

豆豉挥发性风味研究进展

张凤霞^{1,2},殷丽君²,贾鑫²,高雅鑫¹,胡森¹,文伟¹,李淑英^{1*},王凤忠^{1*}

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所,北京 100193;2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院,北京 100083)

摘要: 豆豉是中国传统特色发酵豆制品调味料,因其独特风味而备受消费者青睐。豆豉的生产过程由多个操作单元组成,操作单元的差异能使豆豉的挥发性风味有所区别,主要是由改变发酵体系中微生物组成所造成的。微生物分泌的酶系能将大豆中大分子营养物质水解成小分子营养物质,最终形成多种挥发性风味物质,从而呈现特征风味。基于此,该文对豆豉的分类、挥发性风味物质轮廓进行系统概述,分析豆豉中微生物群落及其与挥发性风味的相关性,并归纳微生物诱导挥发性风味物质形成的机制。

关键词: 发酵豆制品;豆豉;微生物多样性;挥发性风味;形成机制

Research Progress on Volatile Flavor of Douchi

ZHANG Fengxia^{1,2}, YIN Lijun², JIA Xin², GAO Yaxin¹, HU Miao¹, WEN Wei¹,
LI Shuying^{1*}, WANG Fengzhong^{1*}

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Douchi is a traditional fermented bean product condiment in China, which is favored by consumers due to its unique flavor. The production process of Douchi consists of several operating units, and the difference of operating units can cause differences in the volatile flavor of Douchi, which is mostly caused by changing the composition of microorganisms in the fermentation system. The enzyme system secreted by microorganisms can hydrolyze the macromolecular nutrients in soybean into small molecular nutrients, and finally form a variety of volatile flavor substances, thereby presenting characteristic flavor. Based on this, this paper provides a systematic overview of the classification of Douchi, the volatile flavor profile, analyses the microbial community in Douchi and its correlation with volatile flavor, and summarizes the mechanism of microbial-induced formation of volatile flavor substances.

Key words: fermented bean products; Douchi; microbial diversity; volatile flavor; formation mechanism

引文格式:

张凤霞,殷丽君,贾鑫,等. 豆豉挥发性风味研究进展[J]. 食品研究与开发,2025,46(5):204-211.

ZHANG Fengxia, YIN Lijun, JIA Xin, et al. Research Progress on Volatile Flavor of Douchi[J]. Food Research and Development,2025,46(5):204-211.

豆豉是我国传统发酵豆制品之一,因其具有独特的风味,成为一种深受大众喜爱的调味品。豆豉还富含蛋白质、脂肪等营养成分及生物活性肽、异黄酮、低聚糖等功能成分^[1],具有预防心血管疾病、高血压、高

血糖等^[2-3]功效。随着国民健康意识的不断增强,豆豉日益受到消费者关注。

目前,我国是全球最大的豆豉消费国家,豆豉需求规模还在不断增长。为了广泛推广豆豉产业,领域内

基金项目:山东省重点研发计划项目(2022CXGC010602)

作者简介:张凤霞(2000—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食品加工与安全。

*通信作者:李淑英(1979—),女(汉),副研究员,博士,研究方向:功能食品与生物活性物质;王凤忠(1972—),男(汉),研究员,博士,研究方向:功能食品与生物活性物质。

专家更多聚焦于豆豉的营养成分和功能活性成分的挖掘、提取及纯化,关于豆豉风味探索及形成机制的系统研究较少。然而,豆豉风味是影响其品质特性的关键指标,风味可分为挥发性风味和非挥发性风味,其中挥发性风味成分是评价食品品质和消费者接受度的最重要特征之一,豆豉的微生物组成是豆豉形成特有挥发性风味的核心因素。本文对豆豉的分类、挥发性风味物质轮廓进行概述,分析豆豉中微生物群落及其与挥

发性风味相关性,并归纳微生物诱导挥发性风味物质的形成机制,以期为提高豆豉的挥发性风味品质、改善其发酵工艺及产业化生产提供理论依据。

1 豆豉及其分类

豆豉主要是以大豆为原料,经微生物发酵后获得的一种传统发酵豆制品。豆豉品种众多,制作关键工序见图1。

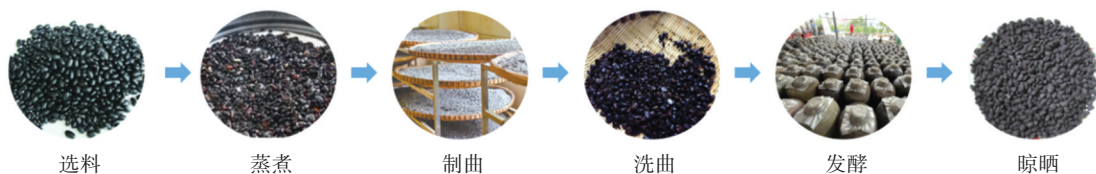


图1 豆豉制作关键工序

Fig.1 Key process of Douchi production

豆豉可依据不同标准及特征对其品种进行分类。

1)根据发酵微生物的来源,豆豉可分为自然发酵豆豉和接种发酵豆豉。自然发酵豆豉的发酵方式呈开放式,参与发酵的微生物繁多,使豆豉风味呈多元化^[4]。但自然发酵方式易受到有害微生物如黄曲霉和寄生曲霉等污染^[5],使产品安全性无法保证,且品质参差不齐。接种发酵豆豉包括纯种发酵和混合发酵。接种发酵菌种可控性强,有利于提高豆豉安全性并缩短发酵周期。纯种发酵由于菌种单一,其挥发性风味物质的丰富性不及自然发酵豆豉^[6-7],混合发酵则弥补了纯种发酵风味不足的弊端,在一定程度上改善了豆豉的挥发性风味。

