

Preparation and Physicochemical Properties of Curcumin Fortified Yogurt

Yuting Liu, Lei Shi, Jinglei Li*

School of Food and Bio-Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui
Email: *lijinglei2010@hotmail.com

Received: Oct. 25th, 2018; accepted: Nov. 6th, 2018; published: Nov. 13th, 2018

Abstract

The solubility of natural curcumin is very limited. In order to improve its application in food, curcumin fortified yogurt (CFY) was prepared. First, the yogurt samples were tested for acidity, pH value, water-holding capacity, main nutrients, texture attributes and microstructure. Secondly, the effects of curcumin addition on antioxidant activities, number of lactic acid bacteria and sensory quality of yogurt samples were studied. Finally, the release profile and bioavailability of curcumin in CFY were determined by *in vitro* digestion test. The results show that curcumin addition showed no significant impact on major physical-chemical properties including acidity, pH value, water-holding capacity, major nutrient content, texture attributes as well as its microstructure. Additionally, CFY showed higher antioxidant activities compared with plain yogurt examined by several conventional assays and lactobacillus number in CFY sample was not reduced compare with plain yogurt. But curcumin may decrease flavor and whole acceptability score which requires further investigation. At last, *in vitro* digestion test was found that curcumin could be released from CFY in a controlled manner. It was calculated as 63.90% after *in vitro* gastric and intestinal digestion test. As conclusion, CFY could be further developed as a novel yogurt product with high nutritional value and multiple functional properties.

Keywords

Yogurt, Curcumin, Solubility, Digestion, Bio-Accessibility

姜黄素发酵乳的制备及理化性质研究

刘玉婷, 石磊, 李井雷*

合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽 合肥
Email: *lijinglei2010@hotmail.com

收稿日期: 2018年10月25日; 录用日期: 2018年11月6日; 发布日期: 2018年11月13日

*通讯作者。

摘要

姜黄素的水溶解度非常低,为了扩大其在食品中的应用范围,我们制备了姜黄素发酵乳。首先对发酵乳样品进行酸度、pH值、持水性、主要营养成分、质构性质以及微观结构等理化性质的检测;其次研究了姜黄素对发酵乳样品的抗氧化性、乳酸菌含量以及感官品质的影响;最后利用体外消化试验测定了姜黄素在发酵乳中的释放曲线和生物利用率。结果表明,添加姜黄素对发酵乳的酸度、pH值、持水性、主要营养成分、质构性质以及微观结构没有显著影响;此外,姜黄素发酵乳与普通发酵乳相比表现出更高的抗氧化活性,且具有相似的乳酸菌数量,但添加姜黄素会降低感官评价得分,因此姜黄素发酵乳的生产工艺需要进一步的改进。最后,体外消化结果表明姜黄素可以以缓释方式从姜黄素发酵乳中释放出来,经体外胃和肠道消化试验后,姜黄素的生物利用率为63.90%。研究结果显示,姜黄素发酵乳具有进一步发展为具有高营养价值和多功能特性的新型发酵乳产品的潜能。

关键词

发酵乳, 姜黄素, 溶解度, 消化, 生物利用率

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

姜黄素是从多年生草本植物姜黄中分离出的含有苯环结构的黄色色素,作为一种重要的草药成分在印度、中国等国家广泛使用。姜黄素来源于姜科姜黄属植物姜黄的干燥根茎,传统中医认为其具有破血行气、通经止痛等功能,常用于治疗胸胁刺痛,闭经,风湿肩臂疼痛,跌打肿痛[1]。现代科学研究表明,姜黄素具有抑制微生物污染,抑制炎症,抗癌,预防阿尔茨海默症等生物活性。此外,姜黄素还具有很高的安全性,因此在功能性食品和药品领域都有广泛的应用空间[2]。

姜黄素具有较强的疏水性和稳定的晶体结构,导致其在水溶液中溶解度极低。然而,大部分功能性食品通常用水做溶剂,所以姜黄素的低溶解度极大地限制了其在水基营养制剂中的使用。研究人员普遍使用两种方法来解决这个问题。第一种是设计使用具有吸附,保护和缓释的传递系统,例如纳米胶束,纳米乳液,纳米复合物和纳米脂质体,作为载体将姜黄素包封在内部,提高其水溶解性和稳定性[3] [4] [5]。但是,为了制备纳米传递系统,通常使用合成聚合物和大量有机溶剂,导致传递体系不能在食品中直接使用。为了扩大姜黄素在食品中的使用范围,近年来研究人员报导了更环保的材料和方法。Kang Pan 等人使用喷雾干燥法制备姜黄素包封的酪蛋白纳米胶囊,与天然姜黄素相比,这种纳米胶囊中的姜黄素水溶性和生物活性都大大提高[6]。我们的之前的研究也表明包封姜黄素淀粉纳米颗粒大大提高了姜黄素的水溶性和稳定性[5]。然而,由于制备过程复杂,费用较高,在食品中仍然不能直接使用含有姜黄素的传递系统。第二种方法是直接使用姜黄素制备食品。据报导,Brij Pal Singh 等人研制出一种添加姜黄素的乳清发酵大豆饮料[7],像乳清这样的蛋白质可以通过疏水相互作用吸附姜黄素,因此可以将0.02%浓度的姜黄素添加到发酵的大豆饮料中[8]。

