

大豆酸奶风味物质研究进展

黄祖贤, 李松泽, 李营威, 杨晓萍, 王丽, 廖振林, 王洁, 钟青萍, 方祥*

(华南农业大学食品学院, 广州 510642)

摘要: 近年来, 随着行业和消费者对健康和环保的认识不断提高, 植物基酸奶产品市场得到快速发展。大豆是最主要的植物基蛋白来源之一, 营养丰富且具有多种生理活性物质, 以大豆蛋白等植物基蛋白发酵的植物酸奶具有绿色健康等优点, 但产品容易出现豆腥味或者苦涩味等不良风味问题, 风味不佳是目前大豆酸奶产品发展的主要技术瓶颈。本文介绍了大豆酸奶主要风味来源、风味物质分类及风味改良方法, 其中大豆酸奶的不良风味主要来源于大豆原料自身风味物质及发酵过程中乳酸菌产生的挥发性风味物质, 本文提出了改善大豆酸奶产品风味的关键在于优化发酵原料、改善原料加工工艺及筛选适合大豆蛋白发酵的风味菌株, 为今后的大豆酸奶研究和产业发展提供思路。

关键词: 大豆酸奶; 乳酸菌; 发酵; 风味; 挥发性物质

Research progress on flavor substances of soybean yogurt

HUANG Zu-Xian, LI Song-Ze, LI Ying-Wei, YANG Xiao-Ping, WANG Li,
LIAO Zhen-Lin, WANG Jie, ZHONG Qing-Ping, FANG Xiang*

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

ABSTRACT: In recent years, the market for plant-based yogurt products is growing rapidly as the industry and consumers become more aware of health and environmental concerns. Soybean is one of the most important sources of plant-based proteins, which is rich in nutrients and has many physiologically active substances. Plant-based yogurt fermented with soybean proteins has advantages such as being green and healthy, but the product is prone to unpleasant flavor problems such as beany flavor or bitterness, and the unfavorable flavor is the main technical bottleneck in the development of soybean yogurt products. This paper summarized the sources of the main flavor of soybean yogurt, the classification of flavor compounds, and the methods of flavor improvement. The off-flavor of soybean yogurt mainly comes from the unpleasant odor of raw materials and the volatile flavor substances produced by lactic acid bacteria during the fermentation process. The keys to improving the flavor of soybean yogurt are to optimize the fermentation raw materials, improve the processing of raw materials, and screen the flavor strains suitable for soybean proteins fermentation, which provides a reference for future research and industrial development of soybean yogurt.

KEY WORDS: soybean yogurt; lactic acid bacteria; fermentation; flavor; volatile compounds

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2022B0202050001、2022B0202040002)、广东省种业振兴专项(2022-WPY-00-008)

Fund: Supported by the Key-area Research and Development Program of Guangdong Province (2022B0202050001, 2022B0202040002), and the Guangdong Province Rural Revitalization Strategy Special Fund Seed Industry Revitalization Project (2022-WPY-00-008)

*通信作者: 方祥, 教授, 主要研究方向为食品生物技术。E-mail: fxiang@scau.edu.cn

*Corresponding author: FANG Xiang, Professor, College of Food Science, South China Agricultural University, No.483, Wushan Road, Tianhe District, Guangzhou 510642, China. E-mail: fxiang@scau.edu.cn

0 引言

植物蛋白饮料近年来受到消费者广泛青睐。植物蛋白食品被市场广泛接受可以减轻畜牧业对环境的压力,在应对世界人口快速增长和气候变化的背景下,可以满足更多的蛋白需求,并具有环境可持续性^[1-2]。植物酸奶是以植物蛋白为主要原料,接种乳酸菌或乳酸菌与酵母等其他菌株混合制成的发酵剂,经发酵而成的发酵植物蛋白饮品,由于其不含胆固醇和乳糖成为酸牛乳的理想替代品,除了受到普通消费者的喜爱,也为乳糖不耐症、牛奶过敏、素食主义和追求健康的消费者群体提供更好的选择^[3-4]。

大豆蛋白质含量较高,是使用广泛的植物蛋白原料之一^[5]。大豆的蛋白质含量达 30%~40%,脂肪含量达 18%~20%,含有大量的多不饱和脂肪酸和必需氨基酸,并且含有丰富的膳食纤维、微量元素及活性物质,是优质植物蛋白来源,且其来源广、总产量大,是植物基蛋白原料的首选^[6-7]。但豆乳营养物质组成结构与牛乳差异性较大,如在脂肪酸的组成上,牛奶以饱和脂肪酸为主,而豆乳以亚油酸等不饱和脂肪酸为主,不饱和脂肪酸容易形成醛类化合物等二次氧化产物,导致大豆酸奶容易出现豆腥等不良风味缺陷^[8]。同时,大豆蛋白酸奶市场前景虽然广阔,但仍有发酵体系不稳定、产品风味口感较差等问题,给大豆酸奶的应用和推广带来一定的难度。本文综述了发酵豆乳中主要风味来源、风味物质分类及风味改良方法,为大豆酸奶的风味研究和产品开发提供参考。

1 大豆酸奶风味物质及其来源

1.1 影响大豆酸奶风味的因素

发酵植物酸奶风味物质来源主要有:植物蛋白原料和辅料本身的风味物质成分;发酵过程中乳酸菌菌株新陈代谢产生的挥发性风味物质。大豆蛋白原料种类、辅料、发酵菌种和添加剂等均影响着发酵豆乳的风味^[9]。大豆酸奶风味体系构成复杂,其对感官感受影响最大的风味物质一方面来自于发酵原料豆乳,另一方面来自于菌种发酵过程中产生的代谢产物。

1.2 发酵原料豆乳挥发性成分

1.2.1 豆乳中挥发性风味成分及其形成途径

大豆成分对豆乳的风味影响较大,大豆的脂肪酸和蛋白质等成分含量影响着豆乳中挥发性化合物含量^[10]。成熟的完整大豆籽粒本身不含有或仅含有痕量风味成分,在加工成豆乳的过程中,由于酶促氧化反应及非酶促氧化反应,会有不同程度的豆腥味产生^[11-12]。目前脂肪氧化酶(lipoxygenase, LOX)诱导的酶促反应被认为是最主要的豆腥味来源之一^[13-14]。在 LOX 和脂肪酸氢过氧化物裂解酶等作用下,大豆中亚油酸和亚麻酸等多不饱和脂肪酸降解

