复原乳代替鲜乳在奶啤发酵中的分析比较

关跃东，吴涛，何强，王亮*

（江苏大学食品与生物工程学院，江苏镇江 212000）

摘要：奶啤是经过乳酸菌、酵母菌先后两步发酵制成的新型发酵乳饮品。试验从理化性质、持水力、色度、粒度、质构、流变、扫描电镜、香气成分等方面分析了以复原乳为原料生产奶啤的可行性，与生鲜乳奶啤相比，以复原乳为原料制备的奶啤品质略有降低，但不显著（P>0.05）。复原乳奶啤的持水力降低了 1.17%；明暗度 L^* 值降低了 24.8%；蛋白质粒径增加了 15.3%；且香气与生鲜乳奶啤存在微小差异；流变分析说明随着剪切时间的延长，复原乳奶啤与生鲜乳奶啤表观粘度的变化趋势相同；扫描电镜显示其在微观结构方面也无显著差异；复原乳奶啤的感官评价分数为 7.50，略低于生鲜乳奶啤；质构方面，复原乳奶啤的弹性相对于生鲜乳奶啤增加了 8.92%，硬度、凝聚力等方面均无显著差异（P>0.05），说明这些差异可被消费者接受。通过此项研究证明了复原乳在一定程度上可代替鲜乳发酵奶啤，解决了奶啤制作过程中过度依赖鲜乳，但内地鲜乳不足且质量参差不齐的难题。

关键词：奶啤；理化性质；流变；鲜乳；复原乳

文章编号：1673-9078(2025)12-52-60 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1370

Analytical Comparison of Reconstituted and Fresh Milk Use in Beer Fermentation

GUAN Yuedong, WU Tao, HE Qiang, WANG Liang*

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Milk beer is a new type of fermented milk beverage produced through a two-step fermentation process involving lactic acid bacteria and yeast. The feasibility of producing milk beer from reconstituted milk was analyzed based on its physicochemical properties, water holding capacity (WHC), color, particle size, texture, rheology, scanning electron microscopy, and aroma composition. The quality of milk beer prepared from reconstituted milk showed a slight decrease compared with that of fresh milk beer; however, the difference was not significant (P>0.05). In reconstituted milk beer, the water holding capacity decreased by 1.17%, brightness L^* value decreased by 24.8%, protein particle size increased by 15.3%, and aroma showed slight differences compared with raw milk beer. Rheological analysis showed that as the shear time increased, the apparent viscosity of both reconstituted milk beer and raw milk beer exhibited similar patterns. Scanning electron microscopy revealed no significant differences in the microstructure of reconstituted milk beer. However, the sensory evaluation score was 7.50, slightly lower than that of raw milk beer. In terms of texture, the elasticity of reconstituted milk beer increased by 8.92% compared with that of raw milk beer, whereas there were no significant differences in hardness and cohesion (P>0.05). These findings indicated that consumers may find these differences acceptable. This study demonstrates that reconstituted milk can as a suitable substitute for fresh milk in fermented milk beer, thereby addressing the issue of excessive dependence on fresh milk. However, the fresh milk in the mainland is insufficient, and

引文格式：

关跃东,吴涛,何强,等.复原乳代替鲜乳在奶啤发酵中的分析比较[J].现代食品科技,2025,41(12):52-60.

GUAN Yuedong, WU Tao, HE Qiang, et al. Analytical comparison of reconstituted and fresh milk use in beer fermentation [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 52-60.

收稿日期：2024-09-13；修回日期：2024-11-27；接受日期：2024-12-09

基金项目：四川省科技计划项目 - 科研院所科技成果转化项目（2022JDZH0036）；四川省科研院所科技成果转化基金项目（22YSZH0016）；江苏大学高水平大学 - 师资建设 - 科研启动基金（411360007）；江苏大学高级专业人才科研启动基金（12JDG069）

作者简介：关跃东（1999-），男，硕士，研究方向：食品微生物菌种筛选及代谢机制，E-mail：13525433277@163.com

通讯作者：王亮（1966-），男，博士，研究员，研究方向：基因工程菌发酵、食品微生物菌种筛选及代谢机制，E-mail：wangliang_2004wl@163.com

the quality varies.

Key words: milk beer; physicochemical property; rheology; fresh milk; reconstituted milk

奶啤略带碳酸气，营养丰富，是一种奶香风味独特的发酵型乳饮品[1]。奶啤中含有多种氨基酸、维生素和蛋白质等营养成分，饮用奶啤对人体的健康具有多种营养保健功效[2]，鲜乳首先经过乳酸菌的发酵，70% 的乳糖被分解，缓解了乳糖不耐症，适于不耐受乳糖人群饮用[3]；经过酵母菌二次发酵，产生的脂肪、蛋白酶和水溶性维生素，具有帮助消化、降低胆固醇、调节血糖以及提高人体免疫力等益生功能[4]；酵母菌发酵产生的醇类、酸类、醛类和酯类等物质形成了奶啤独特的醇香风味，丰富的气泡又有助于缓解疲劳，给人以提神刺激的感受[5]。但对于远离牧区的奶啤生产企业来说，运输、储存鲜乳用来生产奶啤较为困难或成本较高，用哺乳动物的复原乳制备奶啤或许是一种经济实用的方法[6]。

复原乳，也称还原奶，是将一定量的水加入到浓缩乳或乳粉中，使水分与固体物质的比例和生鲜乳中的比例相近的一种乳品[7]。近年来，由于生鲜乳的来源不稳定、质量参差不齐、生产成本高，严重制约乳产品企业的生产。而奶粉价格低、便于运输、质量易控制，对于远离牧场的奶啤企业来说，使用复原乳代替生鲜乳来生产发酵奶啤产品，可显著降低企业的生产成本，带来极大的方便，是一种极其重要的经济实用方法。大量研究表明复原乳和鲜奶的营养成分并没有大的差别[8]，并且用乳粉生产复原乳的成本较生鲜乳更低。任雅丽等[9]以 12% 全脂无糖奶粉做的复原乳为原料，获得了风味较好的酸奶，冷藏 15 d 后，仍具有良好的感官品质和保健作用。刘丹等[10]研究了贮存温度和贮存时间对复原乳的影响，结果显示，随着温度的升高，复原乳的各种理化指标都没有显著性变化。Anna 等[11]评估了使用酪乳和脱脂奶粉作为添加剂标准化低脂酸奶生产中牛奶干物质含量的潜力，以乳粉制备复原乳发酵的酸奶与用酪乳制备的酸奶酸化率和 pH 值相似，富含脱脂奶粉的酸奶和富含酪乳粉的酸奶之间的脂肪酸分布没有发现差异[12]。迄今为止，国内尚未出现有关利用复原乳生产奶啤的分析研究。因此以复原乳为原料经过二次发酵工艺制备生产奶啤，研究分析复原乳对奶啤的颜色、香气、味道、营养和质量等影响，对奶啤企业生产奶啤，解决奶源问题，具有重要的创新价值。

