

馒头挥发性风味物质研究进展

付元哲, 黄雅玲, 冯涛, 孙敏, 姚凌云, 王化田, 宋诗清*
(上海应用技术大学香料香精技术与工程学院, 上海 201418)

摘要: 馒头是中国传统主食之一, 具有1 700多年的历史。随着人们生活质量的不断提高, 馒头种类更加丰富, 风味需求也变得越来越重要。愉悦的风味成为人们消费的主要驱动力, 这对工业化酵母馒头的风味提出了更高的要求。影响馒头风味形成的因素有很多, 包括发酵剂种类、原料以及加工工艺等。其中不同发酵剂因所含微生物的种类及数量不同, 对馒头风味形成有显著的影响。本文针对现阶段影响馒头风味的主要因素进行综述, 为馒头风味的理论研究提供一定的参考, 为开发适应工业化生产且风味更佳的馒头提供实践指导。

关键词: 馒头; 风味; 发酵剂; 微生物菌群; 发酵原料; 发酵工艺

Research Progress on Volatile Flavor Substances in Steamed Bread

FU Yuanzhe, HUANG Yaling, FENG Tao, SUN Min, YAO Lingyun, WANG Huatian, SONG Shiqing*
(School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Steamed bread is one of the traditional Chinese staple foods, with a history of over 1 700 years. With the continuous improvement of people's quality of life, a more abundant variety of steamed bread has been made, and the demand for flavor has become more and more important. Consumers are attracted by steamed bread with pleasant flavor, so there are higher requirements for industrial yeast fermented steamed bread. There are many factors that influence the flavor formation of steamed bread, including the type of leavening agent, raw materials and processing technology. Different starters significantly affect the flavor formation of steamed bread due to the different types and numbers of microorganisms they contain. The major factors affecting the flavor of steamed bread are reviewed to provide a reference for theoretical studies of steamed bread flavor and provide practical guidance for the development of steamed bread with better flavor suitable for industrial production.

Keywords: steamed bread; flavor; fermentation starter; microbial flora; raw materials of fermented foods; fermentation process

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230630-246

中图分类号: TS213.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 08-0312-09

引文格式:

付元哲, 黄雅玲, 冯涛, 等. 馒头挥发性风味物质研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 312-320. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230630-246. <http://www.spkx.net.cn>

FU Yuanzhe, HUANG Yaling, FENG Tao, et al. Research progress on volatile flavor substances in steamed bread[J]. Food Science, 2024, 45(8): 312-320. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230630-246. <http://www.spkx.net.cn>

馒头是以小麦面粉为原料, 加入发酵剂和水及其他辅料, 经过和面、成型、发酵、蒸制过程制作而成^[1]。其制作方便、营养丰富。作为中国人不可或缺的主食, 距今已有1 700多年的历史^[2]。随着人们生活水平的提高,

主食种类日益丰富, 对作为主食之一的馒头提出了更高的风味需求。

如今人们餐桌上的馒头主要采用酵母粉制作而成, 因为其发酵时间短, 工艺简单所以使用广泛; 还有一些

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 上海市地方能力建设项目 (23010504700)

第一作者简介: 付元哲 (1999—) (ORCID: 0000-0002-6076-2723), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品风味化学。

E-mail: 1152680986@qq.com

*通信作者简介: 宋诗清 (1982—) (ORCID: 0000-0003-3253-1941), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品风味化学。

E-mail: ssqing@sit.edu.cn

家庭则采用传统酵母制作馒头，因为其风味更佳。传统发酵剂主要有老面、酒曲、酵子等^[3]。传统发酵剂制作的馒头和商业酵母制作的馒头在风味上有很大的差异，传统发酵剂不仅改善了馒头的质地、风味和营养特性，而且通过抑制有害微生物生长，延缓了馒头变质的过程，延长了馒头的保质期^[4]。微生物种类的差异性造成代谢物质的多样性从而形成了不同地区传统发酵馒头的独特风味^[5]。传统上认为酸面团中酵母的多样性与酵母的代谢特性和功能有关^[6]，根据酵母多样性分析，酵母代谢有助于增强馒头发酵过程中风味物质的形成^[7]。随着国内外研究的深入，很多学者开始研究新型馒头：一是从发酵剂着手，采用菌种复配体系作为馒头的发酵剂，从而改善其风味；另一种则是从原料出发，研究不同原料对馒头风味以及馒头品质的影响。经国内外研究表明，发酵剂种类、原料以及制作工艺对馒头风味影响具有重要作用^[1]。本文对现阶段影响馒头风味形成的主要因素进行综述，为馒头风味研究提供参考。

1 不同发酵剂对馒头风味形成的影响

1.1 单一酵母发酵剂

酿酒酵母作为工业单一酵母发酵剂中的主要酵母菌种，其发酵能力强，主要通过糖的乙醇发酵产生二氧化碳，从而增加馒头体积，在发酵过程中起着关键的作用^[8]。单一酵母馒头制作过程简单，因此大多用于商业生产^[9]。馒头可以通过酿酒酵母的纯培养物进行发酵。Zhang Guohua等^[10]通过研究酿酒酵母对馒头面团发酵过程中挥发性物质及代谢产物的影响，发现了一种独特的香气特征，包括一些先前报道的芳香化合物和一些从未报道的芳香醛（*E*-2-癸烯醛和2-十一烯醛）和酮（2-庚酮和2-壬烷酮）。这些芳香化合物可能来源于小麦面粉本身，可能由面粉的天然酶和微生物菌群所产生^[11]。

商业酵母有鲜酵母、半干酵母、干酵母等种类。不同种类的酵母发酵所产生的风味物质有所不同，风味物质的种类和含量又与馒头整体的感官接受性密切相关^[9]。刘丹蕾等^[12]对不同种类安琪市售商业酵母（BG半干酵母、TC干酵母、JG干酵母、PG鲜酵母以及X鲜酵母）馒头挥发性风味化合物分析发现，共有14种挥发性物质的香气活性值（odor active value, OAV）大于1，对馒头整体的香气特征具有较大贡献。其中异丁醇只在PG鲜酵母所制馒头中检出，具有果香的香叶基丙酮只在TC干酵母所制馒头中发现^[13]。不同类型的发酵剂所制馒头的挥发性香气化合物的相对含量及种类之间具有一定的差异，这种差异会影响馒头整体所表现出的香气特征。Huang Yaling等^[2]对同一菌种不同加工类型酵母发酵剂（安琪干酵母CF1303、速溶干酵母CF1318以及酵母CL10138）馒头的风味物质差异进行系统研究，利用不同风味属性对酵母感官进行描述。研究发现CF1303馒头具有强烈的甜味和甜味回味属性，CF1318馒头具有奶香、小麦香、酵母味属性，而CL10138馒头呈现出明显的酸味、酒味和面粉味属性。CF1303馒头、CF1318馒头和CL10138馒头所特有的关键香气物质分别为愈创木酚、 β -月桂烯、肉桂酸甲酯和壬醛，2-甲基丁酸。这些关键的香气化合物的差异是不同馒头整体风味呈现差异的重要原因之一。

