

# 乳酸菌发酵酸豆奶中不良风味物质研究进展

刘婷<sup>1,2</sup>, 赵良忠<sup>1,2\*</sup>, 李明<sup>3</sup>, 周晓洁<sup>1,2</sup>, 江振桂<sup>4</sup>, 车丽娜<sup>1,2</sup>

(1. 邵阳学院食品与化学工程学院, 邵阳 422300; 2. 豆制品加工与安全控制湖南省重点实验, 邵阳 422300;  
3. 广州佳明食品科技有限公司, 广州 510000; 4. 湖南君益福有限公司, 武冈 422402)

**摘要:** 随着植物基蛋白饮料在国内外的迅速发展, 酸豆奶必将进入新时代。酸豆奶是指以大豆为主要原料经过乳酸菌发酵后所得的产品, 在植物基蛋白饮料中占有重要地位, 良好的气味特征和口感特征对酸豆奶产品来说至关重要, 而豆腥味、苦涩味等不良风味的存在限制了酸豆奶的发展。酸豆奶风味物质种类繁多, 挥发性风味物质、非挥发性风味物质的成分和含量极大程度上决定了酸豆奶的感官品质。本研究就酸豆奶的发酵菌种、不良风味物质的来源、风味物质的分类和检测方法进行综述, 从发酵菌种与酸豆奶中不良风味物质的角度出发, 为解决酸豆奶在工业生产中不良风味问题提供思路。

**关键词:** 酸豆奶; 乳酸菌; 发酵; 风味物质

## Research progress on off-flavor substance in fermented soybean milk by lactic acid bacteria

LIU Ting<sup>1,2</sup>, ZHAO Liang-Zhong<sup>1,2\*</sup>, LI Ming<sup>3</sup>, ZHOU Xiao-Jie<sup>1,2</sup>, JIANG Zhen-Gui<sup>4</sup>, CHE Li-Na<sup>1,2</sup>

(1. School of Food & Chemical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422300, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Soybean Products Processing and Safety Control, Shaoyang 422300, China; 3. Guangzhou Jiaming Food Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 4. Hunan Junyifu Co., Ltd., Wugang 422402, China)

**ABSTRACT:** With the rapid development of plant-based protein beverages at home and abroad, fermented soybean milk will enter a new era. Fermented soybean milk is a product made from soybean and fermented by lactic acid bacteria. It occupies an important position in plant-based protein beverages, good odor and taste characteristics are essential for fermented soy milk products, the existence of bad flavors such as bean odor and bitter taste, which limits the development of fermented soybean milk. There are a variety of flavor substances in fermented soybean milk, and the composition and content of volatile flavor substances and non-volatile flavor substances determine the sensory quality of fermented soybean milk. This paper summarized the fermentation strains of fermented soybean milk, the source of undesirable flavor substances, the classification and detection methods of flavor substances, and provided the ideas for solving the problem of bad flavor in fermented soybean milk in industrial production from the perspective of fermentation strains and undesirable flavor substances in fermented soybean milk.

**KEY WORDS:** fermented soybean milk; lactic acid bacteria; fermentation; flavor substances

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX20201183)、湖南省科技创新计划项目(2019TP1028、2019SK2122、2019NK4229)

Fund: Supported by Hunan Postgraduate Scientific Research Innovation Project (CX20201183), and the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (2019TP1028, 2019SK2122, 2019NK4229)

\*通信作者: 赵良忠, 教授, 主要研究方向为食品工程。E-mail: sys169@163.com

\*Corresponding author: ZHAO Liang-Zhong, Professor, School of Food and Chemical Engineering, Shaoyang University, Liziyuan Campus of Shaoyang University, Shaoyang 422300, China. E-mail: sys169@163.com

## 0 引言

大豆中蛋白质含量约为 40%~50%，脂肪含量为 18%~20%，不饱和脂肪酸含量占脂肪酸总量的 80%以上<sup>[1]</sup>，且大豆中不含乳糖和胆固醇，是一种优质植物蛋白来源。但大豆加工产品容易产生豆腥味、苦涩味等不良风味，并且含有抗营养因子和胀气因子，很大程度上限制了大豆制品的发展<sup>[2]</sup>。目前国内市场仍未出现酸豆奶行业的引领者，原因有二：一是豆腥味、苦涩味等不良风味严重影响了产品的感官品质<sup>[3]</sup>；二是易出现后酸化，产品质量不稳定等问题<sup>[4]</sup>。大量研究表明，豆奶经过乳酸菌发酵后，不良风味得到了改善，同时增加了苷元型大豆异黄酮、大豆多肽的含量，赋予了产品抗氧化性等特点<sup>[4-10]</sup>。本文综述了酸豆奶的发酵菌种、分析了不良风味物质的来源、风味物质的分类和分离分析方法，期望为控制不良风味物质代谢途径，减少不良风味物质的含量，解决酸豆奶豆腥味、豆腥味、苦涩味等的实际生产问题提供新思路。