形成的短链化合物是豆乳中复杂风味的主要来源之一^[15]。

大豆 LOX 是一种含非血红素铁的加氧酶,主要存在 3 种同工酶 LOX1、LOX2 及 LOX3,约占大豆总蛋白的 1%~2%,能够专一催化具有顺,顺-1,4-戊二烯结构的多不饱和脂肪酸的氧化反应^[11,16]。LOX 在进行催化作用时需要两个条件,一是释放酶与底物反应,二是需要水的参与^[17]。LOX 在植物中天然底物主要是亚油酸和亚麻酸,LOX1 能够催化不饱和脂肪酸生成 13-氢过氧化物,LOX2 和 LOX3 催化生成 9-或 13-氢过氧化物^[18-19],其中 LOX2 在豆乳挥发性风味物质的形成中起主要作用^[20]。大豆中含有丰富的亚油酸和亚麻酸,在大豆粉碎过程中细胞破裂释放出脂质及其他小分子物质。在水和氧气等参与下,LOX 催化大豆中多不饱和脂肪酸氧化形成脂肪酸氢过氧化物^[11,15]。氢过氧化物不稳定,容易进一步裂解产生醛、醇和酮等二级氧化产物,这些挥发性化合物共同构成豆乳风味体系^[21-22]。

除了酶促反应外,非酶促氧化反应也是豆乳挥发性风味物质形成途径之一,如大豆不饱和脂肪酸在单线态氧作用下生成 2-戊基呋喃等^[23]。此外豆乳的挥发性化合物形成后能与大豆组分发生相互作用,如醛类、酮类等物质能与大豆蛋白结合,给豆乳风味带来一定的影响^[24-25]。

豆乳主要挥发性风味物质可分为豆腥物质与非豆腥物质,如表 1 所示。豆乳中豆腥物质主要有己醛、己醇、2-戊基呋喃、反-2-己烯醛、1-辛烯-3-醇、1-辛烯-3-酮、反,反-2,4-壬二烯醛和反,反-2,4-癸二烯醛,呈现青草味、蔬菜味、豆腥味、叶子味、蘑菇味、油脂氧化味等不愉快风味;关键非豆腥物质主要有反-2-壬烯醛、壬醛和反-2-辛烯醛,呈现水果香、花香味和青瓜味等令人喜爱的风味^[13,26,30-31]。

1.2.2 豆乳中豆腥挥发性成分及其来源

豆乳中挥发性风味成分主要包括醛类化合物、醇类化合物、酮类化合物、呋喃化合物及其他化合物等。大部分研究认为己醛是最重要的异味化合物,呈现青草味和豆腥味^[21-22]。研究认为,豆乳风味的可接受度不仅基于总挥发性化合物含量,更多的是受到特定挥发性化合物(如己醛等)相对浓度的影响^[32]。

(1)豆乳中主要挥发性醛类物质

挥发性醛类是豆乳主要挥发性化合物,己醛是豆乳中挥发性醛类化合物的主要物质,呈现青草味,感官阈值为 4.5 μg/kg,主要通过 LOX 降解不饱和脂肪酸生成的 13-氢过氧化物进一步裂解形成^[27,33]。YUAN 等^[34]认为豆乳中己醛的含量与大豆亚油酸和 LOX 含量呈正相关性。反-2-己烯醛呈现叶子味,主要通过 LOX 降解亚麻酸形成氢过氧化物,再经氢过氧化物裂解酶降解形成^[18]。反,反-2,4-壬二烯醛呈现豆子味,主要由 LOX 氧化亚麻酸形成 9-氢过氧化物分解产生,反,反-2,4-癸二烯醛呈现油脂氧化味,主要由 LOX 氧化亚油酸形成 13-氢过氧化物分解产生^[15]。

表 1 豆乳中豆腥味与非豆腥味挥发性成分
Table 1 Beany and non-beany volatile components in soymilk

项目	风味物质	风味描述	感官阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	参考文献
豆腥味挥发性成分	己醛	豆腥味、青草味	4.5	[26-27]
	己醇	青草味	500	[18]
	2-戊基呋喃	豆腥味、青草味	5.9~6	[15,18]
	反-2-己烯醛	叶子味、青草味	17~40	[18,22]
	1-辛烯-3-醇	蘑菇味	1.5~6	[22,28]
	1-辛烯-3-酮	蘑菇味、蔬菜味	0.003	[18,29]
	反,反-2,4-壬二烯醛	豆子味	0.09~0.1	[18,26]
	反,反-2,4-癸二烯醛	油脂氧化味	0.027	[18,30]
非豆腥味挥发性成分	反-2-壬烯醛	水果香、甜香味	0.19	[29-30]
	壬醛	柑橘味、花香味	3.5	[13,22]
	反-2-辛烯醛	黄瓜味	3	[22,30]

(2)豆乳中主要挥发性醇类、酮类和呋喃类物质

豆乳中己醇含量较高, 是主要的风味化合物之一^[31]。己醇呈现青草味, 感官阈值在 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 左右, 主要来源于 LOX 氧化亚油酸生成的 13-氢过氧化物^[15,27]。1-辛烯-3-醇在豆乳的醇类化合物中占比较大, 呈现蘑菇味, 感官阈值在 1.5~6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之间^[22,28], 有研究认为豆乳中的 1-辛烯-3-醇主要由氢过氧化反应形成^[35]。豆乳中大部分可挥发酮类物质对豆腥味影响不大, 但其中 1-辛烯-3-酮呈现蘑菇味, 可使豆乳出现不愉快的气味^[18,22]。2-戊基呋喃是一种具有令人不快的豆腥味和青草味的化合物, 感官阈值为 5.9~6.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 可以由单线态氧作用于亚油酸产生^[15,18], 光线与空气的参与也会影响 2-戊基呋喃的生成^[36]。

