



# 中国传统发酵豆制品风味物质的研究进展

杨 杨, 曾剑华, 王 冰, 刘琳琳, 石彦国, 张 娜

(哈尔滨商业大学 食品工程学院/黑龙江省食品科学与工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150076)

**摘 要:** 中国传统发酵豆制品以其独特的风味和营养功能一直受到人们的青睐。本文阐述了发酵豆制品风味物质的形成途径、捕获及检测方法, 对酱油、腐乳、豆豉、豆酱及纳豆的风味物质研究现状进行综述, 以期能够为发酵豆制品风味的深度研究开发提供参考。

**关键词:** 发酵豆制品; 风味物质; 形成途径; 捕获; 检测方法

## Research Progress on Flavor Substance of Traditional Fermented Bean Products

YANG Yang, ZENG Jian-hua, WANG Bing, LIU Lin-lin, SHI Yan-guo, ZHANG Na

(College of Food Science and Engineering/Key Laboratory of Food Science and Engineering of Heilongjiang Province, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

**Abstract:** Fermented bean products have been favored by people for their unique flavor and nutritional functions. This paper describes the extraction and detection method of flavor substances in fermented bean products, and discusses the flavor formation pathway. The flavor compounds of soy sauce, fermented bean curd, douchi, soybean paste and natto were reviewed in order to provide reference for the deep research and development of fermented soybean products flavor.

**Keywords:** Fermented bean product; Flavor substance; Formation pathway; Capture; Detection method

大豆是我国最古老的农业作物, 其历史起源于五千年前。现如今大豆及其制品仍以其丰富多彩的风味迎合着人们日益增长的多样化饮食需求。传统豆制品可分为两类: 非发酵豆制品, 如豆浆、豆腐等; 发酵豆制品: 如豆豉、酱油、纳豆和味噌等<sup>[1]</sup>。由于发酵豆制品在制作时经过多种微生物的发酵作用, 产生一系列复杂的生化反应, 使产品形成独特的风味, 也使得这些食品成为人们饮食生活中不可或缺的一部分。

风味即“食物在摄入人口内会在大脑中留下味觉、嗅觉、痛觉及触觉等综合印象”<sup>[2]</sup>。诱人的风味会使人们在感觉器官和心理上获得愉悦和满足, 并直接影响食物在人体内的消化和吸收。随着人们生活品质的提升, 人们对食物的探索已不仅仅满足于营养与健康, 而体现食物嗜好性的风味更受到重视, 因此, 食品中的风味物质研究作为一个新兴学科发展迅速。在二十世纪中期人们就已开始对发酵豆制品的风味进行初步探索, 到目前为止, 许多学者已经对腐乳及酱油的风味进行了非常详细的论述。本文将针对 5 种传统豆制品—酱油、腐乳、豆

豉、豆酱及纳豆的风味物质的捕获、表征手段、技术等进行综合论述。

### 1 传统豆制品风味物质的形成途径

大豆原料在发酵过程中由于微生物与物料共同作用, 使得蛋白质、脂类及糖类大分子物质发生水解, 生成小肽、游离氨基酸、有机酸、脂肪酸等, 使发酵豆制品拥有独特的风味<sup>[3-4]</sup>, 发酵豆制品风味物质形成机制的研究受到广泛关注。

#### 1.1 蛋白质水解作用

发酵使大豆中的蛋白质逐步降解为小分子肽和游离氨基酸, 分子量的降低增加了大豆蛋白的消化吸收率, 这将有助于调节人体的生理代谢<sup>[5-6]</sup>。氨基酸代谢过程中首先是脱氨基, 随后是脱羧反应, 之后进行多种酯化反应与还原反应, 生成酸类、醇类、酯类等风味物质<sup>[7-8]</sup>, 赋予豆制品特殊的醇香与焦糖风味, 伴随着风味的产生, 也丰富了豆制品中的滋味物质, 如具有鲜味的谷氨酸和天门冬氨酸, 具有甜味的丙氨酸和甘氨酸等, 发酵反应如果过度使胱氨酸、蛋氨酸和组氨酸的含量增加, 使豆

收稿日期: 2018-06-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31871747); 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0400402); 国家自然科学基金(31301602); 哈尔滨市科技局科技创新人才研究专项资金(2016RAQXJ146); 哈尔滨商业大学研究生创新科研项目(YJSCX2018-482HSD)。

