

柠檬酸钠辅助谷氨酰胺转移酶对牦牛乳凝胶特性的研究

李赵敏, 杨林, 张辉, 辜雪冬, 祝亚辉

(西藏农牧学院 食品科学学院 食品科学与工程重点自治区实验室, 西藏 林芝 860000)

摘要:为了解决牦牛酸奶在贮藏和运输过程中易出现凝胶破碎和乳清析出等质构缺陷。本实验主要研究了柠檬酸三钠(TSC)对经谷氨酰胺转移酶(MTGase)处理的脱脂牦牛乳形成凝胶的持水力、硬度和流变特性的影响。将不同浓度的柠檬酸三钠(0、10、30和50 mmol/L)加入到牦牛乳中,分散均匀后重新调整pH至6.55~6.65,然后加入MTGase以促进牦牛乳酪蛋白的共价交联反应。将上述分散体系用1.4%(w/v)D-葡萄糖酸- δ -内酯(GDL)于42℃下酸化4~5 h。结果表明,当TSC的浓度分别为0、10、30和50 mmol/L时,牦牛乳酪蛋白胶束形成的颗粒直径分别为300、110、70、30 nm。在0~30 mmol/L范围内,随着TSC浓度的增加,经过MTGase处理后的牦牛乳形成的酸凝胶的硬度、持水力和屈服应力呈显著的增加趋势,超过30 mmol/L,凝胶的硬度、持水力和屈服应力逐渐降低。总体而言,TSC能够将牦牛乳酪蛋白胶束分解成较小的颗粒,在MTGase存在的条件下,能显著改善牦牛乳酸凝胶的质构缺陷。

关键词:柠檬酸三钠;D-葡萄糖酸- δ -内酯;凝胶;共价键

中图分类号:TS252.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2230(2020)06-0018-04

doi:10.19827/j.issn1001-2230.2020.06.004

Study on Properties of Yak Milk Gel with Sodium Citrate Assisted Transglutaminase

LI Zhaomin, YANG Lin, ZHANG Hui, GU Xuedong, ZHU Yahui

(College of Food Science, Key Autonomous Region Laboratory of Food Science and Engineering, Xizang Agriculture and Animal Husbandry College, Nyingchi 860000, China)

Abstract: in order to solve the texture defects of yak yogurt during storage and transportation, such as gel breakage and whey precipitation, etc. The effects of TSC on hydrostatic properties, hardness and rheological properties of defatted yak milk treated with MTGase were studied. Different concentrations of trisodium citrate (0, 10, 30, and 50 mmol/L) were added to the yak milk, and the pH was adjusted to 6.55~6.65 after uniform dispersion. Then MTGase was added to promote the covalent crosslinking reaction of yak cheese protein. The above dispersion system was acidified by 1.4% (w/v) d-gluconate delta lactone (GDL) at 42℃ for 4~5 h. The results showed that when the TSC concentrations were 0, 10, 30 and 50 mmol/L, the particle diameters of yak cheese protein micelles were 300, 110, 70 and 30 nm, respectively. In the range of 0 to 30 mmol/L, with the increase of TSC concentration, the hardness, hydraulic holding and yield stress of the acid gel formed by the yak milk treated with MTGase showed a significant increase trend, and the hardness, hydraulic holding and yield stress of the gel gradually decreased after the treatment of 30 mmol/L. In general, TSC can decompose the yak cheese micelle into smaller particles, which can significantly improve the texture defects of yak lactic acid gel under the conditions of MTGase.

Key words: Trisodium citrate, D-gluconic- δ - lactone, Gel, Covalent bond

0 引言

牦牛乳酸奶以其独特的风味、细腻的口感和较高的营养价值而深受人们的青睐。与市售荷斯坦牛乳形成的酸奶相比,牦牛乳酸奶的致敏性更低,蛋白质、

矿物质元素、维生素和饱和脂肪酸含量更高,具有广阔的市场前景^[1]。据报道,虽然牦牛的产乳量是传统奶牛的1/10,但因为其蛋白质平均含量、脂肪含量和干物质含量等高于普通牛乳,所以牦牛酸奶具有更高的营养价值^[2]。牦牛酸奶的构筑单元是酪蛋白胶束,包括 α ₁-酪蛋白, α ₂-酪蛋白, β -酪蛋白, κ -酪蛋白^[3]。酪蛋白胶束是直径约在100~300 nm的胶束,通过疏水相互作用、蛋白和蛋白之间的静电相互作用、蛋白和钙之间的静电相互作用、氢键以及二硫键进行相互结合^[4],通过静电排斥和空间位阻效应稳定分散与水中^[5],但是酪蛋白胶束中的共价键贡献度极小。相比于普通牛奶的酪蛋白胶束,牦牛乳的酪蛋白胶束更