头具有强烈的甜味和甜味回味属性，CF1318馒头具有奶香、小麦香、酵母味属性，而CL10138馒头呈现出明显的酸味、酒味和面粉味属性。CF1303馒头、CF1318馒头和CL10138馒头所特有的关键香气物质分别为愈创木酚、 β -月桂烯、肉桂酸甲酯和壬醛，2-甲基丁酸。这些关键的香气化合物的差异是不同馒头整体风味呈现差异的重要原因之一。

1.2 传统混菌发酵剂

我国的传统发酵剂一般采用小麦粉、玉米粉或麸皮等原料经长时间发酵，揉搓成型后汽蒸、晒干而成^[14]。传统发酵剂发酵过程为混菌发酵^[15]，包含了很多菌种，其或多或少对馒头风味的形成有一定的作用。其中酵母菌、乳酸菌和醋酸菌等微生物对馒头风味的形成起着关键性作用^[16]。酸面团中的微生物菌群复杂多样，可以看作是一个较为完整的微生物体系。酵母菌可以通过Ehrlich途径将部分氨基酸转氨、脱羧，最终形成芳香族杂醇油和杂醇酸，从而产生香气^[17]。而乳酸菌通过其代谢及酶系生物转化，产生醛类、醇类、酯类、酮类等香气物质^[18-19]。醋酸菌菌株主要以醋酸为代谢产物，在发酵过程中会产生一些有机酸，例如延胡索酸、苹果酸、乳酸等，能够赋予馒头绵、酸、香等风味特征^[3]。由此可见，微生物在馒头挥发性化合物的形成过程中发挥着重要作用。随着学者对传统发酵剂微生物菌群与多样性研究的逐渐深入，更多人认为微生物的多样性是影响发酵面团最终风味的关键因素^[20]。如图1所示，不同的发酵剂在发酵过程中起作用的主要微生物之间存在一定的相似性，但并非完全相同。微生物种类的多样性造成了代谢产物的多样性，进而形成了不同地区传统发酵剂馒头的独特风味^[5]。老面、酵子与酒曲作为传统混菌发酵剂具有很多相似之处，关于它们的叫法很多地方也不统一，有的地区会将老面与酵子当作同一类发酵剂，关于这两种发酵剂的界定较为模糊，其本质差异可能是发酵源与制作材料的差别。本文参考马先红等^[3]的报道将老面与酵子分开阐述。

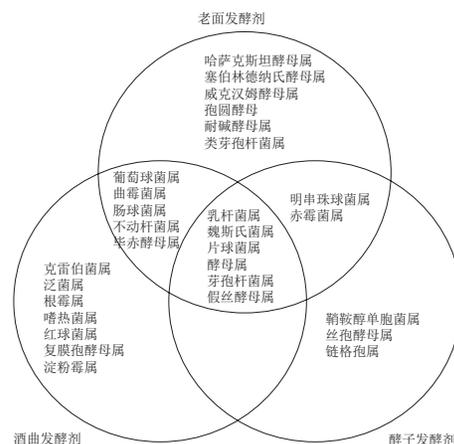


图1 3种传统混菌发酵剂主要微生物菌群对比Venn图

Fig. 1 Venn diagram of major microbial floras of three traditional mixed starter cultures

1.2.1 老面

老面馒头主要依靠野生酵母及其他菌种混合发酵制作。将每次发酵完成后的面团留下作为下次发酵菌种来源,即为老面^[3]。老面馒头是以老面作为发酵剂,经馒头发酵工艺蒸制而成。与酵母馒头相比,其含有的酵母菌的数量和活力相对较低,因此发酵力低下,面团发酵的时间相对较长。在众多微生物的发酵之下,产生了大量的挥发性香气化合物,形成了其特有的风味。老面发酵能够提高馒头风味物质种类和含量,有机酸的产生及其酯化反应是其风味丰富的重要原因之一^[4]。

馒头风味物质组成主要取决于面团发酵中微生物的转化及酶促反应^[21]。老面面团中的微生物优势菌种为乳酸菌和酵母菌,其比值为100:1,在面团中的菌落总数分别为 $10^7\sim 10^9$ CFU/g和 $10^5\sim 10^7$ CFU/g^[4,22]。酵母菌与乳酸菌的复杂微生物菌群使其发酵的产品具有特殊的风味。前人研究发现,菌种组成的差异可能与地理位置不同有关^[23]。表1对国内外文献中不同地区的老面酸面团的主要优势菌群所包含的主要菌种进行了总结。其中酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)是老面馒头发酵面团中必不可少的菌种^[23-24]。

邢小龙^[23]阐明了河南3种地形条件(山区、平原和盆地)下酸面团的细菌多样性,首次报道了氧化葡萄糖杆菌(*Gluconobacter oxydans*)的存在。并报道了不同地区优势菌群之间的差异,戊糖片球菌(*Pediococcus pentosaceus*)为盆地样本中的优势菌种,戊糖片球菌(*P. pentosaceus*)、面包乳杆菌(*Lactobacillus crustorum*)、植物乳杆菌(*L. plantarum*)、多黏类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)为平原样品主要优势菌种;戊糖片球菌(*P. pentosaceus*)为山区主要优势菌种。通过对挥发性物质分析发现,具有水果香气的酯类及醛类物质对馒头整体香气特征的形成不可或缺^[25]。闫博文^[26]通过构建老面馒头微生物菌种与老面馒头中挥发性香气物质组成之间的相互关系发现,旧金山乳杆菌和发酵乳杆菌作为山东老面中的主要乳酸菌菌种,其与乙酸、戊醛、己醛、壬醛、2-戊基呋喃、壬醇和1-辛烯-3-醇等化合物具有较高的正相关系数;酿酒酵母则与己醛有较高的正相关系数。可见己醛与酿酒酵母的代谢有着重要关系。张楚楚^[27]对不同老面馒头与酵母馒头挥发性成分及其图谱进行对比分析发现,老面馒头共有57种化合物,主要特征香气化合物与酵母馒头差异较大。且不同种类老面馒头挥发性物质图谱组内差异较大。相反,酵母馒头的组内差异较小。综上所述,发酵过程中不同的微生物与挥发性香气化合物的产生具有一定的联系,阈值较低的化合物如醛类化合物往往具有较高的OAV,对老面馒头的整体香气特征具有较高的贡献。

