乳酸菌发酵对馒头香气特征的影响

何晓赟[1]，闫博文[1]，赵建新[1]，范大明[1]，连惠章[2]，田丰伟[1]，陈卫[1,3]，张灏[1]
（1.江南大学食品学院，江苏无锡 214122）（2.无锡华顺民生食品有限公司，江苏无锡 214218）
（3.江南大学国家重点实验室，江苏无锡 214122）

摘要：本文研究了不同发酵类型的乳酸菌发酵对馒头的香气特征的影响，采用电子鼻技术对 9 株不同乳酸菌分别发酵馒头的香气成分进行检测，对电子鼻 10 个传感器信号数据进行主成分分析（Principle Component Analysis，PCA）后发现，9 株不同乳酸菌发酵的样品能明显区分开，并且按照不同的乳酸发酵类型，在 PCA 图中能大致划分为三类。采用专性异型菌株发酵制得馒头样品的香气特征与兼性异型菌株发酵制得的样品较近似，却与同型发酵菌株制得的产品存在显著差异，从而说明乳酸菌的发酵代谢类型与馒头的香气物质形成有着紧密的联系。通过气味感官评价及风味模型的构建，探究了不同类型乳酸菌对发酵的馒头的风味贡献特异性，其中异型乳酸发酵菌株发酵的馒头样品同时在麦芽味、水果气味、酒味和酸乳味等风味处都有较高强度表现，更有助于馒头风味的改善，同时为工业化菌种发酵剂的开发奠定了理论研究基础。

关键词：乳酸菌；馒头；发酵；气味；电子鼻
文章篇号：1673-9078(2017)1-179-184 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.1.028

Effects of Lactic Acid Bacteria Fermentation on the Odor Characteristics of Steamed Bread

HE Xiao-yun[1], YAN Bo-wen[1], ZHAO Jian-xin[1], FAN Da-ming[1], LIAN Hui-zhang[2], TIAN Feng-wei[1], CHEN Wei[1,3], ZHANG Hao[1]
(1.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)
(2. Wuxi Huashun Minsheng Food Co. Ltd., Wuxi 214218, China)
(3.State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to better understand the effects of different lactic acid bacteria' fermentation on the odor characteristics of steamed bread, the flavor components of bread fermented by 9 strains lactic acid bacteria separately were detected by using electronic nose technology. The response values obtained by electronic nose were analyzed by the principal component analysis (PCA). The PCA analysis showed 9 batches of steamed bread samples could be obviously distinguished. According to different lactic acid fermentation type, the samples can be divided into three categories in the PCA diagram. The odor characteristics of the steamed bread samples fermented with obligately homofermentative organisms were significantly different from other two kinds of samples, and the odor characteristic of obligately heterofermentative samples were similar with facultatively heterofermentative samples. Through the sensory evaluation and the establishment of the flavor model, this work aimed to explore the specific odor of steamed bread fermented with different types of lactic acid bacteria, and to provide reference for the quick identification and the odor objectification of steamed breads.

Key words: Lactic acid bacteria; Steamed bread; Fermentation; Odors; Electronic nose

馒头是我国传统的蒸制发酵面制品，每年我国40%的小麦及进口小麦用于馒头生产[1]，而馒头消费占中国面制品消费总量的 30%以上[2]。在中国北方地区通常采用酸面团发酵剂发酵生产馒头，在民间常称为老酵、老面或者起子等。相较于由单一酵母发酵制得的馒头风味单一化，由传统老面发酵制得的馒头产品有风味好与口味醇厚的特点[3]。而不同的酸面团发酵剂在微生物菌群上差异必然会导致其代谢产物的种类和含量不同，最终体现在馒头的口感和风味上存在一定的差异。

近年来，酸面团制品因其特有的风味、质构以及

收稿日期：2015-10-16
基金项目：国家自然科学基金资助项目（31471721）；“十二五”国家科技支撑计划项目（2014BAD04B03）
作者简介：何晓赟（1992-），女，在读硕士研究生，研究方向：食品生物技术
通讯作者：赵建新（1971-），男，博士，教授，研究方向：食品生物技术、食品加工技术