收稿日期:2019-07-02

基金项目:2018年农畜加工关键技术研发(藏财教指2018-54号)(503118004);食品科学与工程重点学科建设(503118009);班戈畜牧(50020602)。

作者简介:李赵敏(1994-),女,硕士研究生,研究方向为乳品科学。

通讯作者:杨林

大,而大颗粒的聚集更容易产生多而大的空隙,形成的凝胶不均一,更易出现凝胶不稳定现象^[9]。因此如何改善牦牛酸奶的质构特性是行业亟待解决的问题。

研究表明,共价键的引入增强酸奶凝胶强度可以改善牦牛乳凝胶质构缺陷,谷氨酰胺转移酶能催化蛋白质间(或内)的酰基转移反应,增加酸奶的凝胶强度和持水性^[9-10]。据报道,由MTGase处理的胶束酪蛋白制备的酸诱导凝胶的质地特性可以显著提高,但上述凝胶结构缺陷仍未完全解决^[11-12]。由于牛乳的酪蛋白胶束粒径较大,比表面积小,MTGase的交联位点有限,即使经过MTGase处理后的牦牛乳凝胶结构仍然不均且很脆弱^[13]。向酪蛋白胶束中添加钙离子螯合剂可将天然酪蛋白胶束分解成更小的亚微胶粒^[14]。这可改变凝胶形成过程中酪蛋白颗粒的重排和MTGase与酪蛋白之间的接触,将在酸化之前或酸化过程中改变酪蛋白分子之间的交联键,在MTGase作用前使更多的位点暴露出来,有利于下一步的结合^[15]。且已有研究证实,TSC可使酪蛋白胶束解离形成小的亚胶束,可能改变MTGase交联位点的个数,从而影响凝胶的强度和持水力^[16]。但是目前尚无TSC辅助MTGase处理对牦牛乳凝胶性质影响的研究报道。

本实验的目的是研究钙离子螯合剂TSC协同MTGase对脱脂牦牛乳进行处理,再经过酸化之后进行凝胶稳定性的测定,并进行对照试验,研究其对酪蛋白胶束凝胶结构特性和微观特性的影响,及其作用机制。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牦牛奶,购于甘肃省合作市玛曲牦牛养殖户;二水合柠檬酸三钠(TSC)(分析纯),上海国药集团化学试剂有限公司;谷氨酰胺转移酶(MTGase,上海道衍商贸有限公司;D-葡萄糖酸- δ -内酯(GDL),Sigma-Alorich贸易有限公司。

1.2 仪器与设备

ME2002电子天平;梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;动态光散射仪,英国Malvern公司;TMS-Pro型质构仪,美国FTC公司;分析天平(万分之一),美国Denver公司;HW-W2·600型智能恒温水浴箱,北京东方精锐科技发展有限公司;TDL-608低速台式大容量离心机,上海安亭科学仪器厂;Thermo低温高速离心机,大连博凯辉创科技有限公司;THZ-22台式恒温振荡器;北京科尔德科贸有限公司;流变仪,美国TA公司,HJ-6A型数显恒温多头磁力搅拌器,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 牦牛酸奶的制备

1.3.1.1 牦牛酸奶的工艺流程

鲜奶→脱脂→加入柠檬酸三钠→磁力搅拌(20℃,20 min)→调节pH(6.55—6.65)→加入MTGase酶→磁力搅拌(20℃,20 min)→水浴加热(42℃,2 h)→加入葡萄糖酸内酯→磁力搅拌(20℃,20 min)→水浴加热(42℃,4 h)

1.3.1.2 原料牛乳的处理

对牦牛乳进行低温离心处理(4 500 r, 4℃, 30 min),去除上层脂肪及其他杂质,置于4℃冷藏条件下备用。

1.3.1.3 MTGase酶分散体的制备

将一定量的MTGase酶分散在超纯水中,于25℃600 rpm磁力搅拌30 min。将分散液在25℃下以3 000 r离心10 min以除去底部的杂质,使用前4℃冷藏备用。