## 1 酸豆奶的发酵菌种

大豆中碳水化合物主要是棉籽糖、水苏糖、蔗糖等低聚糖，单一菌株因只能利用一小部分低聚糖而导致菌种繁殖速率低、产酸、产香不够，最后影响产品品质，多菌株协同发酵能提高大豆中低聚糖的利用率，改善产品香味和滋味。酸豆奶生产使用的菌种主要集中在乳杆菌属 (*Lactobacillus*)、双歧杆菌属 (*Bifidobacterium*)、明串珠菌属 (*Trichococcus*)、链球菌属 (*Streptococcus*)、乳球菌属 (*Lactococcus*)，见表 1<sup>[2,4-15]</sup>。郭帅<sup>[8]</sup>利用嗜热链球菌 S10 复合植物乳杆菌 P-8 发酵豆奶，以固相微萃取-气相色谱-质谱联用法 (solid phase micro extraction-gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS) 分析酸

豆奶中挥发性风味物质，发现酸豆奶在后熟结束时有更低的豆腥味物质。有研究表明，多菌株参与发酵酸豆奶比单菌株发酵的风味口感更佳<sup>[7,15]</sup>，乳酸菌和酵母菌之间具有很好的协同发酵作用<sup>[16-17]</sup>。

## 2 酸豆奶不良风味物质的来源

风味物质是由一类能够赋予食品风味的物质组成。酸豆奶的不良风味一般分二类：一类是易挥发的豆腥味、青草味，可凭嗅觉感知，主要成分为醛类、醇类、酮类和呋喃类；另一类是非挥发的苦涩味，通过味觉才能感知，主要成分为酚酸、异黄酮、呋喃等。挥发性风味物质是酸豆奶香气的主要成分，它决定香气特征并对酸豆奶的特征风味贡献最大，而非挥发性风味物质是其滋味的主要来源，决定产品的口感<sup>[18]</sup>。

酸豆奶挥发性风味物质产生的主要原因，一是酶促氧化反应，大豆中含有丰富的脂肪氧化酶 (lipoxygenase, Lox) 如 Lox1、Lox2、Lox3a、Lox3b 可专一催化具有顺、顺-1,4-戊二烯结构的多不饱和脂肪酸，如亚油酸、亚麻酸等，生成具有共轭双键的脂肪酸氢过氧化物，再经脂肪氢过氧化物裂解酶分解生成短链的醇、酮和醛类等挥发性物质；二是非酶促自动氧化反应，不饱和脂质的双键受活性氧的攻击产生少量具有豆腥味的物质，如 2-戊基-呋喃、1-辛烯-3-醇、反-2-壬烯醛等风味物就是亚油酸在单线态氧的光氧化反应下生成的产物<sup>[19-22]</sup>。另外，美拉德反应产物中也包含一些醛类、醇类和呋喃类物质<sup>[23]</sup>；三是已形成的风味物质之间互相作用，或与其体系中的蛋白质、游离氨基酸、脂类发生反应<sup>[24-26]</sup>。RACKIS<sup>[27]</sup>研究发现，有些不良风味的小分子化合物与大豆蛋白中的末端氨基和羧基牢固结合，形成较为复杂的化合物，导致不良风味不易除去。

表 1 酸豆奶主要的发酵菌种  
Table 1 Main fermented strains of fermented soybean milk

菌属	菌种名称
乳杆菌属	嗜酸乳杆菌 ( <i>L. acidophilus</i> )、保加利亚乳杆菌 ( <i>L. bulgaricus</i> )、发酵乳杆菌 ( <i>L. fermentum</i> )、植物乳杆菌 ( <i>L. plantarum</i> )、干酪乳杆菌 ( <i>L. casei</i> )、瑞士乳杆菌 ( <i>L. helveticus</i> )、德氏乳杆菌 ( <i>L. delbrueckii</i> )、鼠李糖乳杆菌 ( <i>L. Rhamnosus</i> )、短乳杆菌 ( <i>L. brevis</i> )、乳酪乳杆菌 ( <i>L. lactis</i> )、副干酪乳杆菌 ( <i>L. paracasei</i> )、枯草芽孢杆菌 ( <i>Bacillus subtilis</i> )、唾液乳杆菌 ( <i>L. salivarius</i> )
双歧杆菌属	动物双歧杆菌 ( <i>B. animalis</i> )、婴儿双歧杆菌 ( <i>B. infantis</i> )、长双歧杆菌 ( <i>B. longum</i> )、短双歧杆菌 ( <i>B. breve</i> )、假短双歧杆菌 ( <i>B. pseudolongum</i> )、两歧双歧杆菌 ( <i>B. bifidum</i> )
链球菌属	嗜热链球菌 ( <i>S. theumophilus</i> )、丁二酮乳链球菌 ( <i>S. diacetylatis</i> )、豆乳链球菌 ( <i>S. sojalactis</i> )、乳酸乳球菌链球菌 ( <i>S. lactiscremoris</i> )、乳脂链球菌 ( <i>S. cremoris</i> )、乳酪链球菌 ( <i>S. cremoris</i> )
明串珠菌属	肠膜明串珠菌 ( <i>L. mesenteroides</i> )、柠檬明串珠菌 ( <i>L. citreum</i> )、乳脂明串珠菌 ( <i>L. humilis</i> )
乳球菌属	乳酸乳球菌 ( <i>Lactococcus lactis</i> )