2)根据制曲阶段的优势微生物可将豆豉分为霉菌型豆豉和细菌型豆豉,霉菌型豆豉又有毛霉型豆豉、根霉型豆豉、曲霉型豆豉等,细菌型豆豉中主要微生物为枯草芽孢杆菌和乳酸菌。微生物对豆豉的利用能力存在差异,采用不同微生物发酵豆豉,能使产品的风味不一。我国生产的豆豉多为霉菌型豆豉,其味道醇厚浓郁且风味独特,能增加菜肴的风味复杂程度和口感层次。细菌型豆豉的典型代表是以枯草芽孢杆菌为主要微生物的日本纳豆,具有较高营养价值和生理活性,但其特殊风味难以被我国消费者接受^[8]。

3)根据发酵阶段食盐的使用情况,豆豉可分为淡豆豉和咸豆豉。淡豆豉采用无盐发酵,味道偏淡,但在发酵过程中添加了青蒿、桑叶等中药^[9],提高了其药用价值,被纳入国家卫生健康委员会公布的《按照传统既是食品又是中药材的物质目录》。咸豆豉的发酵阶段会添加食盐,咸香浓郁,具有开胃增食的作用,是一种深受大众喜爱的调味品。是否添加食盐和食盐的添加量均会影响豆豉中微生物的生长和代谢,添加食盐能抑制部分微生物生长,继而简化微生物群落^[10],最终影

响豆豉的风味。

此外,我国拥有多种地域特色豆豉品牌,如阳江豆豉、永川豆豉、临沂豆豉、浏阳豆豉等。不同地区制作工艺、气候条件的差异,使得豆豉中微生物组成有区别,从而生产出多种风味独特的豆豉。对豆豉品牌分类有利于保护和传承各地豆豉的制作工艺和传统文化,增强地域特色和文化认同。目前学者多以具体品牌豆豉为焦点对豆豉进行研究^[11]。

豆豉发酵过程中原料、微生物与发酵工艺的差异会影响豆豉最终风味品质,通过归纳豆豉的分类方式发现,这些因素大多通过改变豆豉体系中的微生物群落及其代谢情况,进而改变豆豉的挥发性风味物质组成,最终改变豆豉的挥发性风味,说明微生物是发酵豆豉的核心因素。

2 豆豉挥发性风味轮廓

挥发性风味是影响产品品质和消费者对豆豉接受度的直观属性之一。豆豉挥发性风味物质主要包括酯类、醇类、醛类、吡嗪类、酸类等,呈现酱香、豉香、酒香、甜香、烟熏味等优良风味以及霉味、腥臭味等异味^[12-17],豆豉挥发性风味轮廓见图2。

2.1 酯类

酯类物质是豆豉香气的主体成分,多数酯类物质具有高挥发性和较低气味阈值,其含量对豆豉风味具有决定性作用,还可降低脂肪酸和胺类等产生的异味。酯类物质可赋予豆豉花香和果香,使其香气更为复杂。邹强等^[18]从市售毛霉型豆豉中检测出了22种酯类物质,其中亚油酸乙酯、棕榈酸乙酯、油酸乙酯为主体香气成分。

2.2 醇类

醇类物质是豆豉中主要挥发性成分之一,醇类物

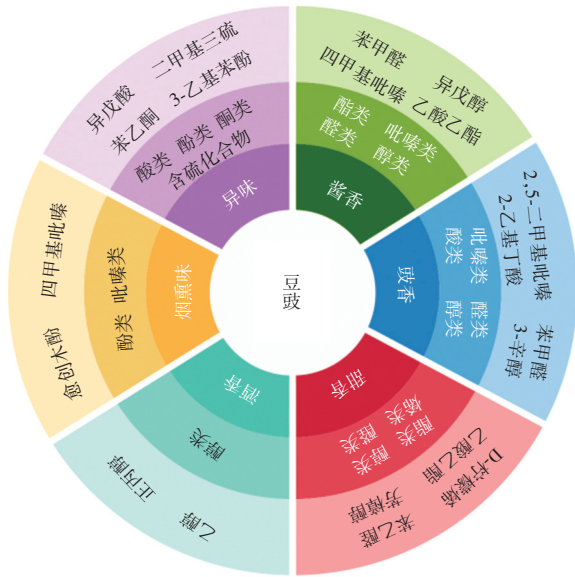


图2 豆豉挥发性风味轮廓
Fig.2 Volatile flavor profile of Douchi

质虽然气味阈值较高^[19],但挥发性较强,能赋予豆豉豉香和酱香味;也能作为合成前体的关键物质,与酸类物质发生反应形成酯类物质。豆豉中醇类物质有两个来源:微生物发酵过程形成以及人为添加食用酒精。如毛霉型豆豉在发酵阶段通常会添加白酒或酒糟,使豆豉中醇类物质含量增加,为豆豉提供浓郁、醇厚的香气。蒋立文等^[20]从毛霉型豆豉发酵过程中检测出了25种醇类物质,其中乙醇含量占比最高,异戊醇含量次之。

2.3 醛类

醛类物质广泛存在于豆豉中,其气味阈值均较低^[21],具有较强的增香能力,赋予豆豉坚果味、花香和果香味。吴梓仟等^[22]研究发现3-甲基丁醛、苯乙醛、苯甲醛在曲霉型豆豉中相对含量较高,其中苯乙醛具有蜂蜜、香甜味;苯甲醛具有烤坚果味,可为豆豉提供咸香和酱香^[23]。

2.4 吡嗪类

吡嗪类物质是决定豆豉优良风味的主要成分之一,易挥发且风味阈值较低^[24],常在烘烤食品中发现,为豆豉提供焙烤、坚果香气,是豆豉酱香和豉香的重要来源,以四甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪为主^[25],可增加豆豉焙烤香气。

