

张岩, 陈炼红, 张莉. 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对牦牛乳干酪品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 34-41. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080261

ZHANG Yan, CHEN Lianhong, ZHANG Li. Effect of Curcumin-Bovine Serum Albumin Complex on the Quality of Yak Milk Cheese[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 34-41. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080261

· 研究与探讨 ·

姜黄素-牛血清白蛋白复合物对牦牛乳干酪品质的影响

张 岩¹, 陈炼红^{2,*}, 张 莉³

(1.西南民族大学畜牧兽医学院, 四川成都 610041;

2.西南民族大学食品科学与技术学院, 四川成都 610041;

3.四川省食品发酵工业研究设计院有限公司, 四川成都 611130)

摘 要: 本研究旨在探讨牛血清白蛋白构建包封姜黄素的纳米复合物作为提高牦牛乳干酪成熟品质的潜在策略, 试验测定了牦牛乳干酪的水分、灰分、粗蛋白、粗脂肪、pH、pH4.6 醋酸盐缓冲液可溶性氮、12% 三氯乙酸溶液可溶性氮、硫代巴比妥酸反应物、酸价以及感官指标。结果表明: 姜黄素-牛血清白蛋白纳米复合物的存在能够显著提升牦牛乳干酪的水分与蛋白质含量 ($P<0.05$), 还能促进乳酸菌的增殖并抑制杂菌生长, 有助于牦牛乳干酪中脂肪与蛋白质的分解, 形成短链脂肪酸和多肽, 呈现较好的独特风味; 而复合物添加量过高会减弱益生效果, 降低脂肪和蛋白分解效率, 同时也引起干酪色泽发黄而降低感官评分。在成熟过程初期, 感官评分显著提升 ($P<0.05$) 得益于蛋白质水解反应以及脂肪分解反应的发生, 但成熟期过长会导致苦味小肽等物质的堆积, 形成不良风味, 影响感官品质。总体来讲, 姜黄素-牛血清白蛋白复合物添加有助于牦牛乳干酪品质的提升, 且复合物添加量为 4%, 成熟时间为 60 d 时, 干酪产品品质最佳。

关键词: 姜黄素, 牛血清白蛋白, 牦牛乳, 干酪, 品质

中图分类号: TS252.53

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)13-0034-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080261

本文网刊:



Effect of Curcumin-Bovine Serum Albumin Complex on the Quality of Yak Milk Cheese

ZHANG Yan¹, CHEN Lianhong^{2,*}, ZHANG Li³

(1.College of Animal & Veterinary Sciences, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China;

2.College of Food Science and Technology, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China;

3.Sichuan Food Fermentation Industry Research and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 611130, China)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the construction of curcumin encapsulated nanocomposite based on bovine serum albumin (BSA) could be a potential strategy to improve the ripening quality of yak cheese. The moisture, ash, crude protein, crude fat, pH value, pH4.6 acetate buffer soluble nitrogen, 12% trichloroacetic acid solution soluble nitrogen, thiobarbituric acid reactant, acid value and sensory index of yak milk cheese were determined. The results showed that the presence of curcumin-BSA nanocomplex could significantly improve the moisture and protein content of yak milk cheese ($P<0.05$), promote the proliferation of lactic acid bacteria and inhibit the growth of hybrid bacteria, contribute to the decomposition of fat and protein in yak milk cheese, and form short-chain fatty acids and polypeptides, presenting a good unique flavor. However, the high addition of complex would weaken the probiotic effect, reduce the decomposition efficiency of fat and protein, and also cause the cheese to turn yellow and reduce the sensory score. In the early stage of the

收稿日期: 2021-08-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2020NYB25)。

作者简介: 张岩 (1990-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 食品安全与加工, E-mail: 540741377@qq.com。

* 通信作者: 陈炼红 (1967-), 女, 本科, 教授, 研究方向: 食品资源开发与研究, E-mail: lianhong_chen@163.com。

maturation process, the sensory score was significantly improved due to the occurrence of proteolysis reaction and lipolysis reaction ($P<0.05$), but too long maturation period would lead to accumulation of bitter peptides and other substances, forming bad flavors and affecting sensory quality. In general, curcumin-bovine serum albumin complex can improve the quality of yak milk cheese, and the best quality of yak milk cheese is obtained when the compound supplemental level is 4% and the maturation time is 60 d.

Key words: curcumin; bovine serum albumin; yak milk; cheese; quality

干酪是一种以牛乳或羊乳为原料,在发酵剂与凝乳酶作用下使乳中酪蛋白凝固并排出乳清,再经过一段时间成熟而制成的发酵乳制品^[1-2]。原料乳中干物质的含量是影响干酪得率的重要指标之一,研究显示牦牛乳营养丰富,风味独特,其干物质约为 17.31%、乳脂为 6.49%、乳蛋白为 5.01%,均高于中国荷斯坦牛,理论上更适合作为干酪的优质原料^[3-5]。然而,受到青藏高原特殊环境的制约及生产技术的限制,牦牛乳产品开发长期处于初级阶段,在市场上只能见到少量的牦牛乳粉和牦牛酸乳产品^[6]。因此,制作牦牛干酪是拓展牦牛产业发展、助力乡村振兴战略的路径之一。

干酪的氧化变质是制约产品保质期的重要因素,干酪产品在储存、运输和零售过程中,会发生氧化反应从而导致异味产生^[7-9]。因此,采取相应的措施来阻止氧化的发生是目前迫切需要解决的问题,但抗氧化剂、产品组成和加工之间的平衡成为挑战。当抗氧化剂在机体内发挥作用时,易于被过量产生的活性氧所淹没,从而发生氧化应激,其中细胞和细胞外大分子(蛋白质、脂质和核酸)可能遭受氧化损伤,进而导致组织损伤^[10]。为了克服此问题,已经尝试使用天然食物中的抗氧化活性成分来对抗此类组织伤害。

