

冯子健, 陈南, 高浩祥, 等. 茶多酚对酸奶发酵品质及抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 143–151. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030230

FENG Zijian, CHEN Nan, GAO Haoxiang, et al. Effects of Tea Polyphenols on Yogurt Fermentation Quality and Its Antioxidant Activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 143–151. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030230

· 生物工程 ·

# 茶多酚对酸奶发酵品质及抗氧化活性的影响

冯子健<sup>1</sup>, 陈南<sup>1</sup>, 高浩祥<sup>1</sup>, 何强<sup>2</sup>, 曾维才<sup>1,2,\*</sup>

(1. 四川大学食品工程系, 四川成都 610065;

2. 四川大学食品科学与技术四川省高校重点实验室, 四川成都 610065)

**摘要:**目的: 研究茶多酚对酸奶发酵品质及抗氧化活性的影响。方法: 对含有不同浓度茶多酚 (0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 g/100 mL 牛乳) 的牛乳进行发酵以制作酸奶。通过理化分析实验测定茶多酚对酸奶的 pH、可滴定酸度、营养成分含量、持水力的影响, 利用质构仪、色差色度仪、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用分析茶多酚对酸奶的质构特性、颜色和风味成分的影响, 通过高效液相色谱法分析酸奶发酵过程对茶多酚中四种儿茶素含量的影响, 并通过体外抗氧化实验测定了茶多酚酸奶的抗氧化能力。结果: 茶多酚对酸奶的 pH、可滴定酸度和营养成分的影响不显著; 茶多酚的添加使酸奶的持水力、硬度、黏性、胶粘性 and 内聚性略微降低, 并使得酸奶的颜色略微偏红和偏黄; 茶多酚的添加使得酸奶中的酸类风味物质的含量略有降低, 而酮类和醇类风味物质的种类和含量有所增加; 酸奶发酵过程中, 酯化儿茶素 (表没食子儿茶素没食子酸酯和表儿茶素没食子酸酯) 发生了降解, 非酯化儿茶素 (表儿茶素和表没食子儿茶素) 的变化不明显; 体外抗氧化实验表明, 茶多酚的添加可以显著提高酸奶的抗氧化活性 (包括: DPPH 及 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力和还原能力的显著增强)。结论: 茶多酚的添加一定程度上改变了酸奶的品质, 并赋予了酸奶独特的风味和抗氧化功效, 为茶多酚在功能型酸奶中的利用提供参考。

**关键词:** 酸奶, 茶多酚, 品质, 儿茶素, 抗氧化活性

中图分类号: TS252.54

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)02-0143-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030230



本文网刊:

## Effects of Tea Polyphenols on Yogurt Fermentation Quality and Its Antioxidant Activity

FENG Zijian<sup>1</sup>, CHEN Nan<sup>1</sup>, GAO Haoxiang<sup>1</sup>, HE Qiang<sup>2</sup>, ZENG Weicai<sup>1,2,\*</sup>

(1. Department of Food Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Key Laboratory of Food Science and Technology of Sichuan Province of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Objective: The aim was to investigate the effect of tea polyphenols (TP) on yogurt quality and its antioxidant activity. Methods: Milk with different concentration (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 g/100 mL milk) of TP was fermented for the preparation of yogurt. The effect of TP on the pH value, titratable acidity, nutrients and water-holding capacity of yogurt was determined by physicochemical analysis. Meanwhile, the effect of TP on the texture properties, color and flavor of yogurt was analyzed with a texture analyzer, chromatic aberration colorimeter and headspace solid phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry, respectively. Besides, the changes of four catechins in TP during the fermentation of yogurt was determined by high performance liquid chromatography (HPLC), and the antioxidant capacity of yogurt with TP was determined by *in-vitro* antioxidant test. Results: TP had no significant influence on the pH value, titratable acidity and nutrients. Then, the addition of TP slightly reduced the water-holding capacity, hardness, adhesiveness, gumminess and cohesiveness of yogurt, and made the color of yogurt slightly red and yellow. The addition of TP slightly reduced the

收稿日期: 2022-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31801548); 四川省科技计划项目 (2021YFH0072); 中央高校创新科技计划项目 (2021CDLZ-21); 国家重点研发计划 (2019YFE0103800)。

作者简介: 冯子健 (1997-), 男, 本科, 研究方向: 食品科学, E-mail: 599848640@qq.com。

\* 通信作者: 曾维才 (1986-), (ORCID: 0000-0002-5819-4333), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学和绿色加工技术, E-mail: weicaizeng@qq.com。

content of acid flavor substances in yogurt, while the types and contents of flavors (ketones and alcohols) increased. During the fermentation of yoghurt, the esterified catechins (epigallocatechin gallate and epigallocatechin gallate) were degraded, while the non-esterified catechins (epigallocatechin and epigallocatechin) were not significantly changed. *In-vitro* antioxidant test showed that the addition of TP significantly increased the antioxidant activity of yogurt (including the significant enhancement of DPPH/ABTS<sup>+</sup> free radical scavenging capacity as well as reduction capacity). Conclusions: The addition of TP has changed the quality of yoghurt to some extent and imparted a unique flavour and antioxidant effect, which could provide a reference for the utilisation of TP in functional yoghurts.

**Key words:** yogurt; tea polyphenols; quality; catechins; antioxidant activity

酸奶是牛乳经乳酸菌发酵和冷却后熟所制得的一种发酵型乳制品,因其独特的风味和良好的营养价值,深受消费者的喜爱<sup>[1]</sup>。但目前酸奶在生产和贮藏过程中仍存在着诸多问题,使产品质量不够稳定,加之消费者对酸奶的口感及功能性等要求的提高,功能性辅料的选择和营养强化型酸奶的研发已成为相关领域的研究热点<sup>[2-3]</sup>。茶多酚是茶叶中酚类化合物的总称,是茶叶中具有保健功能的活性物质,主要包括非酯型儿茶素(表儿茶素, Epicatechin, EC; 表没食子儿茶素, Epigallocatechin, EGC)和酯型儿茶素(表儿茶素没食子酸酯, Epicatechin gallate, ECG; 表没食子儿茶素没食子酸酯, Epigallocatechin gallate, EGCG)等成分。大量研究表明,茶多酚具有抗氧化、抑制病毒及抗辐射等多种有益人体健康的生物活性<sup>[4-5]</sup>。同时,茶多酚还具有绿色、安全及易得等优点,常作为食品添加剂应用于食品工业,对改良食品的质量与品质有积极的作用,在食品加工领域具有广阔的应用前景<sup>[6]</sup>。