1.2.3 豆乳中非豆腥味挥发性成分

豆乳中其他挥发性成分中, 反-2-辛烯醛、壬醛和反-2-壬烯醛是主要的非豆腥味挥发性成分。反-2-壬烯醛具有水果香、甜香味, 有研究表明反-2-壬烯醛可以通过非酶促方式形成, 在亚油酸的自氧化和光敏氧化过程中产生^[26]。壬醛呈现柑橘味和花香味, 反-2-辛烯醛呈现黄瓜味, 这些挥发性化合物是豆乳中关键性非豆腥味成分^[30]。

1.3 乳酸菌发酵对大豆酸奶风味的影响

豆乳含有丰富的蛋白质, 具有较高的营养价值, 但还存在豆腥味和涩味等风味问题。发酵可以有效改善豆乳风味, 豆乳经乳酸菌发酵后能够产生发酵乳特征风味, 改善豆乳产品的风味不佳等问题。一方面, 乳酸菌发酵可以有效减少豆乳中豆腥味物质的生成, 如己醛等。另一方面, 乳酸菌在发酵豆乳过程中还能产生如 2,3-丁二酮、2,3-戊二酮、3-羟基-2-丙酮等奶香味物质^[37]。这些风味化合物互相作用, 赋予大豆酸奶独特的风味品质。

乳酸菌种类是影响大豆酸奶产品品质的关键因素, 现有的酸奶发酵剂多为牛乳类产品开发, 直接应用到植物

基蛋白原料发酵上较难获得理想效果^[28]。大豆与牛乳在碳水化合物成分组成上区别较大, 大豆中只含有一定的蔗糖、水苏糖和棉子糖等低聚糖, 缺乏乳酸菌容易利用的乳糖, 而酸奶发酵的菌株是根据牛奶的营养特性筛选出来, 因此大多数牛乳酸菌发酵剂并不适用于豆乳的发酵。如嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌是经典酸奶发酵剂组合, 在牛乳中两种菌株可以建立共生关系, 在豆乳中嗜热链球菌可以生长, 但大部分保加利亚乳杆菌难以利用豆乳中的蔗糖等主要碳源, 二者在豆乳中互相促进生长效果不佳^[38-39]。简单采用该两株菌株进行发酵, 发酵大豆酸奶缺乏典型发酵乳风味, 并容易产生令人不快的馊味^[40]。因此, 针对大豆蛋白原料筛选可发酵并产生良好风味的乳酸菌菌株, 是解决大豆酸奶不良风味问题的重要途径。在研究中常见用于发酵豆乳的乳酸菌如表 2 所示, 主要有乳杆菌属, 其中包括嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌、干酪乳杆菌、鼠李糖乳杆菌等; 链球菌属, 包括嗜热链球菌等; 乳球菌属、双歧杆菌属以及明串珠菌属等。

表 2 常见的大豆酸奶发酵菌株
Table 2 Common fermentation strains of soybean yogurt

菌属	菌种名称
乳杆菌属	嗜酸乳杆菌(<i>Lactobacillus acidophilus</i>)、干酪乳杆菌(<i>L. casei</i>) ^[41] 、植物乳杆菌(<i>L. plantarum</i>) ^[42] 、副干酪乳杆菌(<i>L. paracasei</i>) ^[43] 、发酵乳杆菌(<i>L. fermentum</i>) ^[44] 、鼠李糖乳杆菌(<i>L. rhamnosus</i>) ^[45] 等
链球菌属	嗜热链球菌(<i>Streptococcus thermophilus</i>) ^[46] 等
乳球菌属	乳酸乳球菌(<i>L. lactis</i>) ^[40] 等
双歧杆菌属	动物双歧杆菌(<i>Bifidobacterium animalis</i>) ^[47] 、婴儿双歧杆菌(<i>B. infantis</i>)、长双歧杆菌(<i>B. longum</i>) ^[48] 等
明串珠菌属	肠膜明串珠菌(<i>Leuconostoc mesenteroides</i>) ^[49] 等

1.4 大豆酸奶主要风味物质成分

大豆酸奶风味成分主要由挥发性成分和非挥发性成分组成。挥发性组分由嗅觉感知,是赋予大豆酸奶气味的主要化合物。非挥发性组分由味觉感知,是赋予大豆酸奶滋味的主要化合物,主要为大豆皂苷、大豆异黄酮等^[23]。

1.4.1 大豆酸奶中主要挥发性风味成分

通过传统乳品发酵剂,即保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌的经典配伍发酵豆乳,即使豆腥味降低了也会形成令人不快的风味。有研究认为发酵乳和大豆酸奶大部分风味物质是相似的,如乙醛、双乙酰和乙偶姻,但大豆酸奶中双乙酰的浓度较高,过量的双乙酰可能是大豆酸奶出现异味的原因之一^[38]。双乙酰是乳制品中重要的风味化合物,阈值为 $0.059 \mu\text{g}/\text{kg}$ ^[29],在发酵乳制品中含量为 $1.5\sim 5 \text{ mg}/\text{kg}$ 时会产生一种黄油风味,但过量时可能会带来风味不佳的问题^[50-51]。俞本杰^[52]研究认为发酵乳风味化合物双乙酰、乙醛、乙偶姻在发酵乳基质中有着最佳浓度范围,分别为 $6.65\sim 9.12 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $25.87\sim 35.45 \text{ mg}/\text{kg}$ 和 $37.34\sim 49.86 \text{ mg}/\text{kg}$,三者比例为 $4:16:32$ 时协同效果较好,在比例失调时可能也是引起发酵豆乳不愉快风味的因素,合适的发酵菌株对发酵乳风味起着重要作用。

此外,还有研究认为发酵豆乳异味来源于醛类、醇类以及呋喃类挥发性化合物,如己醇、1-辛烯-3-醇等^[53]。周艳平^[54]认为大豆酸奶中呈豆腥味的风味物质有己醛、苯甲醛、1-辛烯-3-醇和2-戊基呋喃等,这些物质构成了大豆酸奶中豆腥味等复杂风味。