姜黄素是一种从姜黄根茎中提取的天然亲脂性抗氧化剂,与一般的合成抗氧化剂相比,姜黄素安全无毒,且具有抗炎、抗菌、抗癌以及抗氧化等生物活性^[11-12]。研究表明姜黄素包封于载体中可有效提升其生物利用度以及溶解性^[13-14],能够有效改善其水溶性差、化学不稳定性及低生物利用度等制约因素,在食品工业中具有广阔的应用前景。因此,本实验采用纳米技术制备姜黄素-牛血清白蛋白复合物,作为抗氧化物质应用于牦牛乳干酪制作中,研究其对牦牛干酪成熟过程品质性能的影响,为改善牦牛乳干酪抗氧化能力提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

生鲜牦牛乳 四川省红原县哈拉玛村麦洼牦牛(乳密度: 1.031 g/cm³; 滴定酸度 18 °T; 乳蛋白含量 4.81%; 乳脂含量 6.79%); 菌种 TCC-3、小牛皱胃酶(酶活力 1400 CU/g) 科汉森有限公司; 姜黄素(98%) 南京景竹生物科技有限公司; 牛血清白蛋白 美国 Sigma 公司; 营养琼脂固体培养基/MRS 固体培养基 青岛海博生物科技有限公司; 硫代巴比妥酸、二甲基亚砜、氢氧化钾等试剂 均为分析纯,成

都市科龙化工试剂厂。

SKD-08S2 红外石英消化炉 上海沛欧分析仪器有限公司; MP512-02 精密 pH 计 德国 Mattheus 公司; SKD-800 凯氏定氮仪 上海沛欧分析仪器有限公司; DHG-9203A 电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科技有限公司; PL303 分析天平 梅特勒托利多仪器有限公司; KQ-500E 型超声波清洗仪 昆山市超声仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 姜黄素-牛血清白蛋白复合物制备 参照张鹏等^[11]使用反溶剂沉淀-超声辅助法制作姜黄素-牛血清白蛋白复合物颗粒。将姜黄素溶于二甲基亚砜形成有机相,牛血清白蛋白溶于水中形成水相,以有机相与水相体积之比为 1:20 将有机相于超声过程中注入水相中,姜黄素与牛血清白蛋白用量之比为 3:2。混合液置于冰浴条件下超声处理(800 W, 超声时间 3 s, 间歇 2 s)5 min 得到姜黄素-牛血清白蛋白复合物纳米溶液,加入保护剂混匀后于-80 °C 预冻 18 h,然后快速置于冻干机中冷冻干燥 48 h,即可得到姜黄素-牛血清白蛋白复合物纳米粒。

1.2.2 牦牛乳新鲜干酪加工工艺 生鲜牦牛乳→标准化→巴氏杀菌→冷却→发酵→添加氯化钙→添加凝乳酶→凝乳→切割→搅拌→堆酿→排乳清→添加姜黄素-牛血清白蛋白复合物→压榨成型→盐渍→切块→成熟→成品。

操作要点: 生鲜牦牛乳经过滤、检验、标准化后置于 68 °C 杀菌 30 min, 杀菌后的牦牛乳冷却至 32 °C 时添加一定量的发酵剂进行发酵。当发酵至 pH 为 6.1 左右时分别添加 0.02% 的氯化钙与 0.003% 的凝乳酶,静置保温凝乳。当凝乳形成后,将凝乳块切割为 1 cm³ 的小块,适当升温利于乳清析出,分别取 2%、4%、6%、8% 姜黄素-牛血清白蛋白复合物加入乳酪凝块中搅拌均匀,装入模具进行压榨后放入 15% 的盐水溶液中浸渍 8 h,最终将干酪真空包装放于 10 °C 条件下成熟^[6],以未添加姜黄素-牛血清白蛋白复合物的干酪作为空白对照组。

1.2.3 检测方法

1.2.3.1 营养指标测定 水分、灰分、粗蛋白、粗脂肪含量测定分别依据 GB/T 5009.3-2016、GB/T 5009.4-2016、GB/T 5009.5-2016、GB/T 5009.6-2016^[15-18]。

1.2.3.2 微生物指标测定 参照 GB 4789.2-2016、GB 4789.35-2016 测定细菌总数以及乳酸菌数^[19-20]。取 25 g 干酪样品切碎置于存有 225 mL 灭菌生理盐

水的锥形瓶中,摇匀后得到 10^{-1} 的样品稀释液,依次进行 10 倍的倍比稀释,分别从每个梯度的稀释液中吸取 200 μL 样品溶液,将其均匀涂布于营养琼脂固体培养基/MRS 固体培养基平板上,置于 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下培养 36~48 h,取 30~300 之间菌落数的平板进行计数。

1.2.3.3 pH 测定 将干酪与蒸馏水 1:1(质量比)混合,采用 pH 计直接测定法^[21]。

1.2.3.4 蛋白质分解指标测定 依据李昂等^[22]方法测定 pH4.6 醋酸盐缓冲液可溶性氮(SN-pH4.6)含量及 12% 三氯乙酸溶液可溶性氮(12%TCA-SN)含量。

1.2.3.5 脂肪分解指标测定 依据李昂等^[22]的方法测定硫代巴比妥酸反应物(TBARS)及酸价。

1.2.3.6 感官检测 取牦牛乳干酪样品通过“三角测试”方式提供给 20 位有经验食品专业人员,根据表 1 提供的感官评分标准进行评分^[21]。

1.3 数据处理

利用 Excel 对数据进行整理,采用 SPSS 软件 Duncan 检验对试验数据进行方差分析(ANOVA),定义 5% 作为差异显著性的水平($P<0.05$)。所有试验重复三次,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。