2.5 酸类

酸类物质大多具有刺激性气味,但可以缓解豆豉咸味,起调和作用,也可作为酯类物质的前体物质。细菌型豆豉中酸类物质相对含量占比较高,杨智博等^[14]在渝黔地区8种细菌型豆豉中检测了10种酸类物质,其中异戊酸、异丁酸、2-甲基丁酸对豆豉不良风味贡献度较大,异戊酸和异丁酸呈现酸味和哈喇味,2-甲基丁酸呈现汗臭、酸臭^[26]。

2.6 其他

豆豉中挥发性风味物质还有酚类、酮类、含硫化合物等。酚类物质一般呈现烟熏香和木香,永川豆豉中3-乙基苯酚、愈创木酚等具有香气活性,能为豆豉提供不同程度的烟熏风味^[13],使豆豉具有酱香味。酮类物质通常表现为花香和果香,遵义细菌型豆豉中2-丁酮、2-甲基-3-戊酮、3-甲基-2-戊酮等多种酮类物质对整体风味具有较高贡献^[27]。含硫化合物阈值极低,多呈现不良风味,如二甲基三硫具有腥臭味^[28]。

豆豉中挥发性风味物质种类繁多,挥发性风味物质的组成和浓度差异能影响豆豉产品的感官特性,通过绘制豆豉挥发性风味轮廓,可以更好地掌握豆豉的风味特点,为豆豉风味评价系统提供指导。

3 豆豉中微生物群落及其与风味的相关性

3.1 豆豉中微生物群落

微生物是豆豉发酵及形成风味轮廓的重要基础,了解豆豉发酵过程中微生物多样性及其动态变化,有助于剖析豆豉挥发性风味物质的产生过程。随着高通量测序、扩增子分析、宏基因组学等技术的不断进步,豆豉中微生物多样性逐渐被解析。豆豉微生物的优势菌属丰富,涉及细菌、霉菌和酵母菌。豆豉中优势微生物菌属见表1。张彦赠等^[29]、Zhang等^[30]在制曲和发酵阶段的八宝豆豉中分别注释出128、159个菌属,优势菌属分别为8、12个,并以芽孢杆菌属为主,发酵阶段相对丰度达到了71.31%,表现出绝对优势。聂黔丽等^[27]在遵义细菌型自然发酵干豆豉中鉴定出44个菌属,芽孢杆菌属依旧占主导地位,而变形菌门、厚壁菌门、子囊菌门等是优势菌门^[31-32]。此外,在传统豆豉中还检测到了梭状芽孢杆菌属、克雷伯菌属、沙雷氏菌等机会致病菌^[33],为了保障产品安全,利用优良菌株开发用于生产豆豉的定投式菌剂十分必要,关键是要分离和鉴定出与品质有关的核心微生物。

表1 豆豉中优势微生物菌属

Table 1 Predominant microbial genera in Douchi

类型	优势菌属	参考文献
细菌	芽孢杆菌属、魏斯氏菌属、乳杆菌属、葡萄球菌属、肠球菌属等	[27, 34-35]
霉菌	曲霉属、根霉属、毛霉属、青霉属、赤霉属、横梗霉属等	[34-36]
酵母菌	德巴利氏酵母属、假丝酵母属、维克汉姆酵母属、红酵母属等	[28, 37]

3.2 微生物与豆豉风味相关性

由于豆豉风味形成的复杂性,现阶段学者们常通过冗余分析、Pearson相关性分析、最小二乘法等揭示豆豉中微生物群落与关键挥发性风味物质变化的潜在关系。苏凤等^[38]研究发现芽孢杆菌属和乳杆菌属与吡嗪类物质含量呈正相关;李浩^[39]研究发现葡萄球菌属

与醛类、酸类和酮类的形成有关,乳杆菌属、魏斯氏菌属等多种乳酸菌与酸类和醛类的生成有关。于华等^[40]在发现异常维克汉姆酵母属对酸类和醇类物质的形成贡献最大,乳酸片球菌对豆豉中酮类和酸类物质的形成有较大贡献。乳酸杆菌、芽孢杆菌和葡萄球菌是风味代谢的关键因素^[41],具有为豆豉增强酱香、豉香等典型风味属性。豆豉中核心功能菌株与风味成分密切相关,对豆豉的核心功能菌株与挥发性风味物质进行相关性分析,不仅能为豆豉风味形成机制提供理论基础,还能初步筛选出产生风味的菌株。An等^[42]以3个标准来确定大豆酱中核心功能菌群:发酵过程中稳定检测和具有相对较高丰度、与多种关键风味代谢物的高度正相关以及在转录水平上表达与风味合成相关的关键酶的能力,对从豆豉中筛选核心功能菌株有一定借鉴意义。

此外,细菌和真菌的共同作用对豆豉风味轮廓也具有重要影响^[43]。Li等^[44]研究发现米曲霉的蛋白酶系极为丰富,但蛋白的过度降解会进一步产生令人不愉快的挥发性风味物质,采用曲霉和根霉发酵能产生更多的吡嗪和酯类物质,更有利于豆豉风味的形成。赵超凡等^[45]利用根霉与乳酸菌、芽孢杆菌混合发酵,改善了单一根霉发酵豆豉的风味品质。由于酵母菌具有增香的作用,添加酵母菌的永川豆豉中挥发性风味物质种类明显多于传统永川豆豉^[13]。因此采用多菌混合发酵更有利于豆豉风味的形成,多菌混合发酵豆豉过程中菌种可通过互补机制改善豆豉品质。Luo等^[46]采用贝莱斯芽孢杆菌和乳酸菌共同发酵豆豉,发现两者发酵风味特征较为优越,两种菌表现出了类似寄生的关系。因此豆豉发酵过程中微生物群落建立良好的互作关系,有利于菌群结构稳定和风味品质形成,为豆豉产业化、规模化、标准化提供指导。