较长的储藏期，引起了国内外研究者的浓厚兴趣。目前，国外对酸面团发酵技术的应用以及机理研究较为成熟，Gobetti 和 Corsetti 等对酸面团品质研究[4]、菌种的筛选[5,6]和酸面团发酵过程中代谢机理[7]等方面都进行了深入的研究。反观国内关于传统老面发酵剂对馒头风味等品质特性的研究报道却相对有限，韩德权[8]等对单一酵母发酵剂馒头和复合发酵剂馒头中挥发性物质进行分析，结果表明，复合发酵剂馒头中微生物产生的挥发性物质远高于一般的单一活性酵母发酵剂馒头。此前的相关研究中，菌株筛选工作进行较少，目前对于不同类型乳酸菌菌株在发酵馒头过程中对气味特征影响的研究仍非常有限。

电子鼻是测定食品风味的一项快速检测技术，其能够客观并快捷地对样品的气味进行评价，广泛用于不同食品气味的比较研究。本文对不同乳酸菌发酵制备的馒头的香气特征进行研究，采用电子鼻技术分析不同发酵剂制备的馒头样品中的挥发性风味成分差异，并通过感官评价及风味模型的构建，旨在探究不同类型乳酸菌发酵对馒头的香气贡献特异性，从而为传统老面发酵剂菌株的筛选及乳酸菌产香机制探究提供理论依据及生产指导。

1 材料与方法

1.1 原料

表 1 本研究所用乳酸菌的基本信息

Table 1 Basic information on LAB strains used in this study

菌株编号	菌种	拉丁学名	发酵类型
S2	戊糖片球菌	*Pediococcus pentosaceus*	同型乳酸发酵
XA14	乳酸乳球菌	*Lactococcus lactis*	同型乳酸发酵
15	格氏乳杆菌	*Lactobacillus gasseri*	同型乳酸发酵
S8	短乳杆菌	*Lactobacillus brevis*	专性异型发酵
14	罗伊氏乳杆菌	*Lactobacillus reuteri*	专性异型发酵
Y3	发酵乳杆菌	*Lactobacillus fermentium*	专性异型发酵
P8	植物乳杆菌	*Lactobacillus plantarum*	兼性异型发酵
5	干酪乳杆菌	*Lactobacillus casei*	兼性异型发酵
237	鼠李糖乳杆菌	*Lactobacillus rhamnosus*	兼性异型发酵

风筝牌中筋粉：潍坊风筝面粉有限责任公司；乳酸菌菌种：江南大学食品生物技术保藏中心，具体菌株信息见表 1；高活性干酵母：安琪酵母股份有限公司；去离子水：飘之霖实验用水。

MRS 液体培养基配方：牛肉膏 10 g，蛋白胨 10 g，酵母膏 5 g，葡萄糖 20 g，乙酸钠 5 g，柠檬酸二铵 2 g，$MgSO_4·7H_2O$ 0.1 g，$MnSO_4·H_2O$ 0.05 g，$K_2HPO_4·3H_2O$ 2.5 g，吐温 80 1 mL，去离子水 1000 mL，pH 6.2~6.4。

1.2 主要仪器设备

INose 电子鼻系统，美国 Isenso 公司；搅面机、醒发箱，新麦机械（无锡）有限公司；蒸箱，博西家用电器(中国)有限公司；SCIONSQ 气质联用仪，美国布鲁克 道尔顿公司；固相微萃取纤维头 DVB/CA/PDMS(2 cm，80 μm)，美国 Supelco 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 发酵剂的制备

取经 MRS 液体培养基活化的乳酸菌菌液于 8000 r /min、4 ℃冷冻离心 10 min 得菌泥，加双蒸水重悬浮菌泥，使 $OD_{620\,nm}$ 值为 12.5，对应菌浓度为 10^9 cfu/mL。称取 50 g 面粉加入 25 mL 无菌水，接入 1 mL 重悬浮菌液，搅拌混匀，密封放入 35 ℃恒温培养箱中发酵 12 h。

