透性增加、生长速率降低、加速细胞死亡等因素有关[21]。此外，成熟期间 GC 和 WGC 中，乳酸菌活菌数均与菌落总数相当，表明两种干酪中乳酸菌均占据主导地位。

2.2　成熟期间干酪挥发性风味物质变化

对成熟期间干酪中各类挥发性风味物质含量及占比进行分析，结果如图 2 和图 3 所示。成熟期间，GC 中共鉴定出 25 种挥发性风味化合物，其中酸类、酮类和酯类占比最为丰富，WGC 中共鉴定出 31 种挥发性风味化合物，其中酮类和酸类占比最为丰富。

酸类化合物主要由糖酵解以及脂肪分解产生，赋予干酪典型的特征风味。GC 和 WGC 中酸类物质占比均随成熟时间的延长不断增长，GC 中酸类化合物占比由第 0 d 的 15.95%增长至第 56 d 的 69.96%，其中丁酸(醋酸、腐臭干酪味)、己酸(酸味、脂肪味)和辛酸(脂肪味、蜡质味)含量增长尤为突出，它们分别从第 0 d 的 11.32、12.06 和 7.70 μg/kg 增长为第 56 d 的 303.21 μg/kg(阈值为 240.00 μg/kg)、292.54 μg/kg(阈值为 225.00 μg/kg)和 110.08 μg/kg(阈值为 8.50 μg/kg)，其含量均超过阈值，会对干酪风味产生不利影响。这 3 种酸类正是 DELGADO 等[22]发现山羊干酪成熟过程中的典型风味标志物，其在 0~60 d 成熟期间其含量随时间的延长而增加。而在成熟期内 WGC 中酸类化合物占比由第 0 d 的 10.14%增长至第 56 d 的 28.49%，成熟期间未检测出丁酸，且己酸和辛酸含量分别为 33.91 μg/kg 和 25.60 μg/kg，远低于 GC，可见添加小麦胚芽改善了 GC 成熟过程中由中短链脂肪酸含量升高而产生的不良风味。有研究表明丁酸、己酸及辛酸由脂肪在脂肪酶的作用下水解产生[23]，当含量过高时会产生难闻气味，而添加小麦胚芽后此酸类化合物含量降低，这可能与 WGC 中脂肪含量较低有关。SÁNCHEZ 等[24]也发现不同脂肪含量的山羊干酪中脂肪分解情况不同，其研究表明在成熟 1~28 d 过程中脂肪水解产物随成熟时间的延长而增加，且全脂干酪中的脂肪水解产物高于减脂与低脂干酪。

酮类化合物可由多不饱和脂肪酸氧化、氨基酸降解等



注：GC-0 d、GC-7 d、GC-14 d、GC-28 d、GC-42 d、GC-56 d 分别表示 GC 在成熟 0、7、14、28、42、56 d 的样品；WGC-0 d、WGC-7 d、WGC-14 d、WGC-28 d、WGC-42 d、WGC-56 d 分别表示 WGC 在成熟 0、7、14、28、42、56 d 的样品。