1.3.1.4 酸化剂的用量

新鲜牦牛乳经过脱脂处理后,取100 mL(四份)于烧杯中,依次加入TSC、MTGase进行处理,搅拌后调节pH,然后分别加入0、10、30、50 mmol/L的GDL,每份均分为三份,分别加入1.2%、1.4%、1.6%的GDL,42℃水浴4 h后,用玻璃棒搅拌破坏凝胶结构,再使用pH计测定pH。

表1 不同GDL添加量下样品pH值

GDL添加量/%	0 mmol/L	10 mmol/L	30 mmol/L	50 mmol/L
1.20	4.57	4.35	4.58	4.89
1.40	4.18	4.32	4.53	4.76
1.60	3.99	4.13	4.45	4.64

测定结果如表1所示,当GDL的添加量为1.4%时,牦牛乳凝乳后的pH与市售牦牛酸奶的pH最为相近,故确定最终添加的葡萄糖酸内酯的含量为1.4%(w/v)(以奶计)。

1.3.1.5 牦牛乳凝胶样品的制备

向牦牛乳中缓慢加入TSC(置于磁力搅拌器上连续搅拌),使其浓度分别为0、10、30、和50 mmol/L。用0.5 mol/L的乳酸调节pH至6.55~6.65,然后加入一定体积的MTGase分散液,使其酶活为10 U/g乳蛋白,在42℃的水浴中放置2 h,然后添加1.4% GDL后继续在42℃下水浴4 h后进行凝乳特性的测定。

1.3.2 试验思路

为了探究TSC和MTGase的协同作用,分别设置以下三个处理组:

处理组1的试剂加入顺序:柠檬酸三钠、MTGase、GDL;

处理组2的试剂加入顺序:MTGase、柠檬酸三钠、GDL;

处理组3的试剂加入顺序:柠檬酸三钠、GDL。

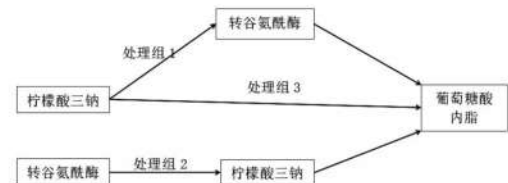


图1 不同的凝胶制备方式示意图

1.3.3 酸奶品质测定方法

1.3.3.1 粒径的测量

将加入MTGase后经过磁力搅拌的样品用移液枪取液125 uL于25 mL容量瓶中,用去离子水定容,震

荡 20 min。Malvern 动态光散射仪预热 30 min 后进行测量,设置测试温度 20 ℃,分散介质的折光指数为 1.33。

1.3.3.2 质构特性的测定

取样品 20 mL 于质构仪专用样品杯中按照 2.3.1.4 操作进行凝乳,从水浴锅取出后恢复至室温,置于质构仪上测其硬度,平行做 6 个样品。利用 TMS-Pro 质构仪测定酸奶质构特性,选择 20 mm 探头,每测一次将探头清洗干净后擦干再测下一个样品。测定参数为:最大量程 100 N,触发力 0.05 N,检测速度 30 mm/min,穿刺距离 10 mm,回程速度 60 mm/min,回程距离 10 mm。

1.3.3.3 持水力的测定

测量离心管的质量并记录 W_0 ,取 7 mL 加入 GDL 后的样品置于离心管中,水浴加热 4 h,并测定样品质量 W_1 ,以 4 000 r/min 的转速离心 10 min,取出后在室温下静置 10 min,除去上清液,测量残余物质量 W_2 ,酸奶持水力的计算公式如下:

$$\text{持水力} = \frac{W_2 - W_0}{W_2 - W_0} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3.4 流变性测定

使用流变仪进行流变性能的测量,选择同心圆柱体夹具(外径 15 mm,内径 14 mm),每次进样量 20 mL,振动应力范围为 0~100 Pa,频率为 1 HZ,取样品点设置为每个数量级取样 20 次。

1.3.3.5 pH 的测定

取经过按照 2.3.1.4 处理的凝乳样品,搅拌均匀,用 PHS-25 型实验室 pH 计依次测定各样品的 pH 值并记录。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 TSC 对凝胶质构的影响

质构仪测量指标包括硬度、粘性、弹性等,获得的质构参数或者指标能够很好的反映食品的口感或者质构,牦牛酸奶的硬度是直接反应口感的一项指标,易于观察,且粘着性的绝对值与硬度几乎呈正相关^[7],故本次实验通过分析硬度来评价牦牛酸奶的质构特性。