目前,相关领域科研人员对酸奶的研究以发展新型发酵菌种以及添加多糖及蛋白类营养补充剂为主,针对天然植物多酚进行设计的酸奶的研究内容较少<sup>[7]</sup>。相关研究表明,酚类化合物与牛乳酪蛋白具有较强的结合能力<sup>[8]</sup>,这种相互作用会使蛋白质的结构发生变化,从而改变牛奶制品的品质。虽然已有部分研究针对酚类物质在酸奶中的应用进行探索,但缺乏对发酵过程中酚类物质主成分变化的分析,忽略了乳酸菌对酚类物质的利用和分解。

本研究通过测定和评估茶多酚酸奶的品质特性(pH、可滴定酸度、营养成分含量、持水力、质构特性、颜色及风味成分)和功能活性(茶多酚中儿茶素含量的变化及体外抗氧化活性),探究茶多酚对酸奶发酵品质及抗氧化活性的影响,为茶多酚在酸奶加工领域的开发利用提供理论与参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜牛乳、活润发酵乳 新希望乳业股份有限公司;茶多酚(纯度 $\geq 95\%$ ) 通泽生物科技有限公司;蔗糖 成都市沃尔玛超市;酚酞、氢氧化钠、磷酸氢二钠、碳酸钠、铁氰化钾、三氯乙酸、三氯化铁(均为分析纯),乙腈、甲醇(均为色谱纯) 成都市科龙化工试剂厂;ABTS(2,2'-azinobis-3-ethylbenzthiazol-

line-6-sulphonate, 2,2'-联氮-二(-乙基苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐)、DPPH(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;实验用水 为蒸馏水。

STARTER2100/3C pH计 奥豪斯仪器上海有限公司;TA.XT.Plus质构仪 英国 Stable Micro Systems 有限公司;CM-5 色差色度仪 日本 Konica Minolta 公司;QP2010 SE 气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 日本岛津公司;Carboxen/PDMS 纤维头和固相微萃取手柄 美国 Supelco 公司;Agilent 1290 高效液相色谱仪(high performance liquid chromatography, HPLC)

美国 Agilent 公司;UV-1800BPC 型紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 茶多酚酸奶制备 茶多酚酸奶制备:称取一定质量的新鲜牛乳,添加 5%(w/w,下同)的蔗糖,搅拌均匀后水浴加热至 60~65 °C,并保持 30 min,随后冷却至 42 °C,备用。向 48 mL 预处理后的牛奶中分别添加 2.5 g 发酵种子(新希望活润发酵乳,该发酵种子的种类和剂量由预实验结果所确定)和 2 mL 不同浓度(w/v, 0%、2.5%、5.0%、7.5%、10.0% 和 12.5%)的茶多酚溶液,使得茶多酚的最终浓度达到 0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 g/100 mL 牛乳。搅拌均匀后置于 42 °C 条件下恒温发酵 4 h,发酵结束后于 4 °C 条件下冷藏后熟 24 h,备用<sup>[9]</sup>。

空白组酸奶制备:向 48 mL 预处理后的牛乳中分别添加 2.5 g 发酵种子(新希望活润发酵乳)和 2 mL 蒸馏水,搅拌均匀后置于 42 °C 条件下恒温发酵 4 h,发酵结束后于 4 °C 条件下冷藏后熟 24 h,备用。

未发酵的茶多酚牛乳制备:向 48 mL 预处理后的牛乳中分别添加 2.5 g 发酵种子(低温巴氏灭菌处理,新希望活润发酵乳)和 2 mL 不同浓度(w/v, 0%、2.5%、5.0%、7.5%、10.0% 和 12.5%)的茶多酚溶液,使得茶多酚的最终浓度达到 0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 g/100 mL 牛乳,搅拌均匀后,备用。

1.2.2 pH 和可滴定酸度测定 称取 10 g 酸奶样品,使用 pH 计对样品的 pH 进行测定。

称取 10 g 酸奶样品,与 20 mL 蒸馏水混匀,滴加适量的酚酞指示剂,随后以 0.1 mol/L 氢氧化钠标

准溶液滴定至微红色, 且 30 s 内不褪色, 滴定结束<sup>[10]</sup>。样品的可滴定酸度值按下式计算:

$$\text{可滴定酸度}(\text{°T}) = \frac{c \times V \times 100}{m \times 0.1}$$

式中:  $c$  为氢氧化钠溶液的浓度(mol/L);  $V$  为消耗的氢氧化钠标准溶液的体积(mL);  $m$  为样品质量(g)。

1.2.3 营养成分含量测定 水分含量测定: 参照国家标准《食品安全国家标准 食品中水分的测定》(GB 5009.3-2016)中半固体类的直接干燥法<sup>[11]</sup>。

灰分测定: 参照国家标准《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》(GB 5009.4-2016)中总灰分的测定方法<sup>[12]</sup>。

蛋白质含量测定: 参照国家标准《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5-2016)中的凯氏定氮法<sup>[13]</sup>。

脂肪含量测定: 参照国家标准《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》(GB 5009.6-2016)中的碱水解法<sup>[14]</sup>。

还原糖测定: 参照国家标准《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》(GB 5009.7-2016)中的直接滴定法<sup>[15]</sup>。

1.2.4 持水力测定 向 50 mL 冷冻离心管中加入 10 g 酸奶样品并进行密封, 随后于 4 °C 条件下离心(3000 r/min)10 min, 静置 10 min 后弃掉上清液, 称量离心管与剩余沉淀物的总质量<sup>[16]</sup>。酸奶样品的持水力按下式计算:

$$\text{持水力}(\%) = \frac{m_2 - m}{m_1 - m} \times 100$$

式中:  $m$  为空离心管的质量(g);  $m_1$  为装有酸乳样品离心管的质量(g);  $m_2$  为弃去上清液后离心管与剩余沉淀物的总质量(g)。

1.2.5 质构特性测定 采用质构仪测定酸奶样品的硬度、粘性、胶粘性和内聚性。仪器的参数设定: 探头选用 P/36R, 测试模式为 TPA(texture profile analysis), 触发力为 5 g。测定前速度、测定时速度及测定后速度均为 2 mm/s, 测试距离为 20 mm<sup>[17]</sup>。每组平行测定五次。