图 2　成熟期间干酪中挥发性风味物质含量热图

Fig.2　Heat map of volatile flavouring substances in cheeses during ripening

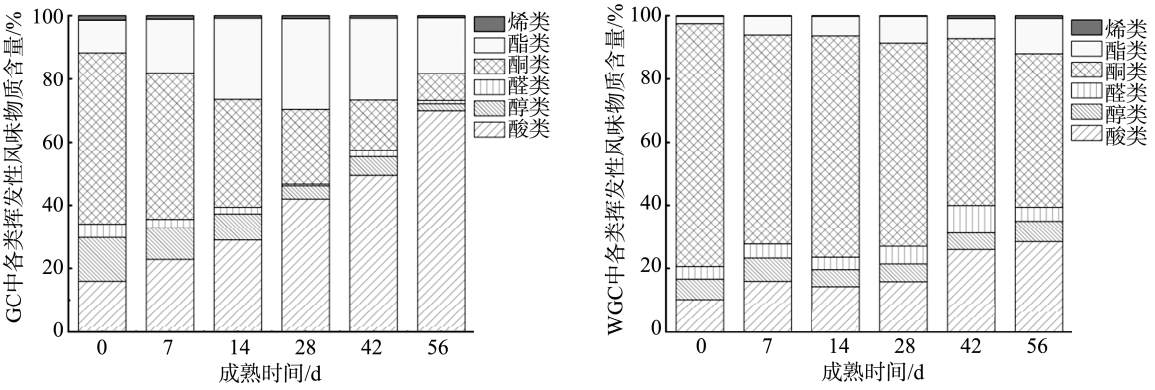


图 3 成熟期间干酪各类挥发性风味物质含量占比

Fig.3 Proportional content of volatile flavor compounds in cheeses during ripening

方式产生, 其感官阈值低, 对干酪风味具有重要影响。成熟过程中, 酮类化合物是GC和WGC中占比最高的挥发性风味物质。在成熟过程中, 酮类化合物含量逐渐降低。GC和 WGC 的含量分别由第 0 d 的 54.20%、76.86%降低至第 56 d 的 8.55%、48.59%。在成熟过程中, WGC 中酮类化合物的占比始终高于 GC, 且占比始终大于 48%。GC 中含量较高的酮类化合物包括 3-羟基-2-丁酮(奶油、黄油味), WGC 中含量较高的酮类化合物包括2,3-丁二酮(发酵香味、乳香)和 3-羟基-2-丁酮。成熟期间 WGC 中 2,3-丁二酮和 3-羟基-2-丁酮的含量明显高于 GC。侯滕[25]利用嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌、植物乳杆菌、嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌发酵麦胚液, 其中 2,3-丁二酮和 3-羟基-2-丁酮是重要的特征风味物质。因此推测这种风味的增加可能源于乳酸菌发酵小麦胚芽, 从而赋予 WGC 更突出的乳香、奶油味的相关风味。

酯类化合物由脂肪酸降解以及醇类酯化产生, 常赋予干酪果香风味。在成熟期间 GC 和 WGC 中的酯类化合物主要包括丁酸乙酯(香蕉香)、己酸乙酯(菠萝香), 且占比随成熟时间的延长不断增加, 分别由第 0 d 的 10.27%、2.27%增加至第 56 d 的 17.60%、11.13%。DELGADO 等[22]关于 GC 成熟期风味变化的研究中也发现成熟期间酯类物质含量的上升。GC 中酯类化合物含量高于 WGC, 这可能与 GC 中更多的脂肪和蛋白质含量有关, 这些化合物在降解的过程中可以产生更多酸和醇, 利于酯类化合物合成[24]。

除酸类、酮类和酯类这 3 种占比较大的化合物外, 醛类也对丰富干酪风味有所贡献, 醛类化合物多来源于多不饱和脂肪酸氧化, 成熟期间 GC 中检测到 3 种醛类化合物, 而 WGC 中检测到 7 种醛类化合物, 己醛(新鲜味、青草味)、异戊醛(麦芽味)、壬醛(玫瑰、柑橘香)、2-甲基丁醛(咖啡、可可味)仅出现在 WGC 中, 己醛、异戊醛和 2-甲基丁醛在原料小麦胚芽中存在[8], 而壬醛存在于发酵小麦胚芽产生风味中[25], 这些成分赋予 WGC 不同于 GC 的关于植物的特殊风味。醇类化合物多阈值较高, 因此对干酪风味影响不大。此外, 还存在少量烯类化合物, 柠檬烯和苯乙烯可赋予干酪柑橘及花香。

在成熟过程中 GC 和 WGC 风味物质组成及其变化情况存在差异, 这些改变可能主要源于添加小麦胚芽后干酪理化组成的改变、乳酸菌发酵小麦胚芽及小麦胚芽自身所带来的风味。总而言之, 添加小麦胚芽后, 干酪中 2,3-丁二酮和 3-羟基-2-丁酮含量增多, 乳香与果香风味突出, 并存在己醛、异戊醛、壬醛和 2-甲基丁醛等 GC 中并未出现的风味成分, 而由脂肪在脂肪酶的作用下水解产生的不良风味减弱。