1.4.2 大豆酸奶中非挥发性滋味成分

在大豆酸奶风味体系中,除了挥发性组分,非挥发性成分也对大豆酸奶风味起重要作用。发酵豆乳具有一定程度的涩味和收敛味,大豆中的皂苷和异黄酮是涩味的主要来源之一^[55]。大豆皂苷是大豆籽粒中一类次生代谢产物,主要类型有A型和DDMP型,A型皂苷以大豆皂醇A为苷元,在C-3和C-22位结合2个糖链形成,同时C-22位连接乙酰化糖链基团;DDMP型皂苷以大豆皂醇B为苷元,在C-3和C-22位分别结合1个糖链和DDMP基团形成^[56]。大豆皂苷具有苦涩味,有研究认为A型大豆皂苷C-22位糖链末端糖基发生乙酰化是大豆制品产生不良苦味和涩味的主要原因^[57]。除了皂苷外,大豆异黄酮也会赋予豆乳苦涩味^[58],尤其苷元形式的黄豆苷元和染料木素,苦涩味临界值在 $10^{-1}\sim 10^{-5} \text{ mmol}/\text{L}$ 之间,大豆籽粒中90%以上的大豆异黄酮为糖苷形式,在加工过程中会部分转化为苷元形式,使大豆酸奶苦涩味加重,爽口度降低^[23,55]。

2 大豆酸奶风味改良的主要方法

目前大豆酸奶风味改良的方法主要有以下3种途径:1)优化发酵原料;2)优化加工工艺;3)筛选合适的发酵菌株等。

2.1 发酵原料的改良

2.1.1 选育大豆 LOX 缺失品种

大豆品种是影响豆乳风味品质的重要因素,豆乳的风味品质因大豆成分的含量不同而产生区别^[10]。LOX是豆腥味成分产生的主要原因,ZHOU等^[59]利用正常(NOR)、缺乏脂肪氧化酶(LOX-lack)和缺乏7S-球蛋白(7S-lack)大豆发酵,其中缺乏LOX的大豆酸奶中豆腥味挥发性化合物中己醇和1-辛烯-3-醇的含量最低,具有最佳的感官接受度。目前,国内许多研究所已经选育出多种LOX缺失型品种大豆,如绥无腥1号、绥无腥2号、五星1号、中黄18号、东农56等,选用低豆腥味大豆品种可以减少豆乳去豆腥味的加工工艺,是豆乳加工的理想原料,虽然现在尚未大面积推广,但未来具有广阔的市场前景^[20]。

2.1.2 通过种子发芽后制作豆乳改变原料特性

在大豆发芽过程中,脂质、蛋白质、抗营养因子等化学成分组成会发生变化,大豆制品的风味口感、营养价值和生物利用度会有所改善^[60]。邢竺静等^[61]研究中发现,相比未萌发大豆,大豆萌发20h时LOX活性和脲酶活性均显著下降,豆腥味主要成分己醛、己醇和1-辛烯-3-醇的含量下降,大豆萌发能够有效降低豆腥味对豆乳的影响。刘爱洁等^[62]研究发现大豆在萌发过程中,在内源酶的作用下大分子蛋白被逐渐降解,胰蛋白酶抑制因子活性下降,大豆萌发能使大豆酸奶理化特性和流变特性显著改善。

2.2 加工工艺优化

2.2.1 热处理使 LOX 钝化失活

热处理可以有效降低大豆LOX的活性,减少其诱导的氧化反应产物的产生,从而减少豆类风味化合物的生成^[12]。ZHANG等^[26]研究发现,与室温研磨豆乳相比,热研磨可以显著降低己醛含量,减少豆乳异味的生成。LV等^[13]研究中也发现,大豆浸泡后经 80°C 以上热水研磨处理2~6min,LOX活性降低了30.2%~56.7%,豆腥味物质(己醛、己醇、1-辛烯-3-醇、反-2-己烯醛和反,反-2,4-癸二烯醛)含量减少。另外,烘烤可以改善大豆产品的风味和颜色,减少豆腥味的产生。在NAVICHA等^[63]的研究中, 110°C 相对低温下烘烤80min可以显著灭活大豆中的LOX,提高豆乳产品接受度。加压煮浆可以使豆乳受热均匀,减少不良风味的产生,此外还可以减少消泡剂的使用。施小迪等^[64]研究中,与常压煮浆相比,微压煮浆(0.08~0.1MPa)能显著降低豆腥味,使豆乳中关键性豆腥味成分(己醛、反-2-己烯醛、1-辛烯-3-醇等)质量浓度显著降低,从而改善豆乳整体的风味品质。ZUO等^[65]的研究表明高温压力处理($105\sim 125^\circ\text{C}$ 及 $0.12\sim 0.235 \text{ MPa}$)会使豆乳蛋白质变性以及黏度增加,在 115°C 条件下加热10min的豆乳会表现出均匀光滑的奶油质地,感官评分有所提升。

2.2.2 超高压均质减少脂肪氧化

超高压均质技术能够有效降低乳液的粒径,同时能

使蛋白质均匀包裹大分子表面的油脂, 防止脂质氧化形成不良风味。李良等^[66]研究表明超高压对豆乳风味有积极的影响, 增加均质压力能够降低己醛等豆腥味物质的含量, 但是也会对壬醛等非豆腥味物质造成影响, 其中均质压力在 80 MPa 时豆乳的风味较佳。

2.2.3 超微粉碎技术提升口感

超微粉碎是一种物理改性的方法, 利用机械或者流体力学方法将原材料加工成微米级至纳米级的微粉, 使原材料的理化性质和功能特性发生变化^[67]。乔一腾等^[68]研究发现, 大豆分离蛋白经超微粉碎后, 黏度降低, 而起泡性、乳化性及凝胶性在一定范围内显著提高。MUTTAKIN 等^[69]的研究中, 经气流粉碎技术处理的超细脱脂大豆粉甜度增加了 112%, 苦味减少了 79%, 此外, 气流粉碎可以使大豆粉粗糙度降低, 对感官特性产生积极影响。

2.2.4 添加剂遮蔽异味

在豆乳的加工过程中, 可以添加环糊精等添加剂来覆盖大豆的异味。环糊精可以与大豆非极性化合物形成复合物, 有效掩盖或者减少异味挥发性化合物^[12,70]。 β -环糊精在豆乳生产中有良好的应用价值, LEE 等^[71]研究发现, β -环糊精的添加减少了大豆蛋白中 1-辛烯-3-醇、苯甲醛和己醛等豆味挥发性化合物的产生, β -环糊精能够有效掩盖大豆蛋白制品的豆味。施小迪等^[72]研究发现, 在豆乳温度为 60°C 时加入添加量不小于 0.5% 的 β -环糊精时, 豆乳中己醛、己醇、1-辛烯-3-醇等关键豆腥味物质显著减低, β -环糊精添加量为 0.75% 时所得豆乳风味最佳。