酸豆奶非挥发性苦涩味物质的来源主要是大豆异黄酮,大豆异黄酮的 12 种组分(见表 2)均具有强烈的苦涩味,每种异黄酮组分有不同的苦涩味阈值,大豆苷及其苷元的阈值排序依次为:大豆黄苷>大豆苷元和乙酰基大豆黄苷>丙二酰基大豆黄苷;黄豆黄苷和染料木苷及其苷元的阈值为糖苷>苷元,具有更高生理活性的苷元型异黄酮苦涩味高于其糖苷型,糖苷型异黄酮在发酵过程中能转化为苷元型异黄酮,从而进一步增加产品的苦涩味<sup>[28-29]</sup>。ROBINSON 等<sup>[29]</sup>发现染料木素的阈值为  $4.006 \times 10^{-3}$  mol/L、大豆苷元的阈值为  $2.921 \times 10^{-3}$  mol/L,远高于 KAZUYOSHI 等<sup>[30]</sup>的报道,并且认为大豆苷元和染料木素不会单独导致大豆食品中的苦涩味。而 HENG 等<sup>[31]</sup>认为酸豆奶苦涩味与大豆皂苷浓度有关,由 A 类、E 类皂苷构

成的 DDMP 类皂苷比 B 类皂苷更苦。同时,发酵过程中大豆蛋白质水解产生的小分子多肽也是苦涩味的重要来源,且主要与分子量在 1000~4000 Da 的多肽有关,分子质量在 500~1000 Da 的大豆多肽苦涩味最强,苦涩味随着大豆多肽分子质量减小逐渐减弱<sup>[32-33]</sup>。

### 3 酸豆奶风味物质的分类

目前研究发现的酸豆奶中的挥发性风味物质共有 184 种(见表 3)<sup>[4-11,15,26,34-43]</sup>。风味物质的种类繁多,但并不是每一种物质都对风味起决定性作用,不同风味物质由于相对含量不同、阈值不同、呈味特性不同,对酸豆奶最终风味的贡献程度也不尽相同<sup>[44]</sup>,表 4 为豆奶主要挥发性风味物质的风味特征<sup>[2,5,26]</sup>。

表 2 大豆异黄酮的种类  
Table 2 Species of soybean isoflavones

取代基团				化合物名称
R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	
	H	H	-	大豆苷元
-OH	H	-OCH <sub>3</sub>	-	黄豆苷元
	-OH	H	-	染料木苷
	H	H	H	葡萄糖苷型大豆黄素
	H	H	-COCH <sub>3</sub>	乙酰基大豆甙
	H	H	-COCH <sub>2</sub> COOH	丙二酰基大豆甙
	H	-OCH <sub>3</sub>	H	葡萄糖苷型黄豆甙
-C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>6</sub> R <sub>4</sub>	H	-OCH <sub>3</sub>	-COCH <sub>3</sub>	乙酰基黄豆甙
	H	-OCH <sub>3</sub>	-COCH <sub>2</sub> COOH	丙二酰基黄豆甙
	-OH	H	H	葡萄糖苷型染料木黄酮
	-OH	H	-COCH <sub>3</sub>	乙酰基染料木甙
	-OH	H	-COCH <sub>2</sub> COOH	丙二酰基染料木甙

注: R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub> 为图 1 中的取代基团, R<sub>4</sub> 为 R<sub>1</sub> 的某系列取代基团。

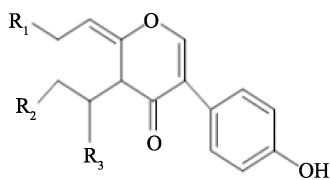


图 1 大豆异黄酮基本结构式

Fig.1 Basic structure of soybean isoflavones

酸豆奶非挥发性苦涩味物质的来源主要是大豆异黄酮,大豆异黄酮分为糖苷型和苷元型异黄酮,苷元型异黄酮是人体可直接吸收的单体,仅占异黄酮总含量的 2%~3%<sup>[45]</sup>。大豆异黄酮共有 12 种组分,其基本结构式见图 1<sup>[45]</sup>,其中苷元型异黄酮有 3 种单体,糖苷型异黄酮有 3 种不同形式,每种形式有 3 种不同单体,详细分类见表 2。