发酵乳作为世界上最受欢迎的乳制品之一,是营养强化的理想食品。在过去的几十年中,已经报道了用维生素,矿物质,膳食纤维和许多其他营养物质强化的发酵乳[9] [10] [11]。我们之前报导了几种用茶,黑豆和其他植物提取物强化的功能性发酵乳[12] [13] [14]。但对于像姜黄素这样的高疏水性化合物,

将它们直接用于发酵乳的研究很少。牛奶中含有的蛋白质可以和姜黄素相互作用并进行吸附，以此作为基础，我们制备研究了姜黄素发酵乳。

在这项研究中，我们制备了姜黄素发酵乳，并研究了其主要的物理化学性质。研究表明，姜黄素发酵乳可提高姜黄素的生物活性，同时本研究结果可有助于其他疏水性化合物强化乳制品的制备。

2. 材料与方法

2.1. 材料

雀巢全脂奶粉：附近超市；姜黄素：上海麦克林生化公司；嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌、青春双歧杆菌：合肥工业大学微生物研究所保藏；所有其他试剂均为分析级，无需进一步纯化即可使用。

2.2. 方法

2.2.1. 姜黄素发酵乳的制备

将全脂奶粉溶解在蒸馏水中并不断搅拌，得到固体含量约 12% 的复原乳。然后向乳液中加入姜黄素粉末，使姜黄素含量分别为 0.5%、0.6%、0.8%，用 JHG-Q54-P60 均质机均质 15 分钟。均质结束后，将混合液在超声波仪中处理 1 小时，再用磁力搅拌器搅拌 2 小时以进一步溶解姜黄素。接着在 85℃ 下进行巴氏杀菌 15 分钟，并迅速冷却至室温。最后按接种量为 5% (与奶粉的重量比) 进行接种乳酸菌，其中保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、青春双歧杆菌按 1:1:1 进行接种。接种完成后在 43℃ 下发酵 5 小时。待发酵乳发酵后，将发酵乳样品在 4℃ 下储存过夜以进行熟化。

2.2.2. 酸度，pH 和持水性的测定

酸度：采用滴定法测定发酵乳的酸度，使用酚酞作为指示剂，用 0.1 mol/L NaOH 中和发酵乳样品，记录 NaOH 的消耗量，最终将发酵乳的酸度表示为乳酸百分比。pH：在室温下，用玻璃棒将样品搅拌均匀，用 pH 计测量发酵乳的 pH 值。持水性：称取 10 g 发酵乳样品置于离心管中，用 3000 rpm/min 离心 15 分钟，然后去除上清液，称重。样品持水性计算公式如下：持水性/% = $(W1/W2) \times 100$ [15]，式中：W1 为样品离心后的重量，g；W2 为样品离心前的重量，g。

2.2.3. 乳酸菌总数

按照 GB4789.35-2016 进行检测[16]。

在 MRS 琼脂培养基上用样品稀释液涂布检测保加利亚乳杆菌，在厌氧培养箱中于 45℃ ± 1℃ 培养 72 ± 2 小时；在 M17 培养基上用样品检测稀释液涂布检测嗜热链球菌，在厌氧培养箱中于 37℃ ± 1℃ 培养 48 ± 2 小时；在 MRS-raffinose 培养基用样品稀释液涂布检测青春双歧杆菌，在 37℃ ± 1℃ 下在厌氧培养箱中培养 72 ± 2 小时。在培养结束后，对三种培养基上形成的菌落单位(CFU)分别进行计数。

2.2.4. 姜黄素浓度测定

将一定量的姜黄素发酵乳称重，并冻干 24 小时。在超声处理下用乙醇从冻干的发酵乳中萃取姜黄素，萃取数次，直到在萃取溶液中没有检测到明显的黄色。收集在萃取过程中用到的乙醇，并在 UV-vis 分光光度计上在 420 nm 下检测其吸光度。根据标准姜黄素乙醇溶液的校准曲线计算姜黄素的浓度。

2.2.5. 主要营养成分测定

根据 AOAC 方法确定主要营养成分，包括水，灰分，蛋白质，脂质和总碳水化合物含量[12]。

2.2.6. 微观结构

在普通光学显微镜下观察姜黄素发酵乳和普通发酵乳的微观结构，并使用由同一公司提供的商业软

件拍摄 100, 200, 400 放大的图片。将发酵乳样品冻干并用离子镀金, 上镜观察, 然后用扫描电子显微镜 SEM (JSM-6490LV, JEOL, Japan) 上观察其显微结构[17]。

2.2.7. 质构性质检测

采用 TA-XTPlus 质构仪, 对姜黄素发酵乳和普通发酵乳的质地, 硬度(g), 稠度(g/sec), 黏聚性(g)和粘性指数(g/sec)进行测定[18]。

