

酱油酿造风味细菌研究进展

Research progress of flavor bacteria in soy sauce fermentation

许延涛¹ 周 凯¹ 蒋雪薇^{1,2} 梁胜男¹

XU Yan-tao¹ ZHOU Kai² JIANG Xue-wei^{1,2} LIANG Sheng-nan²

张 伟¹ 彭 东¹ 周尚庭^{2,3} 罗晓明¹

ZHANG Wei¹ PENG Dong¹ ZHOU Shang-ting^{2,3} LUO Xiao-ming¹

(1. 长沙理工大学化学与食品工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省调味品发酵工程技术研究中心, 湖南 长沙 410600; 3. 加加食品集团股份有限公司, 湖南 长沙 410600)

(1. School of Chemistry and Food Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Condiment Fermentation, Changsha, Hunan 410600, China; 3. Jiagjia Food Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410600, China)

摘要: 酿造酱油的风味物质主要由微生物代谢形成。文章对当前酱油酿造风味细菌与风味物质形成以及风味细菌研究技术的相关研究进展进行了综述, 分析了酱油酿造风味细菌的研究方向及发展, 指出高通量测序、基因组学等现代生物技术的应用, 将为生产安全、健康、酱香醇厚的优质酱油提供有力保障。

关键词: 风味细菌; 酱油酿造; 风味物质; 代谢

Abstract: The flavor materials of soy sauce are formed by the metabolism of microorganism. Reviewed the flavor bacteria, flavor substances of soy sauce and relative research method. Furthermore, the research direction and development of flavor bacteria in soy sauce has also been analyzed, which provided a strong assurance for the production of high quality soy sauce with safety, health and rich mellow flavor.

Keywords: flavor bacteria; soy sauce fermentation; flavor materials; metabolism

酱油是起源于中国的重要餐桌调味品, 自有记载起距今已有 2 000 多年历史^{[1]-5}, 因味道鲜美、富含营养而深受消费者喜爱。随着经济发展, 消费者的消费能力及

消费品味逐渐提高, 促进了酱油市场由过去的中低端产品主导转向高端产品主导。据统计^[2], 2017 年 1~12 月中国高端酱油的销量额总体呈上升趋势, 其中 50 元以上高端酱油销售额在 2017 年 12 月占据总销售额的 40%~45%, 而其全年销售额占比达约 25%。高端酱油对于原料及生产技术提出了更高的要求, 原来普遍采用的低盐固态发酵及自然日晒发酵已无法满足产品安全及风味提升的要求, 为此, 中国大型酱油生产企业在借鉴日式高盐稀态发酵的基础上发展了以连续蒸料炒麦、圆盘制曲、罐式发酵、连续布酱压榨、膜过滤等工艺为特征的现代高盐稀态工艺。该工艺在 16%~18% 的高盐体系下发酵 4~6 个月, 连续封闭的系统有效地减少了污染微生物的生长及代谢, 但也阻碍了对酱油品质及风味有贡献的微生物在酱醅发酵中的生长, 影响了酿造酱油风味物质的丰富度, 进而导致成品酱油醇厚感不足、风味单薄。解决上述问题的关键是风味菌在发酵过程中添加各种功能性风味菌, 构建有利于酿造酱油风味发展且安全的微生物群落结构, 促使酱油在多菌种酿造的过程中形成滋味更加醇厚鲜美、风味更加浓郁的产品^[3]。酱油酿造用风味菌主要有酵母和细菌, 对酱油酵母的研究开展较早, 如安琪酵母股份有限公司在酱油酵母领域开展了一些研究及产业化工作^[4]; 而对风味细菌的研究则刚起步。随着国内外对酱油酿造风味细菌的选育及功能基因组学^[5]、风味物质分析^[6-8]及代谢组学^[9]等领域研究的深入及技术的发展, 酱油酿造风味细菌将为酱油的风味化提升及功能性发展提供更多的支撑。

1 酿造酱油的风味构成

酿造酱油的风味主要从香气、滋味 2 个方面来描

基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目(编号: 2018JJ2421); 湖南省调味品发酵工程技术研究中心开放基金项目(编号: 2018GCZX05)

作者简介: 许延涛, 男, 长沙理工大学在读硕士研究生。

通信作者: 蒋雪薇(1972—), 女, 长沙理工大学副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: jxw_72@sina.com

