

传统甜面包和醪糟青稞面包的品质和风味特征差异性分析

王富¹, 朱开宪², 李耀¹, 程万兴¹, 顾思远², 邓静², 吴华昌^{2*}

(1. 四川旅游学院烹饪学院, 四川成都 610100)

(2. 四川旅游学院烹饪科学四川省高等学校重点实验室, 四川成都 610100)

摘要: 青稞面包是一种新颖的粗粮面包, 深受人们的喜爱。采用感官评价、电子鼻结合气相离子迁移技术, 分析两种面包(醪糟青稞面包、甜面包)的品质和挥发性风味物质的差异。感官评价表明两种面包在气味维度上差异较大。根据比容结果发现甜面包具有较大的比容。电子鼻结果表明, 两种面包整体风味差异较大, 其中醪糟青稞面包在传感器上的响应值较高。GC-IMS 结果表明, 在两种面包中共鉴定出 41 种化合物, 其中醇类和醛类是主要的化合物, 醪糟和青稞的加入会增加面包中酯类和醇类的含量, 而降低酮类的含量 ($P<0.05$), 通过 OPLS-DA 和 ROAV 共筛选出 6 种差异性化合物(异戊醇-D、异戊醇-M、2,6-二甲吡啶、仲辛酮、乙酸乙酯-D、丁苯), 说明这些物质对区分醪糟青稞面包和普通甜面包的具有重要贡献作用。通过 Spearman 相关性发现, 异戊醇-D、2,6-二甲吡啶、丁苯、乙酸乙酯-D 与电子鼻的 T、P 传感器具有较高的正相关性。该研究为合理区分不同面包类型及开发新型粗粮面包提供数据支撑和参考。

关键词: 青稞面包; 醪糟; 电子鼻; GC-IMS; OPLS-DA

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0773

Analysis on the Difference of Quality and Flavor Characteristics Between Traditional Sweet Bread and Glutinous Barley Bread

WANG Fu¹, ZHU Kaixian², LI Yao¹, CHENG Wanxing¹, GU Siyuan², DENG Jing², WU Huachang^{2*}

(1. Culinary college, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

(2. Culinary Science Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

Abstract: Laozhao highland barley bread is a kind of novel coarse grain bread, which is deeply loved by people. Using sensory evaluation, electronic nose combined with gas ion mobility technology, the quality and volatile flavor compounds of two kinds of bread (Laozhao highland barley bread and sweet bread) were analyzed. Sensory evaluation showed that two kinds of bread on the smell dimension differences, and sweet bread has a larger volume. The results of the electronic nose showed that the overall flavor of the two kinds of bread was quite different, and the response value of the Laozhao highland barley bread on the sensor was higher. GC-IMS results show that the two kinds of bread of identified 41 compounds, alcohols and aldehydes were the main compounds, Laozhao and highland barley can increase the ester and alcohol content in the bread, and cut down the content of ketones ($P<0.05$). Six different compounds (isoamylol-D, isoamylol-M, 2,6-dimethylpyridine, octanone, ethyl acetate-D, butylbenzene) were screened by OPLS-DA and ROAV, indicating that these substances had an important contribution to distinguish the highland barley bread from ordinary sweet bread. Through Spearman correlation, it was found that isoamylol-D, 2,6-dimethylpyridine, butylbenzene, ethyl acetate-D had a high positive correlation with the T and P sensors of the electronic nose. This study provided data support and reference for reasonable differentiation of different bread types and development of new whole grain bread.

Key words: highland barley bread; glutinous rice; electronic nose; GC-IMS; OPLS-DA

烘焙产品是世界上消费最广泛的食物之一, 面包消费市场巨大, 全球每年消费超过 90 亿公斤^[1]。目前传统的

收稿日期: 2024-06-02; 修回日期: 2024-08-22; 接受日期: 2024-08-29

项目基金: 四川省科技计划资助项目(2023ZYD0079); 川菜工业化关键工艺技术研究项目(GCZX22-14); 四川省大学生创新创业项目(2024XKZ18)

作者简介: 王富(1971-), 男, 本科, 高级技师, 研究方向: 食品科学与加工方向, E-mail: 531838726@qq.com

通讯作者: 吴华昌(1970-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 发酵食品加工原理与技术, E-mail: whc3930590@sina.com