第一作者简介: 杨杨(1991-), 女, 博士, 主要从事大豆、谷物化学与加工机理研究。E-mail: 13766948050@163.com。

通讯作者: 张娜(1979-), 女, 博士, 教授, 博导, 主要从事食品安全与食品化学研究。E-mail: foodzhangna@163.com。

制品产生苦味<sup>[9-10]</sup>。

1.2 脂类水解作用

豆制品中脂类物质包括甘油和脂肪酸,发酵过程中脂类物质一方面通过水解反应生成酯类和醇类,另一方面由氧化反应进一步生成挥发性醛类、酸类和醇类,同时脂肪酸与醇类结合生成芳香族化合物,赋予发酵豆制品特有的香气<sup>[11]</sup>。脂类对发酵豆制品风味形成的贡献主要有2种途径,脂肪酸在进入 $\beta$ -氧化途径之前,需由乙酰基辅酶A催化活化成脂肪酰辅酶A,活化的脂肪酰辅酶A在一系列酶的作用下,使 $\alpha$ -碳原子和 $\beta$ -碳原子之间产生断裂,生成比原来脂肪酸少两个碳原子的短链脂肪酰辅酶A,循环反复 $\beta$ -氧化直到化合物全部降解,降解产物为酯类、醇类、酮类及酸类;其次是脂肪氧合酶催化氧化(LOX),脂肪氧合酶能催化含有顺-1,4-戊二烯结构多不饱和脂肪酸,生成氢过氧化物,它能被其它酶分解生成挥发性醛类和酮类芳香物质,如反-2-己烯醛,其香味类似于叶子的淡淡的清香,同时也会产生豆腥味等不良风味,其主要成分为己醛和戊醛。

1.3 淀粉水解作用

淀粉经水解后生成还原糖,还原糖再经酵母、乳酸菌的发酵作用生成小分子的醇类、醛类和酸类等风味物质,其中风味物质相互作用生成酯类等香

气,使豆制品具有独特营养与风味,虽然挥发性物质仅是一小部分,它们对豆制品风味的贡献却很大。

当前,各国学者还没有对风味物质形成途径进行更深层次的研究与探讨。

2 传统发酵豆制品风味物质捕获及检测方法

在发酵豆制品风味物质中,挥发性香气物质一方面源于原料自身,一方面取决于大豆加工及发酵过程中酶类的水解作用。香气成分极其复杂且含量微少,但对豆制品的品质影响非常大,因此,对香气成分的分析检测是评价发酵豆制品质量的一种重要方法。目前用于发酵豆制品风味物质分析检测往往要经过取样、预处理、分离、检测 and 数据分析等步骤。因此,选择合适的香味捕获方法对整个分析过程的效率和结果十分重要<sup>[12]</sup>。近年来,许多气相色谱(GC)、液相色谱(HPLC)气相色谱-质谱联用(MS)、顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱(SPME-GC-MS)等得以应用,由于其操作简单且无其他溶剂干扰,常用于食品中风味物质的快速鉴别以及我国传统的大豆发酵食品中挥发性成分分析。表1和2分别列出了已应用于传统发酵豆制品风味物质的捕获和检测方法。

表 1 发酵豆制品风味物质的捕获方法

Table 1 Extraction method of flavor substances in fermented bean products

方法 Method	原理 Principle	参考文献 Reference
同时蒸馏萃取法 SDE	将样品与萃取剂一同蒸馏,两者蒸汽相融,再通过冷凝温度差达到组分分离的目的	[13-15]
顶空固相微萃取 SPME	利用涂有石英纤维的萃取头来吸附、富集样品中的挥发性风味物质	[16-17]
分子蒸馏法 MD	在较低的温度下,减少分子的重凝聚,使其自然蒸发,达到蒸馏的目的	[18]
减压蒸馏萃取法 VDE	挥发性组分的水溶液在低压环境下蒸馏再萃取	

表 2 发酵豆制品风味物质的检测方法

Table 2 Detection method of flavored substances in fermented bean products

方法 Method	原理 Principle	参考文献 Reference
气-质联用法 GC-MS	被测组分通过色谱柱后与载气分离,经离子化后被送往质谱分析器	[19-20]
液-质联用法 LC-MS	流动相液体雾化蒸发,样品完全离子化后送往质谱分析器	[21]
内/外标法 ISTD/ESTD	根据标准品浓度的函数式推算风味物质的百分比	