微生物多样性的研究大多采用高通量测序完成。

Suo Biao等^[7]采用宏基因组基因扩增测序技术,分析了以新乡和菏泽两种中国传统老面发酵剂制备的发酵面团中微生物的多样性并对挥发性物质进行测定。结果表明,两种发酵面团中微生物均以酵母菌、乳杆菌和片球菌属为主。与用商业酵母制备的样品相比,用传统老面发酵剂制备的样品中发现了更多的挥发性物质。在新乡和菏泽的样品中,2-苯乙醇含量均显著高于商业酵母样品。2-苯乙醇是一种芳香化学物质,具有水果香味或玫瑰香味^[16],普遍存在于发酵食品中,在馒头的鲜香和甜味中起作用;另一种常见的成分,1-辛烯-3-醇,具有浓郁的蘑菇味和香草的香气^[28]。这些结果表明,老面发酵剂中不同于商业酵母的微生物对馒头特有风味物质的形成具有一定的影响,使得老面发酵馒头挥发性物质种类或含量高于商业酵母发酵馒头。

表1 不同地区老面酸面团中主要酵母菌与乳酸菌组成
Table 1 Compositions of major yeasts and lactic acid bacteria in sourdough from different regions

酵母菌	乳酸菌
酿酒酵母 (<i>S. cerevisiae</i>)、 扣囊复膜孢酵母 (<i>Saccharomycopsis fibuligera</i>)、 戴尔有孢圆酵母 (<i>Torulaspota delbrueckii</i>)、 异常威克汉姆酵母 (<i>Wickerhamomyces anomalous</i>)、 热带假丝酵母 (<i>Candida tropicalis</i>)、 威克汉姆酵母 (<i>W. anomalous</i>)、 光滑假丝酵母 (<i>C. glabrata</i>)	旧金山乳杆菌 (<i>L. sanfranciscensis</i>)、 面包乳杆菌 (<i>L. crustorum</i>)、 植物乳杆菌 (<i>L. plantarum</i>)、 短乳杆菌 (<i>L. brevis</i>)、 戊糖片球菌 (<i>P. pentosaceus</i>)、 类食品乳杆菌 (<i>L. paralimentarius</i>)

注:表中数据来源于文献[23,26,29]。

1.2.2 酒曲

在经过充分蒸煮的白米中,移入曲霉的分生孢子,然后保温,米粒上即茂盛地生长出菌丝,此即酒曲^[30]。酒曲不仅可以用来制造酒、甜酒等产品,还可以当作馒头的发酵剂^[31]。酒曲发酵能够改善馒头品质,减缓馒头老化速度,从而提升馒头的口感及风味^[32]。有研究指出,制曲工艺、地域及环境等因素使得酒曲中的主要微生物及其特性呈现出一定的差异性^[33],对酒曲发酵微生物的多样性分析也是现阶段酒曲发酵研究的重要内容^[34]。

以酒曲作为发酵剂发酵出的馒头风味较好,因为酒曲中的微生物及酶系格外丰富,在霉菌等微生物的协同作用下,将面团中的大分子物质降解,丰富了酒曲发酵馒头整体的风味及营养^[29]。黎江华等^[35]利用高通量测序对酒曲中的微生物菌群的组成以及多样性分析发现,酒曲中主要优势微生物是乳杆菌属(*Lactobacillus*)和根霉属(*Rhizopus*)。而周书楠等^[36]则采用MiSeq高通量测序得出复膜孢酵母属(*Saccharomycopsis*)、淀粉霉属(*Amylomyces*)以及根霉属(*Rhizopus*)为酒曲中的优势真菌属。根霉是一种具有多酶系特征的霉菌,在酒曲微生物中发挥着重要的作用。胡丽花^[29]通过分析得到甜

酒曲中根霉菌的活菌数约为 $10^3 \sim 10^4$ CFU/g。根霉能产生丰富的淀粉酶,使淀粉变为糖分,具有很好的糖化性能^[37]。生成的糖类物质可以丰富馒头口感。除此之外还能分泌酸性蛋白酶、酒化酶,并且产生乳酸、琥珀酸等代谢产物^[38],能够增强馒头的风味。

甜酒曲的种类、地域及原料的差异都会影响其所制馒头的风味^[33]。国内目前关于将米酒作为发酵剂应用于老面馒头方面的研究还较为缺乏。孙祥祥^[39]研究了米酒发酵馒头与普通酵母馒头的挥发性香气成分之间的差异。在米酒发酵馒头中醇类、酯类以及杂环类对其风味影响较大,主要呈现脂香和花香;而酵母馒头呈现脂香和果香。与之相比,米酒所制馒头挥发性香气成分种类更为复杂多样,含量更加丰富,所以米酒曲发酵使馒头口感和风味更佳。

1.2.3 酵子

酵子通常是以米粉、小麦粉或玉米粉等谷物为主要原料,在酵母菌、乳酸菌等多种微生物的协同作用下多次发酵而成^[3]。酵子发酵面团微生物丰富,其发酵时间长,能提高面团柔软度,进而改善其组织结构。且发酵过程中会发生复杂的化学反应如糖化、酯化等,从而产生各种风味物质^[40]。

杨可等^[41]在对陕西关中不同地区酵子的细菌及真菌菌群多样性研究时,发现醋酸杆菌属 (*Acetobacter*) 和 *Lactobacillus* 为酵子中的优势菌群,丝孢酵母属 (*Trichosporon*) 为大荔地区优势真菌属。链格孢属 (*Alternaria*) 和丛赤壳科 (*Nectriaceae*) 为武功地区优势真菌。对不同地区的酵子多样性研究发现,微生物菌群的结构和多样性差别较大,具有较为明显的区域性特色。Zhang Guohua等^[42]对酵子进行分析,发现明