1.3.2 馒头样品的制备

取 75 g 老面发酵剂、500 g 面粉、225 mL 水和 3 g 干酵母，置于搅面机中先慢速搅打 4 min，再快速搅打 3.5 min。将形成的面团切分成 75 g/个，并搓圆至面团表面光滑，将成形的面团置于 32 ℃，相对湿度 85%条件下醒发 40 min。醒发结束后，将面团置于 100 ℃蒸箱中蒸制 20 min，蒸熟后室温（25 ℃）下冷却 30 min。

1.3.3 电子鼻样品处理方法及数据处理

粉碎馒头样品，混匀，过 2 号筛。称取馒头粉末 1.0 g 装入 10 mL 进样瓶中，加盖密封。常温放置 20 min，待样品挥发性物质挥发达到平衡后，将进样针头插入放置馒头的样品瓶中，用电子鼻对其进行测量，每个样品平行测定 3 次。

测定条件：采样时间为 1 s/组；传感器自清洗时间为 60 s；传感器归零时间为 10 s；样品准备时间为 5 s；进样流量为 400 mL/min；分析采样时间为 120 s。

采用雷达图、主成分分析法(PCA)和聚类分析对原始数据行分析。

1.3.4 感官评价

乳酸菌发酵馒头的感官评价描述词确定的方法参考 Varapha[9]等在对酸面团面包感官评定时建立的方法，并稍作相应修改。

（1）不同发酵剂制备的馒头被切割成 3×3×3 cm^3 的方块，样品均保存于干燥密封无异味的玻璃罐内。为了降低贮藏对感官品质的影响，所有样品均在制备完成后 12 h 以内完成感官评价。

（2）乳酸菌发酵馒头的感官评价小组由 12 名以

前从事过馒头感官评定的专业食品感官人员组成（其中男性 6 名、女性 6 名），所有感官评价小组成员前期需接受 2 h/d 为期 7 d 的关于乳酸菌发酵产品的感官术语的培训。

（3）在评定初期，使用 10 种不同乳酸菌制备的样品用于感官术语的确定，评定人员被要求尽可能多且针对性地提出单一风味特征的描述性词语（评定人员不需考虑此风味对产品是否存在积极或消极影响）。

（4）评价小组成员对每一个样品的描述词汇开展讨论直至成员对该词汇在对样品的风味贡献的描述程度上达成一致。

（5）选取 10 个样品共有的描述词汇，确定为乳酸菌发酵饼干的风味描述词汇表。经过讨论，感官评价小组确定的乳酸菌发酵饼干的风味特征描述词如表所示。

（6）准备具有每一描述词汇风味的典型参考物质，评价小组成员通过讨论确定参考物质的评分，满分 10 分，其打分标准为：1~2 分-无气味或气味极淡；3~4 分-有气味，较淡；5~6 分-有气味，稍浓；7~8 分-有气味，较浓；9~10 分-有气味，很浓。分数越高代表参考物质该风味越强烈。12 位感官评价员分别对不同乳酸菌发酵的馒头样品进行嗅闻及品尝，并对每种特征气味以及喜好度进行打分。

表 2 为通过以上实验，确定的乳酸菌发酵馒头气味特征描述词汇、描述和具体参考。

表 2 乳酸菌发酵馒头气味感官特征描述词汇表

Table 2 Definition of aroma characteristics of LAB-fermented steamed bread

气味贡献	描述	参考
麦芽味	轻微的甜味，表征与坚果风味相联系的综合性描述语	小麦胚芽=7.5 (气味)
面味	潮湿的、未烘烤彻底的滋味，常可联想到谷物产品	生面团=9 (气味)
发酵味	与发酵酵母制品或发酵面制品相联系的风味	白面包芯=5 (气味)
酒味	与白酒相联系的醇类物质香味	10%乙醇=10 (气味)
乳香味	与奶制品相联系的香甜味	奶油奶酪=7 (气味)
水果味	与成熟水果相联系，包括甜味、过熟味和略微酸味	草莓=5 (气味)
酸乳味	酸及干酪混合味，常可联想到酸乳、奶油干酪	1%丁酸=10 (气味)
醋味	与醋相联系的轻柔的酸味	白醋=9(气味)