从表1与2中可以看出,对传统发酵豆制品风味的捕获主要集中在SPME和SDE,这两种方法借助GC-MS技术检测捕获到的风味物质。近几年电子鼻的使用也较广泛,但是电子鼻只能区分样品间风味差异性,无法对风味物质进行定性定量分析,电子鼻只是检测风味物质的辅助手段。尽管发酵豆制品起源于中国,但与国外相比(如日本、越南、

马来西亚、韩国等),风味物质的研究还存在较大差距,对发酵豆制品风味的捕获研究还有待提高<sup>[22-23]</sup>。

3 传统发酵豆制品风味物质鉴定

发酵豆制品的风味形成系统庞大而复杂,香气成分较多,不同的发酵豆制品(酱油、腐乳、豆豉、豆

酱、纳豆)分别有着独特的呈味物质。捕集风味的方法和分析技术略有不同,会造成最后鉴定出的风味物质的数量和种类存在差别。

### 3.1 酱油的风味物质

酱油因其浓郁的香味与独特的滋味被认为是美味与香气的宝库<sup>[24]</sup>,它起源于中国,具有悠久的历史,由于其独一无二的风味,现已成为应用最广泛的亚洲调味品。酱油中的风味元素含量虽然微小,但成分极为复杂<sup>[25]</sup>。目前,从酱油中已检出醇类、酯类、酸类、醛类、酚类、呋喃类和吡嗪类等近300种风味物质。酱油发酵过程中酵母菌和还原糖发生化学反应生成醇类、酸类、醛类、酚类与酯类,此反应在发酵过程中一直存在。蛋白水解生成的有机酸中含有乙酸和乳酸,乳酸利用葡萄糖与五碳糖进行发酵继续生成乳酸与乙酸;同时醇类与酸类相互反应生成酯类,不仅可以缓冲酱油中的咸味,同时还可以使原有的风味更加醇厚。

研究学者对酱油的香味物质捕获与鉴定大多选用 SPME-GC-MS 方法,但不同研究结果间存在差异。Yan 等<sup>[26]</sup>认为醇类、羧酸类、酯类和酚类是酱油中主要挥发性化合物,此外,还发现了一些羰基化合物和杂环化合物;Zhang 等<sup>[16]</sup>认为除此之外,酮类物质也是主要挥发性化合物,与其它酱油(日本酱油和韩国酱油)相比,主要风味成分4-羟基-2-乙基-5-甲基-3-呋喃酮(HEMF)和4-乙基愈创木酚不在这些固态发酵酱油中;Gao 等<sup>[17]</sup>认为在酱油发酵过程中酸、醇、醛、酮、酯和呋喃含量增多,其含量与酱油的颜色形成强度有关,而含硫化物会产生不良气味,因此两者对酱油风味物质的形成和含量有显著影响。以上研究结果可以看出,虽然酱油中风味物质捕获和鉴定的方法相同,但所得风味的数量和种类因研究方法而异,此外,尽管以上论述中酱油的主要风味物质差别较小,但对风味有显著作用的 HEMF、4-乙基愈创木酚、2,3-丁二醇仍没有被研究者全部得到分离鉴定。

### 3.2 腐乳的风味物质

腐乳在我国已有1 000多年的历史,有“东方奶酪”之美誉<sup>[27]</sup>。近年来,腐乳因其特有的风味和保健功能越来越受到西方消费者的关注和喜爱,也吸引了更多科研工作者的目光<sup>[28]</sup>。

SDE-GC-MS 常用于捕获与鉴定腐乳中的风味化合物。Chung<sup>[13]</sup>认为腐乳中主要挥发性物质是酯类和醇类;之后利用嗅闻技术(FID-O)分析了红腐乳的风味物质,其中3-甲基丙酸乙酯、丁酸乙酯、2-

-甲基丁酸乙酯等是红腐乳关键香气的重要成分,进一步得出腐乳中的风味物质大多为酯类<sup>[29]</sup>。Huang 与 Yan 等<sup>[14-15]</sup>分别对红腐乳中风味化合物进行鉴定,得到的结果类似,含量最多的为酯类、其次为醛类、醇类,关键风味成分为亚油酸乙酯、十六酸乙酯、苯乙醛、异戊醛、2,6-二甲基吡嗪、甲基吡嗪。Ma 等<sup>[30]</sup>采用动态顶空进样技术(DHS)结合 GC-MS 捕获青方腐乳的风味化合物,鉴定出70余种挥发性风味物质,用内标定量法得出酸类、酯类、酚类、醇类和含氮化合物的含量相对较高。