串珠菌属 (*Leuconostoc*)、*Weissella* 和 *Lactobacillus* 为酵子中的优势菌群,这与杨可等^[41]的研究结果相似。马凯等^[43]对传统发酵酵子微生物以及风味分析发现,传统发酵酵子中的食窦魏斯氏菌 (*Weissella cibaria*)、融合魏斯氏菌 (*W. confusa*)、瑞士乳杆菌 (*L. helveticus*) 等乳酸菌及短小芽孢杆菌 (*Bacillus pumilus*) 能够代谢麦芽糖等糖类并释放出单糖。同时,苹果醋杆菌能够有效利用糖类和乙醇产生醋酸^[44]。在酵母菌、乳酸菌、芽孢杆菌及醋酸杆菌菌体大量增殖发酵面团的同时,产生的次级代谢产物能够影响酵子馒头的风味和质地。冯婕等^[45]从酵子馒头中鉴定出主要挥发性物质有27种,具有玫瑰香气的苯乙醇含量最高,它主要由酵母代谢产物乙醇通过 Ehrlich 途径将支链氨基酸转化得到^[26,46],对馒头整体香气特征有一定的影响。王远辉等^[47]对酵子发酵馒头和酵母发酵馒头的挥发性物质和香气特征进行分析发现,酵子馒头具有明显而独特的香味。乙醇赋予酵子醇香及酒香味^[12];酸类化合物十六酸赋予酵子馒头一定的酸味特征;酵子馒头与酵母馒头的挥发性化合物在种类和相对含量上有明显差异,这导致两者表现出不同的香气特征。

综上所述,不同天然发酵剂馒头的重要风味香气化合物种类以及相对含量不同,使馒头整体呈现的香气属性具有一定的差异。表2总结了文献中具有代表性(包括但不限于稀释因子值较大、OAV>1、风味阈值较小以及含量较高)的香气物质,根据表2数据绘制了不同的发酵剂所制馒头代表性香气轮图,见图2。可以看出老面馒头代表性香气物质以及香气属性相对较多,这与不同发酵剂微生物菌群种类和数量之间的差异有关。

表2 不同类型馒头的主要风味化合物
Table 2 Key flavor compounds of different types of steamed bread

馒头种类	主要风味化合物种类						参考文献
	醇类	酯类	醛类	酮类	杂环类	其他	
传统老面馒头	1-庚醇、1-己醇、苯乙醇、1-辛烯-3-醇、2-苯乙醇、3-甲基-1-丁醇	乳酸乙酯、乙酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸异戊酯、己酸丁酯、 γ -壬内酯	壬醛、己醛、辛醛、庚醛、苯甲醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E)-2-壬烯醛	辛酮、苯乙酮、香叶基丙酮、二氢-5-戊基-2(3H)-呋喃酮、2,3-戊二酮、橙化基丙酮	2-戊基呋喃	乙酸、乳酸、辛酸	[5,7,11,14,19,23,26,48]
酒曲发酵馒头	苯乙醇、苯甲醇、2-己基-1-癸醇	乙酸苯乙酯、乙酸乙酯、丁酸甲酯、己酸乙酯	壬醛、癸醛、(E)-2-癸烯醛	2-壬酮、苯乙酮、3-庚酮、4-辛酮	2-正戊基呋喃、吡啶	辛酸、4-乙基愈创木酚	[30,33,39]
酵子发酵馒头	壬醇、正辛醇、苯乙醇、正己醇、正庚醇、1-辛烯-3-醇	油酸乙酯、乙酸苯乙酯	苯乙醛、苯甲醛、己醛、壬醛、辛醛	苯乙酮、香叶基丙酮	2-戊基呋喃	乙酸	[19,26,44,47-48]
酵母发酵馒头	苯乙醇、1-戊醇、D-香茅醇、异丁醇、1-己醇、1-辛烯-3-醇、3-甲基-1-丁醇	辛酸乙酯、月桂酸甲酯、 γ -壬内酯、肉桂酸甲酯	癸醛、己醛、辛醛、反-2-辛烯醛、甲硫基丙醛	辛酮、香叶基丙酮、橙化基丙酮	2-戊基呋喃	乙酸、辛酸、茴香脑、 β -月桂烯、2,4-二叔丁基苯酚	[1-2,9,12,19,47-49]
甜玉米馒头	苯乙醇	癸酸乙酯、辛酸乙酯	癸醛、庚醛、壬醛、苯乙醛	香叶基丙酮	2-戊基呋喃、吡啶、2-甲氧基-4-乙基苯酚	苯乙烯	[50]
不同小麦粉馒头	2,3-丁二醇、苯乙醇、1-辛烯-3-醇、1-庚醇、3-甲基-1-丁醇	辛酸乙酯	(E)-2-辛烯醛、己醛、壬醛、庚醛	3-羟基-2-丁酮	2-戊基呋喃		[51]
杂粮馒头	己醇、2,3-丁二醇、1-丁醇、正己醇	乙酸乙酯、乙酸异戊酯、己酸乙酯、苯甲酸甲酯、丁酸丙酯	己醛、丁醛、壬醛、2-甲基丙醛、苯乙醛、苯甲醛、(E)-2-辛烯醛	2,3-丁二酮、2-庚酮	2-戊基呋喃		[52]

注:根据现有研究结果进行总结;发酵剂成分、原料及工艺不完全相同导致挥发性物质可能有一定差异。

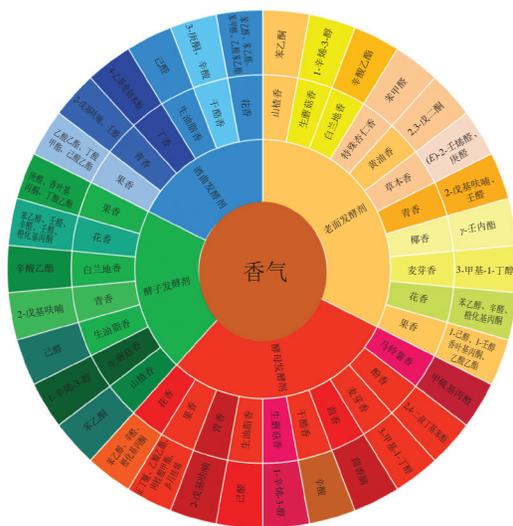


图2 不同种类发酵剂所制馒头代表性香气轮图

Fig. 2 Representative aroma wheel of steamed bread prepared with different starter cultures

1.3 人工复配发酵剂

通过筛选优质菌种进行复配的复合发酵剂，结合了老面混菌发酵的风味多样性以及活性干酵母的发酵优势，具有发酵力强、风味多样性的特点。复合发酵剂馒头在风味、营养及口感上表现良好，是现阶段较为热门的研究方向。

研究发现，酵母菌与乳酸菌复配体系发酵过程中乳酸菌发酵起始数量为 $1.29 \times 10^6 \sim 2.45 \times 10^7$ CFU/g，酵母菌起始数量为 $4.57 \times 10^7 \sim 7.41 \times 10^7$ CFU/g^[29]。在两者混合发酵的整个过程中，酵母菌与乳酸菌的数量均成倍增加。其中发酵乳杆菌 (*L. fermentum*)、食蜜魏斯氏乳酸菌 (*W. cibaria*) 和乳酸片球菌 (*P. acidilactici*) 增长显著。这是由于乳酸菌在复配发酵过程中，能够促进酵母糖酵解及三羧酸循环，从而促进乙醇及相关风味化合物的生成^[26]。加入复配菌种能够促进酵母对碳水化合物和氨基酸的代谢，氨基酸代谢能够促进风味物质的产生，从而提高整体的风味^[23]。