表 1 干酪感官品评标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for cheese

项目	特征描述	评分
整体风味	牦牛乳特有气滋味、香味浓郁	33~40
	牦牛乳特有气滋味、香味较好	25~32
	气滋味良好,香味较淡	17~24
	气滋味合格,香味较淡	9~16
	显著异味	0~8
组织状态	质地紧密、光滑、硬度适中	33~40
	质地基本均匀、稍软或者稍硬、组织细腻	25~32
	组织状态疏松、易碎	17~24
	组织状态呈皮带状	9~16
	表面呈针状、明显分层	0~8
色泽	色泽呈乳黄色,均匀有光泽	16~20
	色泽有变化	10~15
	色泽变化较大,不均匀	0~9

2 结果与分析

2.1 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪营养成分的影响

测定干酪成熟过程中营养成分的变化可以了解干酪的成熟状况,结果如表 2~表 5 所示。姜黄素-牛

表 2 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪水分的影响

Table 2 The effect of curcumin-BSA complex on the moisture of cheese

添加量(%)	成熟时间(d)						
	0	15	30	45	60	75	90
0	35.75 $\pm$ 0.88 ^{Ac}	35.48 $\pm$ 1.14 ^{Bd}	35.29 $\pm$ 0.99 ^{Cc}	34.83 $\pm$ 1.14 ^{Db}	34.26 $\pm$ 0.94 ^{Ec}	34.04 $\pm$ 0.68 ^{Fc}	33.91 $\pm$ 0.87 ^{Ge}
2	35.81 $\pm$ 1.03 ^{Ab}	35.68 $\pm$ 1.07 ^{Bb}	35.34 $\pm$ 1.09 ^{Ca}	35.19 $\pm$ 1.21 ^{Da}	34.38 $\pm$ 0.79 ^{Eb}	34.18 $\pm$ 0.81 ^{Fd}	34.08 $\pm$ 0.78 ^{Gd}
4	35.66 $\pm$ 0.96 ^{Ad}	35.63 $\pm$ 1.12 ^{Bc}	34.92 $\pm$ 1.19 ^{Ce}	34.77 $\pm$ 0.89 ^{Dc}	34.62 $\pm$ 1.01 ^{Ea}	34.55 $\pm$ 0.79 ^{Fa}	34.25 $\pm$ 0.82 ^{Ga}
6	35.42 $\pm$ 0.93 ^{Ae}	35.13 $\pm$ 0.66 ^{Be}	35.06 $\pm$ 0.87 ^{Cd}	34.84 $\pm$ 1.18 ^{Db}	34.64 $\pm$ 1.25 ^{Ea}	34.32 $\pm$ 1.08 ^{Fb}	34.12 $\pm$ 1.14 ^{Gb}
8	35.84 $\pm$ 0.76 ^{Aa}	35.74 $\pm$ 0.94 ^{Ba}	35.31 $\pm$ 0.92 ^{Cb}	34.52 $\pm$ 0.83 ^{Dd}	34.23 $\pm$ 0.58 ^{Ec}	34.23 $\pm$ 0.93 ^{Fc}	34.09 $\pm$ 0.88 ^{Gc}

注:不同大写字母表示同一复合物添加量处理组在不同时间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同复合物添加量处理组在同一时间差异显著($P<0.05$);表3~表5同。

表 3 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪灰分的影响

Table 3 The effect of curcumin-BSA complex on the ash of cheese

添加量(%)	成熟时间(d)						
	0	15	30	45	60	75	90
0	2.61 $\pm$ 0.03 ^{Ga}	2.86 $\pm$ 0.02 ^{Fa}	3.14 $\pm$ 0.01 ^{Ea}	3.39 $\pm$ 0.01 ^{Da}	3.77 $\pm$ 0.01 ^{Ca}	3.98 $\pm$ 0.02 ^{Ba}	4.12 $\pm$ 0.02 ^{Aa}
2	2.58 $\pm$ 0.01 ^{Gb}	2.73 $\pm$ 0.03 ^{Fd}	2.85 $\pm$ 0.02 ^{Ee}	3.24 $\pm$ 0.01 ^{Dc}	3.56 $\pm$ 0.03 ^{Cd}	3.73 $\pm$ 0.01 ^{Be}	4.07 $\pm$ 0.02 ^{Ab}
4	2.63 $\pm$ 0.02 ^{Ga}	2.78 $\pm$ 0.02 ^{Fc}	2.91 $\pm$ 0.01 ^{Ed}	3.33 $\pm$ 0.03 ^{Db}	3.63 $\pm$ 0.02 ^{Cc}	3.81 $\pm$ 0.03 ^{Bd}	4.01 $\pm$ 0.01 ^{Ac}
6	2.62 $\pm$ 0.03 ^{Ga}	2.83 $\pm$ 0.01 ^{Fb}	3.11 $\pm$ 0.03 ^{Eb}	3.34 $\pm$ 0.02 ^{Db}	3.69 $\pm$ 0.01 ^{Cb}	3.84 $\pm$ 0.01 ^{Bc}	4.08 $\pm$ 0.01 ^{Ab}
8	2.61 $\pm$ 0.01 ^{Ga}	2.84 $\pm$ 0.01 ^{Fab}	2.93 $\pm$ 0.01 ^{Ec}	3.22 $\pm$ 0.01 ^{Dc}	3.65 $\pm$ 0.01 ^{Cc}	3.92 $\pm$ 0.01 ^{Bb}	4.11 $\pm$ 0.03 ^{Aa}