面包大多以小麦粉为原料制作,导致面包缺乏膳食纤维、维生素和矿物质等营养物^[2]。为满足人们健康饮食的需要,世界范围内开始生产各种粗粮面包,如青稞面包、藜麦面包、荞麦面包、绿豆面包等^[3,4]。青稞是优质粗粮,具有“三高二低”(高蛋白质、高纤维、高维生素、低脂肪、低糖)的特点,为谷类中的佳品,青稞的营养结构很大程度上符合人们的需求^[5]。在食品生产行业,青稞主要以青稞粉的形式添加到各种食品中,用量可达 30%至 60%^[6]。但因青稞粉口感粗糙,几乎不含面筋,难以发酵,导致单一青稞面包风味特性差^[7]。醪糟是中国传统的一种发酵食品,其含丰富的营养物质和风味物质,同时还含有大量的微生物,可促进青稞面包的发酵。因此探索青稞与醪糟的结合对面包风味品质的改良是本研究的重点。

青稞作为我国西藏地区特有的粮食作物,具有很大的开发价值,但因其口感粗糙,同时其风味相对其他杂粮偏弱,开发难度较大^[8]。目前关于青稞的开发与应用的研究还比较少。黄冰羽^[9]研究青稞粉对青稞-小麦混合面粉的面团特性的影响,发现随着青稞粉添加量的增加,面团的硬度增加,弹性下降,同时面团中湿面筋的含量也在下降。有研究表明^[7],青稞粉在面包中的添加量为 3%~50%,但当青稞粉添加量超过 10%后,会大大影响面包的发酵,需要加入辅助发酵,添加能增大面包体积的面包改良剂等。王宝贝等^[10]研究小球藻对青稞面包品质的影响及其抗氧化特性,发现青稞面包的比容随着藻粉添加量的增加而减小。同时藻粉的添加对青稞面包含水量影响不大,但却能在一定程度上延缓面包水分散失。Liu 等^[11]分析菊粉对青稞面团网络结构和面包品质的影响,发现菊粉有利于面团中面筋的形成,同时使得面包具有更大的比体积和更柔软的质地。He 等^[12]研究蛋清、蛋黄、全蛋对青稞面团的结构和面包品质的影响,发现蛋粉会使面团质地更柔软,面包的比容更大;同时,含有蛋黄的青稞面包具有更多的风味物质和更好的面包屑结构。因此青稞在面包中应用比较广,但对青稞面包中的风味物质还需进一步分析。

基于此,本研究以普通甜面包为对照,采用感官评价、质构分析、电子鼻结合气相离子迁移技术研究醪糟青稞面包和普通甜面包的品质和风味特性差异,通过 ROAV 和 OPLS-DA 筛选出两种面包中的差异性化合物,为合理区分不同面包类型及开发新型粗粮面包提供数据支撑和参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料

金焙 1 号高筋面粉,厦门海嘉面粉有限公司;安佳黄油,恒天然商贸(上海)有限公司;久大低钠盐,四川久大制盐有限责任公司;安琪半干酵母,安琪酵母股份有限公司;蔗糖,广东中轻糖业集团;安琪面包改良剂,安琪酵母股份有限公司;雀巢脱脂奶粉,双城雀巢有限公司;欧福牌蛋液,太阳食品(天津)有限公司;米婆婆醪糟,湖北米婆婆生物科技股份有限公司;青稞膨化粉,四川省旌晶食品有限公司。

1.1.2 仪器设备

乐祺 LQ-C30001 电子天平,昆山优科维特电子科技有限公司;SINMAG SM-20SP 型恒温醒发箱,新麦机械(中国)有限公司;SINMAG SM2-25 和面机,新麦机械(中国)有限公司;SINMAG SM2-523H 烤箱,新麦机械(中国)有限公司;FOX 4000 型电子鼻,法国 Alpha MOS 公司;气相色谱离子迁移谱仪(FlavourSpec®),德国 G.A.S.公司。TA.XT Plus 型物性测试仪,英国 Stable Micro Systems 公司。

1.2 方法

1.2.1 面包的制作

按照表 1 配方将各种配料混合成团,分别按照低速(2 min)、高速(8 min)、低速(1 min)的模式,搅拌均匀;加入黄油后,重复上述搅拌模式,搅拌均匀后取出面团,并准确分割成 80 g/个的面团,揉圆整形。