表 2 TSC 添加量对于凝胶硬度的影响 N

处理组	柠檬酸钠添加量/(mmol/L)			
	0	10	30	50
1	2.99±0.41	3.12±0.57	4.65±0.55	2.50±0.29
2	2.65±0.23	2.07±0.26	1.05±0.14	0.23±0.07
3	0.62±0.11	0.23±0.03	0.48±0.05	0.31±0.03

根据表 2 信息,处理组 3 的凝胶硬度明显低于处理组 1 和处理组 2 的凝胶硬度,说明 MTGase 的确能有效改善牦牛乳的酪蛋白胶束的结构。在处理组 1 中,当 TSC 添加量达到 50 mmol/L 时,其硬度反而低于添加量为 10 mmol/L 时的硬度值,可能是因为当 TSC 添加量达到 50 mmol/L 时,一部分柠檬酸钠作为钙离子螯合剂使用,而剩余的柠檬酸钠则游离在乳中,形成

了柠檬酸缓冲体系,缓冲体系有助于防止 pH 的下降,加入酸化剂后在相同的反应条件下,pH 难以下降到酪蛋白的等电点以下(或刚好接近酪蛋白的等电点),此时无法形成凝胶或形成的凝胶极其不稳定,所以硬度远远低于添加量为 10 或 30 mmol/L 的样品。

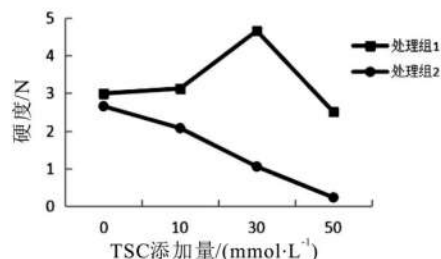


图 2 不同处理对样品硬度的影响

图 2 将处理组 1 和处理组 2 的硬度值进行了对比,在处理组 1 中,当 TSC 浓度达到 30 mmol/L,硬度值达 4.65 ± 0.55 N,显著高于添加量为 10 mmol/L 时的 3.12 ± 0.57 N 和添加量为 50 mmol/L 时的 2.50 ± 0.29 N;在处理组 2 中,随着 TSC 添加量的增加,牦牛乳凝胶的硬度反而降低,究其原因可能是因为先加入的 MT-Gase 使酪蛋白胶束之间发生了共价交联,但是在此之后加入的 TSC 又破坏了酪蛋白胶束的凝胶结构,使酪蛋白胶束内部和两个胶束之间的 Ca^{2+} 被夺走,不仅破坏了此前形成的共价键,可能还使酪蛋白胶束本身的结构被破坏,从而导致牛乳的硬度下降,不添加 TSC 的样品硬度为 2.65 ± 0.23 N,远高于添加 TSC 的样品,样品中加入的 TSC 的含量越多,被破坏的胶束越多,牦牛酸乳的硬度越差。这表明,先加入 TSC 的确能够提高牦牛乳凝胶的硬度,且 TSC 处理对牦牛乳凝胶硬度有显著影响。

2.2 不同浓度 TSC 对胶束持水力的影响

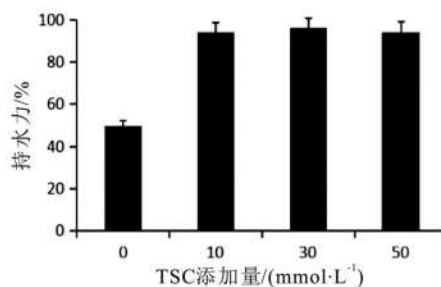


图 3 不同浓度 TSC 对胶束持水力的影响

TSC 对酸诱导的牦牛乳凝胶的持水力的影响见图 3。当 TSC 浓度达到 10 mmol/L 后,持水能力即高于 90%,显著高于 0 mmol/L (空白组,持水力 $49.71 \pm 0.3\%$)。这表明,TSC 辅助 MTGase 处理脱脂牦牛乳后,能够提高牦牛乳凝胶的持水力,这与凝胶的坚硬程度有关,因为弱凝胶倾向于流动,导致凝胶易收缩和乳清排出。