通过菌种复配得到的复合发酵剂在一定程度上弥补了普通酵母发酵剂所致风味物质较少的缺点，通过特定比例的复配甚至可以比传统发酵剂所制馒头风味更好。刘晨等^[48]采用固相微萃取-气相色谱-质谱 (solid phase micro extraction-gas chromatograph-mass spectrometry, SPME-GC-MS) 法研究了老面馒头、复合发酵剂馒头 (从老面中分离的酵母菌与乳酸菌复配所得的复合发酵剂) 和活性干酵母发酵馒头中风味物质的差异。研究发现，阈值较低酯类物质能赋予馒头特殊的香气特征，在复合发酵剂馒头与老面馒头中检出5种酯类物质：乳酸乙酯 (50 mg/kg)、乙酸乙酯 (0.005 mg/kg)、辛酸乙酯 (0.019 3 mg/kg)、乙酸异戊酯 (0.000 15 mg/kg) 和

癸酸乙酯 (0.005 mg/kg)，且复合发酵剂馒头的酯类化合物相对含量较高。复合发酵剂馒头与老面馒头中检出的关键羰基化合物有壬醛 (0.001 1 mg/kg)，其香气阈值较低，能够赋予馒头一定的香气特征^[53]。综合风味分析结果发现，复合发酵剂馒头和老面馒头检出的关键风味物质相似且数量多于酵母馒头，其中复合发酵剂馒头所检出的关键挥发性风味物质在含量上要略高于老面馒头。王聪等^[49]采用SPME-GC-MS分析对比普通酵母发酵馒头、酵母-酵母复合发酵剂馒头、植物乳杆菌-酵母复合发酵馒头的挥发性风味物质。在3种馒头中都检出了2-戊基呋喃。其中酵母-酵母复合发酵剂馒头醇类和酸类含量最高，但酸类总体含量占比较小。而植物乳杆菌-酵母复合发酵馒头中酯类和醛类相对含量较多。普通酵母发酵馒头中醚类只发现了具有水果香气的正丁醚。研究发现，3种馒头中醇类、酯类及醛类相对含量较高，对馒头整体风味影响较大。而且3种馒头阈值较低的关键风味物质在种类和相对含量上有所差异，说明发酵剂对其风味影响较大，将传统发酵剂与新型发酵剂进行适当的复配可以丰富馒头的风味。

发酵剂对馒头挥发性香气物质的影响主要取决于发酵剂中微生物的代谢作用，其本质为酶的作用，因而可以直接利用酶制剂改善馒头风味。碱性蛋白酶和谷氨酰胺转氨酶可以增强无麸质谷物馒头的鲜味和咸味，减弱其苦味和涩味^[54]。成品馒头的醛类和芳香类化合物升高，从而提升了馒头整体的风味。

2 不同原料对馒头风味的影响

除了主要影响因素发酵剂外，原料、工艺等对馒头风味的影响也格外重要。传统的馒头大都采用小麦面粉作为主要原料，面粉原料本身就含有一定的风味物质，例如正己醇、2-戊基呋喃、3-甲基丁醇等^[1,28,48]。面粉中碳水化合物和蛋白质在发酵过程中会降解成小分子物质，面粉在存储过程中也会发生脂肪氧化，生成风味前体物质^[19]。这些因素都会影响馒头的风味^[55]。

不同的原料自身所含的特殊风味物质对所制馒头主体风味也会产生影响。王慧洁等^[50]在对不同原料馒头风味分析时发现，在相同工艺下自制甜玉米馒头 (甜玉米粉质量:小麦面粉质量=1:3) 的风味比普通馒头丰富。其中醛类物质种类及含量差异较大，这是由于甜玉米粉中的脂肪含量比小麦粉高，而醛类物质则来源于脂肪的氧化分解。酯类物质也是酵母代谢的主要产物，阈值较小对馒头整体风味有一定的影响。甜玉米粉的加入产生了一些其特有的风味物质，例如癸醛、癸酸乙酯和十四酸乙酯等。癸醛 (0.003 mg/kg) 与癸酸乙酯 (0.005 mg/kg) 的阈值都很低，这些关键化合物的增加使得甜玉米馒头

较普通馒头风味更加丰富。沙见宇等^[51]对全麦粉馒头、面粉馒头、轻碾脱皮面粉所制馒头这3种馒头的挥发性成分进行鉴定,分别检测出22、18、24种挥发性物质。3种不同精细程度面粉所制馒头所检出的挥发性化合物种类差异较小,其中壬醛(0.0011 mg/kg)、己醛(0.005 mg/kg)、2-戊基呋喃(0.0058 mg/kg)为面粉馒头检出的主要挥发性香气化合物且阈值很小。2-丙基-1-戊醇、己醛分别是轻碾脱皮面粉所制馒头和全麦粉馒头所特有的香气成分,轻碾脱皮馒头和全麦馒头所检出的主要香气化合物相比普通面粉馒头多了苯乙醇、乙醇、1-庚醇(0.0054 mg/kg)等5种醇类化合物。醇类一般来自于脂肪的氧化降解。具有果香味的酯类物质则由醇和脂肪酸的酯化反应生成^[56]。具有果味、焦糖味的辛酸乙酯(0.0193 mg/kg)在3种馒头中检出。根据研究结果可知,不同精细程度的小麦粉在同一馒头制作工艺下产生的挥发性香气成分具有一定的差异。