表 3 酸豆奶主要的挥发性风味物质种类  
Table 3 Main volatile compounds of fermented soybean milk

风味物质种类	挥发性风味物质
醇类(41 种)	1,2-庚二醇、1-庚醇、1-壬醇、1-壬烯-4-醇、1-戊醇、1-戊烯-3-醇、1-辛醇、1-辛烯-3-醇、2,3-丁二醇、2-庚烯-1-醇、2-癸烯-1-醇、2-甲基-1-丁醇、2-甲基-3-戊醇、2-甲基苯乙醇、2-甲基丁醇、2-戊烯-1-醇、2-辛醇、2-辛烯-1-醇、2-乙基癸醇、2-乙基己醇、3-己烯-1-醇、3-甲基丁醇、3-戊醇、3-辛醇、4,4-二甲基环己-2-烯醇、6-甲基庚醇、顺-2-戊烯-1-醇、二甲基环己醇、苯乙醇、苜醇、丙三醇、庚醇、环丁醇、糠醇、戊醇、戊烯醇、辛醇、熏衣草醇、乙醇、正丁醇、正己醇
醛类(38 种)	2,4-庚二烯醛、2,4-庚烯醛、2,4-癸二烯醛、2,4-己二烯醛、2,4-壬二烯醛、2-丙烯醛、2-庚烯醛、2-癸烯醛、2-己烯醛、2-甲基丙醛、2-甲基丁醛、2-壬烯醛、2-戊醛、2-辛烯醛、3-甲基-2-丁烯醛、3-甲基丁醛、3-甲基戊醛、3-甲基己醛、5-甲基环戊酮烯醛、5-羟甲基糠醛、苯甲醛、丁醛、反-2,4-癸二烯醛、反-2-庚烯醛、反-2-癸烯醛、反-2-十一烯醛、反-2-戊烯醛、呋喃甲醛、庚醛、庚烯醛、癸醛、己醛、己烯醛、糠醛、壬醛、戊醛、辛醛、乙醛
酮类(35 种)	1-羟基-2-丙酮、1-辛烯-3-酮、2-丁酮、2-庚酮、2-壬酮、2-戊酮、2-十一烷酮、2,3-丁二酮、2,3-庚二酮、2,3-戊二酮、2,3-辛二酮、2,4-二甲基戊酮、2,4-戊二酮、2,5-辛二酮、2-环戊烯酮、2-羟基-3-戊酮、3-己酮、3-辛酮、3-甲基-2-丁酮、3-羟基-2-丁酮、3-羟基丁酮、3-辛烯-2-酮、3,3,3-三甲基-2-氧杂环丁酮、3,5-辛二烯-2 酮、4-甲基-2-己酮、5-甲基-2-甲基乙基环己酮、5-甲基-3-庚酮、丙酮、庚酮、环己酮、环戊烯酮、羟基丙酮、乙酸异戊酯、羟基-3-戊酮、(5H)-呋喃酮
酸类(21 种)	乙酸、己酸、癸酸、庚酸、丁酸、辛酸、戊酸、壬酸、己酸酐、丙酮酸、丙氨酸、苯甲酸、棕榈酸、异戊酸、十四烷酸、十六烷酸、邻苯二甲酸、甲基丙醇二酸、2-辛烯酸、2-甲基十一酸、2-[(1-甲基-1H-1,2,3,4-四唑-苯并呋喃-5-基)硫代]-乙酸
酯类(19 种)	甲酯、甲酸癸酯、甲酸己酯、甲酸辛酯、壬酸乙酯、辛酸乙酯、己酸乙酯、乙酸丁酯、乙酸己酯、乙酸辛酯、乙酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸叔丁酯、丁酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、乙酸 2-甲基丁酯、乙酸 3-甲基丁酯、邻苯二甲酸二乙酯
呋喃类(8 种)	2-乙基呋喃、2-丙基呋喃、2-戊基呋喃、2-甲基四氢呋喃、2-乙基-5-甲基呋喃、2-正丁基呋喃、2-正戊基呋喃、3-甲基呋喃
芳香类(8 种)	苯酚、2,6-二叔丁基对甲酚、苯、甲苯、对二甲苯、1,2,3,4-四甲基苯、1-乙基-2,3 二甲苯基、1-乙基-2-甲基苯
其他类(14 种)	戊烷、辛烯、苯乙烷、苯乙烯、己二烯、柠檬烯、2-乙基-3,6-二甲基吡嗪、3-羟基辛烯、3-乙基-1,5-辛二烯、3-乙基-2-甲基-1-庚烯、4-乙基-5-甲基壬烷、6-甲基庚基乙烯基醚、四氢-2H-吡喃、四氢-2-呋喃甲酸-1-环戊基

表 4 酸豆奶主要挥发性风味物质的风味特征  
Table 4 Flavour description of the main volatile flavors of fermented soybean milk