2.3 成熟期间干酪蛋白水解度变化

在成熟期间干酪中蛋白质不断被水解产生多肽与氨基酸, 蛋白水解程度是干酪成熟程度的一种标志, 成熟过程将赋予干酪特殊的风味特性和功能特性[26]。在 56 d 成熟期内干酪蛋白质水解情况如图 4 所示。GC 和 WGC 的 pH 4.6-SN、12% TCA-SN 和 5% PTA-SN 含量均随成熟时间的延长呈现显著增长的趋势(P<0.05), ALIAKBAR 等[27]和贾丽丽等[28]的研究结果也表明成熟时间与干酪中可溶性氮含量呈现密切的正相关性。此外, WGC 的 pH 4.6-SN、12% TCA-SN 和 5% PTA-SN 含量均高于 GC, 表明小麦胚芽的添加促进了成熟期内蛋白质的水解程度。

pH 4.6-SN 含量常用来表示干酪成熟期蛋白水解的广度, 主要包括在凝乳酶作用下, 酪蛋白水解生成的大分子及中等分子量的肽[29]。在成熟期间, GC 和 WGC 的 pH 4.6-SN 含量分别由第 0 d 的 9.59%和 12.06%显著增长至第 56 d 的 19.23%和 21.11% (P<0.05), 56 d 时 WGC 是 GC 的 1.10 倍。WGC 在成熟期间的 pH 4.6-SN 含量相较于 GC 更高, 这可能与干酪中凝乳酶的保留量有关, 有研究表明在添加凝乳酶形成凝块的过程中, 凝乳酶大部分随乳清排出, 仅剩 8%~15%的凝乳酶残留在干酪中参与成熟期蛋白质水解[30], 而小麦胚芽的添加抑制了凝块中乳清的排出, 可能将更多的凝乳酶保留在干酪中使得蛋白质水解程度加剧。

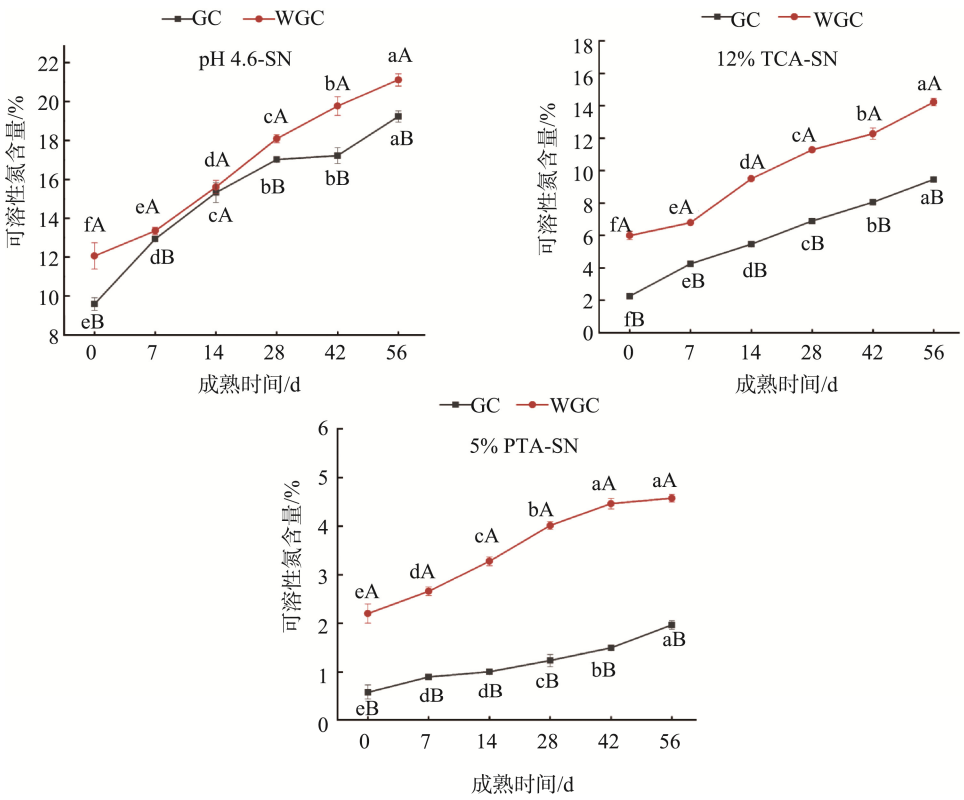


图 4　干酪在成熟期间(0、7、14、28、42、56 d)中 pH 4.6-SN、12% TCA-SN 和 5% PTA-SN 含量变化

Fig.4　Changes in the content of pH 4.6-SN, 12% TCA-SN and 5% PTA-SN in cheeses during ripening (0, 7, 14, 28, 42 and 56 d)