罗晓明(1968—), 男, 长沙理工大学副教授, 硕士。

E-mail: csluoxm@sina.com

收稿日期: 2019-02-06

述^[10]。风味的形成主要依靠有机酸、醇、酯、醛、酮、酚类物质及一些杂环化合物^[11],这些物质在酿造过程中相互作用,构成了酱油的主体风味。随着现代分析仪器的发 展,对酱油香气成分的物质结构、含量等信息有了更加透 彻的了解,目前,酱油已有约 300 种挥发性风味成分被成 功分离并鉴定^[12]。Nunamura 等^[13]通过深入研究后提出 可将酱油的风味成分分为中性部分、酸性部分及碱性部 分 3 部分,并最终鉴定出 270 种化合物,酸性部分共包括 93 种物质,其中对酱油风味成分贡献最大,最具代表性的 物质为 4-羟基-2(5)-乙基-5(2)-甲基-3(2*H*)-呋喃酮 (HEMF);中性成分中则以 4-乙基愈创木酚(4-EG)最具 代表性。酱油中的风味物质大多与微生物代谢有关,其 中醛、酮、酚、酯等气味阈值较低的物质与细菌的代谢有 密切关系^[14];此外,还有一些物质的产生则与原料及原料 处理(如大豆及豆粕的蒸煮、小麦的焙炒)、酱油热杀菌等 工序有关^[15-16]。

2 酱油酿造风味细菌

酱油风味细菌是指在酱油发酵过程中的次生细菌, 包括多种耐高盐乳酸菌,如四联球菌属 (*Tetragenococcus*)、片球菌属 (*Pediococcus*)、乳杆菌属 (*Lactobacillus*)、魏斯氏菌属 (*Weissella*) 等,以及芽胞杆 菌属 (*Bacillus*)、葡萄球菌属 (*Staphylococcus*) 的一些细

菌。乳酸菌是一类能代谢各种糖类物质产生乳酸的细菌 的总称,酱油发酵中的乳酸菌通常还具有耐高盐这一普 通乳酸菌不具备的性质,通过在发酵环境中代谢酸类物 质及分泌抑菌肽^[17],将发酵体系转变为偏酸的环境,能 在一定程度上抑制杂菌的污染,有利于酱油的减盐发酵, 同时有利于一些风味酵母的生长及代谢^{[1]153-161};葡萄球菌 作为风味细菌在发酵肉制品中应用较多^[18-20],其本身具 有很强的耐高盐能力,容易驯化,近年来也有学者^[21]将其 应用于鱼酱油发酵中;芽胞杆菌通常具有较高的蛋白酶 活性及淀粉酶活性,有利于酱油中蛋白质及淀粉的分 解^[22]。酱油风味细菌的研究起步较晚,在生产中的应用 程度较浅,此外,尚有许多风味细菌未被应用或发现,这 需要在此领域内的学者们进行更加深入的研究。

3 风味细菌代谢与酱油风味

风味细菌在酱油发酵过程中分解原料中的蛋白质及 淀粉形成氨基酸、单糖及寡糖,这些物质本身可对酱油风 味产生影响,还可进一步由细菌代谢形成各种挥发性风 味物质进而构成酱油的香气,酱油酿造风味细菌及其在 酱油发酵中的作用如表 1 所示。从表 1 可以看出,在高 盐的酱油发酵体系中,能代谢产生酱油风味物质的细菌 种类不多,但其代谢对于酱油风味的形成具有重要的 作用。

表 1 风味细菌在酱油发酵中的作用

Table 1 Effect of flavor bacteria in soy sauce fermentation

类别	风味细菌	酱油发酵中的作用
乳酸菌	<i>Tetragenococcus halophilus</i>	增加有机酸、醛类、酯类 ^[23]
	<i>Lactobacillus plantarum</i>	增加乳酸、酮类及酚类物质 ^[24]
	<i>Weissella</i> spp.	产乳酸、乙酸等有机酸 ^[25]
	<i>Pediococcus acidilactici</i>	产乳酸、乙酸等有机酸 ^[25]
芽胞杆菌	<i>Bacillus subtilis</i>	产淀粉酶、蛋白酶, <i>L</i> -谷氨酰胺酶 ^[26] ;4-EG、麦芽酚 ^[27]
	<i>Bacillusamyloliquefaciens</i>	产淀粉酶、蛋白酶、 <i>L</i> -谷氨酰胺酶 ^[26]
	<i>Bacillusvelezensis</i>	产淀粉酶、蛋白酶,3-甲基丁醛 ^[8]
葡萄球菌	<i>Staphylococcus</i> spp.	<i>L</i> -谷氨酰胺酶、2-甲基丙醛 ^[21]