本研究的目的是解决奶啤企业生产过程中的奶源问题，为工业化生产复原乳奶啤产品提供科学理论依据。以马克思克鲁维酵母菌株（MK5）为研究对象，以复原乳为原料制备奶啤，分析复原乳对奶啤品质的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 菌株

MK5 筛选自内蒙古，于本实验室保存。

1.1.2 主要试剂

蔗糖、白砂糖由南京甘汁园糖业有限公司提供；复原乳是通过将奶粉与温水（35~40 ℃）以 1:5 的重量比混合制成的；新鲜乳是从一般健康牛中获得（在发酵前进行巴氏杀菌）；新鲜酸乳液是将 300 mL 酸奶（乳酸菌在 37 ℃条件下发酵鲜奶得到）加入 650 mL 水、80 g 白砂糖和 5 g 食品添加剂匀浆，然后在 95 ℃下灭菌 2 min；复原酸乳液是将 300 mL 复原乳酸奶（乳酸菌在 37 ℃条件下发酵复原乳得到），加入 650 mL 水、80 g 白砂糖和 5 g 食品添加剂均质，然后在 95 ℃下灭菌 2 min；无水乙醇、正己烷由国药集团化学试剂有限公司提供；邻二氯苯由上海麦克林生化科技有限公司提供；YPD 培养基来自生工生物工程（上海）股份有限公司。

1.2 仪器与设备

S-3400N 型可变真空钨灯丝扫描电镜，日本日立有限公司；TA-XT2I 型质构仪，英国 SMS 公司；DHR 型流变仪，美国 TA 仪器有限公司；AH-BASIC 型高压均质机，安拓思纳米技术有限公司；GC-5890 HP 型气相色谱仪，美国惠普公司；Litesizer 500 型激光粒度仪，奥地利安东帕公司。

1.3 试验方法

1.3.1 奶啤的制备

为评价乳啤酒发酵性能，将菌株 MK5 接种于新鲜乳酸乳状液和重组乳酸乳状液中，初始浓度为 1×10^6 CFU/mL。牛奶啤酒的生产过程如图 1 所示。在发酵过程中，除原料不同外，其他条件保持不变，整个操作过程在实验室超净工作台中无菌进行，密封罐在 121 ℃的杀菌锅中提前灭菌 15 min。由于鲜乳液发酵酸奶后体积基本保持不变，即 1 L 鲜乳液发酵可得 1 L 酸奶，而在二次发酵过程中，每 30%（*V/V*）的酸奶需要加体积分数 70% 的无菌水进行稀释，且酸乳液均质过

程中每 1 L 会损失 100 mL，则每 1 L 牛奶可得到 3 L 的奶啤。复原乳是通过将奶粉与温水（35~40 ℃）以 1:5 的质量比混合制成，每 167 g 奶粉可得到 1 L 复原乳，且发酵过程与鲜乳保持一致，因此可知，每 167 g 奶粉在发酵得到酸奶后再加入体积分数 70% 的无菌水二次发酵可得到 3 L 的奶啤。

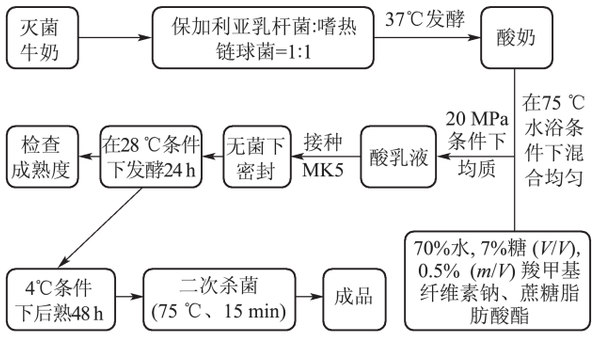

图 1 奶啤的制作流程

Fig.1 Production process of milk beer

1.3.2 奶啤及其原料乳理化性质及持水力的测定

分别以生鲜乳和复原乳为原料，经过二次发酵制备奶啤样品，完成发酵后，于 4 ℃下冷藏 24 h，测定奶啤样品及生鲜乳和复原乳中的 pH 值、酸度、蛋白质含量、总糖含量、脂肪含量、乙醇含量和持水能力，分析不同奶啤样品及其原料乳的理化性质及持水力差异。pH 计测定样品的 pH 值，酸度值表示为可滴定酸度；利用凯式定氮法测定样品中的总蛋白质含量[13]；使用硫酸－丙酮法测定马克思克鲁维酵母菌株 MK5 发酵液中的碳源浓度[14]；样品中的脂肪含量测定采用碱水解法[13]；气相色谱法测定奶啤样品中的乙醇含量[15]；样品的持水能力（WHC）的测定，使用 Yang 等[16]报道的方法，并稍加改进。样品在 4 ℃，716.32 *g* 离心力，15 min 条件下，离心、去上清，称重。奶啤样品的持水能力通过“式（1）”计算：

$$B=(1-\frac{W_1}{W_2})\times 100\% \quad (1)$$

式中：

B——持水能力（WHC），%；

W_1——离心后上清液的质量；

W_2——奶啤样品的质量。

1.3.3 奶啤及其原料乳色度的测定

使用 Hunterlab 分光测色仪测定奶啤样品及其原料乳的色度差异，取一定体积的待测样品于玻璃比色皿中，使用 CIE Lab 颜色空间，于 D65 标准光源，10° 平面观测，测定不同奶啤样品的亮度（L^*）、红绿度（a^* 值，（+）红（−）绿）和黄蓝度（b^* 值，（+）黄（−）蓝）的变化。