1.2.6 颜色测定 采用 CM-5 色差色度仪测定酸奶样品的颜色。测定的光源为 D65, 测量区域为 30 mm, 测量的类型为培养皿测量, 每组样品平行测定 3 次, 并以  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值来反映样品颜色的变化。其中  $L^*$  代表亮度值,  $a^*$  代表红绿值,  $b^*$  代表黄蓝值<sup>[18]</sup>。以空白组酸奶作为标样, 测量并计算其余检样的  $\Delta L$ 、 $\Delta a$ 、 $\Delta b$  和  $\Delta E$ 。 $\Delta E$  的计算公式如下所示:

$$\begin{aligned} \Delta E &= (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2} \\ &= [(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]^{1/2} \end{aligned}$$

式中:  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  分别为样品的亮度值、红绿值和黄蓝值;  $L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$  分别为空白组样品的亮度值、红绿值和黄蓝值<sup>[19]</sup>。

1.2.7 风味成分测定 顶空萃取条件: 取酸奶样品 5 g 置于顶空瓶内, 插入萃取头在 60 °C 条件下萃取 40 min。

GC 条件: 起始温度为 45 °C, 保持 5 min, 然后以 10 °C/min 的速度升温至 80 °C, 保持 1 min, 随后以 5 °C/min 的速度升温至 240 °C, 保持 5 min。进样口温度为 250 °C, 传输线温度为 230 °C, 载气为氦气, 流速为 2.0 mL/min, 进样模式为不分流进样<sup>[20]</sup>。

MS 条件: 离子源温度为 250 °C, 电离方式为 EI, 电子能量为 70 eV; 扫描速率为 4.5 scans/s, 捕获范围为 30~400 m/z。

风味成分的定性和定量分析: 通过检索和对比标准谱库(NIST, 14.0 Gaithersburg, MD, USA)对目标化合物进行定性分析, 采用归一化积分法对各物质进行定量分析<sup>[21]</sup>。

1.2.8 茶多酚中儿茶素单体含量测定 儿茶素单体标准溶液配制: 参考《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》(GB/T 8313-2018), 称取适量 EC、EGC、ECG 和 EGCG 标准品配制标准混合样品储备液。

茶多酚样品溶液配制: 准确称取茶多酚样品 10 mg 并溶解于 10 mL 甲醇中, 配成茶多酚样品储备液。

酸奶样品溶液配制: 称取 10 g 茶多酚凝固型酸奶(浓度为 0.5 g 茶多酚/100 mL 牛乳), 加入 15 mL 甲醇后, 以 4000 r/min 离心 10 min(25 °C), 取上清液并经 0.45 μm 滤膜过滤, 备用。

流动相: 流动相 A: 将 90 mL 乙腈, 20 mL 乙酸及 2 mL 乙二胺四乙酸二钠溶液(10 mg/mL)加入到 1000 mL 水中, 摇匀后经 0.45 μm 滤膜过滤。流动相 B: 将 800 mL 乙腈, 20 mL 乙酸及乙二胺四乙酸二钠(10 mg/mL)溶液加入到 1000 mL 水中, 摇匀后经 0.45 μm 滤膜过滤。

色谱条件: 色谱柱: ODS-3 反相柱(4.6 mm×250 mm×5 μm); 流速: 1 mL/min; 柱温: 35 °C; 紫外检测器检测波长: 278 nm; 进样量: 10 μL; 洗脱程序: 0~10 min, 100% A; 10~25 min, 100%~68% A; 25~35 min, 68% A; 35~36 min, 68%~100% A<sup>[22]</sup>。

1.2.9 茶多酚酸奶抗氧化活性测定 样品制备: 向 10 g 酸奶样品中加入 15 mL 无水乙醇和 0.5 mL 浓盐酸, 然后以 3000 r/min 离心 10 min(4 °C), 静置 10 min 后取上清液进行以下体外抗氧化实验。

DPPH 自由基清除实验: 将上清液稀释 200 倍后, 取 2 mL 稀释液与 2 mL DPPH 自由基溶液(0.1 mol/L)混匀, 25 °C 条件下避光孵育 30 min 后, 于 517 nm 波长下测定其吸光度, 以 95% 乙醇作空白对照, DPPH 自由基清除率的计算公式如下所示<sup>[23]</sup>。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{\text{实验组吸光度}}{\text{空白组吸光度}}\right) \times 100$$

ABTS<sup>+</sup>自由基清除实验: 将上清液稀释 30 倍

后,取 0.1 mL 稀释液与 3.9 mL ABTS 工作液混匀, 25 °C 条件下反应 6 min 后,于 734 nm 波长下测定其吸光度,以蒸馏水作空白对照,ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率的计算公式如下所示<sup>[24]</sup>。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \left( 1 - \frac{\text{实验组吸光度}}{\text{空白组吸光度}} \right) \times 100$$

还原能力的测定:将上清液稀释 30 倍后,取 2.5 mL 稀释液,与 2.5 mL 磷酸缓冲液(0.2 mmol/L, pH6.6) 和 2.5 mL 铁氰化钾溶液(1%, w/v)混匀,50 °C 水浴 20 min 后迅速冷却,加入 2.5 mL 三氯乙酸溶液(10%, w/v),混合后以 3000 r/min 离心 10 min(25 °C),取 2.5 mL 上清液,加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 三氯化铁溶液(0.1%, w/v),混匀后于 700 nm 波长下测定其吸光度<sup>[25]</sup>。吸光度越大,则样品的还原能力越强。

### 1.3 数据处理

每组进行多次重复实验,所有结果均以“平均值±标准差”的形式表示。实验结果用 Origin(version 8.0 for Windows, OriginLab Corporation, SPSS) 软件进行统计分析,显著性差异水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 茶多酚对酸奶 pH 及可滴定酸度的影响

茶多酚浓度对酸奶的 pH 及可滴定酸度的影响如图 1 所示。

酸度的变化与酸奶的黏度、质地以及组织状态等方面密切相关。由图 1 可知,不同浓度茶多酚的加入对酸奶的 pH(图 1A)和可滴定酸度(图 1B)并未产生显著影响,而酸奶的酸度主要由乳酸菌发酵产生。本研究结果表明,该浓度梯度下茶多酚的加入并未显著抑制发酵过程中乳酸菌的生长及发酵产酸<sup>[26]</sup>。