12% TCA-SN 含量用于衡量干酪成熟期蛋白水解的深度，即在发酵剂和凝乳酶共同作用下进一步产生的小分子肽(2~20 个氨基酸残基)和游离氨基酸的含量，此时凝乳酶作用有限，而微生物的胞内酶在其中起主要作用[31]。成熟期间 GC 和 WGC 的 12% TCA-SN 含量分别由第 0 d 的 2.26%和 6.00%显著增长至第 56 d 的 9.46%和 14.23% (P<0.05)，56 d 时 WGC 是 GC 的 1.50 倍。5% PTA-SN 含量代表干酪蛋白质的二次水解程度，包含干酪成熟过程中生成的小分子量肽(小于 600 Dalton)和积累的氨基酸含量，微生物菌体内所含肽酶在其中起主要作用[32]。成熟期间 GC 和 WGC 的 5% PTA-SN 含量分别由第 0 d 的 0.58%和 2.20%显著增长至第 56 d 的 1.96%和 4.57% (P<0.05)，56 d 时 WGC 是 GC 的 2.33 倍。相较于 GC，WGC 的 12% TCA-SN 和 5% PTA-SN 含量提高。这可能与添加小麦胚芽后，干酪基质中乳酸菌数量增多，以及成熟期 7 d 后 WGC 中大量乳酸菌菌体死亡所释放的细胞内肽酶会加速肽降解有关[33]，可见 WGC 的蛋白次级水解水平得到显著提高，并促进小分子物质的产生。景艳等[34]的研究中也发现类似现象，在切达干酪成熟过程中，随成熟时间的延长所添加的附属发酵剂菌种数目增多并有大部分菌株死亡释放大量的酶，进一步降解蛋白从而使得蛋白水解程度提高。

2.4　成熟期间干酪微观结构变化

选取成熟 0、28、56 d 的 GC 和 WGC 观察其微观结构，扫描电镜图如图 5 所示。在各个成熟期，GC 和 WGC 的微观结构存在明显不同，从 0、28、56 d 时 GC 的扫描电镜图中可以观察到由蛋白质粗链交联形成的网络状结构、链间存在较大间隙，这与前人的报道所一致[34]。与 GC 相比，0、28、56 d 时 WGC 呈现为较为致密的团块状结构，表

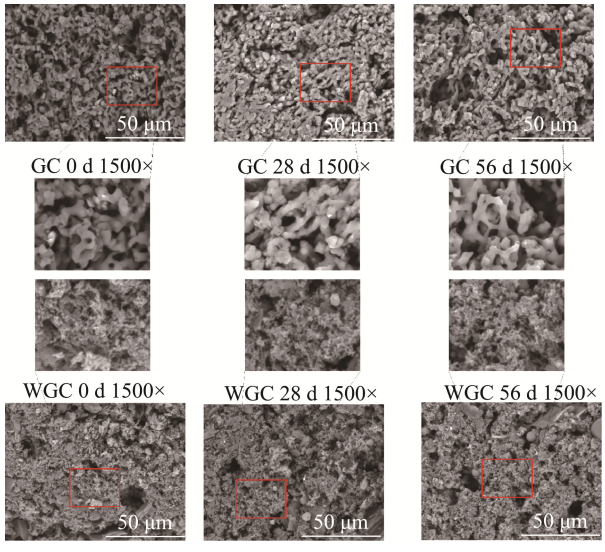


图 5　干酪在成熟期间(0、28、56 d)的扫描电镜图像

Fig.5　Scanning electron micrographs of cheeses during ripening (0, 28 and 56 d)