3.1 风味细菌代谢与酱油滋味

酱油滋味可用鲜甜酸咸来概括。其中咸味主要来源 于发酵中所添加的食盐,高盐稀态工艺中的食盐含量通 常高达 16%~18%;食盐除了提供酱油咸味之外,还能在 发酵中与一些呈味氨基酸结合形成氨基酸盐,故其具有 提鲜提甜的作用。酱油中的甜味主要来自于淀粉水解 生成的单糖及二糖,如葡萄糖、麦芽糖等,此外还包括一部 分氨基酸^[11]。

鲜味是酱油品质的重要评判指标^[28],酱油鲜味的来 源主要是 *L*-谷氨酸、天冬氨酸、丙氨酸等呈味氨基酸。米 曲霉是酱油酿造的主发酵菌种,是一种好氧发酵真菌,具

有完整的酶系,能在合适的发酵环境中产生含量较高的 酸性、中性及碱性蛋白酶、肽酶、谷氨酰胺酶等^[29];而谷 氨酰胺酶能在发酵过程中催化 *L*-谷氨酰胺水解成 *L*-谷 氨酸,因此,米曲霉对发酵酱油鲜味的产生有着非常重要的 作用;不仅如此,米曲霉对酱油中醇类、醛类、酚类及酯类 物质的产生也有重要的促进作用,这些物质很多都对酱 油鲜味及其他风味有重要贡献^[30]。而近年来研究发 现^[21, 26],解淀粉芽胞杆菌、枯草芽胞杆菌及葡萄球菌属 的一些细菌也具有较强的 *L*-谷氨酰胺酶代谢能力,因此 可以认为酱油的鲜味的产生不仅依赖于米曲霉,也依赖 于酱油发酵中的次生菌。

酱油中的酸味来源于有机酸类物质,其中的主要有机酸包括乳酸、乙酸、柠檬酸、琥珀酸、苹果酸、甲酸等。酱油发酵过程中形成的有机酸之间的协同增效作用对酱油独特滋味的形成具有重要贡献^[31],一些有机酸还能降低生物胺的产量消除发酵过程中产生的胺臭味^[32]。就各种有机酸单独的作用而言,乳酸酸味平缓柔和,能使酱油口感更加细腻绵长^[24];乙酸具有刺激的酸味,少量乙酸能适度赋予酱油酸味;琥珀酸的一钠盐是一种食品增鲜剂,对酱油具有提鲜作用^[33];但酱油中的酸类物质总量不能过多,否则将会导致酱油过酸^[11]。酸类物质主要由一些产酸细菌代谢糖类物质产生,这些产酸细菌主要包括酱油四联球菌(*Tetragenococcus sojiae*)、嗜盐片球菌(*Pediococcus halophilus*)、嗜盐四联球菌(*Tetragenococcus halophilus*)、酱油片球菌(*Pediococcus sojiae*)、植物乳杆菌(*Lactobacillus Plantarum*)、魏斯氏乳酸菌(*Weissella confusa*)等,它们均可被归为耐盐乳酸菌^[23-24, 34]。Singracha等^[32]研究发现将嗜盐四联球菌 TS71 与鲁氏酵母混合添加于酱油发酵过程中能有效增加酸类、醇类及呋喃酮的含量,异戊酸及苯甲酸增加明显,这 2 种物质分别具有干酪香气及玫瑰花香;李巧玉等^[34]研究发现某些魏斯氏菌有较强的生物胺降解能力,能降解多种生物胺,因此魏斯氏菌有利于消除酱油酿造中的臭味。植物乳杆菌因其耐盐性差而较难应用于酱油的高盐稀态工艺,赵国忠等^[24]分离出一株能耐受 18% 盐浓度的植物乳杆菌,该植物乳杆菌虽然能在高盐浓度下生长,但生长情况较差,其代谢受到了严重影响,不适用于高盐稀态发酵。最近几年的研究还发现,除了上述耐盐乳酸菌外,一些葡萄球菌也具有较强的产酸作用,如胡传旺等^[25]从酱醪中分离出 9 株风味细菌,其中葡萄球菌 JY09 的乳酸产量达到 2.06 g/L,与唾液乳酸杆菌(*Lactobacillus salivarius*) B1 相当(2.13 g/L),略高于戊糖乳酸片球菌(*Pediococcus pentosaceus*) JY08 (1.77 g/L),乙酸产量仅略低于 *T. halophilus* MRS1。