1.3.5 数据处理

利用 SPSS Statistics 17.0 软件对实验数据进行单因素 ANOVA 分析及主成分分析（Principle Component Analysis，PCA），Tukey HSD 被用于确定 $p \leq 0.05$ 水平时数据的显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 不同乳酸菌发酵对馒头的气味特性影响

2.1.1 响应值分析

图 1 为由 9 株不同乳酸菌发酵剂发酵的馒头样品电子鼻雷达图。10 根传感器对 9 批样品的信号响应差异显著性不大，各个样品在气味组成上比较一致。总体上看，样品在 2 号、3 号和 4 号三个传感器所对应的响应值最强，其中，2 号传感器对芳香族化合物响应灵敏，3 号传感器对酯类化合物响应强烈，4 号传感器对含羰基类物质灵敏，这与对馒头风味物质贡献较大的是酯类和羰基化合物[8]的想法一致。馒头挥发性风味物质中的酯类化合物气味浓郁，香气持久，低分子质量的酯类一般具有芳香气味或特定水果香味[10]，醛类物质的香气浓烈，多为果香及花香，杂环类物质检出量虽然较少，但多具有强烈的气味，对产品风味的改善发挥着重要的作用。结合不同样品在传感器 2 号、3 号、4 号和 5 号特征响应值的显著差异性，后续研究可从酯类、羰基类化合物、芳香族化合物的含量和组成方面进行深入分析不同菌株发酵老酵馒头的风味差异性。采用雷达分析方法无法直观地反映不同发酵菌株制得样品的风味差异性，因此需要对数据进行进一步的分析处理。

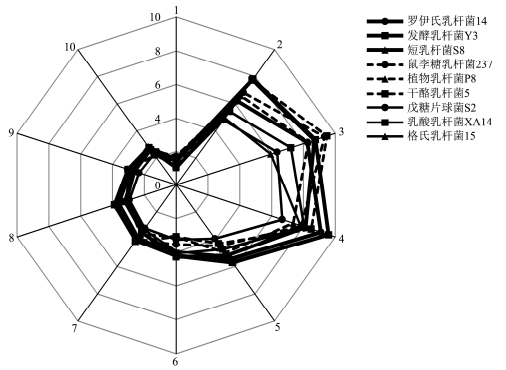


图 1 不同乳酸菌发酵的老面馒头电子鼻检测的挥发性物质雷达图

Fig.1 Radar charts of volatile compounds in sourdough bread fermented with different LAB strains

2.1.2 主成分分析

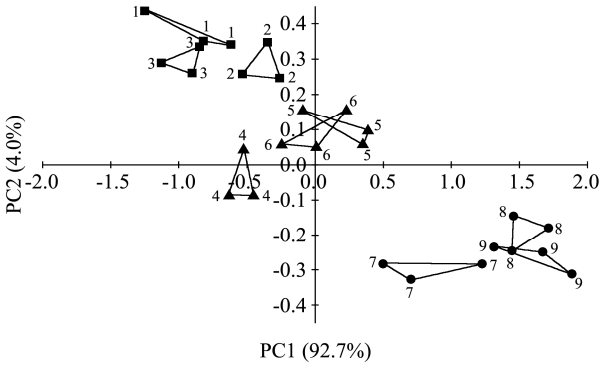


图 2 不同乳酸菌发酵的老酵馒头电子鼻检测结果主成分分析

Fig.2 PCA of volatile compounds in sourdough bread fermented with different LAB strains

注：1，发酵乳杆菌 Y3；2，罗伊氏乳杆菌 14；3，短乳杆菌 S8；4，植物乳杆菌 P8；5，干酪乳杆菌 5；6，鼠李糖乳杆菌 237；7，戊糖片球菌 S2；8，格氏乳杆菌 15；9，乳酸乳球菌 XA14。