豆豉中微生物组成是其风味的主要决定因素,因此生产过程中选择合适的发酵菌种是关键。不同微生物拥有的酶系不同,使其对大分子营养物质的利用情况有所区别,最终影响豆豉挥发性风味物质形成。多菌种混合发酵利用菌种间代谢互补机制促进多个菌群共同生长,较纯种发酵更具优势,不仅能弥补纯种发酵豆豉的风味缺陷,还能提高豆豉生产效率。

4 微生物诱导挥发性风味物质形成机理

豆豉的风味受原材料组成、微生物及发酵工艺影响,其中微生物发酵是挥发性风味物质产生的主要途径,使豆豉具备多元化风味。微生物分泌的酶系降解大豆蛋白质、碳水化合物和脂肪等大分子物质,再通过一系列生化反应,形成大量挥发性风味物质,最终赋予豆豉浓郁的挥发性风味^[47]。微生物的作用会改善大豆自身的豆腥味,大豆中脂氧合酶对多不饱和脂肪酸的氧化作用是形成豆腥味的主要途径之一,微生物能钝化脂肪氧合酶与豆腥味物质反应,从而降低己醇、丁醇、2-丁酮、己醛等豆腥味物质的含量^[48]。微生物在制曲阶段初步降解大豆中蛋白质、脂肪和碳水化合物为多肽、氨基酸、脂肪酸、低聚糖等小分子化合物;在发酵阶段降解产物进一步被分解产生酸、醛、吡嗪等小分子挥发性风味物质,形成豆豉的风味轮廓。蒋立文等^[20]在毛霉豆豉制曲阶段和发酵阶段分别检测出23、65种挥发性成分。李金林等^[49]在曲霉型豆豉的制曲阶段、发酵阶段和晾晒阶段分别鉴定出24、45、50种挥发性风味物质。可见,发酵阶段是豆豉产生挥发性风味物质的关键阶段^[50],主要通过蛋白质降解、碳水化合物分解和脂肪分解氧化等生化反应实现^[51-56]。豆豉挥发性风味物质的重要形成途径见图3。

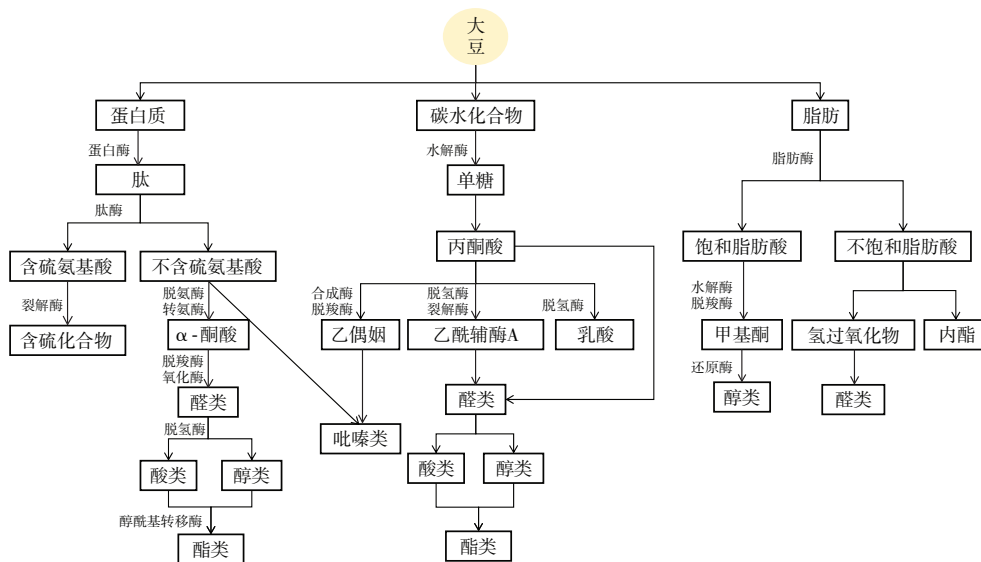


图3 豆豉挥发性风味物质的重要形成途径

Fig.3 Important formation pathways of volatile flavor substances in Douchi

4.1 蛋白质降解

大豆中蛋白质含量高达40%,且豆豉中毛霉、酵母菌、芽孢杆菌等优势菌属的蛋白酶系丰富,因此,蛋白质降解极大影响了豆豉挥发性风味物质的形成。微生物通过代谢产生的蛋白酶破坏蛋白质结构中的肽链骨架,最终使蛋白质降解为氨基酸^[57]。游离氨基酸进一步转化为挥发性风味物质主要有两条途径^[58]:一是含硫氨基酸如蛋氨酸、半胱氨酸等在氨基酸裂解酶催化下生成含硫化物;二是不含硫氨基酸通过转氨、脱羧和裂解等反应转化为醛类、醇类、酸类等挥发性风味物质,如苯丙氨酸可代谢生成苯乙醛、苯乙醇等特征挥发性风味物质。氨基酸衍生的醇类和酸类物质还可以酯化形成酯类物质。