3.2 风味细菌代谢与酱油香气

香气是酱油重要的感官属性,酱油感官评定中香气占据着较高的评分权重,酱油香气物质通常是在酱醪发酵的中后期经过风味细菌的代谢生成^[10, 35]。香气成分包括了醇类、有机酸、醛类、酚类及酯类等,香气物质在酱油中含量很低,但其阈值通常也非常低,如 4-EG 在酱油中含量达 0.5~1.5 mg/kg 时就能明显提升酱油的香气^[11],4-EG、HEMF 及 4-己基苯酚(4-EP)是目前公认的影响酱油香气的主要成分^[36],一般认为 4-EG 的形成跟酵母、芽胞杆菌和一些耐盐葡萄球菌关系较大^[37-38],主要是在发酵过程中酵母细菌将阿魏酸转化成 4-乙烯基愈创木酚(4-VG)后再将 4-VG 转化成 4-EG;此外,有研究^[39]表明一些芽胞杆菌有较强的阿魏酸代谢能力,可以

认为芽胞杆菌对酱油发酵中 4-EG 的生成有正向的影响, Jiang 等^[27]则研究发现添加 *B. subtilis* 的发酵酱油 4-EG 的含量相比对照组有明显提高。酯类物质形成于发酵的中后期,主要通过风味细菌代谢让醇类和酸类物质产生酯化反应生成;醛类物质则是由淀粉被酶解为葡萄糖后,经细菌醛酸途径生成,醛类物质具有辛辣刺激气味,在酱油中能调和香气。酱油中检出的苯乙醛、异丁醛、异戊醛、1-辛烯-3-醇、2-甲基丁醇、戊醇、异戊醇、2,3-丁二醇、乙酸乙酯、乳酸乙酯、乙酸异戊酯等均能赋予酱油独特的香气,其中乙酸乙酯具有清新的水果香气,乙酸异戊酯具有类似香蕉的香气^[40],乳酸乙酯具有酒味香气^[41],2-甲基丙醇具有麦芽香气^[42],而苯乙醛有浓郁的玉簪花香气的同时还具有风信子、水仙等花的芳香^[41]。

酱醪中不同的微生物群落结构对香气物质的形成有较大影响,如 Harada 等^[43]通过研究提出产乳酸细菌对糠醛(呋喃甲醛)、糠醇(呋喃甲醇)、甲基环戊烯醇酮(3-甲基-2-羟基-2-环戊烯-1-酮)及甲硫基丙醛有较大影响,此外,酯类前体物质之一是有机酸,而产酸细菌存在与否对酱油中一些有机酸的含量有较大影响,也就间接对这些酯类的含量产生了影响。

4 酿造酱油风味细菌研究技术进展

风味细菌具有多种代谢途径,并产生多样的代谢产物,其中许多代谢产物能赋予酱油特殊的风味,但也有一些能形成不利的影响甚至安全风险,如生物胺能败坏酱油风味、氨基甲酸乙酯则是被国际肿瘤研究中心认定为 2A 级致癌物^[44]。因此,利用现代生物技术全面系统地研究酿造酱油风味细菌成为其应用的基础和关键。高通量测序、全基因组序列分析、功能基因组学、代谢组学、蛋白质组学等现代化技术因其快速、精准的特点被应用于风味细菌的研究中,对实现风味细菌应用中的趋利避害起了较好的作用。

4.1 高通量测序在酿造酱油风味细菌群落结构分析中的应用

测序技术由一代测序^[45](Sanger 测序),到以 454 焦磷酸测序法^[46]、Illumina 测序法^[47]、SOLID 测序法^[48]为代表的二代测序,进而发展到 Helicos 的 SMS 技术和 Pacific Bioscience 的 SMRT 技术为代表的第三代测序技术^[49],其读长和精确度不断提升。高通量测序可以快速地获得环境中微生物群落结构的信息^[50],目前已从土壤^[51]、水体^[52]等体系的研究中转移到发酵食品的研究中, Song 等^[53]利用高通量测序分析传统固态发酵酱油中的微生物群落,发现酱油固态发酵体系内的核心细菌群落包含 11 个细菌属,如乳杆菌属、芽胞杆菌属、醋杆菌属、片球菌属等,而其中乳杆菌属占据了最高的相对丰度;沈馨等^[54]对辣椒酱中的细菌群落结构研究发现 *Ba-*

cillus 和 *Staphylococcus* 是其优势细菌微生物, 相对含量分别为 37.62% 和 20.66%。随着高通量测序技术的发展, 能更加准确地获得酱油酿造中风味菌, 实现其合理有效应用。