2.3 发酵菌种与菌种组合的选择

2.3.1 单一菌种发酵

微生物发酵是提升大豆酸奶风味的有效方法之一, 其中关键环节是发酵菌种的筛选。在发酵乳菌株筛选时要考虑其在发酵底物中快速发酵的能力及改善感官品质的能力, 后者在消费者接受度方面起着重要作用^[73], 利用适合的菌株发酵能有效地降低大豆酸奶不良风味的产生。陈佩等^[74]利用一株干酪乳杆菌发酵豆乳后风味良好。DU 等^[42]研究发现, 植物乳杆菌 X7021 可以在豆乳中快速生长、酸化和产黏, 降低己醛、1-辛烯-3-醇和 2-戊基呋喃等豆类风味化合物, 并形成乙酸、双乙酰等发酵乳风味物质。

2.3.2 混合菌种发酵

多种菌种混合发酵有利于提高发酵豆乳产品的品质。郭帅等^[75]利用嗜热链球菌 S10 复合植物乳杆菌 P-8 发酵豆乳, 与两种商业豆乳发酵剂相比, 豆腥味挥发性物质相对含量更低, 主要豆腥味挥发性物质己醛含量为 5.62%, 而呈现豆香味的物质乙偶姻、双乙酰、乙酸等含量较高。在发酵豆乳的研究中, 可以根据不同菌株的发酵特性和对产品风味的影响, 进行菌株的复配发酵。任海东^[28]研究表明嗜热链球菌 CG45-1 在豆乳中产酸速度较快, 与保加利亚乳杆菌、副干酪乳杆菌、发酵乳杆菌、鼠李糖乳杆菌和植

物乳杆菌的进行多菌组合适用于发酵豆乳。开菲尔具有丰富的营养价值和保健功能, 其独特的菌群共生体系可以适用于豆乳发酵。杨晓娟^[76]发现豆乳经具有复杂菌群的开菲尔粒发酵后可产生良好风味, 并研制了产品质量稳定、发酵效果好的开菲尔豆酸奶直投式发酵剂。朱亚军^[40]从开菲尔中筛选出豆酸奶的适制性发酵菌株, 选用乳酸乳球菌、植物乳杆菌、副干酪乳杆菌、鼠李糖乳杆菌和嗜热链球菌, 采用风味菌株和功能菌株进行复配, 研制了豆酸奶的适制性发酵剂, 成功解决了酸豆乳的风味问题, 为酸豆乳的产业化提供了基础。混合菌种发酵的研究中, 将风味菌株与产多糖的乳酸菌以及可生物转化大豆异黄酮或降解抗营养因子的功能菌株进行科学组合, 可有效解决植物酸奶的风味和质构问题, 并兼顾植物酸奶产品健康功能方面获得更好的产品。

3 展 望

植物基食品在近年来成为行业技术发展和市场的热点, 受到广泛关注。随着全球气候变暖, 各国都出台了相应的节能减排措施, 植物基食品的快速发展和, 可通过减少动物食品消耗从而推动减少养殖业环节的减排。植物酸奶在欧美发达国家市场近年来获得快速发展, 但在亚洲和非洲市场份额极少, 未来具有极大的增长空间。这些因素吸引了大量的资本进入, 也必将推动相关技术研究快速推进。随着技术的发展, 大豆酸奶的风味成分的研究方法不断更新, 如通过电子鼻与电子舌多元统计分析结合, 可以有效评价发酵乳的滋味和气味^[77-78], 电子鼻和电子舌是电子感官智能检测系统, 可以通过模仿人类嗅觉和味觉, 从样品气味和滋味方面分析食品整体风味情况^[79]。气相色谱-质谱法可以用于发酵乳的主要风味化合物分析和检测, 适用范围广、分离度高^[80-81]。气相色谱-离子迁移谱法具有灵敏度高、分离效率高、检测限低和选择性好等优点, 且无需进行样品的预处理, 可以对挥发性化合物进行快速的定性定量分析^[82-83]。此外, 气相色谱-嗅闻-质谱法、动态顶空稀释分析法也常用于风味成分分析^[18,84]。这些技术的进步能够推动痕量风味成分的分析, 防止主观误判, 可以在关键环节中进行人为干预, 减少不良风味物质的产生, 推动大豆酸奶风味的深入研究。

发酵菌株对大豆酸奶的风味至关重要, 但传统酸奶生产所用的嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌经典组合难以适用大豆营养体系。在以大豆蛋白为原料的植物酸奶的产业发展过程中, 需要根据植物基蛋白的原料特性, 收集和选育适合大豆酸奶发酵的风味菌株。同时, 通过风味菌株和其他菌株复配, 提高大豆酸奶的质构稳定性, 并解决贮藏期后酸化等问题, 将是未来以大豆蛋白为主要原料的植物基酸奶的研究开发和产业化发展的重要课题。