1.3.4 奶啤及其原料乳粒度的测定

利用激光粒度仪对奶啤样品及其原料的粒径进行测定。吸取 5 mL 的样品，用去离子水稀释合适倍数，混合均匀后测定，以平均值来衡量粒径的大小。

1.3.5 奶啤感官评价

感官评价方法将生鲜乳和复原乳发酵生产的奶啤样品，进行消费者感官测试，以未接种任何乳源酵母菌株的酸乳液为空白对照。90 名经过培训，年龄在 18~65 岁之间的消费者（45 名女性和 45 名男性）对奶啤样品进行了评估，奶啤样品的风味、色泽、组织状态、气泡、口感和整体评价的得分在 0~10 分之间。

1.3.6 奶啤质构分析

试验选用 TA-XT2I 质构仪进行测定。采用 A/BE 柱状探头，所有测试均在 4 ℃下进行。测前速率、测定速率为 1 mm/s、测定后速率 10 mm/s、测定距离 30 mm，触发力 10 g、时间 5 s。

1.3.7 奶啤流变学研究

使用旋转流变仪 DHR-1 对奶啤样品进行流变学分析。在 4 ℃，0.1~100 rad/s 剪切速率范围内，使用直径为 40 mm，角度为 0° 的平板进行测量。

1.3.8 奶啤的扫描电镜分析

首先，将奶啤样品放在盘子上，均匀地铺成薄薄的一层。将样品置于 −80 ℃下过夜，充分冷冻，然后在真空下冷冻干燥，得到奶啤粉。将完全磨碎的奶啤样品放置在导电台上，通过喷金提高其导电性。电压设置为 15 kV，最后使用 S-3400N 扫描电镜对样品进行观察。

1.3.9 奶啤香气成分分析

采用 GC-MS 试验测定奶啤样品中的挥发性风味物质。取 8 mL 奶啤样品于 20 mL 顶空瓶中，然后加入 2 g 氯化钠和 6 μL 1,2-二氯苯溶液（内标物），立即用带有硅胶垫帽的顶盖密封，置于 40 ℃平衡 10 min。将 SPME 纤维（50/30 μm）插入顶空瓶中萃取 30 min。萃取完成后，将其插入气相色谱进样口解吸 4 min[1]。

使用气相色谱－质谱系统（岛津，TQ8040）和 Rtx-5ms 色谱柱（30 m×0.25 mm, 0.25 μm）测定发性化合物。程序升温：初始温度 40 ℃，保持 3 min，以 4 ℃ /min 的速度升温至 180 ℃，保持 3 min，再以 10 ℃ /min 的速度升温至 280 ℃，保持 20 min。载气为氦气，流量为 1.0 mL/min。质谱条件：EI 离子源，电子能量 70 eV，离子源温度 230 ℃，质量扫描范围 33~500 *m/z*。

表 1 复原乳和生鲜乳制备奶啤的成分含量

Table 1 Composition content of milk beer prepared by reconstituted milk and fresh milk

类型	参数/(g/100 mL)					
	蛋白质	脂肪	碳水化合物	pH 值	酸度/°T	WHC/%
生鲜乳奶啤	1.03 ± 0.24^{b}	1.42 ± 0.021^{b}	9.12 ± 0.13^{d}	4.39 ± 0.02^{d}	54 ± 0.68^{b}	17.90 ± 0.64^{ab}
复原乳奶啤	1.02 ± 0.38^{b}	1.41 ± 0.16^{b}	10.35 ± 0.42^{c}	4.32 ± 0.02^{e}	61 ± 1.23^{a}	16.73 ± 0.38^{bc}
生鲜乳酸乳液	1.06 ± 0.41^{b}	1.46 ± 0.24^{b}	12.30 ± 0.17^{b}	4.53 ± 0.01^{b}	24 ± 0.69^{d}	19.06 ± 1.02^{a}
复原乳酸乳液	1.09 ± 0.31^{b}	1.43 ± 0.17^{b}	14.21 ± 0.24^{a}	4.61 ± 0.02^{a}	29 ± 0.87^{c}	16.03 ± 0.87^{c}
生鲜乳	3.05 ± 0.63^{a}	4.13 ± 0.58^{a}	4.96 ± 0.35^{e}	6.61 ± 0.03^{e}	15 ± 0.13^{e}	9.23 ± 0.28^{d}
复原乳	2.98 ± 0.52^{a}	4.03 ± 0.41^{a}	5.02 ± 0.41^{e}	6.83 ± 0.02^{f}	14 ± 0.25^{f}	9.01 ± 0.51^{d}

注：同列不同上标字母表示组间差异达到统计学显著水平（$P<0.05$）。下表同。

通过质谱（MS）比较，鉴定四种奶啤样品中的挥发性化合物成分。根据公式计算保留指数（RI），通过 NIST 质谱库（NIST17）和 NIST 质谱搜索程序（版本 2.2）比较 MS 数据初步确定潜在化合物。如果匹配度在 80% 以上，则接受整合报告。通过将保留指数（RI）与烷烃标准溶液（C7–C40）的保留指数进行比较，完成鉴定确认。通过计算内标物（1,2-二氯苯）的峰面积与待测组分峰面积之比，确定每种挥发性化合物的相对含量。

1.3.10 数据分析

使用 Excel 2021 对这些数据进行初步处理。结果以均数 ± 标准差表示。采用 IBM SPSS 26.0 进行方差分析或独立样本 *t* 检验。使用 Origin 2022 软件绘制图表。

2 结果与讨论

2.1 理化性质及持水力分析

奶啤的品质和营养成分与原料中的各种成分含量密切相关[17]。由表 1 可知，由于生鲜乳和复原乳及生鲜乳酸乳液和复原乳酸乳液中的蛋白质、脂肪及碳水化合物含量相近，分别以复原乳和生鲜乳为原料制备的奶啤样品在营养成分上没有显著性差异（$P>0.05$），因此，奶啤品质的差异并不是由原料乳中的成分造成的。根据 GB 5009.239-2016《食品安全国家标准食品酸度的测定》以及企业的要求，所有发酵的奶啤样品的酸度在 40~75°T 范围内，pH 值均小于 4.40，酸度和 pH 值均符合奶啤生产要求，以复原乳为原料发酵制备的奶啤的酸度更高但小于 75°T，给予了复原乳奶啤较酸的口感。复原乳奶啤的持水力略微低于生鲜乳奶啤的持水力，差异不显著（$P>0.05$），这种差异可能是由于在对奶粉进行高温处理和复水后，复原乳中的蛋白质颗粒变大，相对表面积变小，蛋白质不利于与小脂肪球的结合[18]，这反过来又造成复原乳奶啤中结合物的不均匀分布，但是从蛋白质的平均粒径图（图 2）可知，这种差异不明显，并且在后续的储存过程中并没有存在蛋白质沉淀导致的保存期限变短的情况[1]。