主成分分析（PCA）的原理是设法将原来变量重新组合成一组新的互相无关的几个综合变量，同时根据实际需要从中可以取出几个较少的综合变量尽可能多地反映原来变量的信息的统计方法，也是一个降维过程。通过 PCA 分析图可以判定电子鼻是否能区分不同乳酸菌发酵的馒头样品的挥发性成分，PCA 分析见图 2。

图 2 中，PC1 和 PC2 代表通过主成分分析转换得到的第一主成分和第二主成分，其贡献率分别为 92.7%和 4.0%，贡献率越大，说明主要成分可以较好地反映原来多指标的信息。从图中可以看出，除了 5 号样品和 6 号样品，不同乳酸菌发酵的馒头样品挥发性物质成分区域没有交叉，这表明采用 PCA 方法可以将不同发酵剂发酵的馒头的挥发性物质较好的区分开。所有样品明显分成三类，专性异型发酵菌株（发酵乳杆菌 Y3；罗伊氏乳杆菌 14；短乳杆菌 S8）发酵的馒头样品 1、2 和 3 号聚为一类；样品 4、5 和 6 号使用的发酵菌株（植物乳杆菌 P8；干酪乳杆菌 5；鼠李糖乳杆菌 237）均为兼性异型乳酸发酵，所以气味相近，聚为一类；同型发酵菌株发酵的 7、8、9 号样品（格氏乳杆菌 15；戊糖片球菌 S2；乳酸乳球菌 XA14）聚为一类。并且由分布情况可以看出，专性异型发酵菌株发酵的样品的总体信息更接近于第二类，差异主要体现在 PC2（累积贡献率 4.0%），而与第三类样品差异较显著。由此可以说明：专性异型菌株发酵的馒头样品与兼性异型发酵样品的香气特征较接近，但二者与同型乳酸发酵的样品在气味上存在显著差异，这主要是由于乳酸菌代谢途径的不同，导致菌株在发酵过程中代谢产物的含量和种类存在较大差异，进而影响了产品加工过程中风味物质的形成。

2.1.3 聚类分析

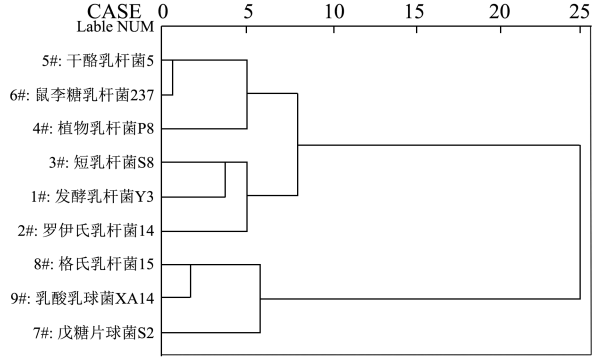


图 3 不同乳酸菌发酵的老酵馒头电子鼻检测结果聚类分析树状图

Fig.3 Dendrogram of multivariate comprehensive cluster analysis

为了进一步验证试验结果的准确性，本文还对 9 个馒头样品的电子鼻数据进行了聚类分析，图 3 为得到的层次聚类分析的树形图，其根据类间距离的大小进行分类，直观地显示了整个聚类过程。由图 3 可见，9 个馒头样品用电子鼻不同的传感器感应值作为聚类变量，间距为 25 时所有样品聚为一类。距离小于 8 时 9 个样品可分成 3 大类：样品 5 号和 6 号间的距离最小，先聚为一类，说明这 2 个样品的气味差异最小；在距离等于 5 处，5 号和 6 号又与 4 号聚为一类，同为兼性异型乳酸发酵，4 号的气味特征还是与另两者稍有差异，这与乳酸菌细微的代谢差异有关；同样，间距等于 5 时，专性异型乳酸发酵样品 1 号、2 号和 3 号也聚为一类；专性异型与兼性异型发酵样品在距离等于 8 时聚为一类；样品 7 号、8 号和 9 号于距离等于 6 时聚为一类，这 3 个样本与其它类之间的距离较大，间距距离均大于 15，这表明样品 7 号、8 号和 9 号的同型发酵样品的气味特征与另两类样品差异较大。