2.3 不同浓度柠檬酸三钠对胶束流变性能的影响

食品流变是指食品在力的作用下发生形变,测定食品的流变性对于鉴别、控制食品的质量、设计、改善有关加工设备具有重要的意义。酸乳是一种复杂的流体,其流变性是指酸奶的流动和变形随时间和力的变化而表现出的性质,酸乳的流变性通常用来描述和衡量产品的质地,包括凝胶的黏度、硬度等^[18]。图4显示了牦牛酸乳在0~100 Pa的压力下应力扫描的结果,其中 $\tan\delta$ 指 G'' (黏性模量)和 G' (弹性模量)的比值,当 $\tan\delta=1$ 时,表示酸乳处于固液临界点,即凝胶状态即将被破坏。由图可知,在添加量为0、10、30 mmol/L的三个样品中,随着柠檬酸钠添加量的增加,达到 $\tan\delta=1$ 时的压力也不断增加,即破坏掉凝胶结构所需要的力逐渐增加,直接证明了经过 TSC 和 MTGase 处理后,牦牛酸乳的凝胶性能得到了大幅度提升,当 TSC 添加量为 30 mmol/L 时,其凝胶性能是不添加 TSC 时的 2 倍左右。

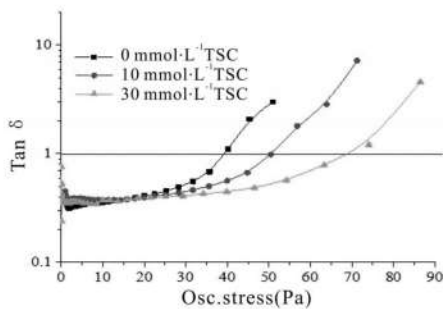


图4 不同浓度 TSC 对胶束流变性能的影响

2.4 不同 TSC 添加量对酪蛋白粒径的影响

正常的牦牛奶酪蛋白胶束的直径约在 100~300 nm,相比于普通牛奶酪蛋白的直径,牦牛奶酪蛋白的胶束更大,TSC 可使酪蛋白胶束解离形成小的亚胶束,可能改变 MTGase 交联位点的个数,从而影响凝胶的强度和持水力,为了探究经过 TSC 处理以后的酪蛋白胶束的直径是否发生了改变,将 TSC 分别按照 0 mmol/L、10 mmol/L、30 mmol/L、50 mmol/L 的浓度添加到适量脱脂奶中,搅拌均匀后加入 MTGase,再次搅拌均匀,用移液枪取液 125 μ L 于 25 mL 容量瓶中,用去离子水定容,测量粒径。

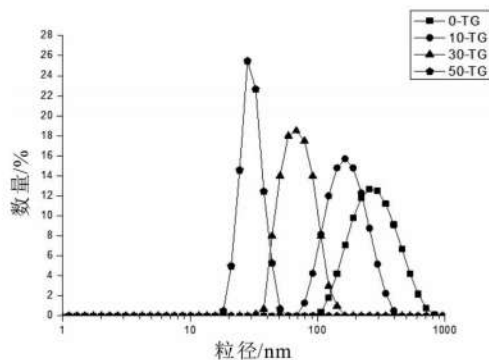


图5 不同 TSC 对酪蛋白粒径的影响

TSC 协同 MTGase 处理的牦牛乳酪蛋白胶束尺寸的影响见图 5。随着 TSC 浓度的增加,颗粒的平均直径呈现明显的下降趋势,未添加柠檬酸钠的样品,粒径在 100~400 nm 之间,而添加柠檬酸钠 50 mmol/L 的样品,粒径分布在 20~50 nm 之间。结果表明凝乳分散体中的酪蛋白胶束的粒径随着 TSC 浓度的增加而降低。有研究已证明,钙离子螯合剂可以通过从胶束中去除 Ca^{2+} 来破坏酪蛋白胶束框架,导致酪蛋白胶束的解离,使大颗粒的胶束分解成小颗粒的亚结构,因此柠檬酸根离子会降低酪蛋白胶束的粒径。酪蛋白颗粒的粒径越小,其比表面积越大,暴露出更多的酶结合位点,易于 MTGase 的结合,理论上 MTGase 对其交联的效率越高,形成的凝胶强度越大。