2.2 蛋白质粒度分析

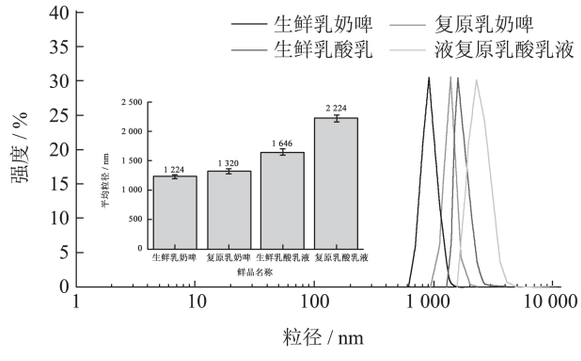

图 2 不同原料制备奶啤样品及酸乳液的平均粒径和粒径分布

Fig.2 Average particle size and particle size distribution of milk beer samples and acid emulsion prepared from different raw materials

原料乳的蛋白质平均粒径和粒径分布与奶啤样品的稳定性、风味和组织状态有关[19]。酸乳液是由酸奶加无菌水稀释后得到，而酸奶中的蛋白质主要是酪蛋白、乳清蛋白和乳球蛋白等，因此酸乳液的蛋白质种类也是如此。酵母菌二次发酵酸乳液后，部分蛋白质被分解成多肽和氨基酸，更易人体消化吸收，得到奶啤后的蛋白种类不变但是整体含量有所下降[20]。测量后生鲜乳和复原乳的蛋白质平均粒径为 1.94 nm 和 2.82 nm，经过乳酸菌发酵后粒径显著增加[21]。酸乳液及奶啤样品的粒度如图 2 所示，在所有测试的样品中，以生鲜乳为原料的奶啤样品的颗粒蛋白质粒径相对较小，平均粒径为 1 224 nm；与生鲜乳奶啤样品相比，复原乳奶啤的颗粒蛋白质粒径分布向更大的方向变化，平均粒径为 1 320 nm，两者差异较小。这可能是由于在高温喷雾干燥过程中，乳粉的蛋白质变性和聚集[22]，使蛋白质由起初的 14.7 g/L 降至 10.9 g/L，导致复原乳

奶啤样品的粒径较大，但复原乳奶啤与生鲜乳奶啤粒径的差异并不会引起消费者在感官上的不同，因为在消费者感官评价表中，复原乳酸乳液与生鲜乳酸乳液之间，以及复原乳奶啤与生鲜乳奶啤之间在组织状态上无显著性差异（$P>0.05$），复原乳酸乳液与生鲜乳酸乳液发酵后的奶啤样品在口感上差异也不显著（$P>0.05$）。

2.3 色差分析

表 2 复原乳和生鲜乳制备奶啤的色差结果

Table 2 The result of color difference in the preparation of milk beer from reconstituted milk and fresh milk

类型	L^*	a^*	b^*
生鲜乳奶啤	28.24 ± 1.4^{c}	1.01 ± 0.74^{a}	6.93 ± 0.5^{c}
复原乳奶啤	21.04 ± 1.97^{d}	0.17 ± 0.24^{b}	16.91 ± 0.97^{a}
生鲜乳酸乳液	29.02 ± 1.39^{c}	0.81 ± 0.24^{ab}	9.6 ± 0.33^{b}
复原乳酸乳液	22.10 ± 0.10^{d}	0.58 ± 0.098^{ab}	17.21 ± 0.33^{a}
生鲜乳	87.19 ± 2.31^{a}	-1.80 ± 0.31^{c}	6.78 ± 0.91^{c}
复原乳	85.01 ± 3.10^{b}	-3.05 ± 0.59^{d}	5.60 ± 0.83^{d}

表 2 显示了所有奶啤样品及其原料乳的明暗度 L^* 值、红绿色 a^* 值、黄蓝色 b^* 值。复原乳的 L^*、a^*、b^* 值都低于生鲜乳，但不显著，原因是复原乳在加工过程中的热处理以及浓缩过程对乳品颜色的影响，使复原乳颜色变暗，但是对后续的发酵无直接影响[23]。奶啤作为一种半透明的液体，会随着发酵程度的加深，半透明状态降低，呈现出颜色变暗的效果[24]。从表 2 中可知，生鲜乳酸乳液、复原乳酸乳液，以及两者发酵制备的奶啤样品，在色差上差异显著（$P<0.05$）。复原乳酸乳液的 L^* 值都低于生鲜乳酸乳液，即复原乳酸乳液的色泽较暗，以复原乳为原料制备奶啤的色泽也相应较暗。复原乳酸乳液与生鲜乳酸乳液之间的 a^* 值即红绿色变化不明显，差异不显著（$P>0.05$），而复原乳酸乳液的 b^* 值显著高于生鲜乳酸乳液，复原乳酸乳液色泽的黄度增加，导致以复原乳为原料发酵生产的奶啤样品的亮度降低，黄色增加，使整体可能呈现轻微的黄色。但这种色差差异可被消费者接受，在感官评价上表（表 3）中色泽方面的感官评价无显著性差异（$P>0.05$）。