风味物质	风味描述	风味物质	风味描述
2,3-丁二酮	黄油、奶油、干酪香气	反-2-戊烯醛	油脂味
2,3-戊二酮	黄油、奶油、干酪香气	反-2-癸烯醛	橙子味、青草味
3-羟基-2-丁酮	奶油味、脂肪香气	反,反-2,4-壬二烯醛	煮大豆味
2-庚酮	水果香味、奶油香味	反,反-2,4-癸二烯醛	油脂氧化、油漆味、香料味
2-壬酮	水果香味、奶油香味	反-2-庚烯醛	水果味、柑橘味
己醛	青草味	己醇	青草、油漆味
戊醛	青草味	1-戊醇	酒精味
壬醛	绿菜花、巧橘味	1-壬醇	玫瑰香味、油脂味
庚醛	腐臭味、酸败味	1-辛烯-3-醇	蘑菇味、青草味
辛醛	柠檬味、水果味	乙酸丁酯	水果味
苯甲醛	中药、苦杏仁味	右旋柠檬烯	柠檬味、橙子味
反-2-己烯醛	叶子味	2-戊基呋喃	青草味
3-甲基-丁醛	红茶、黑巧克力味	2-正戊基-呋喃	生味
反-2-辛烯醛	黄瓜、蔬菜味	2-乙基呋喃	烧焦味
2-庚烯醛	青草味、油脂味	冰乙酸	醋味
2,4-癸二烯醛	青草味、油脂味	异戊酸	臭脚丫味
反-2-壬烯醛	水果香、甜香味	—	—

#### 4 酸豆奶风味物质分离分析方法

食品的风味是各种风味物质的复杂组成,是衡量发酵食品质量的重要指标。目前应用于食品风味的检测技术很多,但仍未有能完美提取风味物质的单一方法,每种方法在结果上都会有一定程度的偏差。因此可根据各项检测技术的特点,针对性测定风味物质,以此提高结果的科学性和准确性。如针对挥发性风味物质进行检测方法主要为气相色谱法(gas chromatography, GC)、气相色谱-质谱联用法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、电子鼻等技术,对非挥发性风味物质主要使用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、液相色谱-质谱联用法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)等技术。目前顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术已经被成熟的应用于测定各种食品挥发性风味物质<sup>[46-49]</sup>,液相色谱-质谱联用法适用于非挥发性物质的分离鉴定<sup>[50]</sup>,另外,高效液相色谱法可

直接实现酸豆奶中大豆异黄酮的定性定量分析<sup>[51]</sup>。常见风味物质分离分析技术汇总在表 5<sup>[52]</sup>。

#### 5 展 望

目前,国内外学者在对挥发性风味物质和非挥发性风味物质对酸豆奶感官风味品质的影响研究中,通常只片面考虑其中一种因素,忽略了气味特征和口感特征对酸豆奶产品来说同等重要且缺一不可。随着风味物质的分离分析方法和不断创新,酸豆奶产品中越来越多的风味物质成分及其含量被检出,但是,目前针对风味物质的检测技术仍存如样品前处理繁琐耗时、样品和溶剂消耗量大、提取时间长、效率低等局限性,研究者结合实际实验条件,针对性地选择 1 种或结合 2 种检测技术,对酸豆奶中风味物质进行定性定量分析,得到更加精确全面的产品风味图谱,深入探究酸豆奶关键风味物质的形成机理和代谢途径,从而在关键环节进行人为干预控制,从源头减少不良风味物质产生,达到改善酸豆奶口感和风味的目的。

表 5 酸豆奶风味物质分离分析技术  
Table 5 Separation and analysis of flavor substances of fermented soybean milk

名称	特点	适用范围	分离物质
固相微萃取气相色谱-质谱联用法	易操作、耗时短、高效率、灵敏度高、无需有机溶剂、应用领域广	各种食品挥发性风味领域	醛类、酮类、酸类、脂类、醇类、芳香族、烷烃类、含氮化合物
电子鼻技术	响应时间短、检测速度快,测定评估范围广,重复性好	各种食品挥发性风味领域	样品中整体挥发性成分
顶空固相微萃取气相色谱-质谱联用法	操作方法简单、灵敏度高、效率高、成分分析准确、重复性好、应用领域广	各种食品挥发性风味领域(更适合挥发度低的物质)	醛类、酮类、烯醛类、醇类
气相色谱-质谱联用法	高效能、高准确性、高选择性、高灵敏度、适用范围广	易挥发性和半挥发性代谢物领域	醛类、酮类、呋喃类、烯醛类、醇类
高效液相色谱法	高柱效、高准确性、高选择性、高灵敏度、适用范围广、分析速度快	非挥发性代谢物领域,相对疏水性的化合物领域	醛类、烯醛类、醇类、黄酮类、酚酸类、生物碱、萜类、甾体、核苷、多肽
液相色谱-质谱联用法	正负离子化、谱图简单但信息丰富、多种扫描类型、分析速度快、检测限低	沸点高的非挥发化合物、极性化合物、热不稳定化合物、大分子量化合物领域	醛类、酮类、烯醛类、醇类