由此可见，采用专性异型菌株发酵制得馒头样品的香气特征与兼性异型菌株发酵制得的样品较近似，却与同型发酵菌株制得的产品存在显著差异，从而说明乳酸菌的发酵代谢类型与馒头的香气物质形成有着紧密的联系。

2.2 不同乳酸菌发酵的馒头气味感官评价结果

根据 1.3.4 所述的方法对 9 株乳酸菌分别制备的发馒头的 8 种气味特征的强度及消费者喜好度进行评

价，表 3 显示了对不同乳酸菌发酵饼干香气特征强度及消费者喜好度的评分。气味感官评定的结果显示，不同乳酸菌发酵的馒头的风味特征有所不同，但麦芽味和乳香味是最主要的两种特征气味。其中，发酵乳杆菌 Y3 和短乳杆菌 S8 同作为异型乳酸发酵菌株所制备的馒头表现突出，所得的感官评分较高，分别为 9.2 和 8.6 分。这两株乳酸菌制备的馒头具有较强烈的麦芽味、水果气味和乳香味这三种风味特征，这可能是其获得较高喜好度的原因。麦芽味和面味是馒头中普遍存在的气味，一般认为来自面粉原始气味；馒头中产生水果气味的基本化学物质是酯类，尤其是乙酯类[11]，它是乙醇和脂肪酸的反应产物；而 3-羟基-2-丁酮则赋予了馒头乳香味。经过感官评定，发现发酵乳杆菌 Y3 和短乳杆菌 S8 这两组馒头气味丰富而富有层次，具有浓郁的麦芽香气及乳香风味，同时酸味柔和。这与 Gobbetti M[4]等人得出的结论类似：异型发酵菌株发酵制备的烘焙制品酸味柔和，具有优良的感官品质。另一方面，植物乳杆菌 P8 及鼠李糖乳杆菌 237 这 2 株乳酸菌制作的馒头的喜好度得分较低，分别为 6.3 和 6.9 分。在这 2 组馒头的风味特征评分中醋味-气味的得分显著高于其他组，这与乳酸菌发酵过程中产生的乙酸和丁酸有关，Michael[12]等人关于不同发酵类型乳酸菌菌株研究中发现：植物乳杆菌发酵面包感官评价中酸度的评分较高，Katina K 等人[13]在关于不同乳酸菌发酵酸面包的研究中也发现由植物乳杆菌发酵的面包有一种不愉快的酸味，这可能是兼性菌株发酵样品喜好度得分较低的主要原因。由此可见，专性异型发酵菌株可赋予馒头更加丰富的香气组成，产品更容易被消费者所接受，对于产品感官品质的提升有着重要的作用，同时也为工业化馒头菌株发酵剂的开发奠定了理论研究基础。

表 3 乳酸菌发酵馒头香气特征及喜好度评分

Table 3 Evaluation of odor characteristics and preference of LAB-fermented steamed bread

样品	麦芽味	面味	发酵味	酒味	乳香味	水果气味	酸乳味	醋味气味	喜好度
1	5.40±0.42	3.00±0.12	5.00±0.31	3.60±0.40	4.40±0.25	4.20±0.20	4.40±0.25	2.60±0.20	9.20±0.20
2	4.20±0.25	2.80±0.20	4.20±0.06	3.20±0.15	4.20±0.25	3.40±0.15	3.60±0.25	1.60±0.15	8.40±0.15
3	4.40±0.30	3.00±0.30	4.60±0.25	3.80±0.30	4.60±0.30	3.60±0.25	4.00±0.30	2.00±0.20	8.60±0.25
4	3.20±0.12	2.80±0.12	2.80±0.15	2.40±0.06	2.20±0.31	2.60±0.12	2.80±0.13	3.00±0.25	6.30±0.25
5	3.40±0.22	3.20±0.20	3.80±0.03	2.80±0.12	2.60±0.20	3.40±0.15	3.20±0.20	2.20±0.10	7.90±0.35
6	3.60±0.25	3.20±0.30	3.60±0.10	2.60±0.25	2.80±0.42	2.40±0.31	2.60±0.11	2.40±0.20	6.90±0.30
7	3.80±0.15	3.80±0.15	4.20±0.15	3.40±0.20	3.00±0.25	2.00±0.12	3.00±0.42	2.00±0.15	8.20±0.20
8	3.60±0.20	3.60±0.25	3.40±0.15	3.00±0.20	2.80±0.15	1.40±0.15	2.40±0.15	1.40±0.15	8.00±0.15
9	3.40±0.15	4.00±0.31	3.60±0.25	2.60±0.31	2.20±0.20	1.40±0.06	2.60±0.31	2.40±0.20	7.50±0.25