2.4 奶啤的感官评价分析

由表 3 可知，复原乳奶啤和生鲜乳奶啤在整体评价上分别达到了 7.50、8.17，复原乳奶啤的风味略低于生鲜乳奶啤，但结果不显著（$P>0.05$），它们都具有香气协调、风味饱满的特点。使用复原乳制备奶啤，使奶啤各项指标的得分均有不同程度的降低，以复原乳为原料制备的奶啤样品的色泽呈现轻微的黄色，这种现象可能是由于乳粉在高温下处理时发生的美拉德反应所致，乳粉中的糖类化合物和蛋白质等氨基化合物经高温发生羰基反应，生产棕色大分子物质，影响了乳粉复原后发酵生产奶啤样品的色泽[13]，但在消费者感官评价中差异不显著（$P>0.05$），说明这种色泽的变化可被消费者接受。同样在组织状态、气泡以及口感等方面，复原乳奶啤在感官评价得分上均发生了较小的改变，但变化不显著（$P>0.05$），产生变化的原因可能是乳粉经过中高温喷雾干燥处理后，其中蛋白质的变性影响了复原乳奶啤的微观结构和口感[17]。复原乳酸乳液与生鲜乳酸乳液相比较，在风味、组织状态、口感及整体评价等方面的得分均相似，说明复原乳是可以作为奶啤的生产原料。综上所述，以复原乳为原料对制备奶啤的品质有一定的影响，但整体并没有显著性差异。

2.5 奶啤质构分析

质地测试，也被称为两次咬合测试，通过模拟人体口腔咀嚼运动将样品压缩两次[21]。质地对于酸奶和相关乳制品的整体可接受性至关重要。由表 4 可知，生鲜乳奶啤和复原乳奶啤在硬度、凝聚力、弹性、粘附性、咀嚼性方面均无显著差异（$P>0.05$），弹性方面略有差异，但不明显。通过口腔咀嚼模拟测试说明，生鲜乳奶啤和复原乳奶啤的质地相似，可被消费者接受，生鲜乳酸乳液和复原乳酸乳液的差异不显著。

表 3 不同原料奶啤的感官评价

Table 3 Sensory evaluation of milk beer prepared from different raw materials

类型	风味	色泽	组织状态	气泡	口感	整体评价
生鲜乳奶啤	7.92 ± 0.40^{a}	8.25 ± 0.64^{a}	7.73 ± 0.40^{a}	7.17 ± 0.44^{a}	8.25 ± 0.87^{a}	8.17 ± 0.34^{a}
复原乳奶啤	7.42 ± 0.66^{ab}	7.50 ± 0.59^{a}	7.55 ± 0.43^{a}	6.67 ± 0.62^{a}	7.58 ± 0.68^{a}	7.50 ± 0.57^{a}
生鲜乳酸乳液	6.50 ± 0.68^{bc}	8.08 ± 0.67^{a}	7.91 ± 0.54^{a}	4.08 ± 0.50^{b}	3.33 ± 0.63^{b}	4.33 ± 0.65^{b}
复原乳酸乳液	5.50 ± 0.57^{bc}	7.08 ± 0.51^{a}	7.80 ± 0.60^{a}	3.75 ± 0.80^{b}	3.0 ± 0.62^{b}	3.92 ± 0.65^{b}

表 4 不同原料制备奶啤样品及酸乳液的质构分析

Table 4 Texture analysis of milk beer samples and acid emulsion prepared from different raw materials

类型	硬度/g	弹性/%	内聚力/%	粘性/%	黏性/N·s	咀嚼性/N
生鲜乳奶啤	5.44 ± 0.04^{a}	64.45 ± 4.37^{a}	86.59 ± 3.94^{a}	82.15 ± 5.97^{a}	417.04 ± 22.84^{a}	387.87 ± 46.45^{a}
复原乳奶啤	5.46 ± 0.02^{a}	73.37 ± 6.12^{b}	90.24 ± 2.37^{a}	87.28 ± 3.85^{a}	493.02 ± 11.21^{a}	430.6 ± 28.65^{a}
生鲜乳酸乳液	5.45 ± 0.04^{a}	44.72 ± 1.38^{c}	59.14 ± 0.42^{b}	65.20 ± 2.13^{b}	322.39 ± 4.74^{b}	210.26 ± 9.59^{b}
复原乳酸乳液	5.50 ± 0.01^{a}	39.93 ± 0.74^{c}	61.91 ± 1.15^{b}	69.30 ± 1.20^{b}	340.75 ± 6.38^{b}	236.1 ± 8.42^{c}

2.6 奶啤流变特性分析

表观粘度是影响奶啤流变特性的重要指标。在相同条件下测定的奶啤表观粘度可以反映样品的内部结构和稳定性[17]。剪切速率－表观粘度关系如图 3 所示。生鲜乳、复原乳奶啤样品及生鲜乳、复原乳酸乳液的表观粘度曲线随着剪切速率的增加而降低，说明奶啤样品及酸乳液样品均表现为假塑性流体[25]。奶啤样品的流动行为表明它们表现出剪切变稀行为，这是由于施加到奶啤样品上的剪切导致凝胶结构破裂所致，奶啤样品具有发酵乳饮品典型的弱凝胶形成[1]，因为它们的物理键很弱，通过静电和疏水相互作用[26]。总的来说，复原乳发酵的奶啤与生鲜乳发酵的奶啤样品都具有弱凝胶性，且增加剪切力后的流变差异不显著。生鲜乳酸乳液和复原乳酸乳液液相比较，通过剪切力的增加，压力和表观粘度的变化趋势相同，说明复原乳可作为生产原料代替生鲜乳发酵奶啤。

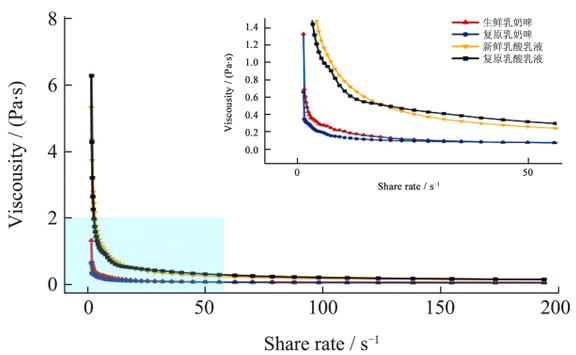

图 3 不同原料制备奶啤样品及酸乳液的流变性能

Fig.3 Rheological properties of milk beer samples and acid emulsions prepared from different raw materials

