

酱油特征性风味生成机制及途径研究进展

方胥伟¹, 赵钜阳*, 卢冰琳²

(哈尔滨商业大学 旅游烹饪学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 酱油是我们生活中最常见的调味品, 酱油的风味是酱油品质及特征的决定性因素, 其在酱油生产加工过程中也较难控制, 因而造成了各品牌酱油品质的参差不齐。本文主要介绍酱油的在烹调过程中的应用及其分类, 挥发性香味成分以及非挥发性成分, 说明香味物质的提取方法的优劣之处, 为未来酱油产业的发展提供理论依据和指导作用。

关键词: 酱油; 风味; 挥发性物质; 非挥发性物质; 香气

酱油是一种传统的调味品, 起源于我国公元前 2 世纪, 由煮过的大豆、烤过的谷物、盐水和米曲霉或大豆曲霉经发酵制成的液体。由于酱油色泽诱人, 滋味鲜美, 现广泛应用于东亚和东南亚的菜肴中, 并逐渐在西方国家中流行^[1-2]。酱油主要由鲜、甜、酸、咸、苦等综合而成^[3-5], 其中, 咸味、甜味、苦味分别主要由酱油的盐分、糖分、糖色所决定, 有些在生产中容易控制。然而, 酱油的鲜度、酸味和香味不是由单一成分决定的, 而是由酯类、醇类、羰基化合物、缩醛类及酚类等多种成分共同作用的结果^[6-7]。酱油中的营养成分十分丰富, 包括氨基酸、可溶性蛋白质、糖、酸和一些微量元素, 可以有效维持人体的生理平衡。酱油是烹饪的首选调料, 味道醇厚, 营养价值高。因此, 本文对酱油的相关香气成分及相应的检测技术进行了研究, 希望能为今后酱油行业的发展提供一些理论依据。

1 酱油风味概述

根据酱油生产的不同方法, 酱油可以分为配制酱油、酿造酱油、再制酱油。其中的酿造酱油根据其加工工艺的不同分为低盐固态发酵酱油、高盐稀态发酵酱油^[8]。利用低盐固态发酵工艺酿造酱油工艺中生产出来的酱油存在较重的焦糊味, 色泽较为暗淡, 而且在口味方面比较单一。高盐稀态发酵工艺的酱油颜色呈现出红褐色, 且其散发出浓厚的酯香和酱香, 突出的鲜味, 醇厚的口感、甜咸适口。根据酱油滋味、色泽的不同分为老抽酱油、生抽酱油、花色酱油。其中使用最广泛的是生抽和老抽酱油。生抽是一种低粘度、不透明、淡棕色的酱油, 其制法通常是将蒸小麦、大豆与曲霉一起培养, 并将三者混合物于盐水中发酵。生抽主要用于调味, 颜色略浅, 口味稍咸且风味独特。老抽则是由生抽制成的颜色较深且稍厚的酱油, 是经长时间陈酿而成的。它通常添加焦糖, 使得其相比于生抽味道更甜、咸且外观独特, 因而老抽口感则更为丰富, 外观更饱满, 其风味也因此多在烹饪后释放, 因此其主要用

于烹饪菜肴的色泽和风味的增补。红烧酱油和蘑菇酱油是老抽的两种延伸，多用特定的菜肴的烹饪，红烧酱油和蘑菇酱油是通过添加额外的香料、添加剂和调味料制成的^[9-10]，它们的发酵过程基本相同，但口味不同，这主要是由于各自添加的添加剂种类和含量不同而造成^[11]。

2 酱油中风味形成机理

2.1 酱油风味形成来源

酱油中风味物质非常复杂，不是单一的物质，而是几十种甚至上百种复杂化合物的混合物^[12]。酱油中已鉴定出近 300 种香气化合物，这些香气化合物包括醇类、醛类、酸类、碳氢化合物、酯类、呋喃、呋喃酮、含氮化合物、酚类、吡喃酮、吡嗪类、吡啶类、含硫化合物和噻唑类^[13]。其中，醇类、酸类、酯类和醛类被报道为酱油中发现的最丰富的香气化合物^[14]。酱油色素形成的主要途径是美拉德反应。原料中的淀粉经过酶水解生成羟基和氨基，生成黑色素物质。美拉德反应是一种非酶促褐变反应，在改善颜色和味道方面起着重要作用，但它也有负面的健康影响^[15]。褐变反应中会产生醛、酮等还原性中间体，达到一定含量会影响健康。美拉德反应是由羰基和氨基之间的缩合反应产生希夫碱，然后进行 Amadori 重排得到 Amadori 产物，然后通过两条主要途径降解，产生大量的美拉德反应产物。 α -DC 是由在美拉德反应过程中形成的糖或其他的美拉德反应产物分解而产生的，但也被认为是由脂质氧化产生的。作为重要的中间体， α -DC 促进了美拉德反应引起的香气和颜色的变化，这些化合物也是最终类黑素(高度聚合的棕色颜料)形成的前体^[16-17]。酱油中的杂环化合物，包括呋喃和吡嗪，主要是通过美拉德反应形成的^[18]。酱油中的呋喃来自葡萄糖热解和美拉德反应，一般来说，呋喃是在美拉德反应中分解而生成的^[19]。吡嗪是一类重要的含氮风味化合物，通常由氨基酸与羰基通过美拉德反应生成^[20]。大多数吡嗪是影响烘烤食品和烘烤食品风味的重要因素。