### 3.3 豆豉的风味物质

豆豉作为中国传统的调味品,其质地绵软、滋味鲜美、风味独特,在人们的饮食中起到非常重要的作用。根据豆豉加工时所选用的发酵剂种类不同,分为细菌型豆豉和霉菌型豆豉两大类。细菌型豆豉大多是利用纳豆枯草杆菌(*Bacillus subtilis* Natto)等在较高温度下繁殖于蒸熟的大豆上,借助其蛋白酶生产出风味独特的食品<sup>[31]</sup>;而霉菌型豆豉大多是采用自然开放制曲,在室温下进行生产。

豆豉后酵过程中利用毛霉、曲霉中多种蛋白酶的作用将蛋白质水解为氨基酸、有机酸和小分子肽,丰富了豆豉中风味物质;发酵阶段乳酸菌、酵母菌不断增加,风味物质中醇类和酸类增加,因此酯类也随着增多。豆豉中鲜味成分主要是游离氨基酸,尤其是游离谷氨酸;挥发性风味成分主要是呋喃类及芳香族的醛、醇类化合物<sup>[32]</sup>。

汪立君<sup>[33]</sup>采用 SDE 结合 GC-MS 检测曲霉型豆豉中挥发性物质成分,与其它发酵豆制品相比,吡嗪类和酚类对曲霉型豆豉风味有突出贡献。林晓华<sup>[34]</sup>、苏伟等<sup>[35]</sup>分别对江西曲霉型豆豉、传统自然发酵豆豉和纯种米曲霉发酵豆豉进行比较,经过 GC-MS 分析,两人一致认为纯种米曲霉发酵豆豉中的烃类、醛类和酸类含量最高,醇类、酚类、含硫化物多存在于传统豆豉中,而两者中的酮类和酯类要明显低于江西曲霉型豆豉。李慧<sup>[36]</sup>认为酯类、醇类、酸类、吡嗪类是细菌型豆豉中主要挥发性风味物质。豆豉风味研究中,酯类与吡嗪类含量相对较高。根据制曲时所选用的霉菌不同,风味种类和数量也会有所不同,这说明影响豆豉风味的原因除检测方法外,主要原因则是选取霉菌的种类<sup>[37-38]</sup>。

### 3.4 豆酱的风味物质

豆酱也称大酱,其色泽鲜艳、风味诱人,是亚洲地区独具特色的调味品<sup>[39]</sup>,目前已知的风味化和物达200余种。豆酱在加工与后熟过程中,酵母和乳

酸菌对风味物质的形成至关重要,蛋白质代谢生成组氨酸、酪氨酸、精氨酸,继而被乳酸菌继续分解产生醇类物质;豆酱后熟过程中蛋白质水解的氨基与还原糖的羰基发生羰氨反应,赋予产品独特的颜色及风味;酵母通过磷酸戊糖途径生成 HEMF 等呋喃酮类化合物;随着酵母菌的不断作用,乳酸增加 pH 下降,此时耐酸酵母开始生长,产生乙醇发酵并生成酯类物质,同时有机酸和醇通过非酶催化的反应也会生成酯,有利于香气形成。发酵后期,醇、酚氧化生成醛类物质,虽然含量较少,但作用十分明显;豆酱内还含有一定量的脂类,经水解后生成脂肪酸和甘油,其中不饱和脂肪酸游离出来后会生成乙酯;而含硫化合物是豆酱中不良气味的主导体。

Park 等<sup>[40]</sup>采用传统黄豆饼、清酒曲、纳豆黄豆饼和混合曲制作 4 种类型的大豆酱(大酱),后熟 90 d 用 GC-MS 分析风味物质成分,其中酯类、酮类含量最高,3-羟乙基-1-丙烯、双氢-2-甲基-3-呋喃酮、丙酮醇、乙酮和异辛酸 2-乙酰基乙基己酸是试验中新发现的五种挥发性风味物质;Zhao 等<sup>[41]</sup>得到与其相似的结果,他们采用 HS-SPME 与 GC-MS 得出中国传统大豆酱中酯类、呋喃酮类、酸类风味化合物含量最高。