2.7 奶啤的扫描电镜分析

扫描电镜是一种简单可靠的显微结构分析技术，用于观察样品的表面形貌[16]。奶啤的微观结构通常有 1 000~10 000 倍的放大倍数，尺寸在几十纳米到几十微米之间[17]。不同原料发酵的奶啤，产生酸、代谢蛋白质和脂肪的能力可能不同，从而影响奶啤的微观结构，产生特有的质地和风味。由图 4 可知，鲜乳酸乳液的结构致密，团聚体较大，其蛋白质胶束混合在一起，气孔很小且分布均匀，这是因为蛋白质颗粒聚集形成致密的凝胶结构，密度高，孔隙率最小；而复原乳酸乳液的孔隙相对较大，这是因为奶啤凝胶中结构蛋白网络的密度与其持水力之间存在明显的关系，持水力较低，其蛋白质网络结构就越松散，由表 1 可知复原乳酸乳液的持水力略低于新鲜酸乳液的持水力，因此发酵生产的奶啤孔隙也相对较大，但不明显[1]。说明，复原乳可以作为生产奶啤的原料。

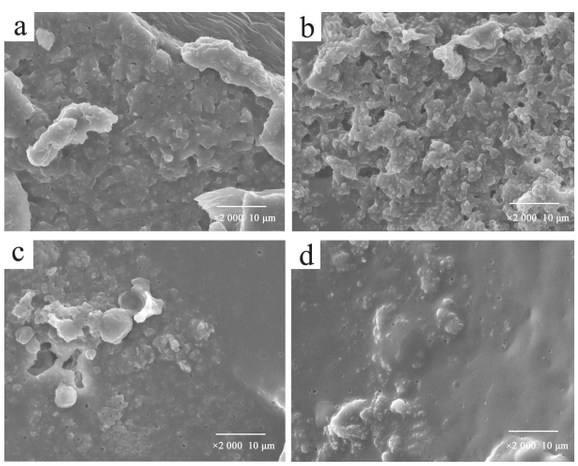

图 4 不同原料制备奶啤样品及酸乳液的电镜分析

Fig.4 Electron microscope scans of milk beer samples and acid emulsions prepared from different raw materials

注：（a）为鲜乳的微观结构，（b）为复原乳酸乳液的微观结构，（c）鲜乳奶啤的微观结构，（d）为复原乳奶啤的微观结构，且放大倍数都为 2 000 倍。

2.8 奶啤的香气成分分析

香气是奶啤产品风味与品质的重要组成部分之一，奶啤中的挥发性成分可以直接反映其品质的差异[1]，所用原料的不同可能导致每个奶啤样品所产生挥发性化合物含量的不同[27]，在所有奶啤样品中共鉴定出 61 种挥发性化合物。分别以复原乳和生鲜乳为原料制备的奶啤样品中挥发性化合物的相对含量存在一定的差异，未接种的复原乳酸乳液和生鲜乳酸乳液也表现出了类似的差异，它们都包括 8 个类型，分别为醇类、酸类、酯类、酮类、酚类和烷烃类等。据图 5 可知，醇类、酸类挥发性化合物含量在复原乳奶啤中的含量

更高，差异显著（$P<0.05$），导致复原乳奶啤具有较高的酸味，重复验证其在国标允许范围内，并且具有醇厚口感。以生鲜乳为原料制备的奶啤样品的酯类、烷烃类的含量显著高于复原乳制备的奶啤样品，使生鲜乳奶啤呈现出更丰富、多层次的口感风味[28]。复原乳奶啤和生鲜乳奶啤表现为两种不同风味的奶啤产品。

醇类在复原乳奶啤和生鲜乳奶啤中的含量都较高，醇类物质是酵母酒精发酵过程中的产物，因此，奶啤样品中挥发性醇类化合物的含量都显著高于酸乳液中的醇类化合物含量[29]。其醇类详细成分比较如表 5 所示，发酵后奶啤的乙醇含量明显增加，且相比于酸乳液增加了苯乙醇、异戊醇、α-松油醇等，使奶啤呈现出酒香或植物清香味，但复原乳奶啤和鲜乳奶啤间醇类物质无显著差异。酸类物质的阈值都较低，在低浓度下具有较为强烈的风味[30]，复原乳奶啤中的酸类物质较多，其中辛酸、2-甲基丁酸都高于生鲜乳奶啤，2-甲基丁酸具有奶酪、酸味，辛酸具涩味、奶油味，可能导致复原乳奶啤的酸味口感更加明显。酯类挥发性化合物是由酸类和酯类化合物发生酯化反应生成的，大多数的酯类物质阈值较低，对风味贡献较大[27]。生鲜乳奶啤和复原乳奶啤都含有 6 种酯，但生鲜乳奶啤中的酯类化合物含量更高，这可能与乳粉在喷雾干燥过程中风味物质被破坏有关，使得乳粉复水后制备得到的复原乳奶啤样品的酯类化合物含量降低[31]。醛类和酮类挥发性化合物都是羰基类化合物，由于其不饱和性，极易被氧化，属于不稳定的中间体化合物，而产品的氧化风味与氧化挥发物有关，这些氧化挥发性化合物主要包括直链醛、甲基酮、烯酮和烯醛等[8]，其中乙醛和 2-庚酮是典型的氧化挥发物，如附录所示，复原乳奶啤中的乙醛含量高于生鲜乳制备的奶啤，同时生鲜乳奶啤未含有 2-庚酮物质。根据 Wang 等[1]的研究，乙醛和 2-庚酮是被认为是影响发酵乳制品风味的挥发性物质，并且它们的阈值较低，这表明复原乳奶啤的风味在生产发酵过程中可能受到这些物质的影响。

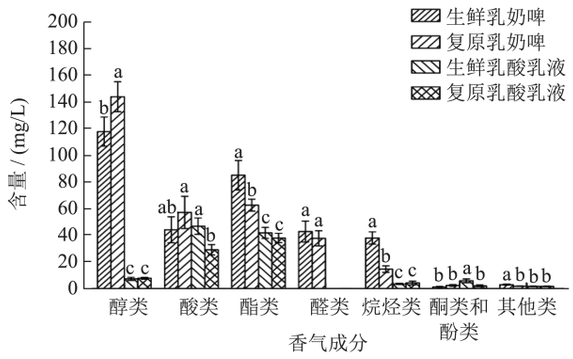

图 5 不同样品中挥发性物质的含量

Fig.5 Content of volatile substances in different samples

注：图中不同字母表示组间差异达到统计学显著水平。

挥发性物质成分的均衡是乳制品风味的关键因素，乳制品的风味不能由单一物质决定[1]，生鲜乳发酵的奶啤样品含有更丰富的香味和更协调的风味，而以复原乳为原料制备的奶啤样品与生鲜乳奶啤样品相比存在部分风味损失，但其酸类和醇类物质种类较多，含量较丰富，可以弥补其它类型风味物质的损失，从感官评价表（表 3）中可以看到，其产品的整体风味可被消费者接受，可对复原乳奶啤进一步研究。