醇类主要存在于发酵初期，酯类主要存在于发酵中期，烷烃和杂环化合物主要出现在发酵末期^[21]。酱油的香气的形成时期是发酵的后期。虽然形成的酱油香气含量甚微，但它对酱油的整体风味有很大的贡献。例如，在酵母发酵的过程中会产生的酒香气、有机酸和醇的酯化作用产生的特殊芳香酯，这些都对酱油的风味起到了积极的作用。酱油的酸味主要来源于琥珀酸、乳酸、乙酸等有机酸。淀粉水解糖赋予了酱油的甜味，酱油的苦味大部分来自亮氨酸、蛋氨酸和精氨酸等氨基酸，食盐中的氯化钠成分赋予了酱油的咸味^[22]。酱油的鲜味主要源于发酵过程中由大豆蛋白和麦麸蛋白水解产生的酸性氨基酸(主要是天冬氨酸和谷氨酸)，这些氨基酸具有独特的鲜味。此外造成酱油独特风味的因素还来自于一些低分子量化

合物，如酸性肽和味精谷氨酸盐(MSC)，它们会赋予酱油咸味和鲜味^[23]。

2.2 酱油风味形成途径

2.2.1 通过蛋白质降解作用产生的风味物质

市售酱油酿造的原料主要是豆粕或者麦麸，酱油在高温下煮沸后，原料中的蛋白质会发生变化，导致蛋白质变性。蛋白质由于微生物分泌的蛋白酶的作用会进一步降解产生谷氨酸、丙氨酸等，这些降解物对酱油的风味产生重要影响，其中谷氨酸对风味贡献最大。水解酶的作用可以使大豆蛋白和小麦粉分解，但由于其复杂而稳定的结构，一些未表征的蛋白一直保留到发酵终点。在酱油发酵过程中，二肽酶，中性蛋白酶，亮氨酸氨基肽酶和 β -木聚糖酶等水解酶的表达水平不是恒定的，并且逐渐降低，某些风味与水解氨基酸和还原糖有关^[24]。根据黄毅等^[25]研究表明 4-羟基-2(5)-乙基-5(2)-甲基-3(2H)-咪喃酮(HEMF)是促使酱油呈现其独特香气的主要风味物质^[26]，不仅能够带来香气，还可为酱油风味提供丰富的浓厚感^[27]。此外，酱油中常见的风味化合物还有 4-羟乙基-5-甲基-3(2H)-咪喃酮(4-HEMF)，其与 HEMF 可能还会导致烟熏味^[28]。总之，这些蛋白质降解产物不仅是酱油中主要的滋味成分，同时也是挥发物质的前体物质，因而进一步影响酱油的挥发性气味。吡嗪和咪喃化合物是酱油中非常重要的化合物。吡嗪化合物来自于 Strecker 降解的 α -氨基酸和还原酮，咪喃化合物来自葡萄糖的降解^[29]。

2.2.2 通过淀粉的糖化作用产生的风味物质

酱油制曲过程的主要微生物——米曲霉能够分泌多种酶类分解酱油原料物质，其中最重要的是淀粉液化酶和糖化酶。米曲霉在发酵过程中起重要作用，在酶的作用下，原料中的淀粉类物质会被分解为小分子的葡萄糖，进而使酱油具有一定的甜味，同时这些糖类物质也为制曲和发酵中的微生物提供了碳源，构成了微生物的物质基础。此外，碳水化合物是美拉德反应中所必需的化合物之一，为酱油风味、色泽、体态的形成打下了基础^[30]，发酵中碳水化合物通过美拉德反应会产生一系列含 N，S 的棕褐色挥发性杂环化合物，如类黑精等^[31]。此外，戊糖还将通过加热过程中的美拉德反应产生酱油中两种最重要的芳香化合物——4-羟基-2, 5-二甲基-3(2H)-咪喃(4-HDMF)和 4-HEMF^[32]。另一方面，构成酱油红棕色或红棕色的主要颜色物质也主要来自酱油发酵过程中酱油醪或酱油醪中蛋白质和淀粉原料(或其分解产物氨基酸和糖)的美拉德反应。2-乙酰基咪喃被认为具有类似焦糖的香气，通常在美拉德反应的糖降解过程中产生^[33]。