4.2 全基因序列分析及功能基因组学研究解析风味细菌作用机制

对风味细菌的全基因序列分析及功能基因组学研究, 可以更直接、更全面地理解其代谢途径, 并可将其基因与其相关代谢物的合成联系起来, 更确切地解释各个基因的作用。Dong 等^[5] 对葡萄球菌 *S. condiment* DSM1674 全基因测序及对比分析, 在菌种的基因组中注释到了乳酸脱氢酶基因, 该酶能在无氧条件下通过糖酵解途径中将丙酮酸转化成乳酸, 此外, 注释了 28 个与该菌种耐高渗高盐环境相关的基因, 由此解释了菌种的耐盐特性, 说明该菌株能在高盐的酱油发酵体系中代谢出乳; 李豆南等^[55] 对酱香大曲中链霉菌菌株 FBK14.005 进行全基因测序及序列分析后得到 7.33 Mb 有效数据量及 7 946 个注释基因, 并通过 GO 注释等方式完成了基因组预测鱼基本功能注释。目前结合全基因序列分析及功能基因组学研究风味细菌作用机制的报道较少, 大多是应用于医学中病原微生物基因的分析^[56], 随着酿造酱油风味细菌研究的深入, 该技术将成为准确解释风味物质的形成及有效提升产风味物质能力的重要手段。

4.3 代谢组学对解析并调控风味细菌代谢的研究进展

代谢组学 (Metabolomics) 是通过考察生物体系受刺激或扰动后, 其代谢产物的变化或其随时间的变化来研究生物体系的科学。生物体的代谢十分复杂迅速, 基因组学、转录组学及蛋白质组学的研究很难覆盖生命体系中一些非常活跃且十分重要的物质, 而代谢组学则能弥补这一缺陷^[57]。色谱技术、光谱技术等是研究代谢组学的主要技术, 其通过检测包括糖、糖醇、有机酸、氨基酸、脂肪酸以及大量次级代谢物来获取代谢通路信息及代谢中间产物变化信息实现代谢组学研究^[58]。

酱油的研究中, 已有一些学者将代谢组学运用于风味细菌及风味物质的关联研究, 解析了风味细菌在酱油发酵过程中的代谢机制。Zhang 等^[59] 通过添加解淀粉芽孢杆菌 JY06 代谢了酱油发酵过程中产生的精氨酸, 从而阻断了瓜氨酸的合成, 并大大减少了氨基甲酸乙酯的产生, 不仅如此, JY06 的添加也增加了发酵酱油中酯和酮类物质的种类; 杨怡敏等^[60] 则利用 *P. pentosaceus* 研究了瓜氨酸在酱油发酵中的积累机制, 发现高盐条件是导致瓜氨酸积累的最重要因素; Ghulam 等^[61] 通过对 20 多种不同来源及品牌的酱油中微生物的代谢物进行分析研究, 提出了分辨高品质酱油的依据。

5 总结

消费者对酱油品质的追求促进了高品质酱油酿造工

艺的发展, 酱油酿造风味细菌的研究及其应用成为推动工艺发展的重要途径, 也将成为研究的热点之一。各种风味细菌与主发酵菌种在长期发酵中相互作用, 代谢产生的各种物质相互反应, 构成了酱油复杂的风味物质体系, 从而形成了酱油特有的风味。随着高通量测序、基因组学、转录组学、蛋白质组学及代谢组学等现代生物技术的应用, 深入研究风味细菌、扩大其应用优势、发掘其在减盐酿造中的应用潜力、实现多菌种混合发酵、优化酱油风味, 将为生产安全健康、鲜咸适口、酱香醇厚的优质酱油提供有力保障。