### 2.2 茶多酚对酸奶营养成分含量的影响

茶多酚浓度对酸奶营养成分含量的影响如表 1 所示。

酸奶中各项营养成分的含量是评价酸奶质量的重要指标。由表 1 可知,不同浓度茶多酚的添加对酸奶的水分、脂肪、蛋白质及灰分含量并未产生显著影响,而还原糖含量有所增大,这可能是由于茶多酚的还原性干扰了测定结果,使得所测还原糖含量偏高<sup>[27]</sup>。

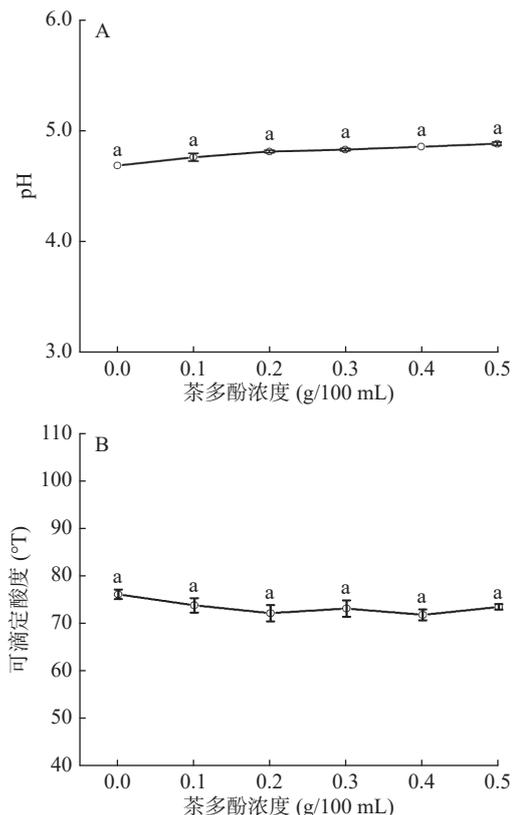


图 1 茶多酚浓度对酸奶 pH 及可滴定酸度的影响

Fig.1 Effects of TP concentrations on pH and titratable acidity of yogurt

注:不同小写字母表示显著性差异( $P < 0.05$ );图 2~图 3 同。

### 2.3 茶多酚对酸奶持水力的影响

茶多酚浓度对酸奶持水力的影响如图 2 所示。

酸奶的持水力是受酸奶中总固形物含量和总蛋白含量的影响,与产品的组织状态密切相关<sup>[28]</sup>。由图 2 可知,与空白对照组酸奶的持水能力相比,随着茶多酚添加量的增大,酸奶的持水力略有减小,但仍然维持在 80% 以上。酸奶持水力的大幅下降会严重影响产品的品质,使得其在储存过程中发生乳清析出和质量劣变等问题,缩短产品的保质期。查阅相关文献分析可知<sup>[8-9,17,28]</sup>,酸奶持水力的轻微降低对产品的品质并不会产生显著的负面影响,而植物多酚的高浓度添加会使得酸奶的持水力大幅下降,故应严格控制植物多酚在酸奶中的添加剂量。在本研究中,含有不同浓度(0.1~0.5 g/100 mL 牛乳)茶多酚的酸奶在设

表 1 茶多酚浓度对酸奶营养成分含量的影响

Table 1 Effect of TP concentrations on nutrient content of yogurt

茶多酚浓度(g/100 mL牛乳)	营养成分的含量(%)				
	水分	灰分	蛋白质	脂肪	还原糖
0	82.63±0.02 <sup>a</sup>	0.70±0.01 <sup>a</sup>	3.22±0.01 <sup>a</sup>	3.05±0.04 <sup>a</sup>	2.97±0.02 <sup>d</sup>
0.1	82.79±0.02 <sup>a</sup>	0.69±0.01 <sup>a</sup>	3.20±0.07 <sup>a</sup>	3.08±0.05 <sup>a</sup>	3.21±0.08 <sup>e</sup>
0.2	82.26±0.01 <sup>a</sup>	0.70±0.03 <sup>a</sup>	3.24±0.01 <sup>a</sup>	3.08±0.01 <sup>a</sup>	3.31±0.02 <sup>b</sup>
0.3	82.09±0.03 <sup>a</sup>	0.69±0.01 <sup>a</sup>	3.20±0.04 <sup>a</sup>	2.98±0.06 <sup>a</sup>	3.30±0.03 <sup>b</sup>
0.4	81.97±0.01 <sup>a</sup>	0.69±0.02 <sup>a</sup>	3.25±0.05 <sup>a</sup>	3.09±0.04 <sup>a</sup>	3.37±0.04 <sup>a</sup>
0.5	81.87±0.02 <sup>a</sup>	0.68±0.01 <sup>a</sup>	3.23±0.03 <sup>a</sup>	3.13±0.02 <sup>a</sup>	3.39±0.05 <sup>a</sup>

注:同一列不同小写字母表示显著性差异( $P < 0.05$ )。

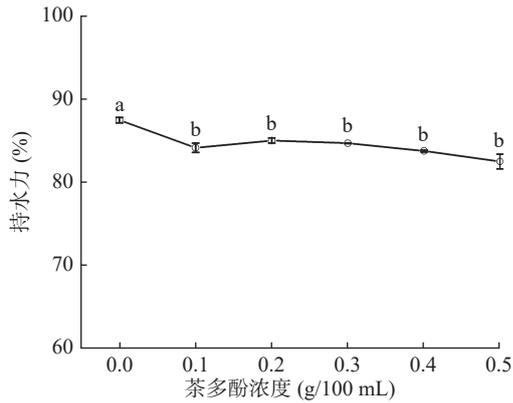


图 2 茶多酚浓度对酸奶持水力的影响

Fig.2 Effect of TP concentrations on the water-holding capacity of yogurt

定的储存周期内(15 d)并未发生乳清析出等不良现象,表明该浓度剂量下茶多酚的添加对产品的储存品质并未产生负面影响。此外,相关研究表明,茶多酚的加入可能会促使蛋白聚集形成大分子聚集物,使得酸奶的内部结构发生改变,从而改变蛋白质分子与水分子间的相互作用,降低蛋白质对水分子的吸附与控制作用,进而使得持水力下降<sup>[8]</sup>。