2.2.3 通过脂肪的水解作用产生的风味物质

黄豆作为酱油生产的原料富含了大量的油脂，在储藏期内油脂分解对酱油的风味有着重

要影响。油脂降解产生的脂肪酸与酵母发酵物乙醇相互作用会生成小分子脂类，脂类具有芳香香气^[34]。酯类是酱油中另一种重要的香气化合物，因为它具有较高的挥发性和对人类嗅觉受体的敏感性。大多数酯是通过发酵过程中脂肪酸和醇类的酯化作用形成的，并且受基质中前体脂肪酸类和醇类的含量的影响，并且可以通过减少胺类和脂肪酸所带来的酸味和苦味来增加风味^[35]。根据 Fengy 等^[36]研究表明，在酱油曲的发酵过程中会产生游离脂肪酸等物质，这些物质是酱油风味和香气的典型前体，在酱油独特风味的形成的过程中发挥了很大的作用。可以闻到一些重要的芳香化合物，包括乙醇、2-甲基-1-丙醇、2-甲基-1-丁醇、二甲基二硫化物、二甲基三硫化物等。L. Gao 等^[37]研究表明与脱脂大豆相比，用全大豆制成的酱油粗脂肪含量高，含有更多的脂肪酸酯，当使用全大豆时，亲脂化合物包括芳香化合物更倾向于驻留在油分中，在巴氏杀菌之前进一步酱醪糖化被去除，这导致最终产品的味道损失，酱油口味也更温和。豆类等发酵过程中产生的高级脂肪酸酯，如油酸乙酯、亚油酸乙酯、十六酸乙酯等物质，具有明显的水果风味，酿造酱油的香气愈加浓郁谐和，但在发酵过程中，由于脂肪酸氧化的产生，也容易产生不良气味，导致酱油质量下降。可见脂肪酸本身对酱油的香气并没有太大的作用，但是经过长达半年的发酵，会被氧化成一系列的脂肪酸链等化合物，再经过进一步的化学反应，会生成醛类、酸类等具有香气的物质。制作酱油的大豆原材料富含油脂，在发酵过程中极易因生产条件控制不当引发脂肪酸败，也易促使不良气味的产生造成酱油品质下降，因此在酱油生产过程中要控制好生产条件^[38]。

2.2.4 通过菌种微生物的代谢作用产生的风味物质

酱油发酵是决定酱油风味和香气品质的重要环节。在这一阶段，大量的微生物在酱油中产生香气化合物，这些化合物构成了酱油的整体香气。由于单一的菌种接种发酵不容易产生色泽饱满，口感浓郁的酱油，因此多采用混合菌种发酵，目前在酱油酿造过程比较常用的菌种是米曲霉、酵母菌、乳酸菌、嗜盐杆菌和鲁氏杆菌等^[39]。其中酵母菌和乳酸菌在酱油发酵过程中起主要作用，它们能够将葡萄糖转化为二氧化碳和乙醇，生成的乙醇可以继续被氧化成酸类，部分进一步反应为酯类，这类物质组成酱油香气的重要部分。Harada 等^[40]研究了发酵过程中酵母和乳酸菌对酱油成分的影响，发现酵母在发酵过程中加入后可以产生乙醇。乙醇不仅具有酒的香气，还能被氧化成醛和酸，并进一步与酸形成酯。乳酸菌的添加也能显著提高酱油中马铃薯风味的甲基化产物。Moromi 发酵被认为是决定酱油风味和香气质量的重要阶段。在此阶段，Moromi 发酵存在的大量微生物会产生香气，这些香气有助于酱油的整体风味。在这些微生物中，嗜盐杆菌和鲁氏杆菌占主导地位，对酱油香气的贡献研究最多^[41]。嗜盐杆菌和鲁氏杆菌分别通过乳酸和酒精发酵途径产生各种次生代谢物，包括重

要的芳香化合物。嗜盐杆菌可产生乙酸、甲酸、苯甲醛、乙酸甲酯、2-羟基丙酸乙酯、2-羟基-3-甲基-2-环戊酮等。Harada 等^[42]代谢组学研究证明了在盐味发酵过程中,嗜盐链球菌与糠醛、糠醇、2-羟基-3-甲基-2-环戊烯-1-酮(环戊烯)和蛋氨酸的增加之间存在相关性,因为这些风味化合物是通过美拉德反应产生的,由嗜盐丁酸杆菌产生乙酸和乳酸创造一个酸性环境。此外,酱油里还有一些通过氨基酸脱羟基、氨基而形成丁醇等醇类物质,它们是酱油风味有效增强剂,不但在缓解酱油咸味发挥重要作用,而且还可以促使酱油的口感变得更加柔和和浓厚^[43]。酯类化合物是酱油中最丰富和复杂的成分。大部分酯类是由醇与蛋白质水解产生的有机酸通过酯化酶进行酯化反应生成的,可以使酱油的风味更加醇厚,酱油的咸味可以得到有效缓解。