面有大量细小而密集的孔隙，以及少量较大孔隙或片状结构。此结构变化可能源于将小麦胚芽粉加入发酵体系后，膳食纤维颗粒填充分散于酪蛋白-脂肪基质之中，改变了干酪的结构组成与孔隙结构。ALQAHTANI 等[35]的研究表明，加入膳食纤维或多糖时，干酪的微观结构发生变化，其网络结构更加松散、孔隙分布与基质密度发生改变，本研究与前人研究具有一致性。在干酪制备过程中，凝乳酶水解 κ-酪蛋白 Phe105-Met106 之间的肽键降低了酪蛋白胶束的稳定性，酪蛋白交联成网状结构，脂肪与水分填充其中从而形成凝乳[36]，而添加小麦胚芽改变了蛋白质网络结构的状态，小麦胚芽成分镶嵌在蛋白质聚集体中形成密集多孔的结构，这种海绵状的结构使得保水性大大提高[37]。在干酪中添加大豆蛋白[38]、南瓜渣粉[39]和藜麦胚芽粉[40]的一些研究中也表明，这种外源成分的添加会使得酪蛋白胶束结构出现明显改变，进而提高干酪截留乳清的能力最终提高干酪水分含量。

与成熟初期相比，成熟末期的 GC 蛋白质网络更加松散、孔径增大，明显可见酪蛋白胶束变细，这与 SOODAM 等[41]的研究结果一致，在其关于干酪成熟过程的研究中均发现蛋白质胶束变得更加纤细，这主要与凝乳酶及微生物的作用有关，在干酪成熟期间蛋白质被不断水解成肽与氨基酸，从而导致干酪微观结构发生变化。与成熟过程中 GC 的蛋白质网络结构变化相比，成熟末期 WGC 中孔洞增大、蛋白胶束变细的现象较为微弱，这也解释了在成熟过程中 WGC 的水分变化并不显著这一现象的原因，因为 WGC 在成熟过程中蛋白质一直保持这种多孔的结构，可以对水分起到更强的束缚作用[42]，从而防止了水分流失。

2.5 电子舌分析

选取两种市售 GC，与 WGC 和 GC 一起进行电子舌分析(图 6)。雷达图结果显示，与 GC 相比，WGC 的酸味、苦味、苦味回味、鲜味及丰富度评分更高，而咸味较低，其余滋味指标差异不明显，表明小麦胚芽的添加在不显著改变整体基本滋味轮廓的前提下，提高了 GC 的味觉层次和丰富度。两种市售 GC 产品之间亦存在较大差异：市售 GC 产品 1“琪雷萨”的酸味突出，而市售 GC 产品 2“贝拉斯”的鲜味最为突出但酸味最低。综合 4 种干酪样品的电子舌结果来看，WGC 的酸味处于相对适中的水平，其苦味、涩味、苦味回味及咸味均低于两款市售 GC，整体滋味更为柔和、协调。

电子舌的结果表明，小麦胚芽粉的引入在保留基本滋味轮廓的前提下，提高了干酪的味觉协调性。这一观察与已有文献中膳食纤维或多糖添加对乳制品感官与结构的影响具有相似性，已有研究指出，将膳食纤维或多糖加入奶酪或干酪中时，不仅能改变其理化性质和显微结构，还可能改善其感官特性[43]。