### 2.4 茶多酚对酸奶质构特性的影响

茶多酚浓度对酸奶硬度、黏性、胶粘性和内聚性的影响如图 3 所示。

质构特性是衡量酸奶品质的一个重要指标,酸奶的口感、组织状态及质量稳定性都与之密切相关<sup>[29]</sup>。由图 3 可知,茶多酚的添加使得酸奶的硬度(图 3A)、黏性(图 3B)和胶粘性(图 3C)整体呈下降趋势,而对其内聚性(图 3D)并未产生显著影响。查阅相关文献可知,酸奶发酵过程中,茶多酚与牛乳中的酪蛋白分子发生相互作用,可引起酪蛋白分子之间的聚集,干扰了酸奶内部网状部结构的形成,从而使得酸奶的硬度和黏性值下降<sup>[30]</sup>。实际加工和销售中,过高的硬度和黏性对于酸奶的感官品质有负面影响,会降低消费者对产品的接受程度。因此,适量浓度茶多酚的添加,可以使得凝固型酸奶的质地更为柔软,降低其对容器的黏附性,在一定程度上提升其感官品质。

### 2.5 茶多酚对酸奶颜色的影响

茶多酚浓度对酸奶颜色的影响如表 2 所示。

酸奶的颜色是感官评价的重要参考指标,影响着消费者的食欲和总体接受程度。由表 2 可知,随着茶多酚浓度的增加,ΔL 值逐渐下降,而 Δa 值、Δb 值和 ΔE 值逐渐增大,这与茶多酚本身的棕红色颜色相关。研究结果表明,适量茶多酚的添加会赋予酸奶一定的色泽,使之呈现出淡淡的茶汤色,增加产品的市场竞争力<sup>[31]</sup>。

### 2.6 酸奶风味成分的分析

酸奶中风味成分的种类和含量与酸奶的感官评价密切相关<sup>[32]</sup>。由表 3 可知,酸奶中的挥发性风味

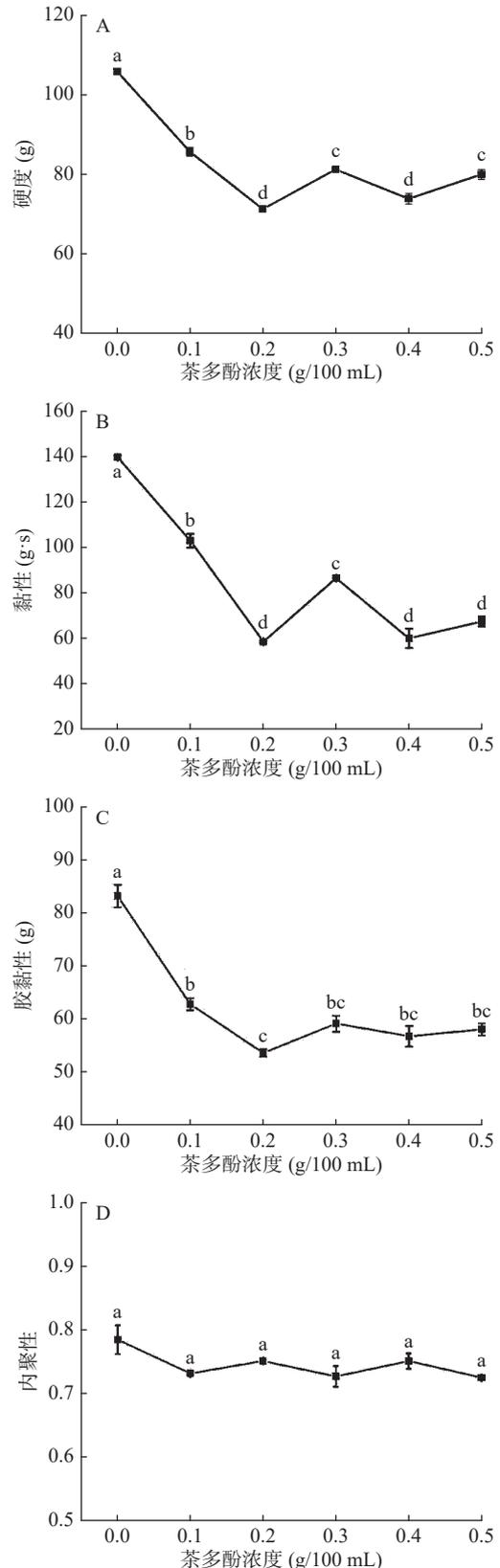


图 3 茶多酚浓度对酸奶质构特性的影响

Fig.3 Effect of TP concentrations on texture of yogurt

成分主要包括酸类、醛类、酮类、醇类和其他类化合物。分析可知,茶多酚的加入降低了酸奶中酸类物质的相对含量,增多了其它风味物质的含量和风味物质的总类别数。这可能是由于茶多酚具有良好的反应活性,参与了酸奶发酵过程中相关风味成分的生成反

表2 茶多酚浓度对酸奶颜色的影响  
Table 2 Effect of TP concentrations on the color of yogurt

颜色参数	茶多酚浓度(g/100 mL牛乳)					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$L^*$	88.39±0.57 <sup>a</sup>	88.35±0.08 <sup>a</sup>	87.26±0.21 <sup>b</sup>	86.60±0.23 <sup>bc</sup>	86.10±0.07 <sup>cd</sup>	85.47±0.11 <sup>d</sup>
$a^*$	-1.65±0.057 <sup>f</sup>	-0.37±0.03 <sup>e</sup>	0.48±0.09 <sup>d</sup>	1.23±0.21 <sup>c</sup>	1.78±0.06 <sup>b</sup>	2.44±0.11 <sup>a</sup>
$b^*$	4.16±0.69 <sup>d</sup>	7.04±0.20 <sup>c</sup>	7.82±0.27 <sup>bc</sup>	8.45±0.27 <sup>ab</sup>	8.78±0.11 <sup>ab</sup>	9.42±0.18 <sup>a</sup>
$\Delta L$	-	-0.04±0.08 <sup>a</sup>	-1.13±0.21 <sup>b</sup>	-1.78±0.24 <sup>c</sup>	-2.28±0.07 <sup>c</sup>	-2.92±0.11 <sup>d</sup>
$\Delta a$	-	1.28±0.03 <sup>e</sup>	2.14±0.09 <sup>d</sup>	2.87±0.21 <sup>c</sup>	3.43±0.06 <sup>b</sup>	4.09±0.21 <sup>a</sup>
$\Delta b$	-	2.83±0.20 <sup>d</sup>	3.66±0.27 <sup>c</sup>	4.29±0.27 <sup>bc</sup>	4.62±0.11 <sup>ab</sup>	5.26±0.18 <sup>a</sup>
$\Delta E$	-	3.16±0.20 <sup>e</sup>	4.39±0.20 <sup>d</sup>	5.48±0.24 <sup>c</sup>	6.19±0.13 <sup>b</sup>	7.27±0.13 <sup>a</sup>