另外,国外的植物基酸豆奶市场成熟,发展速度快,国内达利集团、农夫山泉、伊利、六个核桃等企业也相继进军植物基酸豆奶行业,目前尚处于发展初期。在整个大食品行业健康化趋势的带动下,植物基酸豆奶具有很大的发展潜力,国内企业可以从多重风味、植物基原料、功能性等方面上拓展,进行酸豆奶品类创新。

#### 参考文献

- [1] 傅翠真,常汝镇,邱丽娟.中国大豆品种营养品质评价[J].中国食物与营养,2000,(3):12-13.  
FU CZ, CHANG RZ, QIU LJ. Evaluation on nutritional quality of soybean varieties in China [J]. Food Nutr China, 2000, (3): 12-13.

- [2] 徐寅.乳酸菌对发酵豆乳风味及抗氧化活性影响研究[D].扬州:扬州大学,2012.  
XU Y. Effect of lactic acid bacteria on flavor and antioxidant activity of fermented soybean milk [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [3] 林海知.凝固型酸豆乳品质改良及冷藏稳定性研究[D].杭州:浙江工商大学,2011.  
LIN HZ. Studies on the quality improvement and shelf-life stability of set soy bean yogurt [D]. Hangzhou: Zhejiang Technology and Business University, 2011.
- [4] 陈倩.大豆酸乳发酵菌种以及工艺条件优化的研究[D].杭州:浙江工商大学,2015.  
CHEN Q. The study of the strains and the fermentation process optimization of soy yogurt [D]. Hangzhou: Zhejiang Technology and