人类消费逐渐倾向于健康,具有特定生理功能的食品也成为目前较为热门的研究方向。随着对馒头的研究不断多样化,国内外很多学者开发出不同原料的馒头制品,在营养、风味、功能方面都有提高^[52]。杂粮含有丰富的营养成分,例如膳食纤维、黄酮等,这些营养成分可以预防和改善心血管疾病^[57]。采用不同种类杂粮粉或其与小麦粉混合蒸制的杂粮馒头,可以改变馒头的风味,并能提高小麦面粉所制馒头品质及营养。张佳丽等^[57]通过气相色谱-离子迁移谱对不同杂粮馒头的风味物质进行分析,发现杂粮馒头香气物质的种类和浓度随杂粮添加量的增加而增加。燕麦馒头的主要挥发性物质为醇、醛、酯、呋喃类和酮类,其中2,3-丁二醇、苯乙醛、苯甲醛挥发性成分浓度明显升高,苯乙醛(0.0063 mg/kg)、苯甲醛(0.75089 mg/kg)阈值都很低,表明燕麦的加入增加了馒头的风味。而薏米馒头中检测到的己醛(0.005 mg/kg)、己醇(0.0056 mg/kg)、2-戊基呋喃(0.0058 mg/kg)含量随意米添加量的增加而增加,同样也说明薏米可以丰富馒头的风味;酯类化合物对高粱馒头主体风味有一定的贡献;醇类化合物是黍子馒头的重要香气物质;具有果香及青香等气味的醛类物质,其芳香阈值较低对馒头香味有一定贡献^[58]。通过对比分析发现,小米和荞麦馒头的挥发性成分与对照组小麦面粉所制馒头基本一致,特征挥发性成分种类较少,浓度较低,说明小米以及荞麦本身所产生的特殊风味物质影响较小。苦荞是一种具有较高营养价值的食药原料,其支链淀粉含量丰富,可以作为理想的发酵原料。但苦荞本身的风味较差,这可能会影响其开发与应用。苦荞中主要优势菌属为*Lactococcus*和魏斯氏菌属(*Weissella*),而曲霉属(*Aspergillus*)、青霉属(*Penicillium*)和威克汉姆酵母属(*Wickerhamomyces*)则是主要真菌属。吡嗪类化合物为苦荞酸面团中主要挥发性成分。在发酵后期,

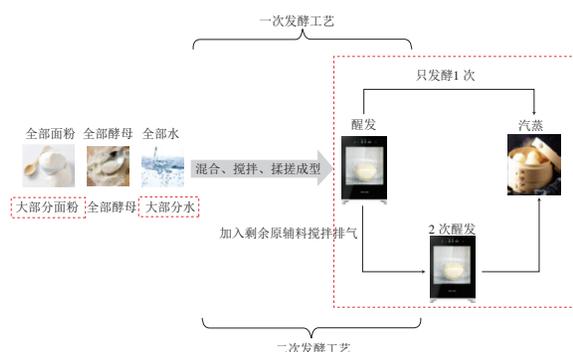
苯乙醇等大量化合物的存在丰富了酸面团的风味^[59]。苦荞麦酸面团中挥发性成分与细菌多样性之间存在着密切的联系,这为酵母微生物筛选提供了理论依据。

3 不同发酵工艺对馒头风味的影响

3.1 制作工艺的影响

3.1.1 不同发酵方法的影响

目前馒头制作工艺主要分为两种,一次发酵法与二次发酵法,图3为两种发酵工艺之间的差异。两种发酵方法在工艺上差距较大(图中用虚线标出)。在发酵时间上,二次发酵较久,使得酵母等微生物具有充分的发酵时间,这些微生物代谢所产生的醇和有机酸等物质通过相互作用,能够产生风味前体物质,对馒头风味的形成具有一定的影响^[60]。但是其生产周期较长,不适合工业化生产^[3]。工业上为了保证食品安全、节约时间以及降低成本,几乎全部采用商业酵母短时间发酵制作馒头,而传统发酵剂由于其菌群含量相对较少并不适合短时间发酵,大多采用二次发酵法。研究发现,同一原料不同工艺条件下,两种馒头挥发性香气化合物的相对含量没有非常明显的差距,但是在二次发酵馒头中检出的香气化合物的种类相较一次发酵的多了3种;部分化合物的含量高于一次发酵。其中醇类的相对含量较一次发酵馒头增加了3.24%。具有豆香、果香以及青香的2-戊基呋喃在两种馒头检出,研究表明其为面粉本身所带的风味物质,是馒头风味中必不可少的物质。经过二次发酵的馒头,出现了苯乙烯、3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇等一次发酵从未出现过的重要风味物质^[60]。二次发酵时间长的特点使得酵母等微生物充分代谢进而产生了更多风味物质,故二次发酵所制馒头在风味水平上优于一次发酵所制馒头。发酵条件的改变可能影响了微生物的活动和代谢产物的生成,以及组分之间的相互反应,从而导致风味物质的差异。



该图仅对不同发酵工艺整体中的关键性步骤与差异进行描述。

图3 馒头一次发酵工艺与二次发酵工艺主要差异图

Fig. 3 Major differences between primary and secondary fermentation processes for steamed bread

3.1.2 不同发酵时间的影响

对于同一发酵方法,其发酵时间不同也会对馒头品质、风味等产生一定的影响,关于不同发酵时间段的风味研究可以看作是馒头风味的动态变化过程。在不同发酵阶段,有的风味物质会随发酵时间延长而增加,有些会随着发酵而降低,有些则会先上升后下降。研究发现,在馒头发酵的不同阶段,挥发性化合物变化明显^[60],一些香气化合物如戊醇、3-甲硫基丙醇、苯乙醇的含量随发酵增加显著,其中戊醇和3-甲硫基丙醇在发酵过程中生成,说明其为酵母代谢产物。吡啶的含量在发酵过程中先上升后下降,这可能是吡啶在发酵过程中被代谢所导致^[1]。这些研究为不同发酵时间对馒头风味物质影响的研究提供了一定的数据支撑。

3.2 加碱的影响

由于传统发酵剂发酵时间长,其发酵面团具有一定的酸性。研究发现,随着发酵时间的延长,酸度逐渐增大,这可能与面团发酵过程中微生物菌群的作用有关。所以在制作过程中,碱或小苏打的加入对馒头的风味具有一定的影响。有研究发现,碱的加入会使酸面团挥发性化合物的种类减少,主要对酸类及酯类风味物质影响较大。由于酸类为酯类物质的生成提供了前提,碱的加入使酸性化合物种类及含量大幅减少,使得酯类风味物质种类及相对含量也相对减少^[61]。在加碱后出现了一些原本从未出现过的风味物质,如丁酸乙酯、甲酸己酯、吡啶高氯酸等,这些物质可能是导致加碱馒头独特香气的原因^[62]。综上所述,加碱馒头与不加碱馒头挥发性风味物质种类及相对含量存在一定差异,使其香气特征有所改变。除此之外,加碱量的多少同样对馒头整体感官及品质有一定的影响。加碱过量会导致馒头发黄、变硬甚至破裂,影响馒头的风味、外观及口感^[63]。所以除了发酵剂外,发酵条件以及制作工艺同样对馒头风味物质的产生有一定的影响。

4 结 语

随着生活质量的不断提高,人们将越来越注重馒头等食品的风味以及功能性。馒头的风味是决定馒头品质的重要原因之一,馒头的挥发性成分中主要包括醇类、酯类、醛类、酮类、芳香类等。挥发性成分的产生与馒头发酵剂中微生物有着密不可分的联系。不同种类以及不同地域的发酵剂馒头风味差异很大,这主要是由于各种发酵剂中微生物的种类、比例及含量有很大的差异。