2.2.8. 抗氧化活性测定

根据之前的实验方法[19] [20], 通过 DPPH, ABTS, FRAP 和 OH 自由基清除测定法测定普通发酵乳和姜黄素发酵乳的抗氧化活性。

2.2.9. 感官评估

八名具有食品专业背景的人员组成感官评定小组, 分别从外观, 质地, 风味和整体接受度四个方面对姜黄素发酵乳评分。感官质量评分如下: 1 表示非常不可接受, 2~4 表示不可接受-几乎不可接受, 5~9 表示可接受-非常可接受, 10 表示非常可接受。

2.2.10. 在姜黄素发酵乳中释放姜黄素的特征和生物利用率

根据我们之前的研究方法, 在模拟胃液(SGF)和模拟肠液(SIF)中测定姜黄素发酵乳中的姜黄素的释放曲线[3] [5]。将 2.0 g NaCl, 7.0 mL HCl (36% w/w), 10 mg 猪胃蛋白酶和 1 g 吐温 80 溶解在 1 L 蒸馏水中制备 SGF, 将 pH 值调节至 1.2 后, 将一小部分(5 g)姜黄素发酵乳放入玻璃小瓶中, 向其中加入 50 mL 预热到 37°C 的 SGF。将含有 SGF 的玻璃瓶转移至在 37°C 和 120 rpm 振荡的水浴锅中温育 2 小时。在胃消化阶段结束后, 用 Na₂CO₃ 溶液将消化液的 pH 值调节至 7.0。将胰腺粉末和胆汁提取物分别以 4 g/L 和 25 g/L 的浓度溶解于 PBS 7.5 溶液中来制备 SIF, 然后向中和后的胃消化液中加入 SIF 开始肠道消化, 依旧在 37°C 和 120 rpm 振荡的水浴中温育 2 小时。在温育结束后, 分别将模拟胃液或模拟肠液转移到离心管中, 并以 4500 rpm 离心 10 分钟以分离上清液, 并在紫外分光光度计上检测姜黄素的浓度。

姜黄素发酵乳中姜黄素生物利用率计算为体外消化后姜黄素与消化试验前的姜黄素发酵乳中的姜黄素总量的重量比。

3. 结果和讨论

3.1. 姜黄素发酵乳的成分优化

由于姜黄素在水溶液中的溶解度非常低, 所以增加其水溶性是更好地应用姜黄素于前提条件。奶粉中含有三种主要蛋白质, 其中酪蛋白和乳清含量最多。据报导, 姜黄素可通过疏水作用与酪蛋白和乳清蛋白形成复合物, 大大提高其水溶性[6] [8]。在这里, 我们认为奶粉中的蛋白质可以和姜黄素形成复合物, 因此可用于制备姜黄素发酵乳。

经过几次初步实验, 我们优化了姜黄素发酵乳的制备步骤。具体制备过程如下: 在 100 mL 蒸馏水中溶解 12 g 奶粉(全脂奶粉: 脱脂奶粉重量比为 5:1)和 0.5%~0.8%姜黄素(基于奶粉的重量), 超声处理 1 小时, 磁力搅拌 2 小时。将奶粉溶液在室温下储存过夜以沉淀未溶解的姜黄素。发酵过程与方法部分中描述的相同。因为姜黄素与酪蛋白和乳清蛋白分子复合, 同时超声和搅拌都增加了姜黄素在乳溶液中的溶解。

姜黄素发酵乳发酵后, 颜色为淡黄色且有姜黄素的轻微气味。主要物理性质总结在表 1 中。普通发酵乳和姜黄素发酵乳的 pH 值和酸度没有显著差异, 这意味着添加姜黄素对发酵过程的影响较小。发酵乳的酸度是衡量发酵乳品质的重要指标[21], 反映了发酵乳中有机酸的含量。在发酵乳发酵 5 小时后, 发

酵乳的 pH 值从中性降低至约 4.35 [22]。持水性反映了发酵乳的持水能力和质地特性。结果表明, 姜黄素发酵乳的持水力略低, 但差异不显著。以前的报告表明, 在制备发酵乳时可以使用超声处理, 由于总脂肪膜表面积增加, 可以增加发酵乳的持水能力[23]。但由于姜黄素与酪蛋白和乳清蛋白相互作用, 这可能会降低发酵乳中蛋白质的持水能力。添加姜黄素对发酵乳主要营养成分的影响结果列于表 2 中。显然, 添加姜黄素对 pH 值, 酸度, 持水力和主要营养成分的影响非常有限, 说明姜黄素发酵乳和普通发酵乳相比, 理化性质没有显著差异。

Table 1. Major physical property of CFY and plain yogurt

表 1. 不同姜黄素添加量制备发酵乳的物理性质

姜黄素添加量/%	pH 值	酸度(g/100 g)	持水性(mL/100 g)
0	4.33 ± 0.14	0.81 ± 0.01	55.57 ± 5.54
0.5	4.21 ± 0.11 ^{ns}	0.86 ± 0.03 ^{ns}	51.34 ± 7.51 ^{ns}
0.6	4.16 ± 0.05	0.88 ± 0.03	53.37 ± 7.94
0.8	4.26 ± 0.07	0.86 ± 0.02	51.76 ± 6.86