参考文献

- [1] 包启安. 酱油科学与酿造技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011.
- [2] 中国产业信息网. 2018 年中国酱油行业销量额及价格走势分析[EB/OL]. (2018-04-11) [2019-01-14]. <http://www.chyxx.com/industry/201804/628893.html>.
- [3] 王丽杰. 高盐稀态发酵酱油工艺技术研究[J]. 福建轻纺, 2012(10): 39-42.
- [4] 郭辉, 李沛, 李库. Umami 型酵母抽提物对无添加酱油的品质提升作用[J]. 中国调味品, 2015, 40(11): 75-77.
- [5] DONG Hui-hui, CHEN Jian, HASTINGS A K, et al. Complete genome sequence and comparative analysis of *Staphylococcus condiment* DSM11674, a potential starter culture isolated from soy sauce mash[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2017, 5: 1-6.
- [6] GAO Li-hua, LIU Ting, AN Xin-jing, et al. Analysis of volatile flavor compounds influencing Chinese-type soy sauces using GC-MS combined with HS-SPME and discrimination with electronic nose[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(1): 130-143.
- [7] WANG Shuo, ZHANG Han, LIU Xiao-fang, et al. Relationship between chemical characteristics and sensory evaluation of koikuchi soy sauce[J]. *Analytical Letters*, 2018, 51(14): 2 192-2 204.
- [8] SONGHEE M, YEONJIN P, INCHEOL K, et al. Isolation and characterization of *Bacillus velezensis* SS360-1 from seed soy sauce[J]. *The Korean Journal of Community Living Science*, 2018, 29(1): 49-58.
- [9] 王博, 陈坚, 堵国成, 等. 酱醪嗜盐四联球菌的分类及特性研究[J]. 微生物学报, 2018, 58(10): 1 826-1 838.
- [10] IMAMURA M. Descriptive terminology for the sensory evaluation of soy sauce[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2016, 31(5): 393-407.
- [11] 苏东海. 酱油生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 66-75.
- [12] 童星, 彭勃. 酱油的风味物质及其研究进展[J]. 中国调味品, 2018, 43(10): 195-200.
- [13] NUNOMURA N, SASAKI M, ASAO Y, et al. Shoyu (soy

- sauce) volatile flavor components: Basic fraction[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1978, 42(11): 2 123-2 128.
- [14] 崔瑞迎, 郑佳, 梁如, 等. 耐盐乳酸菌和酵母菌对高盐稀态发酵酱油品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(6): 197-201.
- [15] 李杨, 李明达, 刘军, 等. 酱油酿造过程中风味物质的形成与鉴定[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(4): 251-256.
- [16] 邓岳, 杨阳, 夏白雪, 等. 杀菌工艺对先市酱油品质形成研究[J]. *中国测试*, 2016, 42(6): 54-59.
- [17] 陈芸芸, 陆兆新, 党丽娟, 等. 复合诱变增强植物乳杆菌 fmb10 的抑菌性能研究[J]. *食品与机械*, 2016, 32(5): 58-62.
- [18] SÁNCHEZ M M, XHAFFERI R, SAMAPUNDO S, et al. Opportunities and limitations for the production of safe fermented meats without nitrate and nitrite using an antibacterial *Staphylococcus sciuri* starter culture[J]. *Food Control*, 2016, 69: 267-274.
- [19] 于海, 王敏, 李梦璐, 等. 1 株源自如皋火腿的产谷氨酰胺酶腐生葡萄球菌 RG-2 催化条件的优化[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(9): 17-21.
- [20] LEE J-H, HEO S, JEONG D-W. Genomic insights into *Staphylococcus equorum* KS1039 as a potential starter culture for the fermentation of high-salt foods[J]. *BMC Genomics*, 2018, 19: 1.
- [21] UDOMSIL N, RODTONG S, TANASUPAWAT S, et al. Improvement of Fish Sauce Quality by Strain CMC5-3-1: A Novel Species of *Staphylococcus* sp[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(9): 2 015-2 022.
- [22] SI Jin-Beom, JANG Eun-ji, CHARALAMPOPOULOS D, et al. Purification and characterization of microbial protease produced extracellularly from *Bacillus subtilis* FBL-1[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2018, 23(2): 176-182.