表 5 不同原料制备奶啤样品及酸乳液的醇类成分比较

Fig.5 Comparison of alcohol compositions of milk beer samples and sourdough emulsions prepared from the same raw materials

	成分	保留时间/min	保留指数	CAS	鉴定方法	含量/(mg/L)			
						生鲜乳奶啤	复原乳奶啤	生鲜乳酸乳液	复原乳酸乳液
醇类	异丁醇	6.64		78-83-1	MS	19.31 ± 1.21	—	—	—
	乙醇	6.27		64-17-5	MS	22.41 ± 1.54	15.15 ± 0.54	—	—
	二甲基硅烷二醇	22.22		1066-42-8	MS	3.24 ± 0.23	1.65 ± 0.14	6.80 ± 1.05	7.37 ± 0.69
	三甲基硅醇	5.53		1066-40-6	MS	—	0.10 ± 0.014	0.39 ± 0.084	0.23 ± 0.017
	苯乙醇	27.68	1 111	60-12-8	MS、RI	26.28 ± 2.15	34.0 ± 2.51	—	—
	异戊醇	10.18		123-51-3	MS	83.61 ± 5.05	91.47 ± 7.81	—	—
	2-茨醇	23.55	1 154	464-45-9	MS、RI	1.68 ± 0.14	—	—	—
	α-松油醇	23.46	1 184	98-55-5	MS、RI	6.46 ± 0.65	1.83 ± 0.24		
	3-己醇	10.07		623-37-0	MS			0.23 ± 0.041	0.27 ± 0.021
	总和					118.03 ± 10.97	144.2 ± 11.25	7.42 ± 1.18	7.87 ± 0.73

采用 PCA（Principal Components Analysis）即主成分分析，对生鲜乳奶啤与复原乳奶啤、生鲜乳酸乳液与复原乳酸乳液样品中挥发性风味物质的分布进行了比较区分，对所有样品进行分类，得到 PCA 分类结果及挥发性风味物质成分载荷图如图 6 和 7 所示，显示了不同样品之间的相似性与差异性。构建 PCA 图评估不同样品之间的差异，总贡献率达到 74.4%，说明 PCA 可以对它们进行区分，图 7 中以生鲜乳与复原乳制备的奶啤样品及生鲜乳酸乳液与复原乳酸乳液 PCA 分类的挥发性风味物质成分载荷图说明了样品间分离的原由。图 7 表明，庚酸、辛酸乙酯、月桂酸、2-庚酮、苯乙醇、2-甲基丁酸、苯甲酸、乙偶姻、壬醛、异戊醇、丁酸乙酯、乙醛、癸酸、乙醇等是样品分离的主要原因。图 6 显示，在以 PC1、PC2 为区分轴时，生鲜乳奶啤和复原乳奶啤相距较远，说明使用不同原料制备的奶啤样品的风味存在差异，而生鲜乳酸乳液、复原乳酸乳液距离较近，表明酸乳液在未接种时，它们的挥发性风味物质特征非常相似，说明复原乳酸乳液与生鲜乳酸乳液之间无差异，复原乳可以作为奶啤产品的生产原料。

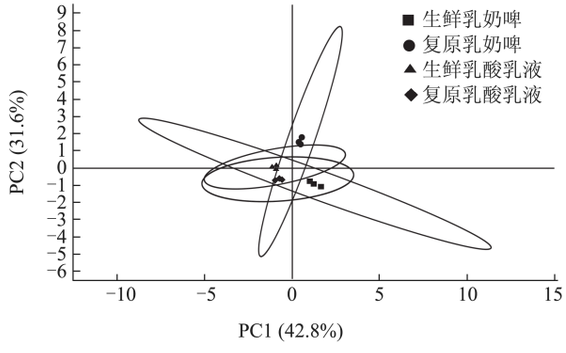

图 6 四种样品的 PCA 分类

Fig.6 PCA classification of the four samples

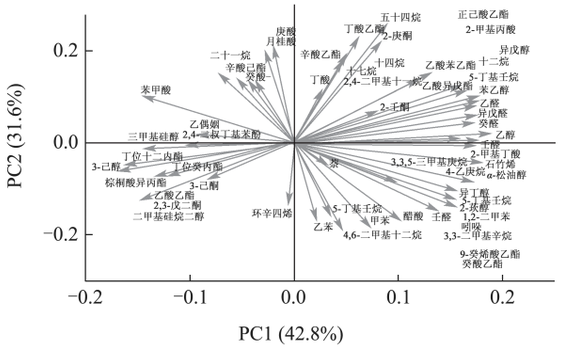

图 7 四种样品 PCA 分类的挥发性风味成分载荷图

Fig.7 Loadings of volatile flavour components for PCA classification of four samples

3 结论

与生鲜乳奶啤相比，以复原乳为原料制备的奶啤品质有所降低，但不显著（$P>0.05$）。复原乳发酵的奶啤的酸度为 61°T，偏高，但在国标允许范围内，持水力降低了 1.17%，同时体系中的蛋白质粒径相对于生鲜乳奶啤增加了 15.3%，明暗度 L^* 值为 21.08、红绿色 a^* 值为 0.41、黄蓝色 b^* 值为 16.91，颜色相对于生鲜乳奶啤偏黄，香气与鲜奶发酵的奶啤样品存在微小差异，其整体感官评价分数为 7.50，略低于生鲜乳奶啤，但结果不显著（$P>0.05$）；通过口腔咀嚼模拟测试说明，生鲜乳奶啤和复原乳奶啤的质地相似，说明这些差异可被消费者接受；随着剪切时间的延长，生鲜乳奶啤和复原乳奶啤的表观粘度变化趋势相同，说明流变特性相似；扫描电镜显示鲜乳奶啤和复原乳奶啤的微观结构无显著差异。综上所述，复原乳可代替鲜乳作为奶啤生产的原料。

本试验国内首次以复原乳为原料开展了发酵制备奶啤的研究，对原料乳奶啤产品质量进行了详实评估分析，具有创新性。试验研究的结果为奶啤企业以复原乳为原料工业化生产奶啤提供坚实的科研理论基础。

参考文献

[1] WANG L, GAO E, HU M, et al. Comparative analysis of the fermentation performance of high-quality milk beer strains (*Kluyveromyces marxianus*) and optimisation of medium formula for high-density fermentation [J]. International Journal of Dairy Technology, 2020, 73(3): 552-562.