4.2 碳水化合物分解

大豆原料中碳水化合物为微生物生长提供碳源,经微生物发酵后产生酸类、醇类等挥发性风味物质,在细菌型豆豉中酸类物质含量最高。部分乳酸菌能通过磷酸戊糖途径代谢葡萄糖转化为有机酸,并进一步将有机酸转化为酯类、酮类、醛类等挥发性风味物质。而醇类和酸类物质相互作用可生成酯类等香气成分,使豆制品具有独特风味。还原糖与氨基酸之间发生美拉德反应可产生吡嗪、芳香醛等多种风味化合物^[59],如芽孢杆菌可以降解碳水化合物产生乙偶姻,同时分泌蛋白酶将蛋白质降解为氨基酸,并进一步形成游离氨,其与乙偶姻经缩合作用合成四甲基吡嗪,使豆豉具有坚果和焙烤香味^[60]。

4.3 脂肪分解氧化

脂肪分解氧化是豆豉挥发性风味形成的重要生化反应。脂肪在脂肪酶催化下被降解为脂肪酸,作为一种酮类、醇类等挥发性风味物质的重要前体物质。饱和脂肪酸可通过 β -氧化生成酮类物质,再经还原酶作用生成醇类物质;不饱和脂肪酸中氧化断裂位点较饱和脂肪酸多,具有更高氧化降解活性,更易形成挥发性风味物质^[61],其在自由基存在情况下极易氧化形成氢过氧化物^[62],随后在裂解酶作用下分解成醛类,如丁醛、庚烯醛等^[29];也可在氧化作用下最终生成内酯^[63]。

5 总结与展望

豆豉是一种深受大众喜爱的发酵豆制品调味料,挥发性风味是评价其品质的关键指标之一。豆豉挥发性风味受多种因素影响,其中微生物对豆豉挥发性风味的形成发挥重要作用,微生物复杂的酶系降解大豆的营养成分从而赋予其独特的风味。豆豉发酵过程中微生物群落繁多且群落演替复杂,目前对豆豉微生物多样性及其挥发性风味物质组成已有部分研究,但豆豉发酵过程中微生物互作机制研究尚未明确,各类微生物对豆豉挥发性风味物质的具体代谢途径也并不清

楚。因此可以将多组学技术、气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术等结合,深入探究豆豉发酵期间对挥发性风味起关键作用的功能微生物组成、挥发性风味代谢物质变化以及关键酶的变化,从而解析不同微生物在发酵豆豉过程中的代谢途径以及豆豉挥发性风味物质形成机制,在明确各类微生物诱导产生挥发性风味物质的作用机制后,进一步研究多个菌种在发酵过程中的相互作用,进而从传统发酵豆豉中筛选出发酵性能优良的菌株制备复合发酵剂,实现多菌种混合发酵,扩大其应用优势,提高产品生产效率,最终使豆豉实现工业化、标准化生产。

参考文献:

- [1] 董超,孙劲冲,李若楠,等.豆豉与淡豆豉的成分测试及微生物菌群分析[J].食品安全质量检测学报,2023,14(11):154-163.
DONG Chao, SUN Jinchong, LI Ruonan, et al. Ingredient test and microbial flora analysis of the Fermented Soya Bean and Sojae Semen Praeparatum[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(11): 154-163.
- [2] QUE Z L, JIN Y, HUANG J, et al. Flavor compounds of traditional fermented bean condiments: Classes, synthesis, and factors involved in flavor formation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 133: 160-175.
- [3] LONG J, ZHANG X, GAO Z X, et al. Isolation of *Bacillus* spp. with high fibrinolytic activity and performance evaluation in fermented Douchi[J]. Journal of Food Protection, 2021, 84(4): 717-727.
- [4] ZHANG Y, ZENG T, WANG H W, et al. Correlation between the quality and microbial community of natural-type and artificial-type Yongchuan Douchi[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 140: 110788.
- [5] LEE S Y, WOO S Y, TIAN F, et al. Contamination characteristics and risk assessment of aflatoxins in homemade soybean paste, a traditional fermented soybean food, in South Korea[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 424(Pt C): 127576.
- [6] 高梦颖,王浩宇,谭小琴,等.自然及人工接种发酵对细菌型豆豉食用品质的影响研究[J].食品与发酵工业,2023,49(13):136-143.
GAO Mengying, WANG Haoyu, TAN Xiaoqin, et al. Effect of natural and artificial inoculation on the quality of bacterial fermented Douchi[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(13): 136-143.
- [7] 文鹤,刘江崑,胡祥飞,等.一株产香酵母 *Trichomonascus ciferrii* 的分离鉴定及其纯种发酵豆豉的挥发性成分分析[J].食品与发酵工业,2021,47(16):152-158.
WEN He, LIU Jiangyin, HU Xiangfei, et al. Volatile compounds in Douchi fermented by an aromatic yeast *Trichomonascus ciferrii* isolated from *Aspergillus*-type Douchi[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(16): 152-158.
- [8] 倪楠.纳豆产品工艺优化与不良风味研究[D].南京:南京农业大学,2019.
NI Nan. Process Optimization of natto products and exploration of bad flavor[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [9] 李尚逊,姬翔,翟兴媛,等.异常威克汉姆酵母纯种发酵淡豆豉的炮制工艺研究[J].大豆科学,2023,42(4):459-465.
LI Shangxun, JI Xiang, ZHAI Xingyuan, et al. Study on processing