- [23] 王博, 周朝晖, 李铁桥, 等. 嗜盐四联球菌及其在发酵食品中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(8): 267-272.
- [24] 赵国忠, 王梦颖, 姚云平, 等. 酱油发酵过程中的耐盐乳酸菌筛选及对低盐固态酱油品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(13): 184-188.
- [25] 胡传旺, 李巧玉, 周朝晖, 等. 酱醪细菌菌株的分离及功能分析[J]. *微生物学通报*, 2017, 44(8): 1 899-1 907.
- [26] YE Mao, LIU Xi, ZHAO Li-yun. Production of a novel salt-tolerant *L*-glutaminase from *Bacillus amyloliquefaciens* using agro-industrial residues and its application in chinese soy sauce fermentation[J]. *Biotechnology*, 2013, 12(1): 25-35.
- [27] JIANG Xue-wei, XU Yan-tao, YE Jing, et al. Isolation, identification and application on soy sauce fermentation flavor bacteria of CS1. 03[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(4): 2 016-2 026.
- [28] ALAM S S, SELAMAT J, MAIMUNAH S, et al. Chemical profiling of different types of soy sauce and the relationship with its sensory attributes[J]. *Journal of Food Quality*, 2016, 39(6): 714-725.
- [29] 李幼筠. 酱油生产实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 115-119.
- [30] XU Ning, LIU Ya-qi, HU Yong, et al. Autolysis of *Aspergillus oryzae* mycelium and effect on volatile flavor compounds of soy sauce[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(8): C1 883-C1 890.
- [31] WANG Shuo, ZHANG Han, LIU Xiao-fang, et al. Relationship between chemical characteristics and sensory evaluation of koikuchi soy sauce[J]. *Analytical Letters*, 2018, 51(14): 2 192-2 204.
- [32] SINGRACHA P, NIAMSIRI N, VISESSANGUAN W, et al. Application of lactic acid bacteria and yeasts as starter cultures for reduced-salt soy sauce (moromi) fermentation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 78: 181-188.
- [33] 赵国忠, 姚云平, 曹小红, 等. 2 种米曲霉发酵酱油风味物质比较[J]. *食品科学*, 2014, 35(24): 249-253.
- [34] 李巧玉, 陈坚, 曾伟主, 等. 酱醪中魏斯氏菌的分离及特性分析[J]. *微生物学通报*, 2018, 45(11): 2 449-2 462.
- [35] 刘瑞钦. 酱油的感官鉴评[J]. *中国调味品*, 2004, 29(3): 39-42.
- [36] 侯丽华, 宋茜, 曹小红. 酱油风味研究进展[J]. *中国酿造*, 2009(7): 1-3.
- [37] WEI Qi, ZHANG Wen-tao, LU Fu-ping. Effect of temperature, NaCl and ferulic acid concentration on bioconversion of ferulic acid to 4-vinylguaiacol and 4-ethylguaiacol by halotolerant yeasts *Candida versatilis* [J]. *Advances in Applied Biotechnology*, 2017, 444: 289-297.
- [38] SUEZAWA Y, SUZUKI M. Bioconversion of ferulic acid to 4-vinylguaiacol and 4-ethylguaiacol and of 4-vinylguaiacol to 4-ethylguaiacol by halotolerant yeasts belonging to the genus *Candida*[J]. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 2007, 71(4): 1 058-1 062.
- [39] 张蔚, 江曙, 钱大玮, 等. 肠道细菌对阿魏酸的代谢研究[J]. *分析化学*, 2014, 42(2): 244-248.
- [40] HARADA R, YUZUKI M, ITO K, et al. Microbe participation in aroma production during soy sauce fermentation[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2018, 125(6): 688-694.
- [41] 熊芳媛, 蔡明招, 吴惠琴. 酱油香气成分的研究: 头油和生抽香气成分的比较[J]. *中国酿造*, 2008(9): 51-55.
- [42] KAORI B, MAIKO F, AKITO N, et al. Preparation of reminiscent aroma mixture of Japanese soy sauce[J]. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 2016, 80(3): 533-539.
- [43] HARADA R, YUZUKI M, ITO K, et al. Influence of yeast and lactic acid bacterium on the constituent profile of soy sauce during fermentation[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2017, 123(2): 203-208.
- [44] 张梦寒, 李巧玉, 周朝晖, 等. 解淀粉芽孢杆菌诱变育种及