3 酱油风味物质检测技术

日本是第一个研究酱油香味的国家。有报道称酱油的香味早在 1887 年就被研究过了^[44]。1940 年,Kihara 在《日本化学学会杂志》上曾经发表过一篇和酱油香味相关的文章,酱油中的香气成分很丰富,Kihara 的研究中指出这些成分包括乙醇、乙酸、乙酸乙酯、乳酸等^[45]。在 1955 年引入第一台气相色谱仪,此仪器在酱油中挥发性风味成分的鉴定中起着至关重要的作用^[46]。截至到目前为止,日本学者在研究酱油味道的道路上从没有停止过脚步^[47]。在我国也是很早就开始启动了研究酱油风味的项目,在 1953 年,曾做过测定酱油中挥发性酸、酯、醛、乙醇等方法的报道^[48-49]。到 1980 年,用气相色谱法研究了酱油中的挥发性风味成分^[50]。在 2008 年,国内开始普及气相色谱和气相色谱-质谱联用技术,我国对酱油中挥发性风味物质的研究有所增加。酱油中的挥发性化合物通常用气相色谱-质谱联用仪进行分析。在进行气相色谱-质谱分析之前,样品必须通过从酱油中提取挥发性化合物来制备,使用的主要技术有溶剂直接萃取、吹扫和捕集、溶剂辅助蒸发风味成分、固相微萃取、同时蒸馏和萃取、蒸馏和顶空取样。

酱油的香气主要是经过多种挥发性风味物质共同作用出来的,而酱油的滋味主要是通过多种非挥发性风味物质共同作用呈现出来的^[51]。

3.1 酱油挥发性香气物质的分离与分析

3.1.1 溶剂直接萃取

溶剂直接提取法是用溶剂提取酱油中的挥发性成分。因为酱油是液态的,这种方法也被称为液-液萃取法,提取酱油中的挥发性成分。可以用分液漏斗直接提取,也可以用特殊的玻璃仪器连续提取^[52-54]。溶剂直接萃取的优点是利用溶剂的不同将挥发性成分萃取出来,但

缺点是对非挥发性成分并不适用。朱志鑫等^[55]利用乙醚溶剂提取酱油挥发性风味物质，使用 GC-MS 分析手段，共鉴定出 43 种物质，4-乙基愈创木酚、HEMF，3-甲巯基丙醇及 5-甲基糖醛等对酱油香气贡献最大。

3.1.2 吹扫捕集

吹扫收集法的优点是可以分析挥发性成分，但缺点是收集效率受多种因素影响，存在误差^[56]。近些年这个方法使用的并不多，韩国学者通过测定韩式酱油挥发性成分在发酵过程中的变化情况，共鉴定出 62 种成分，在发酵过程中，酸类和醛类含量升高^[57]。Zhao 等^[58]研究表明通过气相色谱-质谱法（GC-MS）在传统中式酱油中总共检测到 35 种重要的气味活性值大于 1 的重要香气化合物，其中具有芳香环的芳香化合物共 20 种，占了 35 种重要香气化合物很大比例，超过 57%。此外，应用了全二维气相质谱法（GC×GC-TQMS），鉴定了 414 种香气化合物，其中包括 85 种带有芳香环的香气化合物。结合主成分分析和 GC-O-MS，5-甲基-2-呋喃甲硫醇、3-甲基丁醛苯乙醛、2-苯乙醇、苯乙酸乙酯和苯乙酸乙酯被确认为所有样品中的典型香气化合物。

3.1.3 溶剂辅助风味成分蒸发

溶剂辅助风味蒸发（solvent-assisted flavor evaporation, SAFE）优点在于分离和提取的过程中不需要运用加热处理，能更真实的反映出样品中挥发性成分^[59]。目前，虽然该提取挥发性成分的方法在国际上被公认为最佳，但高真空系统的高成本这一因素，所以在实践中很少投入使用。日本学者用该方法研究 5 种市售酱油中关键香气成分以及在加热条件下香气活性物质的变化，结果显示，其中苯乙酸、异戊酸、麦芽酚、苯乙酸和呋喃酮是 5 种市售酱油中的 25 种核心气体成分鉴定结果中含量较高的^[60]。