随着大健康产业的快速发展, 植物基发酵饮品, 兼

具有抗氧化和益生菌改善肠道菌群等功能,具有非常广阔的市场前景。国内企业可以从风味、功能特性上进行大豆酸奶品类的创新,为人们带来更多元、更健康的植物基蛋白产品。

参考文献

- [1] 王毅文. 混合乳酸菌发酵豆乳的抗氧化活性与风味研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
WANG YW. Multiple-strain *Lactobacillus*-fermented soymilk with antioxidant capacity and delicate flavour [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [2] PANDEY S, RITZ C, PEREZ-CUETO F. An application of the theory of planned behaviour to predict intention to consume plant-based yogurt alternatives [J]. *Foods*, 2021, 10(1): 148.
- [3] 罗洒. 多种益生菌混合发酵制备大豆基植物酸奶的工艺初探[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022.
LUO S. A preliminary study of co-fermentation of soybean-based plant milk yogurt by mixed-culture with several probiotics [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022.
- [4] GRASSO N, ALONSO-MIRAVALLS L, O'MAHONY JA. Composition, physicochemical and sensorial properties of commercial plant-based yogurts [J]. *Foods*, 2020, 9(3): 252.
- [5] MADJIREBAYE P, PENG F, HUANG T, *et al.* Effects of fermentation conditions on bioactive substances in lactic acid bacteria-fermented soymilk and its storage stability assessment [J]. *Food Biosci*, 2022, 50: 102207.
- [6] 聂莹, 邢亚楠, 黄家章, 等. 主栽大豆营养品质及加工特性初探[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(17): 1-7.
NIE Y, XING YN, HUANG JZ, *et al.* Nutritional quality and preliminary investigation of processing characteristics for main soybean cultivars [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(17): 1-7.
- [7] KAHARSO VC, MUHOZA B, KONG X, *et al.* Quality improvement of soymilk as influenced by anaerobic grinding method and calcium addition [J]. *Food Biosci*, 2021, 42: 101210.
- [8] SUGAHARA H, KATO S, NAGAYAMA K, *et al.* Heterofermentative lactic acid bacteria such as *Limosilactobacillus* as a strong inhibitor of aldehyde compounds in plant-based milk alternatives [J]. *Front Sustain Food Syst*, 2022, 6: 965986.
- [9] CHENG HCH. Volatile flavor compounds in yogurt: A review [J]. *CRC Crit Rev Food Sci Nutr*, 2010, 50(10): 938-950.
- [10] SHI X, LI J, WANG S, *et al.* Flavor characteristic analysis of soymilk prepared by different soybean cultivars and establishment of evaluation method of soybean cultivars suitable for soymilk processing [J]. *Food Chem*, 2015, 185: 422-429.
- [11] TIAN Q, HUA Y. Oxidation reactions in model systems simulating the processing of soybeans into soymilk: Role of lipase and lipoxygenase in volatile flavors formation [J]. *Int J Food Prop*, 2021, 24(1): 192-202.
- [12] WANG B, ZHANG Q, ZHANG N, *et al.* Insights into formation, detection and removal of the beany flavor in soybean protein [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 112: 336-347.
- [13] LV Y, SONG H, LI X, *et al.* Influence of blanching and grinding process with hot water on beany and non-beany flavor in soymilk [J]. *J Food Sci*, 2011, 76(1): S20-S25.
- [14] KANEKO S, KUMAZAWA K, NISHIMURA O. Studies on the key aroma compounds in soy milk made from three different soybean cultivars [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(22): 12204-12209.
- [15] JI GZ, LI XM, DONG Y, *et al.* Composition, formation mechanism, and removal method of off-odor in soymilk products [J]. *Food Sci*, 2022, 87(12): 5175-5190.
- [16] 高雨婷, 钱建瓌, 史劲松, 等. 大豆脂肪氧合酶的粗提取及其强化乳香风味的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(21): 90-96.
GAO YT, QIAN JY, SHI JS, *et al.* Crude extraction of soybean lipoxygenase for enhancement of milk flavor [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(21): 90-96.
- [17] ALHENDI A, YANG W, GOODRICH-SCHNEIDER R, *et al.* Sensory evaluation and flavour analysis of soymilk produced from lipoxygenase-free soya beans after modified processes and pulsed light treatment [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2018, 53(6): 1434-1441.
- [18] 冯笑笑. 豆浆关键挥发性异味成分的形成机制及加工工艺对豆浆风味影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
FENG XX. Study on the formation mechanism of key off-flavor compounds and the effect of processing on soymilk flavor [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [19] HAYWARD S, CILLIERS T, SWART P. Lipoxygenases: from isolation to application [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2017, 16(1): 199-211.
- [20] 曾祥博. 不同脂肪氧化酶缺失型大豆制备豆浆中挥发性组分及其中间产物比较和分析[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
ZENG XB. Comparison and analysis on the volatility components and intermediate products in soymilk prepared from different lipoxygenase-free soybean varieties [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.
- [21] WANG Z, BAO G, YANG C, *et al.* A genome-wide association study of hexanal content related to soymilk off-flavours in seed of soybean (*Glycine max*) [J]. *Crop Pasture Sci*, 2020, 71(6): 552-561.
- [22] 田其英. 基于多元模拟体系的豆浆挥发性成分形成机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
TIAN QY. Study on formation mechanism of volatile components in soymilk based on multiple simulation system [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [23] 刘婷, 赵良忠, 李明, 等. 乳酸菌发酵酸豆奶中不良风味物质研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(14): 5720-5726.
LIU T, ZHAO LZ, LI M, *et al.* Research progress on off-flavor substance in fermented soybean milk by lactic acid bacteria [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(14): 5720-5726.
- [24] SHI X, HAO Z, WANG R, *et al.* Changes of hexanal content in fermented soymilk: Induced by lactic acid bacterial fermentation and thermal treatment [J]. *J Food Process Preserv*, 2022, 46(5): e16555.
- [25] 郭军. 大豆分离蛋白与水果风味化合物相互作用影响因素研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
GUO J. Study on the factors affecting interaction between soy protein isolate and fruit flavor compounds [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [26] ZHANG Y, GUO ST, LIU ZS, *et al.* Off-flavor related volatiles in soymilk as affected by soybean variety, grinding, and heat-processing methods [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(30): 7457-7462.
- [27] FISCHER E, CAYOT N, CACHON R. Potential of microorganisms to decrease the "beany" off-flavor: A review [J]. *J Agric Food Chem*, 2022, 70(15): 4493-4508.
- [28] 任海东. 商业发酵剂菌株分离以及组合菌在豆奶基中的发酵特性和对大豆酸奶品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
REN HD. Isolation of commercial starter strains and the effects of combined bacteria on the fermentation characteristics and quality of soy yoghurt [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [29] 叶美霞, 李荣, 姜子涛, 等. 不同年龄段乳粉的挥发性风味成分分析及其分类预测[J]. *食品科学*, 2022, 43(16): 242-252.
YE MX, LI R, JIANG ZT, *et al.* Analysis, classification and prediction of volatile flavor components in milk powders for different age groups [J]. *Food Sci*, 2022, 43(16): 242-252.