注: 同一行不同小写字母表示显著性差异( $P < 0.05$ )。

表3 茶多酚(0.1 g/100 mL 牛乳)对酸奶风味成分的影响  
Table 3 Effect of TP (0.1 g/100 mL milk) on flavor components of yogurt

风味物质种类	化合物名称	保留时间(min)		相对含量(%)	
		空白组酸奶	茶多酚酸奶	空白组酸奶	茶多酚酸奶
酸	乙酸	2.171	-	6.93	-
	正丁酸	5.378	5.308	8.01	11.83
	己酸	12.500	12.425	23.28	21.16
	辛酸	18.121	18.004	11.29	10.91
	癸酸	-	20.843	-	3.02
总计				49.51	46.92
醛	己醛	10.953	-	10.84	-
	壬醛	15.417	15.433	6.63	8.54
	癸醛	-	18.625	-	6.53
总计			17.47	18.07	
酮	甲氧基丙酮	-	2.692	-	3.67
	3-羟基-2-丁酮	2.992	3.054	19.82	14.74
	2-庚酮	7.021	7.083	7.25	7.35
	2-壬酮	14.983	14.975	2.47	2.98
	2-十一酮	-	21.183	-	1.74
总计			29.54	30.48	
醇	1,3-戊二醇	-	5.940	-	0.47
	己醇	8.307	8.361	1.85	1.29
	辛醇	-	12.928	-	0.61
总计			1.85	2.37	
其它	丁酸丁酯	11.975	11.979	0.53	0.92
	戊酸丁酯	12.542	-	0.98	-
	十二烷	14.321	-	0.12	-
	十一烷	-	15.262	-	0.40
总计	2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯	-	28.954	-	0.84
总计			1.63	2.16	

应,从而影响了风味物质的组成及比例<sup>[15]</sup>。同时,茶多酚还可能通过对酸奶中益生菌相关代谢途径的调控,间接地对酸奶的风味产生影响。研究表明,茶多酚的添加可以丰富酸奶的风味,对于改善酸奶风味和提高酸奶品质具有积极影响。

### 2.7 茶多酚中主要儿茶素单体含量的变化

通过高效液相色谱法对茶多酚酸奶中四种儿茶素单体(EC, EGC, ECG 及 EGCG)进行分析,结果如图4~图6所示。

图4为儿茶素混合标品的高效液相色谱图,结合《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》(GB/T

8313-2018)中儿茶素类测定的结果可知<sup>[22]</sup>,实验所用混合标品中按照保留时间依次出现的物质为 EGC、EC、EGCG 和 ECG。

图5为未经发酵处理的茶多酚的高效液相色谱图。由图可知,实验所用的茶多酚中含有四种儿茶素,且各自的含量分别为 1.27%(EGC)、1.86%(EC)、60.83%(EGCG)和 24.78%(ECG),EGCG 为茶多酚中含量最高的儿茶素成分,这与相关报道和测定一致<sup>[5,22]</sup>。

图6是茶多酚酸奶中茶多酚的高效液相色谱图。由图6可知,在乳酸菌的发酵作用下,茶多酚中

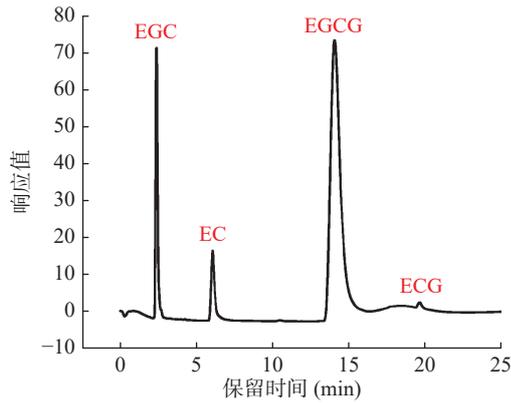


图 4 混合标准溶液高效液相色谱图

Fig.4 High performance liquid chromatography of mixed standard sample

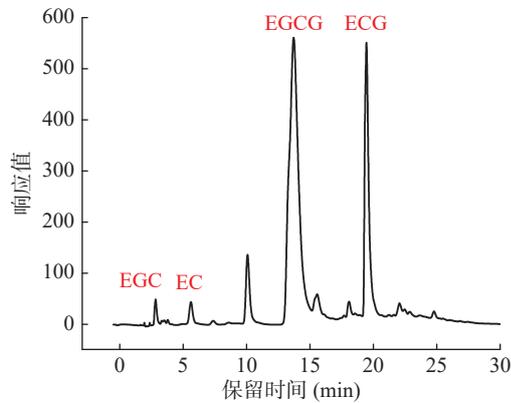


图 5 茶多酚溶液(1 mg/mL)的高效液相色谱图

Fig.5 High performance liquid chromatography of TP solution (1 mg/mL)

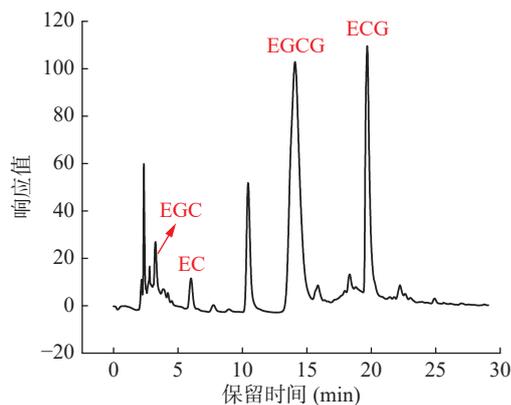


图 6 茶多酚酸奶(0.5 g 茶多酚/100 mL 牛乳)的高效液相色谱图

Fig.6 High performance liquid chromatography of yogurt with 0.5 g TP/100 mL milk

四种主要儿茶素单体的相对含量都发生了变化,分别为 2.92%(EGC)、1.61%(EC)、39.64%(EGCG)和 20.16%(ECG)。同未经发酵的茶多酚相比(图 5),酯型儿茶素(EGCG 和 ECG)的相对含量降低。分析可知,酯型儿茶素结构中的酯键在酶的作用下不稳定,易发生水解。酸奶发酵过程中,益生菌的生长代谢会产生多种酶,它们在适宜的发酵温度条件下可能对酯