3.1.4 固相微萃取

固相微萃取（solid-phase microextraction, SPME）因其操作简单、灵敏、快速、自动化、样品用量少、无溶剂、成本低等优点而被广泛应用^[61]。然而，由于当不同的纤维被用于提取时所识别的不同成分，具有定量结果存在差异的缺点。近些年来，利用 SPME 提取酱油风味的研究很多。高献礼^[62]同时利用 SDE、SMPE 和直接溶剂萃取法三种方法酱油对挥发性风味物质进行提取分离，并采用 GC-MS 分析手段鉴定，在鉴定出的 147 种风味物质中，酯类、酸类、醛类、醇类和杂环类是主要的挥发性的风味物质，数量和相对含量最多的挥发性物质为酯类。Gao 等^[63]研究表明，采用 GC-MS 结合顶空固相微萃取（HS-SPME），对 12 种不同发酵工艺生产的酱油进行了挥发性风味物质的鉴定和挥发性成分的测定，对影响中式酱油风味的 41 种关键挥发性成分进行了定性鉴别，并进行了半定量比较，研究表明，

酱油样品的挥发性风味物质存在较大差异,低盐固态发酵工艺生产的酱油风味品质中挥发性有机物含量普遍较少。

3.1.5 同时蒸馏萃取

同时蒸馏萃取法具有集蒸馏与萃取于一体,操作起来方便等的优点,然而蒸馏萃取法也有着提取热不稳定,具有挥发性的物质并不适用的缺点,因而会生成一些样品中本不存在的成分,影响萃取结果^[64]。为了解决这个问题,可在同时蒸馏萃取时进行减压操作。王军喜等^[65]采用同时蒸馏萃取(SDE)和 SPME 对酱油中挥发性香气成分进行提取,结合气-质联用(GC-MS)仪进行检测,结果显示 SDE 法检测出 73 种挥发性物质。

3.1.6 其他方法

除了上述提到的常用方法外,还有一些其他方法,比如蒸馏法和顶空取样法,这些方法可以从酱油中提取挥发性物质^[66]。蒸馏法早期用于检测酱油风味物质。蒸馏是一种早期检测酱油风味物质的方法,它需要蒸馏和提取,并在提取过程中加热,导致挥发性成分的变化,因此它现在很少使用。顶空取样法主要是用来分析低沸点呈香物质,优点是可以真实的反映顶空气的组成,缺点是抽取挥发性成分少,不便于定性与定量分析。Wang W 等^[67]采用 SPME 和气相色谱/质谱联用法(GC/MSD)对添加和不添加反应香精技术的酱油中的挥发性成分进行了分析,共检出 57 种化合物。Gao X 等^[68]利用超声处理技术不仅能显著提高酱油风味物质的释放和感官品质,而且能降低酱油中 NaCl 的含量,在酱油生产中具有广阔的应用前景。超声波处理提高酶活性,特别是酸性蛋白酶的活性,形成更多的表面积和反应位点,超声波强化酱油风味物质释放和感官品质。杨晓璇^[69]依据代谢组学技术研究方法,利用气相-离子迁移谱和超高效液相色谱串联二级质谱分析不同酱油和食醋中的差异,特级酱油与散装酱油之间的风味差异不显著,而在非挥发性代谢物差异较大。

3.2 酱油非挥发性香气物质的分离与分析

氨基酸是酱油风味的主要来源,其非挥发性风味物质除了氨基酸外,还包括糖类、有机酸和水溶性肽等,酱油甜味的主要来源于葡萄糖和麦芽糖等糖类物质,但并不是所有甜味来源都是糖类物质,有些呈甜味主要是其中的甘氨酸、丙氨酸和色氨酸的作用,同样,酱油的微量苦味也与缬氨酸、酪氨酸等有关,乳酸和琥珀酸等有机酸赋予了酱油的酸味^[70-71]。

目前在酱油非挥发性风味物质的方面分析与研究的不多且不够深入。冯云子等^[72]分析了酱油氨基酸的组成,利用高效液相色谱技术进行分析,测定了中式酱油和日式酱油中含有的可溶性无盐固形物、氨基酸态氮、总氮、总酸和还原糖等指标,除此之外制定感官评价标准,进行了感官评价,实验结果表明:中式和日式酱油在感官评价和非挥发性成分的存在明