除了发酵剂外,原材料以及制作工艺对馒头挥发性物质的产生也有重要影响。发酵剂对风味的影响机理主要表现在不同微生物的作用。如今馒头工业化生产大都采用工业酵母,因其效率高、品质稳定,相比传统发酵

剂发酵更占优势,但单一菌种限制了更多风味物质的产生,使其风味较为单一,不能完全满足消费者的味蕾需求。相反,传统发酵剂口味独特,但其稳定性差,不宜进行大规模生产。人工复配发酵剂的出现理论上更适合工业化生产,但目前研究多偏向复配提高风味及稳定性方面,在实际应用方面较少提及。馒头的研究领域逐渐趋向多样化,未来开发新型发酵剂将成为热门,随着人们对营养保健等功能性食品的开发,研究具有一定功能性的馒头也是大势所趋。此外,直接利用影响馒头风味物质形成的关键酶对馒头风味进行改善也是今后研究方向之一。目前对馒头关键香气化合物的具体形成途径研究不足,因此解析不同发酵剂中微生物代谢途径与香气化合物形成的关系,实现对关键香气化合物的调控将是进一步深入研究馒头风味形成与调控机制的重要途径。

参考文献:

- [1] 汪卓琳. 酵母制品风味物质分析及形成机理研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021: 3-113.
- [2] HUANG Y L, WAN J W, WANG Z L, et al. Variation of volatile compounds and corresponding aroma profiles in Chinese steamed bread by various yeast species fermented at different times[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70: 3795-3806. DOI:10.1021/acs.jafc.2c00550.
- [3] 马先红, 李环通, 马志运, 等. 发酵对馒头风味物质的影响[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(9): 1-4.
- [4] YAN B W, SADIQ F A, CAI Y J, et al. Microbial diversity in traditional type I sourdough and Jiaozi and its influence on volatiles in Chinese steamed bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101: 764-773. DOI:10.1016/j.lwt.2018.12.004.
- [5] LIU T J, LI Y, SADIQ F A, et al. Predominant yeasts in Chinese traditional sourdough and their influence on aroma formation in Chinese steamed bread[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 404-411. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.09.081.
- [6] SIEPMANN F B, SOUSA D A B, WASZCZYNSKYJ N, et al. Influence of temperature and of starter culture on biochemical characteristics and the aromatic compounds evolution on type II sourdough and wheat bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 108: 199-206. DOI:10.1016/j.lwt.2019.03.065.
- [7] SUO B, NIE W J, WANG Y X, et al. Microbial diversity of fermented dough and volatile compounds in steamed bread prepared with traditional Chinese starters[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 126: 109350. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109350.
- [8] CORSETTI A, DE A M, DELLAGLIO F, et al. Characterization of sourdough lactic acid bacteria based on genotypic and cell-wall protein analyses[J]. Journal of Applied Microbiology, 2003, 94: 641-654. DOI:10.1046/j.1365-2672.2003.0184.
- [9] 师雨梦, 滕超, 汤回花, 等. 八种不同酵母发酵对馒头品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 263-267. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.21.052.
- [10] ZHANG G H, SUN Y R, SADIQ F A, et al. Evaluation of the effect of *Saccharomyces cerevisiae* on fermentation characteristics and volatile compounds of sourdough[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55: 2079-2086. DOI:10.1007/s13197-018-3122-1.
- [11] FAN H P, ZHENG X L, AI Z L, et al. Analysis of volatile aroma components from Mantou fermented by different starters[J]. Journal of