表 4 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪蛋白质含量的影响

Table 4 The effect of curcumin-BSA complex on the protein of cheese

添加量(%)	成熟时间(d)						
	0	15	30	45	60	75	90
0	27.05 $\pm$ 0.38 ^{Ad}	26.73 $\pm$ 0.61 ^{Bd}	26.56 $\pm$ 0.41 ^{Cc}	26.19 $\pm$ 0.88 ^{Dc}	25.92 $\pm$ 0.53 ^{Eb}	25.74 $\pm$ 0.39 ^{Fb}	25.66 $\pm$ 0.78 ^{Ga}
2	27.14 $\pm$ 0.83 ^{Ac}	26.81 $\pm$ 0.33 ^{Bbc}	26.59 $\pm$ 0.55 ^{Cb}	26.13 $\pm$ 0.68 ^{Dd}	25.88 $\pm$ 0.76 ^{Ec}	25.68 $\pm$ 0.62 ^{Fc}	25.55 $\pm$ 0.51 ^{Gc}
4	27.16 $\pm$ 0.66 ^{Abc}	26.79 $\pm$ 0.74 ^{Bc}	26.61 $\pm$ 0.61 ^{Cb}	26.11 $\pm$ 0.56 ^{Dd}	25.84 $\pm$ 0.63 ^{Ed}	25.52 $\pm$ 0.52 ^{Fd}	25.47 $\pm$ 0.48 ^{Gd}
6	27.17 $\pm$ 0.58 ^{Ab}	26.83 $\pm$ 0.96 ^{Bb}	26.64 $\pm$ 0.46 ^{Ca}	26.24 $\pm$ 0.71 ^{Db}	25.97 $\pm$ 0.81 ^{Ea}	25.72 $\pm$ 0.66 ^{Fb}	25.62 $\pm$ 0.91 ^{Gb}
8	27.25 $\pm$ 0.72 ^{Aa}	26.88 $\pm$ 0.87 ^{Ba}	26.65 $\pm$ 0.73 ^{Ca}	26.26 $\pm$ 0.62 ^{Da}	25.03 $\pm$ 0.94 ^{Ec}	25.79 $\pm$ 0.77 ^{Fa}	25.64 $\pm$ 0.65 ^{Gab}

表 5 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪脂肪含量的影响
Table 5 The effect of curcumin-BSA complex on the fat of cheese

添加量(%)	成熟时间(d)						
	0	15	30	45	60	75	90
0	34.87±0.58 ^{Aa}	34.58±0.64 ^{Bc}	34.43±1.01 ^{Cb}	34.27±1.08 ^{Dbc}	34.15±0.93 ^{Ebc}	34.09±0.99 ^{Fa}	33.89±0.88 ^{Gb}
2	34.82±0.77 ^{Ac}	34.51±0.82 ^{Be}	34.40±0.95 ^{Cc}	34.22±0.79 ^{Dd}	34.10±1.04 ^{Ed}	33.98±1.01 ^{Fd}	33.86±0.75 ^{Gc}
4	34.85±0.66 ^{Aab}	34.55±0.54 ^{Bd}	34.41±0.71 ^{Cbc}	34.26±0.87 ^{Dc}	34.14±1.11 ^{Ec}	34.02±0.58 ^{Fc}	33.83±0.98 ^{Gd}
6	34.84±0.58 ^{Abc}	34.62±0.55 ^{Bb}	34.46±0.88 ^{Ca}	34.29±0.94 ^{Dab}	34.17±0.89 ^{Eab}	34.06±0.96 ^{Fb}	33.91±1.13 ^{Gab}
8	34.79±0.72 ^{Ad}	34.65±0.83 ^{Ba}	34.47±0.93 ^{Ca}	34.31±1.04 ^{Da}	34.19±0.87 ^{Ea}	34.04±0.68 ^{Fbc}	33.91±0.78 ^{Ga}

血清白蛋白复合物的存在能够显著提升干酪中的水分与蛋白质含量($P<0.05$),水分含量增加主要是由于复合物中具有亲水基团,能够结合水分填充在酪蛋白网状构造之间,而蛋白质含量增加则归因于复合物中载体蛋白作出的贡献,复合物添加量越高^[22],干酪中增加的蛋白质含量越多。在干酪成熟期间,牦牛乳干酪中水分、蛋白质以及脂肪的含量均呈显著下降趋势($P<0.05$),说明蛋白质与脂肪在乳酸菌与凝乳酶的共同作用下被分解,导致干酪酪蛋白网状结构松散,部分可溶性营养成分随着水分析出。然而,灰分呈现上升趋势,这是由于无机盐成分在酪蛋白网状结构的固着作用下损失较少^[22]。

2.2 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪微生物指标的影响

2.2.1 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪乳酸菌的影响 乳酸菌的生长繁殖会直接影响牦牛乳干酪产品的风味、质构等性状,是重要的监测指标之一。姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪乳酸菌的影响如图 1 所示,添加姜黄素-牛血清白蛋白复合物的干酪中乳酸菌含量显著高于对照组($P<0.05$),这表明复合物具有一定的益生性能,有助于干酪成熟过程中乳酸菌的增殖生长。特别是,在复合物添加量为 4% 时,乳酸菌含量最高,而添加量过高,对乳酸菌的益生效果逐渐减弱,但在成熟过程中添加姜黄素-牛血清白蛋白复合物的干酪中乳酸菌含量始终高于对照组。