[2] CASTELLONE V, BANCALARI E, RUBERT J, et al. Eating fermented: health benefits of LAB-Fermented foods [J]. Foods, 2021, 10(11): 2639.

[3] SAVAIANO D A, HUTKINS R W. Yogurt, cultured fermented milk, and health: a systematic review [J]. Nutr Rev, 2021, 79(5): 599-614.

[4] DIMIDI E, COX S, ROSSI M, et al. Fermented foods: definitions and characteristics, impact on the gut microbiota and effects on gastrointestinal health and disease [J]. Nutrients, 2019, 11(8): 1806.

[5] 梁茂文,王呈,赵瑞生,等.我国发酵型乳酒的开发研究进展[J].现代农业科技,2010,519(1):335-336,8.

[6] DU L, LU W, GAO B, et al. Authenticating raw from reconstituted milk using fourier transform infrared spectroscopy and chemometrics [J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019: 1-6.

[7] RICHARD B, LE PAGE J F, SCHUCK P, et al. Towards a better control of dairy powder rehydration processes [J]. International Dairy Journal, 2013, 31(1): 18-28.

[8] MOINEAU-JEAN A, RAYMOND Y, SABIK H, et al. Effect of manufacturing processes and storage on aroma compounds and

sensory properties of yoghurt [J]. International Dairy Journal, 2020, 105: 104662.

[9] 任雅丽,李博,籍保平.用嗜酸乳杆菌发酵复原乳酸奶的工艺条件及保藏性研究[J].食品工业科技,2006,12:128-131.

[10] 刘丹,龙肇,赵谋明,等.贮存温度和贮存时间对复原乳稳定性的影响[J].食品与发酵工业,2013,39(7):35-38.

[11] GARCZEWSKA-MURZYN A, SMOCZYŃSKI M, KOTOWSKA N, et al. Effect of buttermilk and skimmed milk powder on the properties of low-fat yoghurt [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(6): 2160-2167.

[12] XIA J Y L J, ZHUANG Y P, ET AL. Opportunities and challenges for fermentation optimization and scale-up technology in the artificial intelligence era [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2022, 38(11): 4180-4199.

[13] KUMAR A, KAUR A, TOMER V. Process optimization for the development of a synbiotic beverage based on lactic acid fermentation of nutricereals and milk-based beverage [J]. Lwt, 2020, 131: 109774.

[14] MALINA C, YU R, BJÖRKEROTH J, et al. Adaptations in metabolism and protein translation give rise to the Crabtree effect in yeast [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(51): e2112836118.

[15] MIYAWAKI O, GUNATHILAKE M, OMOTE C, et al. Progressive freeze-concentration of apple juice and its application to produce a new type apple wine [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 171: 153-158.

[16] YANG T, WU K, WANG F, et al. Effect of exopolysaccharides from lactic acid bacteria on the texture and microstructure of buffalo yoghurt [J]. International Dairy Journal, 2014, 34(2): 252-256.

[17] WANG L, TIAN H, LIU W, et al. Effects of EPS-producing Leuconostoc mesenteroides XR1 on texture, rheological properties, microstructure and volatile flavor of fermented milk [J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103371.

[18] BAZINET L, IPPERSIEL D, GENDRON C, et al. Comparison between reconstituted and fresh skim milk chemical and electrochemical acidifications [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, 82(12): 1356-1364.

[19] PAN Z, YE A, FRASER K, et al. Heat stability of sheep's skim milk: Aggregation and interaction of proteins [J]. International Dairy Journal, 2023, 144: 105689.

[20] WANG L, HE M, WU T, et al. Screening of the freeze-drying protective agent for high-quality milk beer yeast (*Kluyveromyces marxianus*) and optimization of freeze-drying process conditions [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12): 16016.

[21] TIAN H, GU Y, LV Z, et al. The exopolysaccharides produced by Leuconostoc mesenteroides XR1 and its effect on silk drawing phenomenon of yoghurt [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 129952.

[22] CHENG H, ZHU R G, ERICHSEN H, et al. High temperature storage of infant formula milk powder for prediction of storage stability at ambient conditions [J]. International Dairy Journal, 2017, 73: 166-174.

[23] ANEMA S G, LEE S K, KLOSTERMEYER H. Reconstituted skim milk: effect of re-dilution after heating concentrated milk at different pH and temperatures [J]. International Dairy Journal, 2022, 131: 105368.

[24] 其布日其其格,李勇.奶啤生产过程中影响产品质量的因素及控制措施[J].工艺技术,2019,5:92-98.

[25] PAREDES J L, ESCUDERO-GILETE M L, VICARIO I M. A new functional kefir fermented beverage obtained from fruit and vegetable juice: Development and characterization [J]. Lwt, 2022, 154: 112728.

[26] JIAO B, WU B, FU W, et al. Effect of roasting and high-pressure homogenization on texture, rheology, and microstructure of walnut yogurt [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101017.

[27] WANG L, GAO E, HU M, et al. Isolation, identification and screening of high-quality yeast strains for the production of milk beer [J]. International Journal of Dairy Technology, 2018, 71(4): 944-953.

[28] LIU W, FAN M, SUN S, et al. Effect of mixed fermentation by *Torulaspora delbrueckii*, *Saccharomyces cerevisiae*, and *Lactobacillus plantarum* on the sensory quality of black raspberry wines [J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(8): 1573-1581.

[29] WIMMER B, PATTKY M, ZADA L G, et al. Capillary electrophoresis-mass spectrometry for the direct analysis of glyphosate: method development and application to beer beverages and environmental studies [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2020, 412(20): 4967-4983.

[30] CHEN L, PENG Q, LIU B, et al. Study on the dynamic changes of nutrient components and flavor compounds during the fermentation process of high-quality highland barley wine [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 35: 100860.

[31] LIU Q, ZHONG W, YANG X, et al. Study on screening of fermentation agents and optimization of the fermentation process for pharyngitis tablet residue [J]. Frontiers in Veterinary Science, 2022, 9: 981388.