- Food Processing and Preservation, 2018, 42(6): e13627. DOI:10.1111/jfpp.13627.
- [12] 刘丹蕾, 滕超, 汤回花, 等. 不同商业酵母馒头发酵风味及品质分析[J]. 中国酿造, 2019, 38(1): 59-65. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2019.01.012.
- [13] RÖGNER N S, MALL V, STEINHAUS M. Odour-active compounds in liquid malt extracts for the baking industry[J]. European Food Research and Technology, 2021, 247: 1263-1275. DOI:10.1007/s00217-021-03707-z.
- [14] XING X L, MA J Y, FU Z J, et al. Diversity of bacterial communities in traditional sourdough derived from three terrain conditions (mountain, plain and basin) in Henan Province, China[J]. Food Research International, 2020, 133: 109139. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109139.
- [15] 谢水琪, 张晓桐, 靳奇文, 等. 乳酸菌发酵剂对杂粮面团及馒头品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 189-194. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220113-129.
- [16] DE VUYST L, HARTH H, VAN KERREBROECK S, et al. Yeast diversity of sourdoughs and associated metabolic properties and functionalities[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 239: 26-34. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2016.07.018.
- [17] RÖGNER N S, MALL V, STEINHAUS M. Impact of malt extract addition on odorants in wheat bread crust and crumb[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69: 13586-13595. DOI:10.1021/acs.jafc.1c05638.
- [18] GÄNZLE M G, ZHENG J. Lifestyles of sourdough lactobacilli: do they matter for microbial ecology and bread quality?[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 302: 15-23. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.019.
- [19] 沙见宇. 不同发酵剂馒头风味特性的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017: 2-46.
- [20] RIPARI V, CECCHI T, BERARDI E. Microbiological characterisation and volatiles profile of model, *ex-novo*, and traditional Italian white wheat sourdoughs[J]. Food Chemistry, 2016, 205: 297-307. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.02.150.
- [21] HANSEN A, SCHIEBERLE P. Generation of aroma compounds during sourdough fermentation: applied and fundamental aspects[J]. Trends in Food Science & Technology, 2005, 16: 85-94. DOI:10.1016/j.tifs.2004.03.007.
- [22] MINERVINI F, DI CAGNO R, LATTANZI A, et al. Lactic acid bacterium and yeast microbiotas of 19 sourdoughs used for traditional/typical Italian breads: interactions between ingredients and microbial species diversity[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2012, 78(4): 1251-1264. DOI:10.1128/AEM.07721-11.
- [23] 邢小龙. 河南地区老酵面团菌群结构及优势菌种复配研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020: 25-89.
- [24] VUVST L D, KERREBROECK S V, FRÉDÉRIC L. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation[J]. Advances in Applied Microbiology, 2017, 100: 49-160. DOI:10.1016/bs.aamb.2017.02.003.
- [25] 李晓敏, 韩伟, 黎琪, 等. 传统酸面团菌群结构及其酵制馒头风味物质分析[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 162-170. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200109-107
- [26] 闫博文. 老面馒头微生物菌群多样性差异分析及其对馒头风味特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 14-30.
- [27] 张楚楚. 自然发酵面团细菌菌群结构对馒头挥发性风味物质影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017: 33-37.
- [28] XI J Z, XU D, WU F F, et al. The aroma compounds of Chinese steamed bread fermented with sourdough and instant dry yeast[J]. Food Bioscience, 2020, 38: 100775. DOI:10.1016/j.fbio.2020.100775.
- [29] 胡丽花. 传统主食馒头发酵剂微生物的筛选及对馒头品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2010: 25-41.
- [30] YANG H Y, LIU T J, ZHANG G H, et al. Intraspecific diversity and fermentative properties of *Saccharomyces cerevisiae* from Chinese traditional sourdough[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 124: 109195. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109195.
- [31] ZHANG C, AO Z, CHUI W Q. Characterization of the aroma-active compounds in *Daqu*: a tradition Chinese liquor starter[J]. European Food Research and Technology, 2012, 234: 69-76. DOI:10.1007/S00217-011-1616-4.
- [32] 刘长虹, 钱志海, 韩旭. 米曲霉对酵母馒头老化性质的影响[J]. 食品科技, 2009, 34(3): 151-154. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2009.03.050.
- [33] 孙祥祥, 石飞, 刘长虹, 等. 米酒作为馒头传统发酵剂的生产工艺研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(2): 144-147. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2019.02.027
- [34] XU D, YIN Y, ALI B, et al. Isolation of yeast strains from Chinese liquor *Daqu* and its use in the wheat sourdough bread making[J]. Food Bioscience, 2019, 31: 100443. DOI:10.1016/j.fbio.2019.100443.
- [35] 黎江华, 刘超兰, 冯兴, 等. 高通量测序分析五倍子发酵用酒曲与酒糟微生物多样性[J]. 中成药, 2020, 42(8): 2113-2118. DOI:10.3969/j.issn.1001-1528.2020.08.027.
- [36] 周书楠, 王玉荣, 周亚澳, 等. 基于MiSeq高通量测序技术的米酒真菌多样性分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 85-96. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.015.
- [37] 母应春, 姜丽, 苏伟. 应用Illumina高通量测序技术分析3种酒曲中微生物多样性[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 115-122. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181030-359.
- [38] 陈冬纯, 周传云. 根霉、酵母原生质体的制备与融合探讨[J]. 现代食品科技, 2006(1): 26-34. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2006.01.009.
- [39] 孙祥祥. 米酒老面馒头研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020: 16-48.
- [40] 王雯雯, 路源, 汪雅馨, 等. 特色酵子的发酵特性及对馒头品质的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 216-219. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2020.03.041.
- [41] 杨可, 康佳木, 刘柳. 陕西关中地区酵母中微生物群落结构及多样性分析[J]. 食品发酵与工业, 2019, 45(2): 67-73. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.018007.
- [42] ZHANG G H, HE G Q. Predominant bacteria diversity in Chinese traditional sourdough[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(8): M1218-M1223. DOI:10.1111/1750-3841.12193.
- [43] 马凯, 武会娟, 刘悦, 等. 一种传统发酵酵母细菌多样性及挥发性发酵产物分析[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(2): 202-208. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.013079.
- [44] 刘青娥, 钟仙龙. 柑桔果醋酿造用菌种分离及其生产性能测定[J]. 广东农业科学, 2015, 42(20): 80-85. DOI:10.16768/j.issn.1004-874x.2015.20.005.
- [45] 冯婕, 温纪平, 徐会勤, 等. 不同系统粉流馒头的风味分析[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 154-160. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.11.025.
- [46] PICO J, BERNAL J, JOSÉ G, et al. Wheat bread aroma compounds in crumb and crust: a review[J]. Food Research International, 2015, 75: 200-215. DOI:10.1016/j.foodres.2015.05.051.
- [47] 王远辉, 赵靖雯, 吴宵云, 等. 酵母馒头与酵母馒头挥发性组分与香气特征分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(4): 281-290. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.04.035.

- [48] 刘晨, 孙庆申, 吴桐, 等. 3种不同发酵剂馒头风味物质比较分析[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 150-153. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201510030.
- [49] 王聪, 吕莹果, 陈洁. 不同发酵剂发酵馒头风味成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 261-267. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020090240.
- [50] 王慧洁, 白岩, 张国治, 等. 甜玉米馒头的营养特性及风味物质的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 70-76. DOI:10.16433/j.1673-2383.2021.05.009.
- [51] 沙见宇, 张锦丽. 不同小麦粉对馒头品质及风味的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 753-758. DOI:10.3969/j.issn.1000-2324.2021.05.006.
- [52] 路飞, 吴玥瞳, 郑家荣, 等. 杂粮馒头的营养价值及加工技术研究进展[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(3): 230-237. DOI:10.3969/j.issn.1673-5862.2021.03.008.
- [53] 周晓媛, 邓靖, 李福枝, 等. 发酵辣椒的挥发性风味成分分析[J]. 食品与生物技术学报, 2007(1): 54-59.
- [54] 李东红, 贾先勇, 杨晋杰, 等. 碱性蛋白酶和谷氨酰胺转氨酶对无麸质谷物馒头发酵过程中风味特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 62-69. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020030116.
- [55] 徐丹. 旧金山乳杆菌对酸面团面包品质影响机理及面包风味改良的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 1-10.
- [56] 宋琛琛, 韩小贤, 张新阁, 等. 不同出粉率面粉和混合发酵剂所制馒头挥发性物质的分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 7-13. DOI:10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2015.05.002.
- [57] 张佳丽, 张爱霞, 李朋亮, 等. 基于GC-IMS分析不同杂粮馒头挥发性成分的差异[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(9): 270-279. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000375.
- [58] 马良, 王若兰. 玉米储藏过程中挥发性成分变化研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 316-325. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.7.049.
- [59] ZHOU Y M, SHE X M, ZHU S Y, et al. The study of microbial diversity and volatile compounds in Tartary buckwheat sourdoughs[J]. Food Chemistry: X, 2020, 14: 100353. DOI:10.1016/j.fochx.2022.100353.
- [60] 王大一, 温纪平. 一次发酵和二次发酵馒头中挥发性风味物质比较[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 58-61. DOI:10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2015.02.034.
- [61] 马永生. 老面发酵制作馒头特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011: 21-23.
- [62] 刘娜, 程晓燕, 孙银凤, 等. GC-MS分析传统酸面团馒头风味及添加食用碱对其风味的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 76-81. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.16.008.
- [63] XI J Z, XU D, WU F F, et al. Effect of Na_2CO_3 on quality and volatile compounds of steamed bread fermented with yeast or sourdough[J]. Food Chemistry, 2020, 324: 126786. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126786.