注: ns 表示同一列中没有显著差异

Table 2. Nutritional parameters of CFY and plain yogurt

表 2. 不同姜黄素添加量制备发酵乳的主要营养成分

姜黄素添加量/%	含水量/%	灰分含量/%	蛋白质含量/%	脂质含量/%	碳水化合物含量/%
0	69.82 ± 0.87	0.39 ± 0.05	4.20 ± 0.33	5.50 ± 0.68	20.09 ± 1.49
0.5	68.86 ± 1.21 ^{ns}	0.43 ± 0.03 ^{ns}	4.26 ± 0.21 ^{ns}	5.52 ± 0.57 ^{ns}	20.35 ± 1.09 ^{ns}
0.6	68.31 ± 1.45	0.44 ± 0.02	4.04 ± 0.35	5.53 ± 0.63	21.68 ± 2.33
0.8	68.53 ± 2.04	0.47 ± 0.06	4.10 ± 0.09	5.73 ± 0.31	21.17 ± 2.54

注: ns 表示同一列中没有显著差异

3.2. 姜黄素含量和总酚含量

姜黄素的特点是溶解度低, 在紫外线照射和热处理等环境中不稳定。即使通过姜黄素与乳蛋白形成复合物有助于溶解姜黄素, 但实际溶解的姜黄素并不多。在搅拌和超声处理后, 可以在乳液的底部检测到姜黄素沉淀。但发酵后, 观察到部分的姜黄素溶解在发酵乳中, 这与之前的研究一致[24]。在发酵乳发酵期间, pH 值降低, 而姜黄素在酸性溶液中的溶解度较低, 因此我们推测乳酸菌发酵可以促进姜黄素与乳蛋白或其水解产物的络合作用, 但这仍需要进一步研究证明。表 3 是发酵乳和姜黄素发酵乳的姜黄素含量和总酚含量结果。姜黄素发酵乳的姜黄素浓度在 0.25 至 0.30 mg/g 之间, 这意味着前处理和发酵过程溶解了约 40%至 50%的姜黄素, 姜黄素-蛋白质复合物比率为 2.06~2.67 mg/g, 而在 0.5%姜黄素发酵乳中姜黄素的溶解性和复合物比率较高。因此, 在随后的检测中选择姜黄素发酵乳(0.5%)进一步研究。酪蛋白和乳清蛋白可以以不同方式与姜黄素相互作用以增强其溶解度, 但由于使用的方法不同, 文献中报导的结合比率也不同[8] [25]。此外, 乳蛋白在发酵过程中部分水解产生短肽, 短肽可能更容易接近吸附姜黄素, 进一步增加其在发酵乳中的溶解度[26]。

如上所述, 姜黄素在水性环境中具有非常低的溶解度, 这是食品中添加姜黄素的一大障碍。在最近的一项研究中, 姜黄素的水溶度为 $0.39 \pm 0.05 \mu\text{g/mL}$ [27]。与报导值相比, 姜黄素发酵乳中的姜黄素浓度比天然姜黄素浓度高 650 倍, 这也表明发酵乳可以有效地提高姜黄素溶解度。

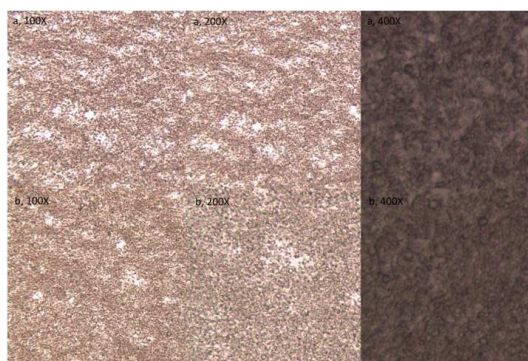
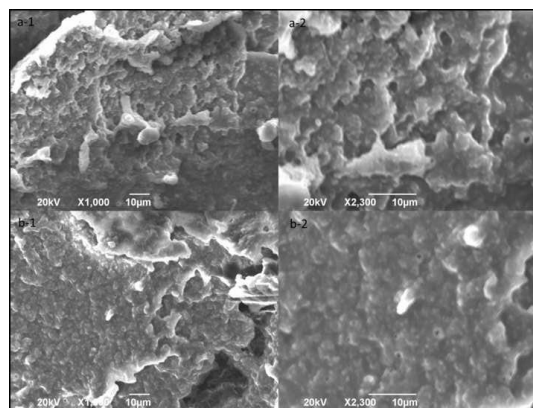
Table 3. Curcumin content and total phenol content of CFY and plain yogurt**表 3.** 不同姜黄素添加量制备发酵乳的姜黄素和总酚含量

姜黄素添加量/%	姜黄素含量(mg/g)	装载效率(%)	蛋白质络合比(mg/g)	总酚含量(mg/g)
0	-	-	-	0.19 ± 0.05 ^b
0.5	0.26 ± 0.04 ^{ns}	52.0 ± 0.94 ^a	2.17 ± 0.13 ^b	0.48 ± 0.08 ^a
0.6	0.25 ± 0.05	41.7 ± 1.37 ^b	2.08 ± 0.09 ^b	0.45 ± 0.06 ^a
0.8	0.31 ± 0.03	38.8 ± 2.69 ^c	2.67 ± 0.07 ^a	0.44 ± 0.11 ^a