键产生水解效应,故而使得酯型儿茶素在共发酵过程中结构发生了改变,酯键被破坏,使其降解生成分子量更小的物质<sup>[33]</sup>。

### 2.8 茶多酚酸奶抗氧化活性的分析

茶多酚酸奶和未经发酵的茶多酚牛乳的抗氧化活性如图 7 所示。

由图 7 未添加茶多酚的空白对照组可知,未添加茶多酚的牛乳(即茶多酚浓度为 0 g/100 mL)不具有抗氧化活性,而牛乳经保温发酵形成酸奶后,其抗氧化活性相比未发酵牛乳的略有增加,但并不显著,该结果表明牛乳发酵产物所提供的抗氧化活性较低,而茶多酚的添加能够赋予牛乳和酸奶更强的抗氧化活性。同时,随着茶多酚添加浓度的增大,茶多酚酸奶和茶多酚牛乳的 DPPH 自由基清除率(图 7A)和

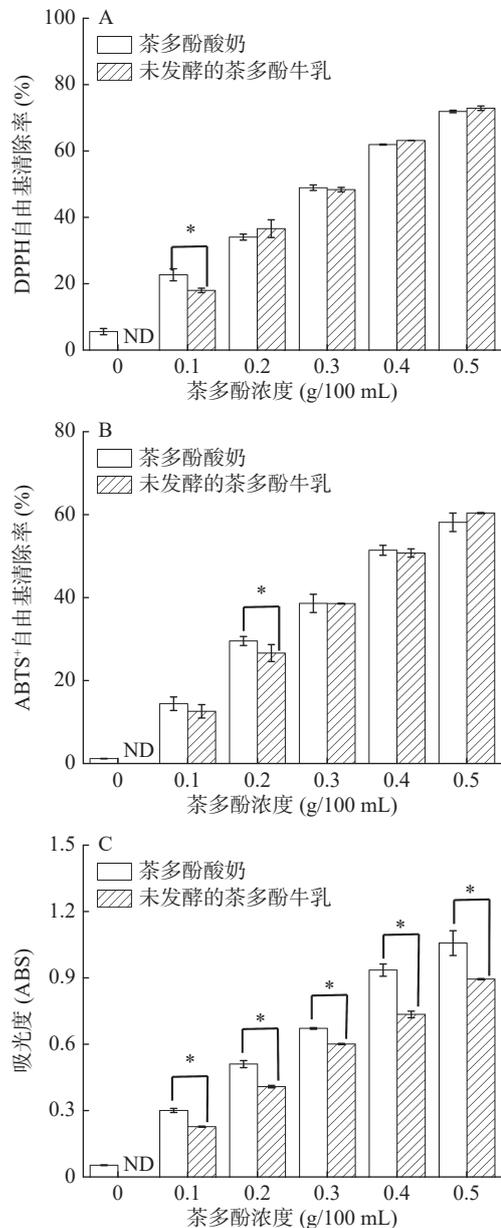


图 7 茶多酚酸奶和未发酵的茶多酚牛乳的抗氧化活性

Fig.7 Antioxidant activity of TP yogurt and TP milk

注:“\*”表示酸奶组和未发酵牛乳组之间有显著性差异 ( $P < 0.05$ ); ND 为 Not detected, 代表未检测到。

ABTS<sup>+</sup>自由基清除率(图7B)逐渐提高,呈显著的浓度剂量效应。此外,随受试浓度的增加,反应溶液的吸光度值也在逐渐增大(图7C),表明其还原能力逐渐增强。结合前述实验结果可知,茶多酚虽然与酸奶中的蛋白质结合并在发酵过程中受到益生菌相关酶的作用发生了降解,但其仍能展现出较强的抗氧化活性(图7)。同时,与同浓度未经发酵的茶多酚牛乳的抗氧化活性结果相比,茶多酚酸奶的 DPPH 及 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力总体上并没有发生显著的变化,其还原能力增强,表明由益生菌的生长代谢所促发的茶多酚中酯型儿茶素的降解并未对茶多酚的抗氧化能力产生显著的负面影响,这可能是由于酯型儿茶素(ECG 和 EGCG)降解所得的小分子物质仍然具有良好的电子转移能力,从而表现出良好的还原能力与自由基清除作用<sup>[31,33]</sup>。因此,乳酸菌发酵所得的茶多酚酸奶仍然具有良好的抗氧化能力。实验结果表明,茶多酚牛乳发酵所得的酸奶仍具有良好的抗氧化活性。

### 3 结论

添加茶多酚对酸奶的 pH、可滴定酸度、持水力及营养成分含量影响不大。同时,茶多酚的添加改善了酸奶的质构特性和颜色,提升了酸奶的风味。此外,茶多酚中的酯型儿茶素在发酵过程中会发生显著的降解,但茶多酚酸奶仍具有良好的自由基清除活性及还原能力等抗氧化作用。实验结果表明,茶多酚对酸奶的品质及功能性有益,可作为一种天然成分参与酸奶的制备。研究为茶多酚在酸奶加工领域的应用提供参考。后续还需要进一步优化和确定茶多酚在酸奶中添加的工艺参数,并对其在乳酸菌发酵过程中的降解历程及其抗氧化作用影响的构效关系和相关分子机理进行研究。