- technology of *Semen sojae* praeparatum pure-fermented by wickhamomyces anomalus[J]. Soybean Science, 2023, 42(4): 459-465.
- [10] WANG D D, CHEN G, TANG Y, et al. Correlation between autochthonous microbial communities and flavor profiles during the fermentation of mustard green Paocai (*Brassica juncea* Coss.), a typical industrial-scaled salted fermented vegetable[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 172: 114212.
- [11] GUO W D, ZHANG Y, LONG Z, et al. Study on the taste active compounds in Douchi using metabolomics method[J]. Food Chemistry, 2023, 412: 135343.
- [12] 范琳, 陶湘林, 欧阳晶, 等. 曲霉型豆豉后发酵过程中挥发性成分的动态变化[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 274-277.
FAN Lin, TAO Xianglin, OUYANG Jing, et al. Dynamic changes in volatile components in *Aspergillus*-type Douchi during post-fermentation[J]. Food Science, 2012, 33(22): 274-277.
- [13] 李薇. 传统发酵永川豆豉和速成豆豉增香发酵关键香气物质基础比较研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
LI Wei. Comparative Study on the key aroma compounds basis of traditional fermented Yongchuan Douchi and the fast-fermented Yongchuan Douchi after Aroma enhancement fermentation[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [14] 杨智博, 谭小琴, 周才琼. 渝黔地区细菌发酵型豆豉食用安全性及风味特点比较分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 124-133.
YANG Zhibo, TAN Xiaoqin, ZHOU Caiqiong. Edible safety and flavor characteristics of bacterial fermented Douchi in Chongqing and Guizhou regions[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 124-133.
- [15] 赵谋明, 曹永, 蔡宇, 等. SDE 和 HS-SPME 法与 GC-MS/O 联用分析阳江豆豉的香气活性化合物[J]. 现代食品科技, 2016, 32(5): 264-275.
ZHAO Mouming, CAO Yong, CAI Yu, et al. Identification of aroma-active compounds from Yangjiang Douchi by SDE and HS-SPME combined with GC-MS/O[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(5): 264-275.
- [16] 黄晓润. 枯草芽孢杆菌产酱香相关基因的筛选及功能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
HUANG Xiaorun. Screening and functional research on related genes of soy sauce flavor produced by *Bacillus subtilis*[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [17] 郭娅. 枯草芽孢杆菌产豉香相关基因的筛选及功能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
GUO Ya. Screening and functional study of the genes related to the production of soy fragrance from *Bacillus subtilis*[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [18] 邹强, 危梦, 张孝琴, 等. 顶空固相微萃取法对两种毛霉型豆豉风味分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(5): 159-163.
ZOU Qiang, WEI Meng, ZHANG Xiaoqin, et al. Analysis of flavor of two *Mucor*-type Douchi by headspace solid-phase microextraction method[J]. Food Research and Development, 2021, 42(5): 159-163.
- [19] 何晓桐, 吴姗姗, 成钰莹, 等. 利用根霉发酵发芽黑豆前后营养、活性和风味成分的变化[J]. 中国酿造, 2022, 41(11): 127-134.
HE Xiaotong, WU Shanshan, CHENG Yuying, et al. Changes of nutrient, activity and flavor components of germinated black beans before and after fermentation by *Rhizopus chinensis*[J]. China Brewing, 2022, 41(11): 127-134.
- [20] 蒋立文, 谢艳华, 李跑, 等. HS-SPME/GC-MS 和电子感官技术分析毛霉型豆豉发酵过程中风味品质[J]. 核农学报, 2020, 34(7): 1497-1506.
JIANG Liwen, XIE Yanhua, LI Pao, et al. Analysis of the volatile flavor components and quality of *Mucor*-type Douchi with HS-SPME/GC-MS method and electric-sense technology[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(7): 1497-1506.
- [21] WANG Y R, ZHOU H, DING S H, et al. Changes in free amino acids of fermented minced peppers during natural and inoculated fermentation process based on HPLC-MS/MS[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(9): 2803-2811.
- [22] 吴梓仟, 刘晶晶, 邓高文, 等. 曲霉强化发酵对浏阳豆豉风味品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 267-275.
WU Ziqian, LIU Jingjing, DENG Gaowen, et al. Effect of enhanced fermentation with *Aspergillus* on the flavor quality of Liuyang Douchi, a traditional Chinese soybean product[J]. Food Science, 2023, 44(22): 267-275.
- [23] 林洪斌, 毕小朋, 方佳兴, 等. 郫县豆瓣挥发性物质变化规律及特征香气物质形成机理[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 259-266.
LIN Hongbin, BI Xiaopeng, FANG Jiaying, et al. Pattern of variations in volatile substances and formation mechanism of characteristic aroma substances in Pixian broad-bean paste[J]. Food Science, 2020, 41(2): 259-266.
- [24] 王琴, 文安燕, 秦礼康, 等. 传统发酵豆豉特征风味物质研究[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(1): 62-72.
WANG Qin, WEN Anyan, QIN Likang, et al. Study on characteristic flavor substances in traditional fermented douchiba[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2023, 59(1): 62-72.
- [25] 谭小琴. 西南地区传统细菌型豆豉品质特点及微生物群落研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
TAN Xiaoqin. Study on the quality characteristics and microbial community of traditional bacterial Douchi in southwest China[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [26] 周束, 王洪伟, 张玉, 等. 基于感官评价和 GC-MS 分析嗜盐芳香酵母对速成永川豆豉香气的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(9): 59-64.
ZHOU Jian, WANG Hongwei, ZHANG Yu, et al. Effects of halophilic aromatic yeasts on the aroma of rapid Yongchuan Douchi by sensory evaluation and GC-MS analysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(9): 59-64.
- [27] 聂黔丽, 王修俊, 刘林新, 等. 遵义细菌型自然发酵干豆豉菌群结构及风味品质分析[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 158-164.
NIE Qianli, WANG Xiujun, LIU Linxin, et al. Analysis of bacterial flora structure and flavor quality of bacterial-type naturally fermented dried Douchi produced in Zunyi[J]. Food Science, 2022, 43(14): 158-164.
- [28] 张彦贻. 八宝豆豉后发酵过程中细菌群落演替和挥发性风味的表征及其相关性分析[D]. 烟台: 烟台大学, 2023.
ZHANG Yanzeng. Characterization and correlation analysis of bacterial community succession and volatile flavor during post-fermentation of Ba-bao Douchi[D]. Yantai: Yantai University, 2023.
- [29] 张彦贻, 汤晓娟, 林祥娜, 等. 八宝豆豉制曲过程中微生物多样性与蛋白酶活性的动态变化及其潜在相关性[J]. 中国酿造, 2022, 41(12): 61-67.
ZHANG Yanzeng, TANG Xiaojuan, LIN Xiangna, et al. Dynamic changes and potential correlation between microbial diversity and protease activity during the koji-making process of Ba-bao Douchi[J]. China Brewing, 2022, 41(12): 61-67.
- [30] ZHANG Y Z, LIN X N, JI Y Q, et al. Characterization and correlation of dominant bacteria and volatile compounds in post-fermentation process of Ba-bao Douchi[J]. Food Research International, 2022, 160: 111688.
- [31] 王娜, 陈万轩, 张伟萍, 等. 基于高通量测序技术的贵州不同类型细菌型豆豉菌群多样性分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48