注：1，发酵乳杆菌 Y3；2，罗伊氏乳杆菌 14；3，短乳杆菌 S8；4，植物乳杆菌 P8；5，干酪乳杆菌 5；6，鼠李糖乳杆菌 237；7，戊糖片球菌 S2；8，格氏乳杆菌 15；9，乳酸乳球菌 XA14。

2.3 不同乳酸菌发酵的馒头挥发性风味组分的气味模型

本文还对不同乳酸菌发酵制得馒头样品建立了气味分析模型。图 3 为乳酸菌发酵馒头特征气味感官评定的主成分分析图，图中数据为气味感官评价员对不同乳酸菌发酵的馒头的气味打分平均值（结果见表 3）。图中的实线轴为每种气味的变化大小，实线越长表明气味的变化越明显。

如图 4 所示：所有样品的分布大致分为三类，7、8 和 9 号样品都使用的同型发酵菌株，气味相近，特征风味中面味较重，聚为一类；异型发酵菌株发酵的馒头样品 1、2 和 3 号也聚为一类，代表风味为麦芽味、水果气味、酸乳味和乳香味，其次发酵味额酒味也突出；兼性发酵菌株 4、5 和 6 号样品聚为一类，其代表风味为醋味，在其他特征风味中表现并不突出。由同一种发酵类型乳酸菌发酵的样品特征风味相似，但在强度上也存在差异，如在兼性发酵区域可以发现 4 号样品的酸味风味强度，强于 6 号和 5 号样品。在感官评价中表现突出的异型发酵菌株 Y3 和 S8 发酵的样品，在图 4 中均处于风味最丰富的区域中，同时在麦芽味、水果气味、酒味和酸乳味等风味处都有较高强度表现，这与国外研究酸面团的学者得出的结论近似，即异型发酵菌株制备的烘焙产品风味表现更丰富[15]，这与异型乳酸发酵的代谢产物有着密切的关系，如乙酸乙酯、某些醇以及低风味阈值的醛类物质。酯类化合物气味浓郁，香气持久，低分子质量的酯类如乙酸乙酯一般具有芳香气味或特定水果香味；醇类化合物主要包括脂肪族醇、萜醇和芳香族醇等，如乙醇和 3-

甲基丁醇等被证实是馒头挥发性风味物质中重要组成部分；而醛类物质的香气浓烈，多为果香及花香，对馒头的特征风味有着重要影响。

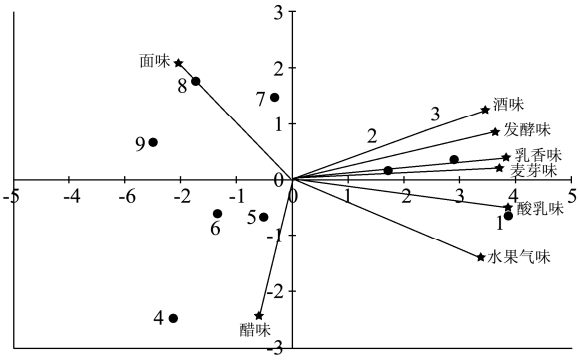


图 4 不同乳酸菌发酵馒头特征气味的 PCA 图

Fig.4 PCA analysis of the characteristic odors of different steamed bread samples