注: 姜黄素基于校准曲线 $Y = 0.1645 * X - 0.0158$, $r^2 = 0.9999$ 计算, 其中 X 代表姜黄素浓度(ppm), Y 代表 419 nm 处的吸光度; 总酚含量基于校准曲线 $Y = 0.0089 * X + 0.0714$, $r^2 = 0.998$ 计算; ns 表示同一列中没有显著差异, 同列字母不同表示差异显著

3.3. 微观结构

由于姜黄素具有典型晶体结构, 可以在显微镜下进行检测, 姜黄素发酵乳微观结构如图 1 和图 2 所示。在显微镜下放大 100, 200 和 400 倍数的图像结果显示, 在普通发酵乳和姜黄素发酵乳中, 主要结构是酪蛋白胶束或其聚集体, 这和先前所报导结果一致[28]。明显可以看出, 姜黄素发酵乳中的姜黄素晶体消失, 推测其与酪蛋白和乳清蛋白相互作用, 主要以分子或无定型状态存在。通过如图 2 所示的 SEM 图像进一步证明了这一点, 在普通发酵乳和姜黄素发酵乳图像中酪蛋白和酪蛋白聚集体均占优势。

**Figure 1.** Microstructure of CFY (100×, 200×, 400×)**图 1.** 姜黄素发酵乳的微观结构(100×、200×、400×)**Figure 2.** SEM of CFY (1000×, 2300×)**图 2.** 姜黄素发酵乳的电镜扫描图(1000×、2300×)

之前报道的姜黄素 SEM 图像显示姜黄素通常为长的板状或针状, 其尺寸约为 $30\ \mu\text{m}$ [29]。据推测, 姜黄素可能存在于姜黄素发酵乳中作为无定形状态, 这之前的报导一致[6] [8]。当存在于无定形状态时, 姜黄素不仅具有较高的溶解度, 而且具有较高的抗氧化性和生物利用率, 因此在下面的研究中, 我们研究了姜黄素发酵乳的抗氧化性, 释放曲线和其它主要理化性质。

3.4. 质构性质

姜黄素发酵乳和普通发酵乳的质构性质参数如表 4 所示。姜黄素发酵乳和普通发酵乳具有相似的硬度, 稠度和粘聚性, 但普通发酵乳的粘性指数高于姜黄素发酵乳。姜黄素发酵乳的较低粘度指数是由于超声处理以及姜黄素添加引起。一方面, 超声和热处理联合诱导更强的发酵乳结构; 另一方面, 姜黄素减少了酪蛋白聚集体之间的氢键的相互作用, 因此降低了粘度指数。

Table 4. Texture properties of CFY and plain yogurt

表 4. 姜黄素发酵乳(0.5%)和普通发酵乳的质构性质

姜黄素添加量/%	硬度(g)	稠度(g/sec)	黏聚性(g)	粘性指数(g/sec)
0	$105.07 \pm 5.37^{\text{ns}}$	$1804.70 \pm 126.89^{\text{ns}}$	$-36.17 \pm 6.86^{\text{ns}}$	$-377.92 \pm 33.58^{\text{a}}$
0.5	100.38 ± 4.67	1676.46 ± 77.82	-53.01 ± 8.31	$-68.34 \pm 1.13^{\text{b}}$

注: ns 表示同一列中没有显著差异, 同列字母不同表示差异显著。

3.5. 抗氧化能力

三种姜黄素发酵乳样品中的姜黄素浓度在 $0.26\sim 0.31\ \text{mg/mL}$ 范围内, 但没有显著差异。但姜黄素在姜黄素与奶粉的重量比为 0.5% 时与奶粉中蛋白质结合效率最高, 所以选取 0.5% 的姜黄素发酵乳测定其抗氧化能力。

通过四种常规方法评估发酵乳的抗氧化性, 包括 DPPH, ABTS, FRAP 和 OH 自由基清除试验, 结果如图 3 所示, 普通发酵乳在所有抗氧化试验中显示出强抗氧化能力。在发酵期间, 作为乳蛋白的主要成分的酪蛋白和乳清被水解成具有显著抗氧化活性的寡肽[30]。姜黄素发酵乳的 DPPH 自由基清除能力与普通发酵乳类似, 因为两种发酵乳样品均显示出超过 90% 的 DPPH 自由基清除率。在 ABTS, FRAP 和 OH 清除试验中, 由于姜黄素是一种强抗氧化剂, 因此姜黄素发酵乳表现出更高的抗氧化能力。因此我们可以看出, 添加姜黄素提高了发酵乳的抗氧化能力。