- Business University, 2015.
- [5] 施小迪. 豆乳及豆乳发酵液不良风味的形成及改善途径研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
SHI XD. Study on the formation and improving methods for off-flavor of soymilk and soymilk fermented liquid [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [6] 周艳平, 张彩猛, 孔祥珍, 等. 酸奶发酵剂对大豆酸奶品质的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(1): 149–156.  
ZHOU YP, ZHANG CM, KONG XZ, *et al.* Effect of yoghurt starter cultures on the quality of soybean yoghurt [J]. Soybean Sci, 2018, 37(1): 149–156.
- [7] 武旭. 利用纳豆芽孢杆菌与乳酸菌发酵全豆豆乳的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.  
WU X. Study on fermentation of whole soybean milk by *Bacillus subtilis natto* and *Lactobacillus* [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [8] 郭帅. 适用于豆乳发酵的嗜热链球菌筛选及其应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.  
GUO S. Screening and application of *Streptococcus thermophilus* suitable for soymilk fermentation [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [9] 杜林, 曾娜, 黄小丹. 两歧双歧杆菌发酵橙汁酸豆奶的研究[J]. 现代食品科技, 2011, 27(11): 1359–1362.  
DU L, ZENG N, HUANG XD. Fermentation of soymilk and orange juice by *Bifidobacterium bifidum* [J]. Mod Food Sci Technol, 2011, 27(11): 1359–1362.
- [10] 李程程. 产黏植物乳杆菌 70810 发酵豆乳生产拉丝酸豆乳饮品的研制[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.  
LI CC. Production of drawing soy beverage produced with sticky *Lactobacillus plantarum* 70810 [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [11] 李学莉, 胡海娥, 张金桃, 等. 乳酸菌发酵豆乳研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(12): 385–390.  
LI XL, HU HE, ZHANG JT, *et al.* Progress in researches on lactic acid bacteria-fermented soymilk [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(12): 385–390.
- [12] ZHENG Y, FEI YT, YANG Y, *et al.* A potential flavor culture: *Lactobacillus harbinensis* M1 improves the organoleptic quality of fermented soymilk by high production of 2,3-butanedione and acetoin [J]. Food Microbiol, 2020, 91: 103540.
- [13] 王冰聪. 产  $\gamma$ -氨基丁酸乳酸菌的筛选及发酵条件的优化[D]. 长春: 长春大学, 2019.  
WANG BC. Screening of  $\gamma$ -amino butyric acid-producing lactic acid bacteria and optimization of the fermentation conditions [D]. Changchun: Changchun University, 2019.
- [14] 郭帅, 韩之皓, 王月娇, 等. *Streptococcus thermophilus* S10 发酵豆乳的基础研究[C]. 益生菌: 技术及产业化——第十三届益生菌与健康国际研讨会, 2018.  
GUO S, HAN ZH, WANG YJ, *et al.* Basic research of *Streptococcus thermophilus* S10 fermented soybean milk [C]. Probiotics: Technology and Industrialization-Summary of the 13th International Symposium on Probiotics and Health, 2018.
- [15] 郭帅, 韩之皓, 白梅, 等. 嗜热链球菌 S10 复合植物乳杆菌 P-8 发酵豆乳中挥发性风味物质的 SPME-GC-MS 分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(10): 268–279.  
GUO S, HAN ZH, BAI M, *et al.* Analysis of fermented soybean milk produced by *Streptococcus thermophilus* S10 compound *Lactobacillus plantarum* P-8 by SPME-GC-MS [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2020, 20(10): 268–279.
- [16] 闫彬. 一组乳酸菌与酵母菌共生关系和风味代谢产物的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.  
YAN B. Research on interactions and flavour metabolites between a strain of lactic acid bacteria and a strain of yeast [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012.
- [17] 韩雪, 雷鹏, 樵飞, 等. 发酵乳制品中乳酸菌与酵母菌相互作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(7): 388–391.  
HAN X, LEI P, JIAO F, *et al.* Research progress on symbiotic between yeasts and lactic acid bacteria in fermented [J]. Sci Technol Food Ind, 2014, 35(7): 388–391.
- [18] 马磊, 孙君明, 韩粉霞. 大豆豆奶风味品质研究进展[J]. 大豆科学, 2012, 31(3): 478–482.  
MA L, SUN JM, HAN FX. Advances on the study of soymilk flavor [J]. Soybean Sci, 2012, 31(3): 478–482.
- [19] MIN S, YU Y, YOO S, *et al.* Effect of soybean varieties and growing locations on the flavor of soymilk [J]. J Food Sci, 2005, 70(1): C1–C11.
- [20] 麻浩, 官春云, 何小玲, 等. 大豆种子脂肪氧化酶缺失基因控制豆腥味的研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(4): 367–372.  
MA H, GUAN CY, HE XL, *et al.* Studies on the different effects of soybean null lipooxygenase genes on beany-flavor [J]. Sci Agric Sin, 2001, 34(4): 367–372.
- [21] EDWIN F, WILLIAM E, EDWARD S. Analysis of autoxidized fats by gas chromatography-mass spectrometry: VII. volatile thermal decomposition products of pure hydroperoxides from autoxidized and photosensitized oxidized methyl oleate, linoleate and linolenate [J]. Lipids, 1981, 18: 353–357.
- [22] LEE JY, MIN S, CHOE EO, *et al.* Formation of volatile compounds in soy flour by singlet oxygen oxidation during storage under light [J]. J Food Sci, 2003, 68(6): 1933–1937.
- [23] ZHANG ZY, ELFALLEH W, HE SD, *et al.* Heating and cysteine effect on physicochemical and flavor properties of soybean peptide Maillard reaction products [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 120(Pt B): 2137–2146.
- [24] GREMLI HA. Interaction of flavor compounds with soy protein [J]. J Am Oil Chem Soc, 1974, 51: 95A–97A.
- [25] SURREY K. Spectrophotometric method for determination of lipoxidase activity [J]. Plant Physiol, 1964, 39(1): 65–70.
- [26] 孙灵湘. 豆浆风味模拟体系的构建及各组分对其风味组成的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2015.  
SUN LX. The construction of model system with soymilk volatiles and influence of components on its flavor [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [27] RACKIS JJ. Spectrophotometric method for determination of lipoxidase activity [J]. J Am Oil Chem Soc, 1979, 56: 262–268.
- [28] KUDOU S, FLEURY D, WELTI D, *et al.* Malonyl isoflavone glycosides in soybean seeds (*Glycine max* Merrill) [J]. Biosci Biotech Bioch, 1991, 55(9): 2227–2233.
- [29] ROBINSON KM, KLEIN BP, LEE SY. Utilizing the R-index measure for threshold testing in model soy isoflavone solutions [J]. J Food Sci, 2004, 69(1): SNQ1–SNQ4.
- [30] KAZUYOSHI O, MIYUKI I, YUJI K, *et al.* Components responsible for the undesirable taste of soybean seeds [J]. Biosci Biotech Bioch, 2014, 56(1): 99–103.
- [31] HENG L, VINCKEN JP, KONINGSVELD GV, *et al.* Bitterness of saponins and their content in dry peas [J]. J Sci Food Agric. 2006, 86(8): 1225–1231.
- [32] CHO MJ, UNKLESBAY N, HSIEH FH, *et al.* Hydrophobicity of bitter