2.5 酪蛋白胶束的重组

相对于其他研究中直接添加 MTGase,本实验先经过 TSC 处理的优势如图 6 所示。

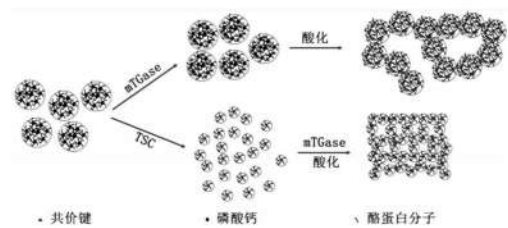


图6 柠檬酸钠作用示意图

酪蛋白胶束直接经过 MTGase 处理后,虽然形成了相应共价键,但是其凝胶结构并未被打开,只在胶束之间形成了共价键,形成的共价键数量少,在后期的酸凝过程中,胶束之间的结合仍然较为松散,凝胶性弱;在经过 TSC 处理后,酪蛋白胶束之间的非共价键作用被破坏,酪蛋白单体释放,暴露出更多的酶结合位点,此时再经过 MTGase 处理后,形成了更多的共价键,经过酸凝处理后,形成了致密的网络结构,其持水力和凝胶稳定性大幅度提高。

3 结论

在本研究中,研究了 TSC 对酸诱导的 MTGase 处理的胶束酪蛋白凝胶的质构特性和微观结构的影响。得出结论:TSC 能螯合酪蛋白胶束中的 Ca^{2+} ,破坏天然的酪蛋白胶束,使天然酪蛋白胶束分解成较小的酪蛋白亚微胶粒,交联位点暴露,有利于 MTGase 对其进行重新组合,经过酸凝后形成的凝胶比直接用 MTGase 形成的凝胶更稳定。酪蛋白胶束首先被 TSC 解离,然后与 MTGase 交联(处理组 1)比先用 MTGase 交联,再用 TSC 处理(处理组 2)更能形成稳定的酸性凝胶。因此,当 TSC 将牦牛乳酪蛋白胶束分解成更小的颗粒后,再经过 MTGase 处理和酸诱导形成的凝胶,将具有更高的硬度,形成的网络结构均匀且致密,因此持水能力有很大提升,并且在一定范围内(0~30 mmol/L),TSC 浓度越大,形成的凝胶越强,持水能力越好。

(下转第 35 页)

- [32] Fuentes M C, Calsamiglia S, Fievez V, et al. Effect of pH on ruminal fermentation and biohydrogenation of diets rich in omega-3 or omega-6 fatty acids in continuous culture of ruminal fluid[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 169(1-2):0-45.
- [33] Van Nevel C J, Demeyer D I. Influence of pH on lipolysis and biohydrogenation of soybean oil by rumen contents in vitro[J]. *Reprod Nutr Dev*, 1996, 36(1):53-63.
- [34] Lennarz W J. Lipid metabolism in the bacteria[J]. *Adv Lipid Res*, 1966, 4:175-225.
- [35] Jouany J. P, Michalet Doreau B, Doreau M. Manipulation of the rumen ecosystem to support high-performance beef cattle-review[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2000, 13(1):96-114.
- [36] 马燕芬. 通过调控草料改善牛奶中脂肪酸成分[J]. *饲料工业*, 2008, 29(11):14-19.
- [37] 周玲. 广西地区奶水牛及娟姗奶牛生产性能、乳中氨基酸和脂肪酸的比较研究[D]. 广西大学, 2017.
- [38] 黄世群, 罗玲, 周虹, 等. 红原牦牛奶与荷斯坦牛奶氨基酸和脂肪酸含量比较分析[J]. *山西农业科学*, 2017, 45(8):1249-1252.
- [39] Dhiman T R, Anand G R, Satter L D, et al. Conjugated linoleic acid content of milk from cows fed different diets[J]. *Journal of Dairy Science*, 1999, 82(10):2146-56.
- [40] Schroeder G F, Couderc J J, Bargo F, et al. Milk production and fatty acid profile of milkfat by dairy cows fed a winter oats (*Avena sativa* L.) pasture only or a total mixed ration[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2005, 48(2):187-195.
- [41] Yang G, Bu D P, Wang J Q, et al. Duodenal infusion of α -linolenic acid affects fatty acid metabolism in the mammary gland of lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(10):5821-5830. DOI: 10.3168/jds.2011-4893.
- [42] 刘庆生, 王加启, 卜登攀, 等. 灌注法生产 α -亚麻酸牛奶的氧化稳定性研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(12):33-38.
- [43] 黄显慈. 提高牛奶中多不饱和脂肪酸含量的方法概况[J]. *食品与发酵科技*, 1995(3):45-46.
- [44] Ryman V E, Packiriswamy N, Norby B, et al. Supplementation of linoleic acid (C18:2n-6) or α -linolenic acid (C18:3n-3) changes microbial agonist-induced oxylipid biosynthesis[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(3):1870-1887.
- [45] Pi Y, Gao S T, Ma L, et al. Effectiveness of rubber seed oil and flaxseed oil to enhance the α -linolenic acid content in milk from dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016:S0022030216302429.
- [46] 金曙光, 双金, 包鹏云, 等. 探讨富含 α -亚麻酸的添加剂对奶牛生产性能及乳中脂肪酸组成的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2004(12):16-19.
- [47] 何天培. 谈提高乳脂中不饱和脂肪酸的含量[J]. *中国奶牛*, 1991(3):25-26.
- [48] Han R, Zheng N, Zhang Y, et al. Milk fatty acid profiles in Holstein dairy cows fed diets based on corn stover or mixed forage[J]. *Archives of Animal Nutrition*, 2014, 68(1):63-71.
- [49] Moallem U, Vyas D, Teter B B, et al. Transfer rate of α -linolenic acid from abomasally infused flaxseed oil into milk fat and the effects on milk fatty acid composition in dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(9):5276-5284.
- [50] Bu D P, Wang J Q, Dhiman T R, et al. Effectiveness of oils rich in linoleic and linolenic acids to enhance conjugated linoleic acid in milk from dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(2):998-1007.