#### 参考文献

- [1] 宋军霞, 祁红兵, 袁彩霞. 常见市售酸奶在不同温度贮藏下的品质变化分析[J]. 农产品加工, 2020(22): 69-73. [SONG J X, QI H B, YUAN C X. Analysis on the quality change of common market yogurt stored at different temperatures[J]. Farm Products Processing, 2020(22): 69-73.]
- [2] 李支霞. 茶酸奶的工艺研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2005. [LI Z X. Study on technology of tea yogurt[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2005.]
- [3] 高冬腊, 王伟华, 孟玉昆, 等. 无花果风味酸奶的研制[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 157-162, 169. [GAO D L, WANG W H, MENG Y K, et al. Development of fig-flavored yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 157-162, 169.]
- [4] FENG M Y, YU L, ZHU P T, et al. Development and preparation of active starch films carrying tea polyphenol[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 196: 162-167.
- [5] 陈南, 陈龙, 曾维才, 等. 茶多酚对馒头品质的影响及机理初探[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 23-31. [CHEN N, CHEN L, ZENG W C, et al. Effects of tea polyphenols on the quality of steamed bun and its mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(20): 23-31.]
- [6] MUNIANDY P, SHORI A B, BABA A S. Influence of green, white and black tea addition on the antioxidant activity of probiotic yogurt during refrigerated storage[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2016, 8: 1-8.
- [7] ARYANA K J, OLSON D W. A 100-year review: Yogurt and other cultured dairy products[J]. Journal of Dairy Science, 2017, 100(12): 9987-10013.
- [8] AL-SHABIB N A, KHAN J M, MALIK A, et al. Molecular interaction of tea catechin with bovine  $\beta$ -lactoglobulin: A spectroscopic and in silico studies[J]. Saudi Pharmaceutical Journal, 2020, 28: 238-245.
- [9] 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): 53-36. [WANG W D, HUANG H, QIN J, et al. Research on preparation of yogurt solidified with plant polyphenols[J]. China Dairy Industry, 2017, 45(8): 53-36.]
- [10] OMER F C, HASAN T. Traditional yogurt dilemma; rich favor vs. microbial safety: An investigation on volatile aroma profiles, chemical, and microbiological qualities of traditional yogurts[J]. Journal of Central European Agriculture, 2020, 21: 461-475.
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 Determination of moisture in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.4-2016 食品中灰分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.4-2016 Determination of ash content in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.5-2016 Determination of protein in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.6-2016 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.6-2016 Determination of fat in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.7-2016 食品中还原糖的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.7-2016 Determination of reducing sugar in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [16] CHEN L, LI Z Y, ZENG W C, et al. Effect of lotus (*Nelumbo nucifera*) petals extract on the quality of yogurt and its action mechanism[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(5): 1-10.
- [17] 陈南, 徐乾达, 曾维才, 等. 共发酵工艺对酸乳贮藏品质的影响及作用机理[J]. 乳业科学与技术, 2018, 41(5): 6-11. [CHEN N, XU Q D, ZENG W C, et al. Influence and mechanism of co-fer-

- mentation on storage quality of yogurt[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2018, 41(5): 6–11. ]
- [ 18 ] 杨兆甜, 李方巍, 王震昊, 等. 食品颜色评价及在食品工业中的应用[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(24): 417–423. [ YANG Z T, LI F W, WANG Z H, et al. Food color evaluation and application in food industry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(24): 417–423. ]
- [ 19 ] 耿想, 姚曦, 尤俊昊, 等. 不同干燥方式对竹笋品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(16): 144–149. [ GENG X, YAO X, YOU J H, et al. Effect of different drying methods on the quality of bamboo shoots[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(16): 144–149. ]
- [ 20 ] SU N N, REN L, YE H L, et al. Antioxidant activity and flavor compounds of hickory yogurt[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(8): 1894–1903.
- [ 21 ] 杨菲菲, 麻志宁, 王祎, 等. 不同菌株组成饮用型酸奶发酵剂指纹图谱的构建[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(19): 244–251. [ YANG F F, MA Z N, WANG W, et al. Fingerprints construction of starter cultures in drinking yogurt[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(19): 244–251. ]
- [ 22 ] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8313-2018 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [ Standardization Administration of China. GB/T 8313-2018 Method for determination of tea polyphenols and catechins in tea[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. ]
- [ 23 ] 赵晓明, 宋菲, 赵松林, 等. 功能性椰子植物酸奶的工艺及抗氧化活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(11): 150–155. [ ZHAO X M, SONG F, ZHAO S L, et al. Study on technology and antioxidant activity of functional coconut plant-based yogurt[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(11): 150–155. ]
- [ 24 ] 曾维才, 石碧. 天然产物抗氧化活性的常见评价方法[J]. *化工进展*, 2013, 32: 1205–1247. [ ZENG W C, SHI B. Common methods of antioxidant activity evaluation for natural products: A review[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32: 1205–1247. ]
- [ 25 ] KIM D, WON Y, SU J, et al. Effects of lotus (*Nelumbo nucifera*) leaf on quality and antioxidant activity of yogurt during refrigerated storage[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2019, 39(5): 792–803.
- [ 26 ] 潘焯灿, 张京涛, 马玲, 等. 蛹虫草浸提液对酸奶品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(7): 168–172. [ PAN Y C, ZHANG J T, MA L, et al. Effects of extract of *Cordyceps militaris* on quality of yoghurt[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(7): 168–172. ]
- [ 27 ] YAN Z, ZHONG Y, DUAN Y, et al. Antioxidant mechanism of tea polyphenols and its impact on health benefits[J]. *Animal Nutrition*, 2020, 6(2): 115–123.
- [ 28 ] 薛依婷, 白红霞, 李明杰, 等. 黑木耳多糖凝固型酸奶发酵工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 156–162. [ XUE Y T, BAI H X, LI M J, et al. Optimization of fermentation process of set yogurt with *Auricularia auricular* polysaccharide[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(16): 156–162. ]
- [ 29 ] PEREIRA C T M, PEREIRA D M, VENTURA M B, et al. Skyr yogurt with mango pulp, fructooligosaccharide and natural sweeteners: Physical aspects and drivers of liking[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 1096–1127.
- [ 30 ] MOUSAVI M, HESHMATI A, VAHIDINIA A, et al. Texture and sensory characterization of functional yogurt supplemented with flaxseed during cold storage[J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(3): 907–917.
- [ 31 ] ROMERO M M, STASZEWSKI M, MARTINEZ M J. The effect of green tea polyphenols addition on the physicochemical, microbiological and bioactive characteristics of yogurt[J]. *British Food Journal*, 2021, 123(7): 2380–2397.
- [ 32 ] CHENG H F. Volatile flavor compounds in yogurt: A review[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2010, 50(10): 938–950.
- [ 33 ] 石玉涛, 陈金磊, 肖秀丹, 等. 加工工艺对香茶儿茶素组分含量的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(5): 70–76. [ SHI Y T, CHEN J L, XIAO X D, et al. Effect of processing technology on the components of catechin in fragrant tea[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(5): 70–76. ]