### 3.5 纳豆的风味物质

大豆经过纳豆芽孢杆菌发酵作用后制成具有保健作用的纳豆,已有 400 年历史。纳豆具有良好的保健功能,同时还有独特的风味和粘性<sup>[42]</sup>。纳豆中富含特殊的纳豆菌,同时蛋白酶和淀粉酶的水解作用使纳豆具有特殊的风味物质。纳豆中蛋白质水解使谷氨酸含量增加,纳豆鲜味加重,蛋氨酸和赖氨酸的水解使得丁酸、丙酸和丁二酸等酸类的含量较高。脂肪水解过程中,产生的酸类与醇类物质反应生成酯类,增加了纳豆中的香气。目前关于纳豆风味的研究较少,有学者认为吡嗪类化合物是纳豆中关键风味物质<sup>[43]</sup>。

Tanaka 等<sup>[44]</sup>通过 GC-MS 分析两种东南亚纳豆 Chungkuk-jang(CKJ)和 Itohiki-natto(natto)的挥发性化合物,发现 CKJ 含有大量的乙醇,关键香气物质是二烯丙基二硫短链脂肪酸、二硫化二烯丙基、2,5-二甲基吡嗪及 2-甲基丁酸,而丙酮和异丁酸甲酯是 natto 的主要成分。Huang 等<sup>[45]</sup>采用 SPME-GC-MS 鉴定出 55 种化学成分,利用峰面积归一化法计算各成分的相对百分含量,其中吡嗪类物质最多,酯类次之。Liu 等<sup>[46]</sup>采用 4 种捕获方法 SAFE(溶剂辅助风味蒸发)、SDE、SPME 和 DHS(动态顶

空进样技术)结合 GC-MS 分析纳豆挥发性成分,SAFE 和 SDE 法对酯类、醚类有较好的捕获效果,而 SPME 和 DHS 法捕获酮类、酸类和吡嗪类效果较好,其中酮类、芳香烃类化合物较多。纳豆中关键香气成分包括 2,3-丁二酮、甲基异戊、3-羟基-2-丁酮、2-壬酮、糠醛、乙酸、异丁酸、乙酸乙酯等物质。

从上述几种传统发酵豆制品的风味研究可知,其风味机理形成大致相似。发酵豆制品生产时均是以大豆为原料,后期通过加入多种霉菌或细菌进行发酵,在后熟过程中菌类、酶类与原料中的蛋白质、脂肪、糖发生复杂的化学与生物反应。发酵豆制品风味物质形成的关键途径还包括美拉德反应,即羰氨反应,羰基大部分来自于还原糖,而氨基大部分来自于蛋白质及氨基酸,反应过程中会生成无数个挥发性的中间体分子,包括酮类、醛类及杂环化合物,同时还会生成类黑精等其它非挥发性化合物,赋予发酵豆制品独特的颜色和风味<sup>[47-48]</sup>。

## 4 结论与展望

我国发酵豆制品已有上千年历史,但对于风味形成的机理和调控研究层次还比较浅显。随着风味检测手段的不断更新与进步,科技工作者们对中国传统发酵豆制品的风味已有较深入的研究,许多未知物逐渐被发现,对发酵豆制品中主要风味、关键成味物质也越来越了解,但对于风味形成途径的研究还比较匮乏。以后的相关研究中其突破就在于进一步揭示豆制品的风味物质形成机理,寻找到提高工业化豆制品风味品质的方法,创造出更加吸引消费者的新型豆制品。本文有关酱油、腐乳、豆豉、豆酱及纳豆的风味物质研究现状的论述能够为发酵豆制品风味物质的深入研究和相关更优风味的发酵豆制品的研发提供强有力的理论支撑。

## 参考文献

- [1] 路秀玲,欧宏宇. 中外传统发酵食品的比较[J]. 中国食物与营养, 2000(2):19-20. (Lu X L, Ou H Y. Research progress of analysis technique for flavor substances in food[J]. Food and Nutrition in China, 2000(2):19-20.)
- [2] Zellner B D, Dugo P, Dugo G, et al. Gas chromatography-olfactometry in food flavour analysis [J]. Journal of Chromatography A, 2008, 1186(1):123-143.
- [3] Shukla S, Choi T B, Park H K, et al. Determination of non-volatile and volatile organic acids in Korean traditional fermented soybean paste (Doenjang) [J]. Food & Chemical Toxicology, 2010, 48(8):2005-2010.
- [4] Jeleń H, Majcher M, Ginja A, et al. Determination of compounds