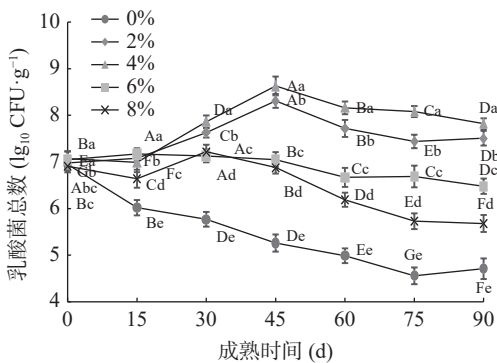


图 1 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪乳酸菌的影响
Fig.1 The effect of curcumin-BSA complex on the content of lactic acid bacteria in cheese

注:不同大写字母表示同一复合物添加量处理组在不同时间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同复合物添加量处理组在同一时间差异显著($P<0.05$);图 2~图 8 同。

2.2.2 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪菌落总数的影响 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪菌落总数的影响结果见图 2。所有实验组干酪在成熟过程中细菌总数呈下降趋势。与对照组相比,添加姜黄素-牛血清白蛋白复合物干酪中细菌总数显著降低($P<0.05$)。这归因于姜黄素本身是一种酚类物质,具有抑制有害细菌以及霉菌生长的功能,与牛血清白蛋白结合形成纳米颗粒后仍然保持生理活性,从而显著抑制杂菌的生长繁殖($P<0.05$),保障牦牛乳干酪成熟过程环境的稳定。

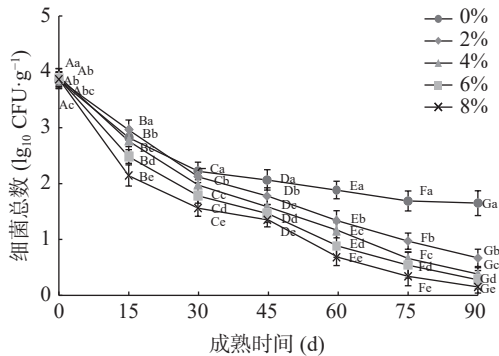


图 2 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪菌落总数的影响
Fig.2 The effect of curcumin-BSA complex on the total number of colonies in cheese

2.3 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪 pH 变化的影响

干酪产品的色泽、口感、风味以及稳定性方面离不开 pH 的贡献,姜黄素-牛血清白蛋白复合物添加量对干酪 pH 变化的影响结果如图 3 所示。在牦牛乳干酪成熟过程中,pH 均呈先下降后趋于平稳的趋势,而添加姜黄素-牛血清白蛋白复合物使干酪 pH 下降的速度显著增快($P<0.05$),当复合物添加量为 4% 时,pH 下降速度最快。据报道,由于乳酸菌以及凝乳酶的存在,在干酪成熟初期,乳糖以及脂肪成分会分解产生乳酸、脂肪酸成分,导致 pH 下降,而在成熟后期,干酪中的糖分分解完全不再继续提供乳酸,同时蛋白质水解产生的碱性小分子有机物也会中和一部分游离的 H^+ ,导致干酪的 pH 不再继续下降^[23]。另外,添加复合物能够促进乳酸菌繁殖生长,加速干酪中乳酸以及脂肪酸的形成,导致干酪 pH 下降的速度增快,而当姜黄素-牛血清白蛋白复合物添加量大于 4% 时,复合物益生效果下降,因此降低乳酸以及

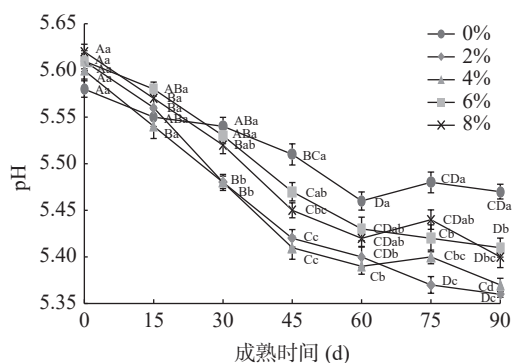


图3 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪pH变化的影响

Fig.3 The effect of curcumin-BSA complex on the pH value of cheese

脂肪酸形成的速率,这与2.2.1中获得的结果相一致。

2.4 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪蛋白分解指标的影响

2.4.1 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪中SN-pH4.6含量的影响 SN-pH4.6含量是评价干酪成熟度的重要指标之一,能够体现出干酪蛋白被乳酸菌、凝乳酶分解出的小肽和中肽的含量。如图4所示,姜黄素-牛血清白蛋白复合物的添加显著提高可溶性氮含量,在复合物添加量为4%时更为显著($P<0.05$),这归因于复合物能提升乳酸菌分解蛋白质的效率,同时复合物包封的载体蛋白质在成熟过程中也会被分解形成可溶性氮,大大提升了SN-pH4.6含量。此外,观察到随着干酪成熟天数的增加,SN-pH4.6含量总体呈上升逐渐趋于平缓的趋势。这是由于在成熟初期,乳酸菌浓度不高,发酵程度不足,蛋白质分解能力差,而随成熟时间延长,乳酸菌数量上升且具有较高的活力,可以迅速将干酪中的酪蛋白水解成小肽。当干酪达到一定成熟度后,乳酸菌与凝乳酶的活力减退,蛋白质水解速度下降,同时部分中肽和小肽也会被继续分解形成游离氨基酸^[24],因此SN-pH4.6增加的速度明显减缓。