- 其突变株在降低酱油中氨基甲酸乙酯的应用[J]. 微生物学报, 2017, 57(12): 1 817-1 826.
- [45] SANGER F. Determination of nucleotide sequences in DNA[J]. Bioscience Reports, 1981, 1(1): 3-18.
- [46] MARGULIES M, EGHOLM M, ALTMAN W E, et al. Genome sequencing in microfabricated high-density picolitre reactors[J]. Nature, 2005, 437(7 057): 376-380.
- [47] PORRECA G J, ZHANG Kun, LI Jin-billy, et al. Multiplex amplification of large sets of human exons[J]. Nature Methods, 2007, 4(11): 931-936.
- [48] BRIAN D O, ANJANA V, KARLA D P, et al. Efficient mapping of applied biosystems SOLiD sequence data to a reference genome for functional genomic applications[J]. Bioinformatics, 2008, 24(23): 2 776-2 776.
- [49] 杨悦, 杜欣军, 梁彬, 等. 第三代 DNA 测序及其相关生物信息学技术发展概况[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(10): 143-148.
- [50] 邓杰, 黄治国, 卫春会, 等. 基于高通量测序的浓香型白酒窖池细菌群落结构分析[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 50-55.
- [51] 苗菁, 宗万松, 吕敏, 等. 基于高通量测序技术研究土壤细菌对盐生植被演替的响应[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 602-608.
- [52] YE Dong-dong, LIANG He-bin, ZHOU Wei, et al. Total and active microbial communities in a full-scale system treating wastewater from soy sauce production[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 123: 206-215.
- [53] SONG Zhe-wei, DU Hai, ZHANG Yan, et al. Unraveling core functional microbiota in traditional solid-state fermentation by high-throughput amplicons and metatranscriptomics sequencing[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 1-14.
- [54] 沈馨, 王艳, 代凯文, 等. 基于 Miseq 高通量测序技术的辣椒酱核心细菌类群研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(10): 151-157.
- [55] 李豆南, 王晓丹, 罗小叶, 等. 酱香大曲中链霉菌菌株 FBKL4.005 全基因组测序及序列分析[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 206-212.
- [56] 周子超, 何岚, 丁月平. 全基因组测序(WGS)在肠杆菌科细菌中的应用研究[J]. 智慧健康, 2019, 5(2): 70-72.
- [57] 许国旺. 代谢组学方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-12.
- [58] 黄强, 尹沛源, 路鑫, 等. 色谱-质谱联用技术在代谢组学中的应用[J]. 色谱, 2009, 27(5): 566-572.
- [59] ZHANG Ji-ran, DU Guo-cheng, CHEN Jian, et al. Characterization of a *Bacillus amyloliquefaciens* strain for reduction of citrulline accumulation during soy sauce fermentation[J]. Biotechnology Letters, 2016, 38(10): 1 723-1 731.
- [60] 杨怡敏, 方芳, 周朝晖, 等. 乳酸足球菌精氨酸代谢与瓜氨酸积累[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(3): 247-251.
- [61] GHULAM M K, YUAN Bin, HUSSAIN A I, et al. ¹³C-NMR-based metabolomic profiling of typical asian soy sauces[J]. Molecules, 2016, 21(9): 1 168-1 181.
-
- (上接第 208 页)
- [2] KIM H W, KIM J B, CHO S M, et al. Anthocyanin changes in the Korean purple-fleshed sweet potato, Shinzami, as affected by steaming and haking[J]. Food Chemistry, 2012, 130(4): 966-972.
- [3] 陈兵. 鲜湿菠菜粉条的研制及其保鲜的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 7-8.
- [4] 赵萌, 王珊, 沈群, 等. 红薯淀粉与绿豆淀粉复配粉条的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(12): 58-63.
- [5] 邢丽君, 木泰华, 张苗, 等. 不同低温冷冻条件及干燥温度对紫薯粉条品质的影响[J]. 食品科技, 2015, 40(3): 115-121.
- [6] 邢丽君, 木泰华, 张苗, 等. 紫薯全粉添加量对甘薯淀粉物化特性及粉条性质的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(3): 484-492.
- [7] 蒋光阳, 肖力源, 王章英, 等. 不同基材复配紫薯花青素制备智能指示膜及应用研究[J/OL]. 食品科学. [2018-12-27]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2206.ts.20181018.1501.016.html>.
- [8] LEE D J, PARK J H, KANG M C. Optimization of TiC Content during Fabrication and Mechanical Properties of Ni-Ti-Al/TiC Composites Using Mixture Designs [J]. Materials, 2018, 11(7): 1 132.
- [9] 张勋, 张丽霞, 芦鑫, 等. 混料试验与模糊评价结合优化挤压膨化芝麻制品工艺[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 248-253.
- [10] 吕振磊, 李国强, 陈海华. 马铃薯淀粉糊化及凝胶特性研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 22-27.
- [11] 廖卢艳, 吴卫国. 湿热处理改善红薯粉条品质的优化工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 114-119, 130.
- [12] 钱籽霖, 秦宏文, 刘奕, 等. 制汁工艺对紫薯汁品质及香气成分的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 79-85.
- [13] 宋春春. 马铃薯营养粉丝(条)的研制[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013: 7-10.
- [14] MESTRES C, COLONNA P, BULEON A. Characteristics of starch networks within riceflour noodles and mungbean starch vermicelli [J]. Journal of Food Science, 1988, 53(6): 1 809-1 812.
- [15] 廖卢艳, 吴卫国. 不同淀粉糊化及凝胶特性与粉条品质的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 332-338.
- [16] 王永强, 姚卫蓉, 蔡超, 等. 基于鲜湿米粉品质综合评价的原料配比优化研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(13): 90-94.
- [17] 廖卢艳, 吴卫国. 湿热处理改善红薯粉条品质的优化工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 114-119, 130.
- [18] 范会平, 李瑞, 王娜, 等. 冷冻工艺对无铝红薯粉条品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(8): 142-146.