- peptides from soy protein hydrolysates [J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52(19): 5895–5901.
- [33] 邓勇, 冯学武. 大豆多肽分子质量分布与苦味的确定[J]. *中国农业大学学报*, 2001, (4): 98–102.
- DENG Y, FENG XW. Determination of distribution of molecular weight and bitterness of soybean peptides [J]. *J China Agric Univ*, 2001, (4): 98–102.
- [34] 刘瑞雪. 大豆品种和制浆工艺对豆浆中不良物质影响的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- LIU RX. Comparative studies on off-flavor compound profiles of soymilk processed with four different processing technologies and 26 soybean cultivars grown in China [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016.
- [35] 周艳平. 大豆酸奶产品品质的影响因素及制备工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- ZHOU YP. Studies on the factors influencing product quality and the processing technology of soy yogurt [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [36] 冯静文. *Pichia amethionina* Y 的分离鉴定及去除豆腥味研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- FENG JW. Isolation of *Pichia amethionina* Y and its effect on elimination of beany flavor [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [37] 韩之皓. 基于不同基质对复合益生菌在活性乳酸菌饮料中功能特性及挥发性代谢物研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- HAN ZH. Study on the functional characteristics and volatile metabolites of compound probiotics inactive lactic acid bacteria beverage based on different matrix [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [38] 刘容旭. 巴氏杀菌发酵豆乳生产关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- LIU RX. The key technology in the processing of pasteurized fermented soybean milk [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [39] 王若瑾. 混合菌种发酵谷物饮料的研发[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
- WANG RJ. Research and development of fermented grains with mixed strains [D]. Tianjin: Tianjin University of Science Technology, 2017.
- [40] 朱亚军. 豆酸奶适制性菌株的筛选及发酵剂的研制[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- ZHU YJ. Screening of suitable strains for fermented soymilk and development of starter [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.
- [41] 田其英, 华欲飞, 孔祥珍, 等. 豆浆模拟体系中挥发性风味物质的比较研究[J]. *中国油脂*, 2008, 43(11): 116–121.
- TIAN QY, HUA YF, KONG XZ, *et al.* Comparison of volatile flavor substances in soymilk model system [J]. *China Oils Fats*, 2008, 43(11): 116–121.
- [42] 韩之皓, 郭帅, 黄天, 等. 复合益生菌发酵不同基料乳酸菌饮料中挥发性代谢物差异分析[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(3): 300–314.
- HAN ZH, GUO S, HUANG T, *et al.* Difference analysis of volatile flavor metabolite in lactobacillus beverage fermented with complex probiotics [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(3): 300–314.
- [43] 张佳, 马永昆, 崔凤杰, 等. 乳酸菌发酵酸豆乳香气成分分析及评价[J]. *食品科学*, 2010, 31(20): 298–302.
- ZHANG J, MA YK, CUI FJ, *et al.* Determination and evaluation of volatile components of soymilk yoghurts fermented by lactic acid bacteria [J]. *Food Sci*, 2010, 31(20): 298–302.
- [44] 朱涔铭, 郝正祺, 郭顺堂. 不同菌种发酵所得酸豆乳风味物质的主成分分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(17): 5971–5981.
- ZHU CM, HAO ZQ, GUO ST. Principal component analysis of flavoring substances in fermented soymilk with different strains [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(17): 5971–5981.
- [45] 张月洁, 兰韬, 初侨, 等. 大豆异黄酮的制备技术与功能活性进展研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(17): 5964–5970.
- ZHANG YJ, LAN T, CHU Q, *et al.* Progress in preparation technology and functional activity of soybean isoflavones [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(17): 5964–5970.
- [46] JOHANNA D, SARAH T, ANETA M, *et al.* Analysis of selected hop aroma compounds in commercial lager and craft beers using HS-SPME-GC-MS/MS [J]. *J Am Soc Brew Chem*, 2020, 78(1): 16–31.
- [47] CAI JS, ZHU YY, MA RH, *et al.* Effects of roasting level on physicochemical, sensory, and volatile profiles of soybeans using electronic nose and HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Chem*, 2021, 340: 127880.
- [48] DUY TD, DUC PL, THANH DN, *et al.* Isolation of *Penicillium citrinum* from roots of *Clerodendron cyrtophyllum* and application in biosynthesis of aglycone isoflavones from soybean waste fermentation [J]. *Foods*, 2019, 8(11): 554.
- [49] 苗榕芯, 孙莹, 石长波, 等. 顶空固相微萃取气质联用技术在谷物食品中的应用研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(4): 219–224.
- MIAO RX, SUN Y, SHI CB, *et al.* Application of headspace solid phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry in cereal food [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(4): 219–224.
- [50] 朱青欣. 液相色谱-质谱联用技术在食品检测中的应用[J]. *食品安全导刊*, 2020, (20): 29–31.
- ZHU QX. Application of liquid chromatography-mass spectrometry in food detection [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2020, (20): 29–31.
- [51] 米智慧, 胡日查, 陈永福. 超高效液相色谱质谱联用仪在发酵豆乳中异黄酮分析的应用[J]. *食品科技*, 2018, 43(1): 302–305.
- MI ZH, HU RZ, CHEN YF. Analysis of isoflavones in fermented soybean milk by ultra performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Sci Technol*, 2018, 43(1): 302–305.
- [52] 谢建春. 香味分析原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- XIE JC. Principles and techniques of aroma analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

## 作者简介



刘婷, 硕士研究生, 主要研究方向为食品工程。

E-mail: 1249971349@qq.com



赵良忠, 教授, 主要研究方向为食品工程。

E-mail: sys169@163.com