- (20): 85-90, 104.
- WANG Na, CHEN Wanxuan, ZHANG Weiping, et al. Community diversity of different bacterial-type of Guizhou Douchi using high throughput sequencing[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(20): 85-90, 104.
- [32] 陈怡, 刘洋, 蒋立文, 等. 基于高通量测序分析不同浏阳豆豉中真菌的多样性[J]. 中国酿造, 2020, 39(11): 66-70.
- CHEN Yi, LIU Yang, JIANG Liwen, et al. Fungal diversity in different Douchi samples from Liuyang by high-throughput sequencing[J]. China Brewing, 2020, 39(11): 66-70.
- [33] 马上超, 程超, 田成, 等. 基于高通量测序技术分析恩施州淡豆豉的细菌多样性[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 156-161.
- MA Shangchao, CHENG Chao, TIAN Cheng, et al. Analysis of bacterial diversity in sojiae *Semen* praeparatum from Enshi by high-throughput sequencing[J]. Food Science, 2022, 43(10): 156-161.
- [34] 石聪, 李世瑞, 李跑, 等. 基于高通量测序浏阳豆豉不同发酵阶段微生物多样性分析[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(2): 27-32, 39.
- SHI Cong, LI Shirui, LI Pao, et al. Analysis of microbial diversity in different fermented stages of Liuyang Douchi based on high throughput sequencing[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(2): 27-32, 39.
- [35] 李薇, 罗沈斌, 邱泽瑞, 等. 永川毛霉型豆豉传统发酵过程中微生物群落结构及动态演替规律[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 60-67.
- LI Wei, LUO Shenbin, QIU Zerui, et al. Microbial community structure and dynamic succession in traditional fermentation of *Mucor*-type Yongchuan Douchi[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 60-67.
- [36] HE B, LI H R, HU Z H, et al. Difference in microbial community and taste compounds between *Mucor*-type and *Aspergillus*-type Douchi during koji-making[J]. Food Research International, 2019, 121: 136-143.
- [37] 曾涛, 罗沈斌, 索化夷. 永川毛霉型豆豉在发酵过程中菌群动态变化规律[J]. 中国调味品, 2019, 44(3): 42-45, 64.
- ZENG Tao, LUO Shenbin, SUO Huayi. Dynamic change rule of microflora in Yongchuan *Mucor*-type fermented *Soya* beans during fermentation[J]. China Condiment, 2019, 44(3): 42-45, 64.
- [38] 苏凤, 黄治国, 卫春会, 等. 3种传统发酵介质对细菌型豆豉风味形成的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 263-269.
- SU Feng, HUANG Zhiguo, WEI Chunhui, et al. Effects of three traditional fermentation mediums on the flavor formation of bacterial Douchi[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 263-269.
- [39] 李浩. 传统曲霉型豆豉中微生物与风味形成的关联研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2021.
- LI Hao. Fermentation relationship between microorganism and flavor formation in traditional *Aspergillus*-type Douchi[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2021.
- [40] 于华, 刘亚君, 梅小庆, 等. 功能菌对曲霉型豆豉风味物质形成的影响[J]. 中国调味品, 2020, 45(9): 81-85.
- YU Hua, LIU Yajun, MEI Xiaoqing, et al. Effect of functional bacteria on the formation of flavor substances in *Aspergillus*-type fermented blank beans[J]. China Condiment, 2020, 45(9): 81-85.
- [41] WANG Y R, XIANG F S, ZHANG Z D, et al. Characterization of bacterial community and flavor differences of different types of Douchi[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(7): 3460-3469.
- [42] AN F Y, LI M, ZHAO Y, et al. Metatranscriptome-based investigation of flavor-producing core microbiota in different fermentation stages of dajiang, a traditional fermented soybean paste of North-east China[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128509.
- [43] LI J L, PENG B, HUANG L, et al. Association between flavors and microbial communities of traditional *Aspergillus*-Douchi produced by a typical industrial-scale factory[J]. LWT - Food Science and Technology, 2023, 176: 114532.
- [44] LI A J, YANG G, WANG Z R, et al. Comparative evaluation of commercial Douchi by different molds: Biogenic amines, non-volatile and volatile compounds[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(1): 434-443.
- [45] 赵超凡, 吴姗姗, 赵文俊, 等. 不同发酵方式对淡豆豉品质及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 144-152.
- ZHAO Chaofan, WU Shanshan, ZHAO Wenjun, et al. Effect of different fermentation methods on the quality and flavor of *Semen sojiae* praeparatum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 144-152.
- [46] LUO Y Y, GUO Y, HU X Y, et al. Flavor improvement of fermented soybean foods by co-fermentation with *Bacillus velezensis* and *Lactiplantibacillus plantarum*[J]. LWT - Food Science and Technology, 2023, 186: 115257.
- [47] LAN L, WANG J X, WANG S Y, et al. Correlation between microbial community succession and flavor substances during fermentation of Yongchuan Douchi[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103192.
- [48] CHEN Y, LI P, LIAO L Y, et al. Characteristic fingerprints and volatile flavor compound variations in Liuyang Douchi during fermentation via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130055.
- [49] 李金林, 万亮, 王维亚, 等. 基于 SPME-GC-MS 技术分析曲霉型豆豉生产过程中的挥发性成分变化[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 252-257.
- LI Jinlin, WAN Liang, WANG Weiya, et al. Change of volatile compounds in *Aspergillus*-type Douchi during processing evaluated by SPME-GC-MS[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 252-257.
- [50] RONG P X, HE X Q, AYYASH M, et al. Untargeted metabolomics analysis of non-volatile metabolites and dynamic changes of antioxidant capacity in Douchi with edible mushroom by-products[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137066.
- [51] YVON M, RIJNEN L. Cheese flavour formation by amino acid catabolism[J]. International Dairy Journal, 2001, 11(4/7): 185-201.
- [52] WU J R, TIAN T, LIU Y M, et al. The dynamic changes of chemical components and microbiota during the natural fermentation process in Da-Jiang, a Chinese popular traditional fermented condiment[J]. Food Research International, 2018, 112: 457-467.
- [53] LANDAUD S, HELINCK S, BONNARME P. Formation of volatile sulfur compounds and metabolism of methionine and other sulfur compounds in fermented food[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 77(6): 1191-1205.
- [54] WEI G M, CHITRAKAR B, REGENSTEIN J M, et al. Microbiology, flavor formation, and bioactivity of fermented soybean curd (furu): A review[J]. Food Research International, 2023, 163: 112183.
- [55] ZHANG K, ZHANG T T, GUO R R, et al. The regulation of key flavor of traditional fermented food by microbial metabolism: A review[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100871.
- [56] HUANG Q, DONG K, WANG Q, et al. Changes in volatile flavor of yak meat during oxidation based on multi-omics[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131103.
- [57] 张雯姝. 产蛋白酶菌株的 ARTP 诱变及其降解蛋白质代谢通路分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2023.
- ZHANG Wenshu. Mutation of protease-producing strain by ARTP and analysis of its metabolic pathway for degrading protein[D]. Da-