注：1，发酵乳杆菌 Y3；2，罗伊氏乳杆菌 14；3，短乳杆菌 S8；4，植物乳杆菌 P8；5，干酪乳杆菌 5；6，鼠李糖乳杆菌 237；7，戊糖片球菌 S2；8，格氏乳杆菌 15；9，乳酸乳球菌 XA14。

3 结论

3.1 本文通过采用电子鼻技术对不同乳酸菌发酵的馒头进行挥发性风味成分的比较分析，对电子鼻传感器信号数据进行主成分分析和聚类分析，结果表明同种发酵类型的样品聚为一类，所有样品在 PCA 图中划分为三类，专性异型发酵与兼性异型发酵菌株发酵的馒头分布较为接近，其差异主要体现在 PC2（累计贡献率仅为 4.0%），说明二者香气特征较为相似；而同型发酵与专性异型发酵菌株发酵样品相距较远，且差异主要体现在 PC1 上（贡献率达 92.7%），说明同型发酵菌株发酵的样品与其他两种类型香气特征差异显著。这主要是由于乳酸菌代谢途径的不同，导致菌株在发酵过程中代谢产物的含量和种类存在较大差异，进而影响了产品加工过程中风味物质的形成。

3.2 为了进一步验证电子鼻分析测试的准确性，本文还通过感官评价发现，发酵乳杆菌 Y3 和短乳杆菌 S8 发酵的两组馒头气味丰富而富有层次，具有浓郁的麦芽香气及乳香风味，同时酸味柔和，获得的喜爱度评分最高。通过气味模型建立，发现两者均处于风味最丰富的区域附近，除了特征风味，在水果气味和酒味等风味区域也有较高强度表现。而戊糖片球菌 S2 等同型发酵的样品的的特征风味为面味；植物乳杆菌 P8 等兼性发酵乳酸菌制作的馒头的喜好度得分较低，且代表风味为醋味，这与兼性异型乳酸菌发酵过程中产生的乙酸和丁酸有关。

3.3 综上所述，采用电子鼻分析测试方法可简单直观的反映出馒头中感官风味差异性，测试方便，快捷。经感官分析得出：专性异型发酵菌株更有助于馒头风味的改善，为工业化菌种发酵剂的开发奠定了理论研究基础。

参考文献

[1] Y Kim, W Huang, H Zhu, et al. Spontaneous sourdough processing of Chinese northern-style steamed breads and their volatile compounds [J]. Food Chemistry, 2009, 114(2): 685-692

[2] 李里特,薛佳.论传统小麦面食的现代化与工业化[J].粮食与食品工业,2010,17(5):7-10
LI Li-te, XUE Jia. Study on the modernization and industrialization of traditional wheat flour [J]. Cereal and Food Industry, 2010, 17(5): 7-10

[3] Hammes W P, Gänzle M G. Sourdough breads and related products [J]. Fermented Foods, 1998, 1: 199-216

[4] Gobbetti M, Rizzello C G, Cango R D, et al. How the sourdough may affect the functional features of leavened baked goods [J]. Food Microbiology, 2014, 37(5): 30-40

[5] Giusi Ventimiglia, Antonio Alfonzo, Paola Galluzzo. Codominance of *Lactobacillus plantarum* and obligate heterofermentative lactic acid bacteria during sourdough fermentation [J]. Food Microbiology, 2015, 51: 57-68

[6] Corsetti A, Settanni L. *Lactobacilli* in sourdough fermentation [J]. Food Research International, 2007, 40(5): 539-558

[7] E J Yang, H C Chang. Purification of a new antifungal compound produced by *Lactobacillus plantarum* AF1 isolated from kimchi [J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 139(1-2): 56-63

[8] 韩德权,孙庆申,李冰,等.复合发酵剂馒头和单一酵母馒头风味物质比较[J].食品科学,2012,33(2):240-242
HAN De-quan, SUN Qing-shen, LI Bing, et al. Comparison of flavor compounds of complex and single fermentation in steamed bread [J]. Food Science, 2012, 33(2): 240-242

（下转第 190 页）