- responsible for tempeh aroma [J]. Food Chemistry, 2013, 141 (1):459-65.
- [5] Korhonen H. Technology options for new nutritional concepts [J]. International Journal of Dairy Technology, 2002, 55 (2): 79 - 88.
- [6] Hartmann R, Meisel H. Food-derived peptides with biological activity: From research to food applications [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2007, 18(2):163-169.
- [7] Meinschmidt P, Schweiggert-Weisz U, Eisner P. Soy protein hydrolysates fermentation: Effect of debittering and degradation of major soy allergens [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71:202-212.
- [8] Meinschmidt P, Ueberham E, Lehmann J, et al. Immunoreactivity, sensory and physicochemical properties of fermented soy protein isolate [J]. Food Chemistry, 2016, 205:229-238.
- [9] Dajanta K, Apichartsrangkoon A, Chuksatiro E, et al. Free-amino acid profiles of thua nao, a Thai fermented soybean [J]. Food Chemistry, 2011, 125(2):342-347.
- [10] Lourdes S L, Adrián H M, Belina V C, et al. Food-derived immunomodulatory peptides [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 96(11):3631.
- [11] 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, 28(12):135-138. (Zhu Z X, Wu H Q, Huang X L. Analysis of aroma components in soy sauce by GC/MS [J]. Food Research and Development, 2007, 28(12):135-138.)
- [12] 彭帮柱, 岳田利, 袁亚宏. 固相微萃取技术及其在酒类风味成分分析上的应用[J]. 食品科学, 2006, 27(8):266-270. (Peng B Z, Yue T L, Yuan Y H. Application review of solid-phase microextraction technique for aroma analysis in alcoholic beverage[J]. Food Science, 2006, 27(8):266-270.)
- [13] Chung H Y. Volatile components in fermented soybean (*Glycine max*) curds [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1999, 47(7):2690-2696.
- [14] Huang M Q, Sun B G, Chen H T, et al. Study on volatile components in red fermented soybean (*Glycine max*) curds from Beijing [J]. Science & Technology of Food Industry, 2010, 31(7):150-151.
- [15] Yan P P, Jie-Rong Y I. Analysis of volatile flavor components in red fermented soybean curds [J]. Food Science, 2012, 33(2): 211-215.
- [16] Zhang Y F, Tao W Y. Flavor and taste compounds analysis in Chinese solid fermented soy sauce [J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(4):673-681.
- [17] Gao X L, Cui C, Zhao H F, et al. Changes in volatile aroma compounds of traditional Chinese-type soy sauce during moromi fermentation and heat treatment [J]. Food Science & Biotechnology, 2010, 19(4):889-898.
- [18] Porter, Kenneth E. Review: Developments in distillation and separation technology [J]. AIChE Journal. 2001, 47(5):1060-1066.
- [19] Zhang Y F, Tao W Y. Flavor and taste compounds analysis in Chinese solid fermented soy sauce [J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(4):673-681.
- [20] Sano A, Satoh T, Oguma T, et al. Determination of levulinic acid in soy sauce by liquid chromatography with mass spectrometric detection [J]. Food Chemistry, 2007, 105(3):1242-1247.
- [21] 王芙蓉, 张晓鸣, 佟建明, 等. 食品风味分析技术研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2008, 29(3):170-172. (Wang F R, Zhang X M, Tong J M, et al. Research progress of analysis technique for flavor substances in food [J]. Food Research & Development, 2008, 29(3):170-172.)
- [22] Singh R J, Hymowitz T. Soybean genetic resources and crop improvement [J]. Genome, 1999, 42(4):605-616.
- [23] Shin D, Jeong D. Korean traditional fermented soybean products: Jang [J]. Journal of Ethnic Foods, 2015, 2(1):2-7.
- [24] 王夫杰, 鲁绯, 赵俊平, 等. 酱油风味及其检测方法的研究进展 [J]. 中国酿造, 2010, 29(8):1-5. (Wang F J, Lu F, Zhao J P, et al. Research progress of flavor compounds in soy sauce and detection methods [J]. China Brewing, 2010, 29(8):1-5.)
- [25] 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, 28(12):135-138. (Zhu Z X, Wu H Q, Huang X L. Analysis of aroma components in soy sauce by GC/MS [J]. Food Research and Development, 2007, 28(12):135-138.)
- [26] Yan L, Zhang Y, Tao W, et al. Rapid determination of volatile flavor compounds in soy sauce using head space solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2008, 26(3):285-291.
- [27] Han B Z, Rombouts F M, Nout M J R. Amino acid profiles of sufu, a Chinese fermented soybean food [J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2004, 17(6):689-698.
- [28] 李理, 罗立新, 梁世中. 腐乳的研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(10):70-74. (Li L, Luo L X, Liang S Z. Research progress of Sufu [J]. Food and Fermentation Industries, 2002, 28(10):70-74.)
- [29] Chung H Y. Volatile flavor components in red fermented soybean (*Glycine max*) curds [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2000, 48(5):1803-1809.
- [30] Ma Y L, Liu Y Q, Xia Y N, et al. Key volatile flavor compounds of grey sufu, a Chinese traditional fermented soybean food product [J]. Modern Food Science & Technology, 2015, 31(5): 316-321.
- [31] 索化夷, 赵欣, 蹇宇, 等. 永川毛霉型豆豉在发酵过程中微生物总量与区系变化规律 [J]. 食品科学, 2015, 36(19):124-131. (Suo H Y, Zhao X, Qian Y, et al. Changes of microbial biomass and flora of Yongchuan *Mucor*-type fermented soybean during fermentation [J]. Food Science, 2015, 36(19):124-131.)
- [32] 蔡位辉. 豆豉生产新工艺的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 1997. (Cai W H. Study on the new process of fermented soya bean [D]. Wuxi: Jiangnan University, 1997.)
- [33] 汪立君. 曲霉型豆豉发酵特性及风味物质研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2006:44-73. (Wang L J. Study on fermentation characteristics and flavor substances of *Aspergillus* type douchi [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006:44-73.)
- [34] 林晓华. 曲霉型豆豉的发酵条件及挥发性成分的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2013:44-58. (Lin X H. Study on the fermentation conditions and volatile components of *Aspergillus* douchi [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013:44-58.)