- lian: Liaoning Normal University, 2023.
- [58] 解春芝. 基于氨基酸代谢的腐乳酱风味促熟及机理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- XIE Chunzhi. Study on flavor ripening and mechanism of sufu sauce based on amino acid metabolism[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [59] 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 Xiaoxiao. Study on the formation mechanism of key off-flavor compounds and the effect of processing on soymilk flavor[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [60] 黄璐, 贡献, 佟硕秋, 等. 枯草芽孢杆菌 pckA 影响四甲基吡嗪合成的研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(12): 47-53.
- HUANG Lu, GONG Xian, TONG Shuoqi, et al. Effects of *Bacillus subtilis* pckA on the synthesis of tetramethylpyrazine[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(12): 47-53.
- [61] 吴娜, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 动物源食品中脂质氧化降解对香气物质形成的作用[J]. 中国食品学报, 2016, 16(7): 209-215.
- WU Na, WANG Xichang, TAO Ningping, et al. Contribution of lipid oxidation and degradation to the formation of aroma compounds in animal-derived foods[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(7): 209-215.
- [62] WANG Y Q, WANG H F, WU Y Y, et al. Insights into lipid oxidation and free fatty acid profiles to the development of volatile organic compounds in traditional fermented golden pomfret based on multivariate analysis[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 171: 114112.
- [63] 臧金红. 酸鱼发酵过程中特征风味形成与微生物的关系研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- ZANG Jinhong. Study on the relationship between characteristic flavors formation and microorganisms in Suanyu fermentation[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.

加工编辑: 张昱

收稿日期: 2023-12-18

(上接第 121 页)

- seed (*Sesamum indicum* L.) after fermentation pretreatment[J]. Food Chemistry, 2023, 428: 136781.
- [18] 王铮, 赵宇, 高晓晨, 等. 鸿雁雁血多肽的制备及免疫调节作用的初步研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 65-71.
- WANG Zheng, ZHAO Yu, GAO Xiaochen, et al. Preliminary study on preparation and immunomodulatory effect of *Anser cygnoides* blood protein peptide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 65-71.
- [19] CARRERA-ALVARADO G, TOLDRÁ F, MORA L. Bile acid-binding capacity of peptide extracts obtained from chicken blood hydrolysates using HPLC[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 173: 114381.
- [20] LU Z Q, SUN N, DONG L, et al. Production of bioactive peptides from sea cucumber and its potential health benefits: A comprehensive review[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(25): 7607-7625.
- [21] 于志成, 黄福气, 许宙, 等. 碱性蛋白酶酶解酱油渣蛋白制备免疫活性肽[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(11): 125-130.
- YU Zhicheng, HUANG Fuqi, XU Zhou, et al. Optimized process of immuno-active peptides from soy sauce residue protein hydrolyzed by alkaline protease[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(11): 125-130.
- [22] 刘春阳, 白金波, 杨尚青, 等. 枳椇子多糖的酸提取工艺优化及其理化性质与抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 148-156.
- LIU Chunyang, BAI Jinbo, YANG Shangqing, et al. Optimization of acid extraction process for polysaccharide from *Hovenia dulcis* seed and analysis of its antioxidant activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(9): 148-156.

责任编辑: 冯娜

收稿日期: 2024-01-02