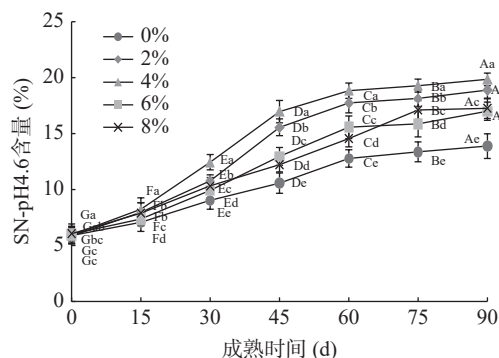


图4 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪中SN-pH4.6的影响

Fig.4 The effect of curcumin-BSA complex on SN-pH4.6 in cheese

2.4.2 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪中12%TCA-SN含量的影响 测定12%TCA-SN含量是评估干酪中催化水解酪蛋白产生的小分子肽以及游离氨基酸含量的重要技术手段,可以客观反映出干酪成熟度情况。

由图5可知,在干酪成熟过程中,12%TCA-SN含量一直呈上升趋势,但在发酵初期12%TCA-SN增加缓慢,归因于发酵初期干酪蛋白初步分解产生中间产物中肽及小肽,而随着发酵时间延长,虽然乳酸菌与凝乳酶活力下降,但部分乳酸菌开始自溶并释放出细胞酶,进一步将初期分解的中肽等中间产物继续分解为小肽及游离氨基酸,因此12%TCA-SN含量快速增加。在整个发酵过程中,试验组中12%TCA-SN含量显著高于对照组,主要是由于复合物中载体蛋白质成分被分解也提供一些可溶性氮成分,且添加复合物制作的干酪中乳酸菌数量与活性也优于对照组,导致蛋白水解量增加,产生大量的小分子肽及游离氨基酸。

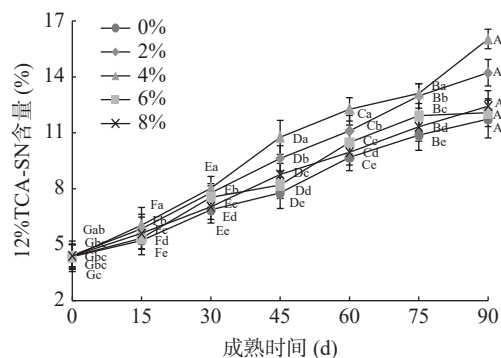


图5 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪中12%TCA-SN的影响

Fig.5 The effect of curcumin-BSA complex on 12%TCA-SN in cheese

2.5 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪脂肪分解指标的影响

2.5.1 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪酸价的影响 酸价体现了干酪中脂肪分解出游离脂肪酸总量,通过测定酸价的变化可以评价乳脂肪分解程度。由图6可知,在干酪成熟过程中,酸价逐渐升高且趋于平缓,主要是由于在干酪成熟初期,乳酸菌与酶类对干酪中脂肪分解强度较大,产生大量游离脂肪酸,导

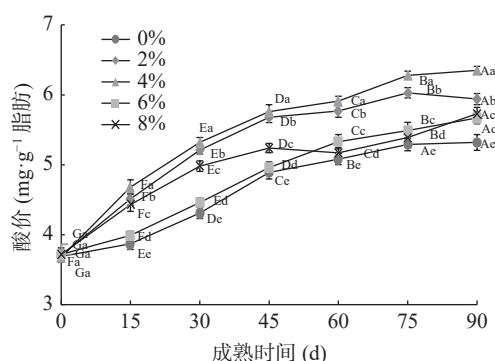


图6 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪酸价的影响

Fig.6 The effect of curcumin-BSA complex on acid value of cheese

致酸价快速上升,而成熟后期,乳酸菌与凝乳酶逐渐失去活力,干酪中脂肪分解受到限制,因此酸价上升趋势减缓。在整个发酵过程中,添加姜黄素-牛血清白蛋白复合物使干酪中酸价显著高于对照组($P<0.05$),说明复合物的存在能增加乳酸菌分解脂肪的能力,有利于游离脂肪酸的形成。

牦牛乳干酪中的脂肪会在成熟过程中被乳酸菌与酶类分解,产生醇类、酯类、醛类以及游离脂肪酸等风味物质,共同作用下呈现出独特的风味^[25],因此脂肪的分解程度能够直接影响牦牛乳干酪的口感、风味以及质地。研究显示,国外大部分干酪因脂肪分解产生大量的风味物质而形成浓烈的风味,其酸价高达 8.8~9.6 mg/g^[26],这对于国内消费者是较难接受的。值得注意的是,本研究中牦牛乳干酪酸价保持在 5.0~6.5 mg/g 范围内,整体低于国外大部分干酪,表明此干酪中脂肪分解程度有限,干酪风味相对柔和,易于被国内消费者接受。

2.5.2 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪 TBARS 的影响 乳制品中的脂肪特别是不饱和脂肪酸,化学分子结构含有双键,化学性质活泼,易被氧化,从而导致不良的风味、质地和营养价值丧失。脂肪自动氧化的主要初期产物氢过氧化物很不稳定,容易降解为醛类、酮类、醇类、酯类等有机化合物,因其能够与硫代巴比妥酸生成有色物质,可通过测定 TBARS 值反映脂肪的氧化程度。干酪成熟过程中 TBARS 值变化情况如图 7 所示, TBARS 值随着成熟时间的延长而快速上升,主要是脂肪氧化的结果,尤其在成熟后期干酪中脂肪被分解为游离脂肪酸等分子量较小的成分,更加容易与氧气接触,氧化程度增加。与对照组相比,添加姜黄素-牛血清白蛋白复合物制作的干酪中 TBARS 值显著降低($P<0.05$),说明复合物能有效抑制脂肪氧化,而且抑制效果随着复合物添加量的增加而增强,这主要由姜黄素贡献,加载在牛血清白蛋白纳米粒子中的姜黄素的稳定性得以改善,仍然保留酚羟基的抗氧化活性,能够有效抑制脂肪氧化。