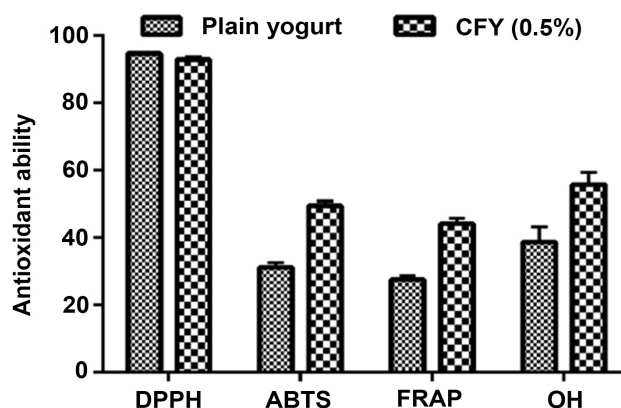


Figure 3. Antioxidant ability of CFY (0.5%) and plain yogurt

图 3. 姜黄素发酵乳(0.5%)和普通发酵乳的抗氧化性

3.6. 乳酸菌数量

测定了乳酸菌数,结果如图4所示。在本研究中,我们使用 Anaero Pack 为乳酸菌培养提供厌氧环境。普通发酵乳和姜黄素发酵乳的菌落形成单位与报告值相近。从结果可以看出,添加姜黄素对嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌、青春双歧杆菌的生长没有显著影响。据报导,因为姜黄素可显著抑制产气荚膜梭菌、大肠杆菌,小肠结肠炎耶尔森氏菌和金黄色葡萄球菌等病原体的生长,但对青春双歧杆菌,双歧杆菌,长双歧杆菌和乳酸杆菌等益生菌无抑制作用[31][32]。所以姜黄素的选择性抗微生物性质可以促进发酵乳的安全性并延长其储存时间,同时不会对发酵过程产生负面影响。

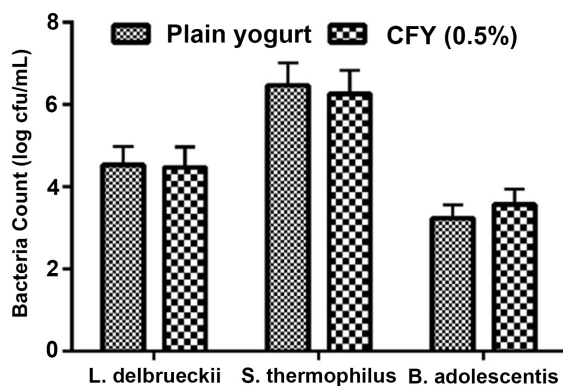


Figure 4. Bacteria count of CFY (0.5%) and plain yogurt
图4. 姜黄素发酵乳(0.5%)和普通发酵乳的乳酸菌含量

3.7. 感官品质

研究中根据外观,质地,风味和整体可接受度评价发酵乳和姜黄素发酵乳的感官品质。结果表明如图5所示,姜黄素发酵乳的外观和质地与普通发酵乳的外观和质地没有显著差异。姜黄素发酵乳的颜色类似于芒果或香蕉的黄色,因此,姜黄素发酵乳的外观评分略高于普通发酵乳。添加姜黄素对发酵过程几乎没有影响,所以姜黄素发酵乳的质地特性与普通发酵乳的质地特性相似。由于姜黄素可以完全溶解,在感官评价试验中未检测到颗粒感或砂砾感。然而,姜黄素发酵乳有一种类似于草药的特殊的味道,这也是姜黄素发酵乳在感官评价和整体可接受性方面得分较低的原因。针对这一问题,有人提出用环糊精等材料包裹姜黄素以掩盖令人不快的味道[33]。另外,其他的添加了功能性材料的配方发酵乳,如添加茶,知母和山核桃的发酵乳,也同样面临其风味问题[12][13][34]。

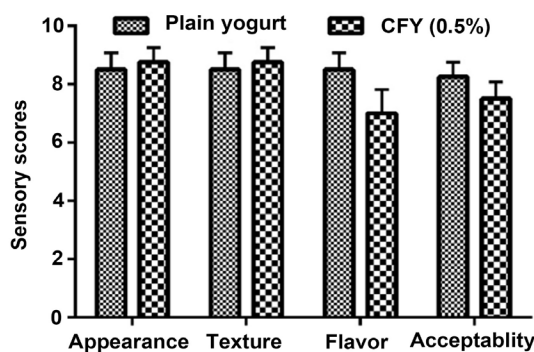


Figure 5. Sensory scores of CFY (0.5%) and plain yogurt
图5. 姜黄素发酵乳(0.5%)和普通发酵乳的感官评价

3.8. 姜黄素的释放曲线和生物利用率

在体外胃和肠道消化条件下, 检测来自姜黄素发酵乳中的姜黄素的释放曲线。结果如图 6 所示, 姜黄素可以以缓释的方式释放出来。在胃消化阶段, 消化 90 分钟后姜黄素释放达到平衡状态。在胃消化阶段结束后, 姜黄素发酵乳中约 37.25% 的姜黄素被释放到胃消化物中。当肠道消化开始时, 释放速度显著增加并达到姜黄素含量的约 60%。在肠道消化结束时, 约 63.90% 的姜黄素被释放到消化物中。在肠道消化中, 胰腺分泌液中含有的蛋白酶进一步降解了姜黄素发酵乳的蛋白质和短肽, 加快了姜黄素的释放速度。另外, 体外消化后, 在模拟消化容器的底部可以看到少部分未消化的发酵乳碎片, 因此并非所有的姜黄素都被释放到模拟的消化溶液中。生物利用率表示为在完成肠道溶液模拟消化后, 释放到消化物中的姜黄素与姜黄素发酵乳中姜黄素总量的比率。姜黄素在姜黄素发酵乳中的生物利用率确定为 63.90%。