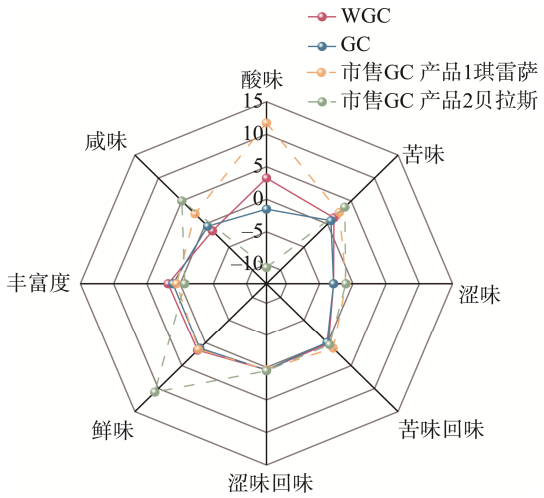


图 6 4 种干酪样品电子舌分析雷达图

Fig.6 Radargram of electronic tongue analysis of 4 kinds of cheese samples

3 结 论

本研究比较了 GC 和 WGC 在成熟期间理化品质、风味特性、蛋白水解及微观结构的变化，旨在说明小麦胚芽的添加对 GC 成熟期品质的影响。结果表明，相较于 GC，添加小麦胚芽制备的 WGC 水分含量显著提高(P<0.05)，脂肪、蛋白质含量和 pH 显著降低(P<0.05)，并且成熟期间 WGC 的水分含量未发现显著变化(P>0.05)。微观结构结果表明 WGC 形成团块状聚集状态、表面孔洞小而密集，从而提高了 WGC 的持水能力。气相色谱-质谱法分析发现 WGC 中 2,3-丁二酮和 3-羟基-2-丁酮含量最高，赋予其浓郁乳香味，且成熟 56 d 后 WGC 中丁酸、己酸及辛酸含量(含量分别为未检出、33.91 μg/kg 和 25.60 μg/kg)远低于 GC 中的含量(分别 303.21、292.54 和 110.08 μg/kg)，并含有己醛、异戊醛、壬醛和 2-甲基丁醛等与小麦胚芽相联系的，WGC 中独有的风味成分。成熟期内 WGC 的蛋白水解程度显著高于 GC (P<0.05)，成熟 56 d 时 pH 4.6-SN、12% TCA-SN 和 5% PTA-SN 含量分别为 GC 的 1.10、1.50 和 2.33 倍。综上，相较于 GC，WGC 成熟期未出现明显的水分流失，理化品质稳定，风味更加丰富且减弱了成熟期间不良风味的产生，蛋白水解程度提高，可见小麦胚芽可以作为一种具有独特风味的添加成分用于创新 GC 产品品类。向 GC 中添加小麦胚芽粉可在保留 GC 基本风味轮廓的前提下，使其风味更佳柔和和协调。

参考文献

[1] LIU B, LIANG YH, HE YZ, *et al*. Differences in fat digestion from milk of different species: *In vitro* gastrointestinal digestion model for infants [J]. Food Research International, 2023, 174(P1): 113571.

[2] ZHENG XC, SHI XW, WANG B. A review on the general cheese

processing technology, flavor biochemical pathways and the influence of yeasts in cheese [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 703284.

[3] TALAVERA M, CHAMBERS DH. Flavor lexicon and characteristics of artisan goat cheese from the United States [J]. Journal of Sensory Studies, 2016, 31(6): 492–506.

[4] WATKINS JP, JABOREK RJ, FEI T, *et al*. Branched chain fatty acids in the flavour of sheep and goat milk and meat: A review [J]. Small Ruminant Research, 2021, 200: 106398.

[5] KACZYŃSKI KA, DOROTA CS, PAULINA B, *et al*. The influence of the texture and color of goat's salad cheese on the emotional reactions of consumers compared to cow's milk cheese and feta cheese [J]. European Food Research and Technology, 2023, 249(5): 1257–1272.

[6] 王文洁, 孙宇欣, 童志芳, 等. 小麦胚芽的灭酶稳定化及其在烘焙制品中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 379–388.
WANG WJ, SUN YX, TONG ZF, *et al*. Enzyme inactivation and stabilization of wheat germ and its application in bakery products [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 379–388.

[7] 严永红, 郑召君, 李波, 等. 小麦胚芽贮藏期内脂质水解酸败机理解析[J]. 中国油脂, 2021, 46(2): 41–47.
YAN YH, ZHENG ZJ, LI B, *et al*. Analysis of the mechanism of lipid hydrolytic rancidity during wheat germ storage period [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(2): 41–47.

[8] 邵子晗, 龚勋, 宋玉, 等. 不同处理方式对小麦胚芽贮藏稳定性及风味特征的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 231–239.
SHAO ZH, GONG X, SONG Y, *et al*. Effects of different processing methods on storage stability and flavor characteristics of wheat germ [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 231–239.