显差异,中式酱油鲜、咸味突出,而日式酱油口感较为协调,两类酱油感官差别的主要原因是非挥发性成分不同的组成。

4 展望

作为我国传统的调味品,酱油拥有丰富的风味物质。伴随着科学分析仪器的迭代发展和挥发性成分提取技术的进步,许多研究人员已开始重视酱油的挥发性成分的分析,提取、分离和鉴定酱油的挥发性风味成分。虽然研究人员已经通过多种方法检测出酱油中的关键风味物质成分和其他风味物质成分,但是风味物质各成分的具体功能以及他们之间的相互作用仍不可知。此外,这些风味物质在食品加工过程中进一步变化并进一步影响食品整体风味的机理尚不清楚,因此这一问题所蕴含的科学内涵需要进一步探索和分析。

参考文献:

- [1]Devanthi PVP, Gkatzionis K. Soy sauce fermentation: Microorganisms, aroma formation, and process modification[J]. Food Research International.2019;120:364-374.
- [2]Harada R, Yuzuki M, Ito K, et al. Microbe participation in aroma production during soy sauce fermentation[J]. Journal of Bioscience and bioenging. 2018;125(6):688-694.
- [3]邓远均,刘爽,刘凯,等.提高低盐固态酱油利用率和风味的探索[J].中国调味品, 2015, 40(11):57-58+63.
- [4]尹立明,P.Hanmoungjai.浅析酱油发酵工艺及改善酱油风味的方法[J].中国调味品, 2018, 43(03):119-121.
- [5]何婷. 大豆粕酶解物对酱油风味品质的影响及呈味肽的分离鉴定[D].华南理工大学,2019.
- [6]朱萌,钱晓庆,林成军,等.麸皮曲鱼酱油的制备及品质分析[J].中国调味品,2019,44(12):55-59+64.
- [7]吴星茹,王磊,雷敏,等.市售老抽酱油滋味品质的评价[J].食品研究与开发, 2020, 41(01):66-71.
- [8]杨成聪,舒娜,张亦舒,等.基于电子鼻和 GC-MS 技术对市售酱油风味品质的评价[J].中国调味品,2018,43(10):151-155.
- [9] Magishi N, Yuikawa N, Kobayashi M, et al. Degradation and removal of soybean allergen in Japanese soy sauce[J]. Molecular Medicine Reports. 2017;16(2):2264-2268.
- [10]赵维克.酱油的分类及各自特性的介绍[J].食品安全导刊,2016(33):98.

- [11]Zou T, Liu J, Song H, et al. Discovery of Amadori-Type Conjugates in a Peptide Maillard Reaction and Their Corresponding Influence on the Formation of Pyrazines[J].Journal of Food Science. 2018;83(6):1588-1595.
- [12]张珊. 耐盐酵母的添加对高盐稀态酱油的影响[D].天津科技大学,2018.
- [13]Feng Y, Cai Y, Su G, et al. Evaluation of aroma differences between high-salt liquid-state fermentation and low-salt solid-state fermentation soy sauces from China[J]. Food Chemistry. 2014;145:126-134.
- [14]Wei CL, Chao SH, Tsai WB, et al. Analysis of bacterial diversity during the fermentation of inyu, a high-temperature fermented soy sauce, using nested PCR-denaturing gradient gel electrophoresis and the plate count method[J]. Food Microbiology. 2013;33(2):252-261.
- [15]Aalaei K, Rayner M, Sjöholm I. Chemical methods and techniques to monitor early Maillard reaction in milk products; A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2019;59(12):1829-1839.
- [16]Xu ZZ, Huang GQ, Xu TC,et al. Comparative study on the Maillard reaction of chitosan oligosaccharide and glucose with soybean protein isolate[J]. International Journal of Biological Macromolecules. 2019;131:601-607.
- [17]Yu H, Seow YX, Ong PKC,et al. Kinetic study of high-intensity ultrasound-assisted Maillard reaction in a model system of d-glucose and glycine[J]. Food Chemistry. 2018;269:628-637.
- [18]Hou L, Xie J, Zhao J, et al. Roles of different initial Maillard intermediates and pathways in meat flavor formation for cysteine-xylose-glycine model reaction systems[J]. Food Chemistry. 2017, 232: 135-144
- [19] Lee SJ, Ahn B. Comparison of volatile components in fermented soybean pastes using simultaneous distillation and extraction (SDE) with sensory characterisation[J]. Food Chemistry. 2009,114: 600-609.
- [20]Lu G, Yu TH, Ho CT. Generation of flavor compounds by the reaction of 2-deoxyglucose with selected amino acids[J].Journal of Agriculture and Food Chemistry. 1997.45: 233-236.
- [21]Devanthi PVP, Gkatzionis K. Soy sauce fermentation: Microorganisms, aroma formation, and process modification[J].Food Research International. 2019;120:364-374.
- [22]朱莉, 许长华.酱油关键风味物质及其功能与发酵工艺研究进展[J].食品与发酵工业, 2018, 44 (6) :287-292.