- [35] 苏伟, 叶艳, 王倩, 等. 传统发酵与接种发酵豆豉风味物质的比较研究[J]. 食品科学, 2016, 8: 421-431. (Su W, Ye Y, Wang Q, et al. Comparison of aroma compounds in traditional fermented and inoculated Douchies, A Chinese traditional fermented soybean food[J]. Food Science, 2016, 8: 421-431. )
- [36] 李慧. 混菌型豆豉发酵及风味物质的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2009. (Li H. Study on fermented and flavor substance in Multi-Strain Douchi[D]. Dalian: Dalian University of Industry, 2009. )
- [37] 杨军, 陈九武, 彭仲雄, 等. 曲霉豆豉生产工艺的研究[J]. 中国调味品, 1998(4): 17-18. (Yang J, Chen J W, Peng Z X, et al. Study on the production process of *Aspergillus* lobster sauce [J]. China Condiment, 1998(4): 17-18. )
- [38] 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 L, Tao X L, Ouyang J, et al. Dynamic changes in volatile components in *Aspergillus*-Type douchi during post-fermentation [J]. Food Science, 2012, 33(22): 274-277. )
- [39] Nunomura N, Sasaki M, Yokotsuka T. Shoyu (soy sauce) flavor components: Neutral fraction [J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 1984, 48(7): 1753-1762.
- [40] Park J S, Lee M Y, Kim K S, et al. Volatile flavor components of soybean paste (doenjang) prepared from different types of strains [J]. Journal of Classroom Interaction, 1994, 49: 26-32.
- [41] 赵建新, 顾小红, 刘岷岷, 等. 传统豆豉挥发性风味化合物的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 684-687. (Zhao J X, Gu X H, Liu Y M, et al. Study on the volatile flavor compounds of the traditional Chinese soybean paste [J]. Food Science, 2006, 27(12): 684-687. )
- [42] 高瑞萍, 刘辉, 刘嘉, 等. 纳豆的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2011, 47(1): 23-26. (Gao D P, Liu H, Liu J, et al. Advances in the research of natto [J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2011, 47(1): 23-26. )
- [43] Sugawara E, Ito T, Odagiri S, et al. Comparison of compositions of odor components of natto and cooked soybeans [J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 1985, 49(2): 311-317.
- [44] Tanaka T, Muramatsu K, Kim H R, et al. Comparison of volatile compounds from Chungkuk-Jang and Itohiki-Natto [J]. Bioscience Biotechnology & Biochemistry, 1998, 62(7): 1440-1444.
- [45] Huang X, Liao L Y, Fan L, et al. Analysis of volatile components from natto by solid-phase microextraction [J]. Science & Technology of Food Industry, 2012, 33(10): 58-61.
- [46] Liu Y, Su H, Song H L. Comparison of four extraction methods, SPME, DHS, SAFE, Versus SDE, for the analysis of flavor compounds in natto [J]. Food Analytical Methods, 2017: 1-12.
- [47] 张晓鸣. 食品风味化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009. (Zhang X M. Food flavor chemistry [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009. )
- [48] 夏延斌. 食品风味化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 120-150. (Xia Y B. Food flavor chemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. )