[9] 吕欣, 马婧怡. 一种小麦胚芽羊乳干酪及其制备方法: 中国, CN2025100713628 [P]. 2025-04-28.
LV X, MA JY. A wheat germ goat milk cheese and its preparation method: China, CN2025100713628 [P]. 2025-04-28.

[10] ZHENG AR, WEI CK, WANG MS, *et al*. Characterization of the key flavor compounds in cream cheese by GC-MS, GC-IMS, sensory analysis and multivariable statistics [J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100772.

[11] 万俊, 张孝芹, 王梓源, 等. Camembert 干酪成熟特性及其贮藏品质变化规律[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 134–142.
WAN J, ZHANG XQ, WANG ZY, *et al*. Maturation characteristics and storage quality changes of Camembert cheese [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 134–142.

[12] NASSER M, AKRAM A, ATAYE SE, *et al*. Effect of inulin/kefiran mixture on the rheological and structural properties of mozzarella cheese [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 191: 1079–1086.

[13] 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.

[14] WONGKAEW M, TINPOVONG B, INPRAMOON A, *et al*. Functional low-fat goat feta cheese formulated with dietary fiber as a fat replacer: Physicochemical, textural, and sensory interactions [J]. Dairy, 2025, 6(4): 31.

[15] MOHAMED E, ABO-SREA M, AMMAR ET. Effect of certain dietary fibers on Kariesh cheese characteristics [J]. Journal of Food and Dairy Sciences, 2018, 9(1): 1–5.

[16] DALIA GK, AHMED RA, MOHAMED AH, *et al*. Nutritional, antioxidant, and antimicrobial assessment of carrot powder and its application as a functional ingredient in probiotic soft cheese [J]. Journal of Dairy Science, 2023, 106(3): 1672–1686.

[17] RIBEIRO A, GUIMARAES JS, LAGO A, *et al*. Oat bran and sweeteners in petit-suisse cheese: Technological and nutritional properties and consumer acceptance [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111318.

[18] GAGLIO R, RESTIVO I, BARBERA M, *et al*. Effect on the antioxidant, lipoperoxyl radical scavenger capacity, nutritional, sensory and microbiological traits of an ovine stretched cheese produced with grape pomace powder addition [J]. Antioxidants, 2021, 10(2): 306.

[19] 侯银臣, 吕行, 黄继红, 等. 脱脂麦胚酸奶制备工艺技术研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(5): 207–210.
HOU YC, LV X, HUANG JH, *et al*. Research on the preparation technology of defatted wheat germ yogurt [J]. China Brewing , 2020, 39(5): 207–210.

[20] 李培培, 郭帅, 张启航, 等. 乳酸乳球菌乳亚种 BL19 对动物双歧杆菌乳亚种发酵乳的品质改善研究[J]. 中国食品学报, 2025, 25(2): 201–212.
LI PP, GUO S, ZHANG QH, *et al*. Quality improvement of fermented milk by *Lactococcus lactis* subsp. lactis BL19 on *Bifidobacterium* animalis subsp. Lactis [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(2): 201–212.

[21] ADAMBERG K, KASK S, LAHT TM, *et al*. The effect of temperature and pH on the growth of lactic acid bacteria: A pH-auxostat study [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 85(12): 171–183.

[22] DELGADO FJ, GONZÁLEZ CJ, CAVA R, *et al*. Formation of the aroma of a raw goat milk cheese during maturation analysed by SPME-GC-MS [J]. Food Chemistry, 2011, 129(3): 1156–1163.

[23] XU ZL, CHEN JL, SHI XW, *et al*. Characteristic physicochemical indexes and flavor compounds in Xinjiang Kazak cheese during ripening [J]. Food Bioscience, 2020, 35: 100586.

[24] SÁNCHEZ MD, MORALESDELA NA, MORENO II, *et al*. Lipolysis and proteolysis profiles of fresh artisanal goat cheese made with raw milk with 3 different fat contents [J]. Journal of Dairy Science, 2011, 94(12): 5786–5793.

[25] 侯滕. 麦胚乳酸菌发酵饮料的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
HOU T. Research on lactic acid bacteria fermented beverage from wheat germ [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.