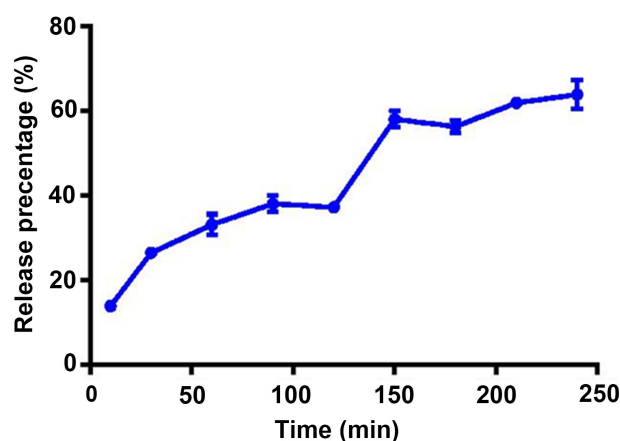


Figure 6. Release percentage of CFY (0.5%) and plain yogurt
图 6. 姜黄素发酵乳(0.5%)的姜黄素释放曲线

4. 结论

众所周知, 生物活性化合物如姜黄素、花青素、白藜芦醇等具有多种促进健康的功能。但由于溶解度低, 稳定性差和吸收率低, 直接食用通常会导致较低的生物利用率。为了更好地将这些天然活性物质应用于功能性食品中, 需要开发合适的传递系统或新型食品。在这项研究中, 我们在发酵乳中加入姜黄素, 并不影响发酵乳的主要理化性质, 同时还提高了姜黄素的溶解度和生物利用率。并且体外消化过程证明姜黄素可以以缓释方式释放, 因此可以提高姜黄素的生物利用率。对于感官评价, 姜黄素发酵乳有一些草药味, 这是姜黄素发酵乳在风味和整体可接受性方面得分较低的主要原因。因此, 在后续研究中, 可以使用纳米乳液等纳米递送系统来封装和掩盖姜黄素的风味, 并提高姜黄素发酵乳的品质。

基金项目

合肥工业大学校博士专项科研资助基金, JZ2016HGBZ0747。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 3 部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010.
- [2] 沃兴德, 洪行球, 高承贤. 姜黄素长期毒性试验[J]. 浙江中医药大学学报, 2000(24): 61-65.
- [3] Li, J., Hwang, I.C., Chen, X. and Park, H.J. (2016) Effects of Chitosan Coating on Curcumin Loaded Nano-Emulsion: Study on Stability and *in Vitro* Digestibility. *Food Hydrocolloids*, **60**, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.03.016>