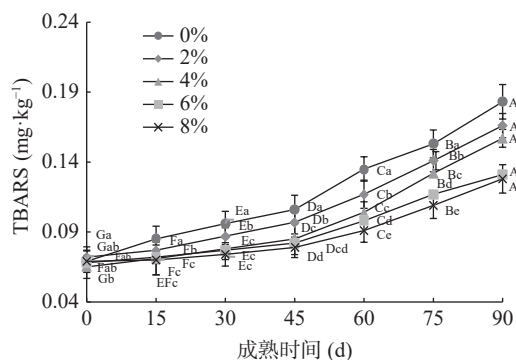


图 7 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪 TBARS 的影响
Fig.7 The effect of curcumin-BSA complex on TBARS in cheese

2.6 姜黄素-牛血清白蛋白复合物对干酪感官的影响 姜黄素-牛血清白蛋白复合物会影响干酪色泽以

及成熟过程中风味的形成,感官评定是牦牛乳干酪产品品质的直观体现,干酪的感官评分结果如图 8 所示。所有体系中干酪感官评分随着发酵时间的增长呈先上升后下降的整体趋势,而添加姜黄素-牛血清白蛋白复合物的干酪感官评分高于对照组,且复合物添加量为 4%,成熟时间为 60 d 时,感官评分显著高于其他处理组($P<0.05$)。姜黄素-牛血清白蛋白复合物的添加会显著改善干酪色泽($P<0.05$),使干酪黄度增加,但是添加量超过 4% 时导致干酪色泽呈黄色,影响感官评分。此外,姜黄素-牛血清白蛋白复合物的添加能够改善干酪内的菌落组成^[27-28],有益于风味物质的形成,提高其感官评分,而成熟 60 d 后,干酪中的部分蛋白质分解成苦味小肽,脂肪分解形成大量的风味物质,造成干酪风味过于浓烈且苦感增强,同时蛋白质分解引起干酪内部稳定的网状结构受到破坏^[29],组织状态变差,影响感官评分,这与前面实验结果相一致。

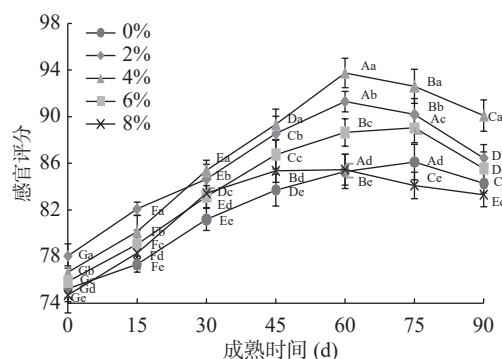


图 8 牦牛乳干酪感官评分
Fig.8 Sensory score of yak milk cheese

3 结论

本实验以川西北高原地区牦牛乳为原料生产牦牛干酪,探究基于牛血清白蛋白构建包封姜黄素的纳米复合物可作为提高牦牛乳干酪成熟品质的潜在应用价值。结果表明姜黄素-牛血清白蛋白纳米复合物的存在能够显著提升牦牛乳干酪的水分与蛋白质含量($P<0.05$),还能促进乳酸菌的增殖并抑制杂菌生长,有助于牦牛乳干酪中脂肪与蛋白质的分解,形成短链脂肪酸和多肽,呈现较好的独特风味;而复合物添加量过高会减弱益生效果,降低脂肪和蛋白分解效率,同时也引起干酪色泽发黄而降低感官评分。在成熟过程初期,感官评分显著提升($P<0.05$)得益于蛋白质水解反应以及脂肪分解反应的发生,但成熟期过长会导致苦味小肽等物质的堆积,形成不良风味,影响感官品质。综上所述,姜黄素-牛血清白蛋白复合物添加量为 4%,成熟时间为 60 d 时,干酪产品品质最佳,为天然抗氧化成分提高干酪成熟过程品质性能应用技术提供理论支撑。