- [30] 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.
- [31] YU H, LIU R, HU Y, *et al.* Flavor profiles of soymilk processed with four different processing technologies and 26 soybean cultivars grown in China [J]. *Int J Food Prop*, 2018, 20(sup3): S2887–S2898.
- [32] ACHOURI A, BOYE JI, ZAMANI Y. Identification of volatile compounds in soymilk using solid-phase microextraction-gas chromatography [J]. *Food Chem*, 2006, 99(4): 759–766.
- [33] FENG X, LI X, ZHANG C, *et al.* Formation mechanism of hexanal and (*E*)-2-hexenal during soybean [*Glycine max* (L.) Merr] processing based on the subcellular and molecular levels[J]. *J Agric Food Chem*, 2022, 70(1): 289–300.
- [34] YUAN S, CHANG SK. Selected odor compounds in soymilk as affected by chemical composition and lipoxygenases in five soybean materials [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(2): 426–431.
- [35] MATSUI K, TAKEMOTO H, KOEDUKA T, *et al.* 1-Octen-3-ol is formed from its glycoside during processing of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] seeds [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(28): 7409–7416.
- [36] YUAN SH, CHANG SKC. Selected odor compounds in cooked soymilk as affected by soybean materials and direct steam injection [J]. *J Food Sci*, 2007, 72(7): S481–S486.
- [37] 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.
- [38] KANEKO D, IGARASHI T, AOYAMA K. Reduction of the off-flavor volatile generated by the yogurt starter culture including *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* in soymilk [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(7): 1658–1663.
- [39] 李锋, 华欲飞. 应用不同类型的大豆蛋白制备大豆酸奶[J]. *食品与生物技术学报*, 2004, 23(3): 61–64.
LI F, HUA YF. Preparation of soy-based yogurt with different type of soy proteins[J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2004, 23(3): 61–64.
- [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] AHSAN S, KHALIQ A, CHUGHTAI M, *et al.* Technofunctional quality assessment of soymilk fermented with *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* [J]. *Biotechnol Appl Biochem*, 2022, 69(1): 172–182.
- [42] DU L, RO K, ZHANG Y, *et al.* Effects of *Lactiplantibacillus plantarum* X7021 on physicochemical properties, purines, isoflavones and volatile compounds of fermented soymilk [J]. *Process Biochem*, 2022, 113: 150–157.
- [43] CHOUDHARY S, SINGH M, SHARMA D, *et al.* Principal component analysis of stimulatory effect of synbiotic combination of indigenous probiotic and inulin on antioxidant activity of soymilk [J]. *Probiotics Antimicrob Proteins*, 2019, 11(3): 813–819.
- [44] 陈涛, 马映昆, 陈福生. 适合豆乳发酵的乳酸菌筛选及其应用[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(3): 76–82.
CHEN T, MA YH, CHEN FS. Study on screening and application of *Lactobacillus* spp. for fermentation of soymilk yogurt [J]. *Food Ferment Ind*, 2014, 40(3): 76–82.
- [45] WU H, JIANG L, SHUM TF, *et al.* Elucidation of anti-hypertensive mechanism by a novel *Lactobacillus rhamnosus* ac1 fermented soymilk in the deoxycorticosterone acetate-salt hypertensive rats [J]. *Nutrients*, 2022, 14(15): 3174.
- [46] BOULAY M, AL HM, RUL F. *Streptococcus thermophilus* growth in soya milk: Sucrose consumption, nitrogen metabolism, soya protein hydrolysis and role of the cell-wall protease PrtS [J]. *Int J Food Microbiol*, 2020, 335: 108903.
- [47] CHARNCHAI P, JANTAMA SS, JANTAMA K. Genome analysis of food-processing stressful-resistant probiotic *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BF052, and its potential application in fermented soymilk [J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2017. DOI: 10.1093/femsle/fnx180
- [48] WANG YC, YU RC, CHOU CC. Antioxidative activities of soymilk fermented with lactic acid bacteria and *Bifidobacteria* [J]. *Food Microbiol*, 2006, 23(2): 128–135.
- [49] MANTEGAZZA G, DALLA VA, LICATA A, *et al.* Use of kefir-derived lactic acid bacteria for the preparation of a fermented soy drink with increased estrogenic activity [J]. *Food Res Int*, 2023, 164: 112322.
- [50] ZHENG Y, FEI Y, 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.
- [51] 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, ZHANAG CM, KONG XZ, *et al.* Effect of yoghurt starter cultures on the quality of soybean yoghurt [J]. *Soybean Sci*, 2018, 37(1): 149–156.
- [52] 俞本杰. 发酵乳中增香乳酸菌的筛选及其产香机制研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2020.
YU BJ. Screening of high flavor-producing lactic acid bacteria and their mechanism for flavor production [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.
- [53] 徐寅, 黄玉军, 陈霞, 等. 牛乳含量对发酵豆乳风味成分的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(4): 1–5.
XU Y, HUANG YJ, CHEN X, *et al.* Influence of milk content on flavor compounds in fermented soymilk [J]. *Food Sci*, 2013, 34(4): 1–5.
- [54] 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.
- [55] 马磊, 孙君明, 韩粉霞. 大豆酸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.
- [56] 陈禹汐, 于寒松, 王敏, 等. 大豆皂苷的研究进展与应用[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 420–427.
CHEN YX, YU HS, WANG M, *et al.* Research progress and application of soybean saponins [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(21): 420–427.
- [57] TAKAHASHI Y, LI X, TSUKAMOTO C, *et al.* Identification of a novel variant lacking group A soyasaponin in a Chinese wild soybean (*Glycine soja* Sieb. & Zucc.): Implications for breeding significance [J]. *Plant Breed*, 2016, 135(5): 607–613.
- [58] MA L, LI B, HAN F X, *et al.* Evaluation of the chemical quality traits of soybean seeds, as related to sensory attributes of soymilk [J]. *Food Chem*, 2015, 173: 694–701.
- [59] ZHOU Y, LI X, HUA Y, *et al.* The absence of lipoxygenase and 7S globulin of soybeans and heating temperatures on the properties of soymilks and soy yogurts [J]. *LWT*, 2019, 115: 108431.