- [23]Meng Q, Imamura M, Katayama H, et al. Key compounds contributing to the fruity aroma characterization in Japanese raw soy sauce[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*.2017; 81(10):1984-1989.
- [24]Zhao G, Ding LL, Yao Y,et al. Extracellular Proteome Analysis and Flavor Formation During Soy Sauce Fermentation. *Frontiers in Microbiology*. 2018;9:1872.
- [25]黄毅.酱油中氨基酸和香气的分析及质量评价[D].保定:河北农业大学, 2012.
- [26]Goh KM, Lai OM, Abas F, et al. Effects of sonication on the extraction of free-amino acids from moromi and application to the laboratory scale rapid fermentation of soy sauce[J]. *Food Chemistry*. 2017;215:200-208.
- [27]Devanthi PVP, Linforth R, El Kadri H, et al. Water-in-oil-in-water double emulsion for the delivery of starter cultures in reduced-salt moromi fermentation of soy sauce [J]. *Food Chemistry*. 2018;257:243-251.
- [28]Lee, S. J., and Ahn, B. Comparison of volatile components in fermented soybean pastes using simultaneous distillation and extraction (SDE) with sensory characterisation[J]. *Food Chemistry*. 2009.114, 600–609.
- [29]Xiao,D.R.,Liu,R.S.,He,L.,et al..Aroma improvement by repeated freeze-thaw treatment during *Tuber melanosporum* fermentation[J]. *Science Reports*. 2015.5:17120.
- [30]Huang Z, Gruen I, Vardhanabhuti B. Intragastric Gelation of Heated Soy Protein Isolate-Alginate Mixtures and Its Effect on Sucrose Release[J].*Journal of Food Science*. 2018;83(7):1839-1846.
- [31]赵谋明, 许瑜, 苏国万, 等.小同淀粉质原料对高盐稀态酱油香气品质的影响[J].*现代食品科技*, 2018 (6) : 130-142.
- [32]Meng Q, Imamura M, Katayama H, et al. Key compounds contributing to the fruity aroma characterization in Japanese raw soy sauce[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2017;81(10):1984-1989.
- [33]Račkauskienė I, Pukalskas A, Fiore A, et al. Phytochemical-Rich Antioxidant Extracts of *Vaccinium Vitis-idaea* L. Leaves Inhibit the Formation of Toxic Maillard Reaction Products in Food Models[J].*Journal of Food Science*. 2019;84(12):3494-3503.
- [34]Inoue Y, Kato S, Saikusa M, et al. Analysis of the cooked aroma and odorants that contribute to umami aftertaste of soy miso (Japanese soybean paste) [J]. *Food Chemistry*.

2016;213:521-528.

- [35]Zhang, L., Zhou, R., Cui, R., et al.Characterizing soy sauce moromi manufactured by high-salt dilute-state and low-salt solid-state fermentation using multiphase analyzing methods[J]. Journal of Food Science, 2016,81(11), C2639–C2646.
- [36]Feng Y, Chen Z, Liu N, et al. Changes in fatty acid composition and lipid profile during koji fermentation and their relationships with soy sauce flavour[J]. Food Chemistry, 2014, 158: 438-444.
- [37]Gao L, Liu T, An X, 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.
- [38]孙佳贺. 白汤酱油在储藏中的褐变及护色措施[D].江南大学,2015.
- [39]Ding C, Meng M, Jiang Y, et al. Improvement of the quality of soy sauce by reducing enzyme activity in *Aspergillusoryzae*[J]. Food Chemistry. 292(2019),81-89.
- [40]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 Bioscience and Bioengineering, 2017, 123 (2) :203-208.
- [41]Sulaiman J, Gan HM, Yin WF, et al. Microbial succession and the functional potential during the fermentation of Chinese soy sauce brine[J]. Frontiers in Microbiology. 5(2014),556.
- [42]Harada R, Yuzuki M, Ito K, et al. Microbe participation in aroma production during soy sauce fermentation[J]. Journal Bioscience and Bioengineering. 2018;125(6):688-694.
- [43] Ding C, Meng M, Jiang Y, et al. Improvement of the quality of soy sauce by reducing enzyme activity in *Aspergillusoryzae*[J]. Food Chemistry. 2019;292:81-89.
- [44]Gao, X., Zhang, J., Liu, E., et al..Enhancing the taste of raw soy sauce using low intensity ultrasound treatment during moromifermentation[J].Food chemistry, 298(2019), 124928.
- [45]Chen, Z. Y., Feng, Y. Z., Cui, C., et al. Effects of koji-making with mixed strains on physicochemical and sensory properties of Chinese-type soy sauce[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2015;95(10), 2145–2154.
- [46]陈亮,贺博,康文丽,等.酱油风味物质检测方法研究进展[J].食品与发酵工业,2019,45(16):293-298.
- [47]石磊.酱油风味物质检测方法研究进展[J].现代食品,2019(18):183-185.