[26] TEKIN A, GÜLER Z. Glycolysis, lipolysis and proteolysis in raw sheep milk Tulum cheese during production and ripening: Effect of ripening materials [J]. Food Chemistry, 2019, 286: 160–169.

[27] ALIAKBAR G, DAVIJANI AK, KARAMI M. Investigating the effect of ozone treatment on microbiological, proteolytic and lipolytic characteristics of brined ultrafiltered cheese during ripening [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(10): 8386–8396.

[28] 贾丽丽, 王家栩, 李嘉欣, 等. 牛羊乳比例对 Malatya 干酪成熟品质及抗氧化特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 64–73.
JIA LL, WANG JX, LI JX, *et al*. Effect of cow and sheep milk ratio on the ripening quality and antioxidant properties of Malatya cheese [J]. Food Science, 2023, 44(22): 64–73.

[29] CAI HF, LUO HB, SCHOLTEN E, *et al*. Effect of chymosin/pepsin ratio on milk coagulation and physical properties of model cheese [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110257.

[30] 王倩敏. 常温新鲜奶酪的制备工艺研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2024.
WANG QM. Research on the preparation process of fresh cheese at room temperature [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2024.

[31] AYAG N, DAGDEMIR E, HAYALOGLU AA. Comparison of γ-aminobutyric acid and free amino acid contents of some common varieties of Turkish cheeses [J]. International Dairy Journal, 2022, 128: 105285.

[32] 孟昭旭. 山羊奶干酪中 NSLAB 的筛选及其促干酪成熟作用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
MENG ZX. Screening of NSLAB in goat milk cheese and its role in promoting cheese ripening [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[33] BLAYA J, BARZIDEH Z, LAPOINTE G. Symposium review: Interaction of starter cultures and nonstarter lactic acid bacteria in the cheese environment [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(4): 3611–3629.

[34] 景艳. 干酪乳杆菌中关键产香基因对切达奶酪奶香味影响机制的研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022.
JING Y. Study on the mechanism of key aroma-producing genes in *Lactobacillus casei* affecting the milk aroma of Cheddar cheese [D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Sciences, 2022.

[35] ALQAHTANI NK, ALNEMR TM, ALQATTAN AM, *et al*. Physicochemical and sensory properties and shelf life of block-type processed cheeses fortified with date seeds (*Phoenix dactylifera* L.) as a functional food [J]. Foods, 2023, 12(3): 679.

[36] AMARO HJC, OLIVAS GI, ACOSTA MCH, *et al*. Chemical interactions among caseins during rennet coagulation of milk [J]. Journal of Dairy Science, 2022, 105(2): 981–989.

[37] DOMAGALA J, NAJGEBAUER LD, WIETESKA SI, *et al*. Influence of milk protein cross-linking by transglutaminase on the rennet coagulation time and the gel properties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(10): 3500–3507.

[38] ATIA M, XIA WS, ZHANG GN. Effect of soy protein supplementation on the quality of ripening Cheddar-type cheese [J]. International Journal of Dairy Technology, 2004, 57(4): 209–214.

[39] LIPSA FD, ULEA E, GAFENCU AM, *et al*. Pumpkin pomace powder as a bioactive powder ingredient for whey cheese production [J]. Applied Sciences-Basel, 2024, 14(21): 9624.

[40] SOHREGHE MK, JAVADI A, ZOMORODI S, *et al*. The effect of quinoa germ on the quality properties of fresh whey-less cheese made by ginger (*Zingiber officinale*) extract as a coagulant [J]. International Journal of Dairy Technology, 2023, 76(4): 939–947.

[41] SOODAM K, ONG L, POWELL IB, *et al*. Effect of elevated temperature on the microstructure of full fat Cheddar cheese during ripening [J]. Food Structure-Netherlands, 2017, 14: 8–16.

[42] 王宇航. 低脂 Mozzarella 干酪工艺优化及脂肪替代物对其品质的影响研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2023.
WANG YH. Research on the optimization of low-fat mozzarella cheese processing technology and the impact of fat replacers on its quality [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2023.

[43] RAJU PN, PAL D. Effect of dietary fibers on physico-chemical, sensory and textural properties of Misti Dahi [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(11): 3124–3133.

(责任编辑: 安香玉 冯东慧)