- [60] LE P H, DIEP TT, NGUYEN NTA, *et al.* Evaluation of physicochemical properties of soymilk prepared from germinated soybean [J]. *J Food Process Preserv*, 2021, 45(12): e16070.
- [61] 邢竺静, 李笑梅, 赵廉诚, 等. 大豆萌发期脂肪氧化酶与脲酶活性变化及钝化方法效果评价[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(1): 14-19.
- XING ZJ, LI XM, ZHAO LC, *et al.* The effect evaluation of lipoxigenase and urease activity and passivation method in soybean germination [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(1): 14-19.
- [62] 刘爱洁, 冯立科, 李理. 大豆萌发对大豆酸奶品质的影响[J]. *食品与机械*, 2013, 29(2): 13-17.
- LIU AIJ, FENG LK, LI L. Effect of germinated soybean to soy yogurt preparation [J]. *Food Mach*, 2013, 29(2): 13-17.
- [63] NAVICHA WB, HUA Y, MASAMBA K, *et al.* Optimization of soybean roasting parameters in developing nutritious and lipoxigenase free soymilk [J]. *J Food Meas Charact*, 2017, 11(4): 1899-1908.
- [64] 施小迪, 左锋, 郭顺堂. 微压煮浆对豆乳风味特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(5): 343-349.
- SHI XD, ZUO F, GUO ST. Effect of micro-pressure heating on soymilk flavor characteristics [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2017, 48(5): 343-349.
- [65] ZUO F, PENG X, SHI X, *et al.* Effects of high-temperature pressure cooking and traditional cooking on soymilk: Protein particles formation and sensory quality [J]. *Food Chem*, 2016, 209: 50-56.
- [66] 李良, 田甜, 刘军, 等. 超高压均质对豆乳风味特性的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(4): 133-137.
- LI L, TIAN T, LIU J, *et al.* Effect of ultra high pressure homogenization on soymilk flavor characteristics [J]. *Food Ind*, 2019, 40(4): 133-137.
- [67] 杨春瑜, 柳双双, 梁佳钰, 等. 超微粉碎对食品理化性质影响的研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(1): 220-224.
- YANG CY, LIU SS, LIANG JY, *et al.* Effects of superfine grinding technology on physical and chemical properties of food [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(1): 220-224.
- [68] 乔一腾, 司玉慧, 盖国胜, 等. 超微粉碎对大豆分离蛋白功能性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(9): 57-61.
- QIAO YT, SI YH, GAI GS, *et al.* Effect of ultra-micro-comminution on the functional properties of soybean isolate protein [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2012, 12(9): 57-61.
- [69] MUTTAKIN S, KIM MS, LEE DU. Tailoring physicochemical and sensorial properties of defatted soybean flour using jet-milling technology [J]. *Food Chem*, 2015, 187: 106-111.
- [70] SAKAI K, SATO Y, OKADA M, *et al.* Cyclodextrins produced by cyclodextrin glucanotransferase mask beany off-flavors in plant-based meat analogs [J]. *PLoS One*, 2022, 17(6): e269278.
- [71] LEE EJ, KIM H, LEE JY, *et al.* Beta-cyclodextrin-mediated beany flavor masking and textural modification of an isolated soy protein-based yuba film [J]. *Foods*, 2020, 9(6): 818.
- [72] 施小迪, 吕艳春, 郭顺堂. 热处理及 β -环糊精添加量对豆乳风味的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 293-300.
- SHI XD, LV YC, GUO ST. Effects of heat treatment and β -cyclodextrin addition on soymilk flavor [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2017, 33(8): 293-300.
- [73] PATRIGNANI F, MODESTO M, MICHELINI S, *et al.* Technological potential of *Bifidobacterium aesculapii* strains for fermented soymilk production [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 89: 689-696.
- [74] 陈佩, 党辉, 贺国旗, 等. 一株干酪乳杆菌生物学特性及其发酵豆乳的研究[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(17): 17-21.
- CHEN P, DANG H, HE GQ, *et al.* Study on the biological characteristics of *Lactobacillus casei* and application in the fermented soymilk produce [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(17): 17-21.
- [75] 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.
- [76] 杨晓娟. 开菲尔豆酸奶直接式发酵剂的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- YANG XJ. Study on the kefir soybean yogurt direct-vat-set cultures (DVS) [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [77] 陈聰. 双孢蘑菇酸奶溶豆的制备及食用品质研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022.
- CHEN C. A study on the preparation technique and eating quality of yogurt melts added with *Agaricus bisporus* [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022.
- [78] 祝玉婷. 无蔗糖酸奶与普通酸奶感官及理化性质差异性研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2021.
- ZHU YT. Study on the difference of sensory and physicochemical properties of sucrose-free yogurt and plain yogurt [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2021.
- [79] 蔡雨静, 张振宇, 王彩玲, 等. 电子鼻、电子舌结合 SPME-GC-MS 对青海玉树牦牛肉挥发性化合物分析[J]. *食品工业科技*: 1-14. [2023-04-21]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100236
- CAI YJ, ZHANG ZY, WANG CL, *et al.* Application of electronic nose, electronic tongue intelligent detection combined with SPME-GC-MS in the identification of flavor characteristics of Yushu yak [J]. *Sci Technol Food Ind*: 1-14. [2023-04-21]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100236
- [80] KAMEL DG, MANSOUR A, EL-DIIN M, *et al.* Using rosemary essential oil as a potential natural preservative during stirred-like yogurt making [J]. *Foods*, 2022, 11(14): 1993.
- [81] ZHANG X, TIAN W, XIE B, *et al.* Insight into the influence of lactic acid bacteria fermentation on the variations in flavor of chickpea milk [J]. *Foods*, 2022, 11(16): 2445.
- [82] LI N, HUANG G, ZHANG Y, *et al.* Diversity of volatile compounds in raw milk with different $n-6$ to $n-3$ fatty acid ratio [J]. *Animals*, 2022, 12(3): 252.
- [83] YANG Y, WANG B, FU Y, *et al.* HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds across different production stages of fermented soybean whey tofu [J]. *Food Chem*, 2021, 346: 128880.
- [84] ZHAO M, LI H, ZHANG D, *et al.* Variation of aroma components of pasteurized yogurt with different process combination before and after aging by DHS/GC-O-MS [J]. *Molecules*, 2023, 28(4): 1975.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



黄祖贤, 硕士研究生, 主要研究方向为食品生物技术。

E-mail: huangzuxian2020@163.com



方祥, 教授, 主要研究方向为食品生物技术。

E-mail: fxiang@scau.edu.cn