(上接第21页)

参考文献:

- [1] APPLE, 王旭峰. 破译牦牛奶的营养价值[J]. *消费指南*, 2008(11):24-25.
- [2] 刘冬, 黄玉军, 赵海晴, 等. 牦牛乳蛋白质组成及特性[J]. *乳业科学与技术*, 2013(03):20-23.
- [3] 吴春生, 李键, 寿宇, 等. 牦牛乳及牦牛酸乳营养价值的研究现状[J]. *乳业科学与技术*, 2012(03):43-46.
- [4] 李晓晖. 牛乳中酪蛋白的结构特性及其应用[J]. *食品工业*, 2002(01):29-31.
- [5] 方海田, 德力格尔桑, 刘慧燕. 牛乳中酪蛋白胶束结构理论模型的研究进展[J]. *农业科学研究*, 2006(03):86-89.
- [6] 韩清波, 刘晶. 酪蛋白胶束结构及其对牛乳稳定性的影响[J]. *中国乳品工业*, 2007(02):43-44.
- [7] 范金波, 王鹏杰, 周素珍, 等. 酪蛋白胶束结构和理化性质的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2014(03):396-400.
- [8] 王鹏杰. 牦牛乳酪蛋白胶束理化性质的研究[D]. 甘肃农业大学, 2013.
- [9] Schorsch C, Carrie H, Clark A H, et al. Cross-linking casein micelles by a microbial transglutaminase conditions for formation of transglutaminase-induced gels[J]. *International Dairy Journal*, 2000, 10(8):519-528.
- [10] 陈开霜, 陈美芳, 于博, 等. 转谷氨酰胺酶在凝固型麦冬酸奶中的应用研究[J]. *中国酿造*, 2017(09):158-162.
- [11] 王银, 张富新, 王毕妮, 等. 谷氨酰胺转氨酶添加量对酸羊乳凝胶特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017(11):119-124.
- [12] Sharma R, Lorenzen P C, Qvist K B. Influence of transglutaminase treatment of skim milk on the formation of ϵ -(γ -glutamyl)lysine and the susceptibility of individual proteins towards crosslinking[J]. *International Dairy Journal*, 2001, 11(10):785-793.
- [13] 王鹏杰, 甘伯中, 杨敏, 等. 酸凝乳凝胶形成机理的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012(13):420-423.
- [14] 李昌盛, 张富新, 邹鲤岭, 等. 整合剂对羊乳凝乳特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2009(02):71-73.
- [15] O'sullivan M M, Kelly A L, Fox P F. Influence of transglutaminase treatment on some physico-chemical properties of milk[J]. *Journal of Dairy Research*, 2002, 69(03).
- [16] 王国骄, 甘伯中, 文鹏程, 等. 热处理和酸诱导对鲜牦牛乳酪蛋白功能性质的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2013(01):129-134.
- [17] 范宇, 陈历俊, 赵常新. 酸奶质构影响因素研究进展[J]. *中国乳品工业*, 2009(07):30-34.
- [18] 李荣华. 乳蛋白对凝固型酸奶流变学特性及微观结构的影响[D]. 东北农业大学, 2007.