## (上接第 960 页)

- [14] 刘志刚, 范亚苇, 贾才华, 等. 利用豆渣双菌混合发酵生产酱油[J]. 食品与发酵工业, 2010(4): 111-115. (Liu Z G, Fan Y W, Jia C H, et al. Production of soy sauce by mixed fermentation of bean dregs [J]. Food and Fermentation Industries, 2010(4): 111-115. )
- [15] 张长贵, 董加宝, 何绍洋, 等. 影响豆渣酱油曲品质的因素及其优化[J]. 中国调味品, 2015(8): 10-14. (Zhang C G, Dong J B, He S Y, et al. Factors affecting the quality of soybean sauce and its optimization [J]. Chinese Condiment, 2015(8): 10-14. )
- [16] 严碧云, 朱云蔚, 郑清. 豆渣制酱油曲工艺条件的优化[J]. 科学技术创新, 2016(32): 79-80. (Yan B Y, Zhu Y W, Zheng Q. Optimization of process conditions for soybean sauce [J]. Science and Technology Innovation, 2016(32): 79-80. )
- [17] Montgomery D C. Design and analysis of experiments [J]. Technometrics, 1991, 48(1): 158.
- [18] 李珍, 哈益明, 李安, 等. 响应面优化苹果皮渣多酚超声提取工艺研究[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4569-4577. (Li Z, Ha Y M, Li A, et al. Response surface slag apple polyphenol ultrasound studies process [J]. Extraction China Agricultural Science, 2013, 46(21): 4569-4577. )
- [19] 赵莉娟, 胥江河, 王星敏, 等. 紫苏梗酶解糖化条件优化[J]. 南方农业学报, 2017, 48(6): 1054-1061. (Zhao L J, Xu J H, Wang X M, et al. Such as basil stems enzymatic saccharification optimization [J]. Southern Agricultural Sciences, 2017, 48(6): 1054-1061. )
- [20] 康永锋, 薛永刚, 韩巧英, 等. 响应面优化黑豆总黄酮微波辅助提取工艺及其抗氧化性能评价[J]. 大豆科学, 2017(6): 958-964. (Kang Y F, Xue Y G, Han Q Y, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of total flavonoids from black bean by response surface and its antioxidant performance [J]. Soybean Science, 2017(6): 958-964. )
- [21] 张泽志, 韩春亮, 李成未. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 2011, 20(4): 34-37. (Zhang Z Z, Han C L, Li C W. Application of response surface method in experimental design and optimization [J]. Journal of Henan Institute of Education (Natural Science Edition), 2011, 20(4): 34-37. )
- [22] 费荣昌. 试验设计与数据处理[M]. 4版. 无锡: 江南大学出版社, 2001. (Fei R C. Experimental design and data processing [M]. 4 edition. Wuxi: Jiangnan University Press, 2001. )
- [23] 王宪斌, 冯霞, 刘义, 等. 多菌种制曲在酱油发酵中的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2016, 52(3): 60-64. (Wang X B, Feng X, Liu Y, et al. Research progress of multi-strain variety in soy sauce fermentation [J]. Food and Fermentation Technology, 2016, 52(3): 60-64. )
- [24] Gengec E, Ozdemir U, Ozbay B, et al. Optimizing dye adsorption onto a waste-derived (modified charcoal ash) adsorbent using box-behnken and central composite design procedures [J]. Water Air & Soil Pollution, 2013, 224(10): 1-12.
- [25] Mason R L, Gunst R F, Hess J L. Statistical design and analysis of experiments: With applications to engineering and science [M]. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Ltd. 2003.