- [4] Li, J., Shin, G.H., Chen, X. and Park, H.J. (2015) Modified Curcumin with Hyaluronic Acid: Combination of Pro-Drug and Nano-Micelle Strategy to Address the Curcumin Challenge. *Food Research International*, **69**, 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.12.045>
- [5] Li, J., Shin, G.H., Lee, I.W., Chen, X. and Park, H.J. (2016) Soluble Starch Formulated Nanocomposite Increases Water Solubility and Stability of Curcumin. *Food Hydrocolloids*, **56**, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.11.024>
- [6] Pan, K., Zhong, Q. and Baek, S.J. (2013) Enhanced Dispersibility and Bioactivity of Curcumin by Encapsulation in Casein Nanocapsules. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **61**, 6036-6043. <https://doi.org/10.1021/jf400752a>
- [7] Singh, D., Vij, S. and Singh, B.P. (2016) Antioxidative and Antimicrobial Activity of Whey Based Fermented Soy Beverage with Curcumin Supplementation. *Indian Journal of Dairy Science*, **69**, 171-177.
- [8] Liu, W.J., Chen, X.D., Cheng, Z.N. and Selornulya, C. (2016) On Enhancing the Solubility of Curcumin by Microencapsulation in Whey Protein Isolate via Spray Drying. *Journal of Food Engineering*, **169**, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.034>
- [9] 王丽爽, 赵秀红. 燕麦膳食纤维酸奶的研制[J]. 食品研究与开发, 2017(38): 91-95.
- [10] 杨淑妮, 李理. 全谷物酸奶的理化及功能特性研究[J]. 中国乳品工业, 2016(44): 17-20.
- [11] 任大勇, 陈青青, 荣凤君, 周亭亭, 王珂, 刘宏锋, 沈明浩. 苦荞麦酸奶的研制和质量特性分析[J]. 食品研究与开发, 2017(38): 102-105.
- [12] Su, N., Ren, L., Ye, H., Sui, Y., Li, J. and Ye, M. (2017) Antioxidant Activity and Flavor Compounds of Hickory Yogurt. *International Journal of Food Properties*, **20**. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1223126>
- [13] Ye, M., Liu, D., Zhang, R., Yang, L. and Wang, J. (2012) Effect of Hawk Tea (*Litsea coreana* L.) on the Numbers of Lactic Acid Bacteria and Flavour Compounds of Yoghurt. *International Dairy Journal*, **23**, 68-71. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2011.09.014>
- [14] Ye, M., Ren, L., Wu, Y., Wang, Y. and Liu, Y. (2013) Quality Characteristics and Antioxidant Activity of Hickory-Black Soybean Yogurt. *LWT-Food Science and Technology*, **51**, 314-318. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.027>
- [15] 王然. 杂粮复合酸奶的感官评价与理化性质研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(15): 95-99.
- [16] 马群飞. GB4789.35-2016《乳酸菌检验》解读[J]. 中国卫生标准管理, 2017, 8(16): 1-3.
- [17] 马力, 张国栋, 谢林. 酸凝乳超微结构的电镜观察[J]. 食品科学, 2004(25): 63-66.
- [18] 高奇. 凝胶型酸乳的制备及其质构流变特性研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡市: 江南大学, 2006.
- [19] 任丽. 植物型酸奶的制备、风味物质及抗氧化活性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [20] Wang, H., Jiang, X., Mu, H., Liang, X. and Guan, H. (2007) Structure and Protective Effect of Exopolysaccharide from *P. agglomerans* Strain KFS-9 against UV Radiation. *Microbiological Research*, **162**, 124-129. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.01.011>
- [21] 郭清泉, 张兰威, 王艳梅. 酸奶发酵机理及后发酵控制措施[J]. 中国乳品工业, 2001(29): 17-19.
- [22] 林伟锋, 刘宏锋, 赵谋明, 赵强忠. 酸奶发酵过程中物理性质和乳酸菌生长规律研究[J]. 中国乳品工业, 2005(33): 15-18.
- [23] 赵璞, 张书文, 刘鹭, 逢晓阳, 芦晶, 吕加平. 超声波改性酪蛋白后其特性的变化及其在凝固型酸奶凝胶中的应用[J]. 中国乳品工业, 2018(46): 4-8.
- [24] Kim, S.B., Kang, B.H., Kwon, H.S. and Kang, J.H. (2011) Anti-Inflammatory and Anti-Allergic Activity of Fermented Turmeric by *Lactobacillus johnsonii* IDCC 9203. *Korean Journal of Microbiology & Biotechnology*, **39**, 266-273.
- [25] Esmaili, M., Ghaffari, S.M., Moosavimovahedi, Z., Atri, M.S., Sharifzadeh, A., Farhadi, M., Yousefi, R., Chobert, J.M., Haertlé, T. and Moosavimovahedi, A.A. (2011) Beta Casein-Micelle as a Nano Vehicle for Solubility Enhancement of Curcumin; Food Industry Application. *LWT—Food Science and Technology*, **44**, 2166-2172. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.05.023>
- [26] Park, J.H., Kim, H.A., Park, J.H. and Lee, M. (2012) Amphiphilic Peptide Carrier for the Combined Delivery of Curcumin and Plasmid DNA into the Lungs. *Biomaterials*, **33**, 6542-6550. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.05.046>
- [27] Aditya, N.P., Yang, H., Kim, S. and Ko, S. (2015) Fabrication of Amorphous Curcumin Nanosuspensions Using β -Lactoglobulin to Enhance Solubility, Stability, and Bioavailability. *Colloids & Surfaces B Biointerfaces*, **127**, 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2015.01.027>
- [28] Alfaro, L., Hayes, D., Boeneke, C., Xu, Z., Bankston, D., Bechtel, P.J. and Sathivel, S. (2015) Physical Properties of a

- Frozen Yogurt Fortified with a Nano-Emulsion Containing Purple Rice Bran Oil. *LWT—Food Science and Technology*, **62**, 1184-1191. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.055>
- [29] Araiza-Calahorra, A., Akhtar, M. and Sarkar, A. (2018) Recent Advances in Emulsion-Based Delivery Approaches for Curcumin: From Encapsulation to Bioaccessibility. *Trends in Food Science & Technology*, **71**, 155-169. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.009>
- [30] Sah, B.N.P., Vasiljevic, T., Mckechnie, S. and Donkor, O.N. (2014) Effect of Probiotics on Antioxidant and Antimutagenic Activities of Crude Peptide Extract from Yogurt. *Food Chemistry*, **156**, 264-270. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.105>
- [31] Lee, H.S. (2006) Antimicrobial Properties of Turmeric (*Curcuma longa* L.) Rhizome-Derived Arturmerone and Curcumin. *Food Science and Biotechnology*, **15**, 559-563.
- [32] Wang, Y., Lu, Z., Wu, H. and Lv, F. (2009) Study on the Antibiotic Activity of Microcapsule Curcumin against Foodborne Pathogens. *International Journal of Food Microbiology*, **136**, 71-74. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.09.001>
- [33] Laokuldilok, N., Thakeow, P., Kopermsub, P. and Utama-Ang, N. (2016) Optimisation of Microencapsulation of Turmeric Extract for Masking Flavour. *Food Chemistry*, **194**, 695-704. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.150>
- [34] Zhang, R., Yang, L., Ji, J., Li, B.B., Li, L. and Ye, M. (2016) Physico-Chemical Properties and Hypoglycaemic Activity of Fermented Milks Prepared with *Anemarrhena asphodeloides* Water Extracts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **96**, 492-496. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7115>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2166-613X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjfn@s-hanspub.org