- [48]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(04):251-256.
- [49]童佳,赵国忠,赵建新,等.米曲霉发酵高盐稀态酱油过程中典型挥发性风味物质的形成[J].中国酿造,2017,36(05):22-29.
- [50]Meng Q, Imamura M, Katayama H, et al. Key compounds contributing to the fruity aroma characterization in Japanese raw soy sauce[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 2017;81(10):1984-1989.
- [51]Gao X, Zhang J, Regenstein JM, et al. Characterization of taste and aroma compounds in Tianyou, a traditional fermented wheat flour condiment[J]. *Food Research International*. 2018;106:156-163.
- [52]白佳伟,陈亮,周尚庭,等.特级高盐稀态酿造酱油中关键香气物质的分析[J].中国酿造,2019,38(11):179-185.
- [53]赵谋明,许瑜,苏国万,等.不同淀粉质原料对高盐稀态酱油香气品质的影响[J].现代食品科技,2018,34.
- [54]Lee SM, Kim SB, Kim YS. Determination of Key Volatile Compounds Related to Long-Term Fermentation of Soy Sauce[J]. *Journal of Food Science*. 2019;84(10):2758-2776.
- [55]朱志鑫,吴惠勤,黄晓兰.酱油香气成分 GC/MS 分析[J].食品研究与开发,2007(12):135-138.
- [56]Aryuman P, Lertsiri S, Visessanguan W, et al. Glutaminase-producing *Meyerozyma (Pichia) guilliermondii* isolated from Thai soy sauce fermentation[J]. *International Journal of Food Microbiology*. 2015;192:7-12.
- [57]Harada R, Yuzuki M, Ito K, et al. Microbe participation in aroma production during soy sauce fermentation[J].*Journal Bioscience and Bioengineering*. 2018;125(6):688-694.
- [58]Zhao G, Ding LL, Hadiatullah H, et al. Characterization of the typical fragrant compounds in traditional Chinese-type soy sauce[J]. *Food Chemistry*.2020,312 .
- [59]Wang W, Cha YJ. Volatile Compounds in Seasoning Sauce Produced from Soy Sauce Residue by Reaction Flavor Technology[J]. *Preventive Nutrition and Food Science*.;23(4):356-363.
- [60]Katayama H, Tatemichi Y, Nakajima A. Simultaneous quantification of twenty Amadori products in soy sauce using liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Food Chemistry*. 2017;228:279-286.
- [61]傅若农.固相微萃取(SPME)近几年的发展[J].分析实验室,2015,34(5):602-620.

- [62]高献礼, 赵谋明, 崔春, 等.高盐稀态酱油挥发性风味物质的分离与鉴定[J].华南理工大学学报, 2009, 37(10): 117-122.
- [63]Gao L, Liu T, An X, 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 Technology. 2017;54(1):130-143.
- [64]Kim Yong An,BaHoaVan,HwangInho. Effects of Traditional Sauce Type and Storage Time on Quality Characteristics, Shelf-life and Flavor Compounds of Marinated Pork Cooked by Sous Vide Method.[J]. Food science of animal resources,2019,39(3).
- [65]王军喜, 赵莹, 白卫东, 等.同时蒸馏与固相微萃取法对酱油香气成分提取的比较研究[J]. 中国酿造, 2020, 39 (5) : 201-206.
- [66]童佳. 米曲霉发酵高盐稀态酱油过程中挥发性风味物质及蛋白酶表达规律研究[D].江南大学,2017.
- [67]Wang W, Cha YJ. Volatile Compounds in Seasoning Sauce Produced from Soy Sauce Residue by Reaction Flavor Technology[J]. Preventive Nutrition and Food Science. 2018;23(4):356-363.
- [68]Gao X, Zhang J, Liu E, et al. Enhancing the taste of raw soy sauce using low intensity ultrasound treatment during moromi fermentation[J]. Food Chemistry. 2019;298:124928.
- [69]杨晓璇. 基于 GC-IMS 和 UPLC-MS/MS 代谢组学技术分析不同酱油和食醋中的差异[D]. 山东师范大学,2020.
- [70]隋明,张凤英,胡继红,等.不同类型酱油挥发性组分及多重辨析的研究[J].中国调味品,2019,44(06):77-80.
- [71]刘翔,邓冲,侯杰,等.酱油香气成分分析研究进展[J].中国酿造,2019,38(06):1-6.
- [72]冯云子.高盐稀态酱油关键香气物质的变化规律及形成机理的研究[D].广州:华南理工大学, 2015.