参考文献

- [1] 王博,张维清,杨国红,等.我国牦牛乳制品开发现状与前景[J].食品与发酵工业,2021,47(13):318-324. [WANG B, ZHANG

- W Q, YANG G H, et al. Recent progress of yak milk products in China[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(13): 318–324.]
- [2] LU S L, JI H, WANG Q L, et al. The effects of starter cultures and plant extracts on the biogenic amine accumulation in traditional Chinese smoked horsemeat sausages[J]. Food Control, 2015, 50: 869–875.
- [3] 马瑞娟, 许英瑞, 薛元泰, 等. 牦牛乳风味物质及影响因素研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 363–368. [MA R J, XU Y R, XUE Y T, et al. Research progress on flavor substances and influencing factors of yak milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(10): 363–368.]
- [4] CHENG K, ROPERS M, LOPEZ C. The miscibility of milk sphingomyelin and cholesterol is affected by temperature and surface pressure in mixed Langmuir monolayers[J]. Food Chemistry, 2017, 224: 114–123.
- [5] 石永祺, 梁琪, 宋雪梅, 等. 脂肪含量对牦牛乳硬质干酪质构、流变和微观结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 14–19. [SHI Y Q, LIANG Q, SONG X M, et al. Effect of fat content on texture, rheology and microstructure of yak milk hard cheese[J]. Food Science, 2020, 41(20): 14–19.]
- [6] 陈怡帆, 陈炼红, 张岩. 固定化酶制作工艺优化及促进牦牛乳硬质乳酪成熟研究[J]. 食品科技, 2020, 45(9): 22–29. [CHEN Y F, CHEN L H, ZHANG Y. Optimization of immobilized enzyme production process and the promotion of yak milk hard cheese maturation[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(9): 22–29.]
- [7] 石永祺, 梁琪, 宋雪梅, 等. 抑制牦牛乳制品脂肪氧化的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 321–326, 331. [SHI Y Q, LIANG Q, SONG X M, et al. Research progress in inhibiting fat oxidation of yak dairy products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 321–326, 331.]
- [8] ZHAO L L, MIN D, JING G, et al. Label-free quantitative proteomic analysis of milk fat globule membrane proteins of yak and cow and identification of proteins associated with glucose and lipid metabolism[J]. Food Chemistry, 2019, 275: 59–68.
- [9] 马欢, 梁琪, 宋雪梅, 等. 发酵剂添加量和成熟时间对牦牛乳硬质干酪脂肪氧化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(15): 150–156. [MA H, LIANG Q, SONG X M, et al. Effects of starter amount and ripening time on fat oxidation of yak milk hard cheese[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(15): 150–156.]
- [10] 芬妮. 绿茶提取物微胶囊化及其对新鲜干酪抗氧化、抗菌性及品质特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018. [FEN N. Effect of microencapsulation of green tea polyphenols on the antioxidant, antibacterial activity and quality attributes of fresh cheese[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.]
- [11] 张鹏, 刘璐, 王虹, 等. 姜黄素白蛋白纳米粒的制备与评价[J]. 中国医院药学杂志, 2018, 38(7): 719–722, 731. [ZHANG P, LIU R, WANG H, et al. Preparation and preliminary characterization of curcumin albumin nanoparticles[J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2018, 38(7): 719–722, 731.]
- [12] NICOARA O, TWOMBLEY K. Immunoglobulin a nephropathy and immunoglobulin a vasculitis[J]. The Pediatric Clinics of North America, 2019, 66(1): 101–110.
- [13] 赵悦, 张静, 敖仕杰. 姜黄素及其衍生物与血清白蛋白的相互作用比较研究[J]. 工程技术研究, 2018(4): 255–256. [ZHAO Y, ZHANG J, AO S J. Comparative study on the interaction between curcumin and its derivatives and serum albumin[J]. Engineering and Technology Research, 2018(4): 255–256.]
- [14] 徐广宽. 姜黄素提取及与牛血清白蛋白相互作用研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017. [XU G K. Study on extraction of curcumin and interaction with bovine serum albumin[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017.]
- [15] 中华人民共和国卫生部. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National food safety standards Determination of moisture in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB 5009.4-2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 5009.4-2016 National food safety standards Determination of ash in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [17] 中华人民共和国卫生部. GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 5009.5-2016 National food safety standards Determination of protein in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [18] 中华人民共和国卫生部. GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 5009.6-2016 National food safety standards Determination of fat in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [19] 中华人民共和国卫生部. GB 4789.2-2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 4789.2-2016 National food safety standards Food microbiological testing Determination of the total number of colonies[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [20] 中华人民共和国卫生部. GB 4789.35-2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 4789.35-2016 National food safety standards Food microbiological testing Lactic acid bacteria test[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [21] 高代微, 陈炼红, 王琳琳, 等. 相对湿度对牦牛毛霉菌奶酪成熟过程中品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 23–30. [GAO D W, CHEN L H, WANG L L, et al. Effects of relative humidity on the quality of yak mold cheese during ripening[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(5): 23–30.]
- [22] 李昂, 陈炼红, 李键, 等. 雅致放射毛霉添加量对牦牛霉菌奶酪品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 120–125. [LI A, CHEN L H, LI J, et al. Effect of addition amount of actinomucor elegans on quality of yak mold cheese[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(24): 120–125.]
- [23] COLLINS Y F, MCSWEENEY P L H, WILKINSON M G.

Lipolysis and free fatty acid catabolism in cheese: A review of current knowledge[J]. *International Dairy Journal*, 2003, 13: 841–866.

[24] SIHUFE G A, ZORRILLA S E, RUBIOLO A C. Casein degradation of fynbo cheese salted with NaCl/KCl brine and ripened at various temperatures[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(1): 117–123.

[25] 张玥琪, 郭贝贝, 孙丰义, 等. 蓝波奶酪挥发性风味成分的分离与鉴定[J]. *食品科学*, 2015, 36(16): 132–136. [ZHANG Y Q, GUO B B, SUN F Y, et al. Analysis of volatile flavor compounds in blue cheese[J]. *Food Science*, 2015, 36(16): 132–136.]

[26] 贺家亮, 李开雄, 侯玉泽, 等. 发酵剂添加量对半硬质干酪品质的影响研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(6): 120–122. [ZHANG Y Q, GUO B B, SUN F Y, et al. Analysis of volatile flavor compounds in blue cheese[J]. *Food Science*, 2009, 30(6): 120–122.]

[27] 王卫东, 黄昊, 秦杰, 等. 富含植物多酚凝固型酸奶的研制[J]. *中国乳品工业*, 2017, 45(8): 53–56. [WANG W D, HUANG H, QIN J, et al. Research on preparation of yoghurt solidified with plant polyphenols[J]. *China Dairy Industry*, 2017, 45(8): 53–56.]

[28] 刘玉婷, 石磊, 李井雷. 姜黄素发酵乳的制备及理化性质研究[J]. *食品与营养科学*, 2018, 7(4): 311–321. [LIU Y T, SHI L, LI J L. Preparation and physicochemical properties of curcumin fortified yogurt[J]. *Hans Journal of Food and Nutrition Science*, 2018, 7(4): 311–321.]

[29] LYNCH K M, MCSWEENEY P L H, ARENGT E K, et al. Isolation and characterisation of exopolysaccharide-producing *Weissella* and *Lactobacillus* and their application as adjunct cultures in Cheddar cheese[J]. *International Dairy Journal*, 2014, 34(1): 125–134.