面包烘烤:发酵温度 25℃,发酵湿度 75%,在醒发箱内醒发 40 min,烤箱上火温度 230℃,下火温度 180℃,烘烤 15 min。

表 1 两种面包的制作配方

Table 1 Recipe for two kinds of bread

面包类型	添加量/g										
	水	高筋粉	青稞膨化粉	糖	盐	奶粉	酵母	改良剂	鸡蛋	黄油	醪糟
醪糟青稞面包	400	1 000	150	180	12	40	15	6	60	100	300
甜面包	400	1 000	0	180	12	40	15	6	60	100	0

1.2.2 感官评价

选 20 名（10 男，10 女）经过专业学习的食品专业人员对面包从外观形态、表面色泽、口感、气味和口感进行感官评价。

表 2 面包感官评分表

Table 2 Bread sensory rating scale

项目	评分标准	分值/分
外观形态 (20 分)	外形饱满，表面光滑，无裂痕	20~16
	比容较小，表面有褶皱	10~15
	比容小且表面塌陷	0~9
表面色泽 (20 分)	色泽棕黄色，且颜色均匀	20~16
	色泽呈黄色，表皮略微有焦黑	10~15
	不呈棕黄色，表皮焦黑	0~9
组织 (20 分)	有弹性，气孔呈海绵状	20~16
	有弹性，气孔大小不一	10~15
	无弹性，组织疏松	0~9
气味 (20 分)	面包香味浓郁	20~16
	面包香味较淡	10~15
	面包香味较淡，无明显青稞香味	0~9
口感 (20 分)	松软，咀嚼后不黏牙，无苦味	20~16
	口感偏硬，咀嚼后轻微黏牙，轻微苦味	10~15
	口感粗糙且发苦，黏牙	0~9

1.2.3 面包比容的测定

将待测面包样品称量后置于容器中，用小米完全覆盖并摇实，刮平表面。取出面包后用量筒量取小米体积，容器体积与小米体积的差值即为面包体积（V）。比容计算公式如下：

$$P = \frac{V}{M}$$

(1)

式中，
V——表示面包的体积（mL）；
M——表示面包的质量（g）。

1.2.4 面包质构特性的分析

参考丁双鲲^[8]的方法，将冷却后的面包进行切片，取中间部位的面包进行全质构分析测定，设置测定参数：探头型号为 P36/R 圆柱形探头；测前速度为 2 mm/s，测中速度为 1 mm/s，测后速度为 1 mm/s；触发力为 0.38 N，形变量为 30%，选取硬度、内聚性、弹性和咀嚼性为检测指标。

1.2.5 电子鼻分析

准确称取 2 g 粉碎的样品于 10 mL 样品瓶中，加盖密封，放入顶空加热器中，60 ℃加热 5 min，取 1 mL 气体手动进样，进样速度为 1 mL/s，数据采集时间 2 min，数据采集延迟 3 min，每个样品测试 3 个平行。

1.2.6 GC-IMS 分析

GC 条件：色谱柱温度 60℃，载气：N₂ (纯度>99.99%)，流速：0-5 min 为 5 mL/min，15-45 min 为 150 mL/min

IMS 条件: 准确称取 2 g 样品, 于 20 mL 顶空瓶, 加盖密封, 孵化温度 60 ℃, 孵化时间 10 min, 采用顶空固相萃取方法, 自动进样。

1.2.7 ROAV 分析

相对气味活度值用来评价化合物对整体风味的贡献程度, 一般而言, ROAV>1 则表明该物质可判定为特征性风味物质, 对整体风味的贡献度较大; 0.1<ROAV<1 则表明物质对整体风味的呈现具有修饰作用; 当 ROAV<0.1 则说明该物质对整体风味呈现的作用较小^[13]。计算公式为:

$$ROAV = \frac{C_i}{T_i} \times \frac{T_{max}}{C_{max}} \times 100 \quad (2)$$

式中:

C_i ——为待测化合物的相对含量(%)

T_i ——为待测化合物的阈值;

T_{max}/C_{max} ——为待测化合物中 C_i/T_i 最大的化合物。

1.2.8 数据处理

所有样品取 3 个平行, GC-IMS 的数据利用仪器自带的数据库(NIST 和 IMS)进行定性分析, 利用软件的插件 Gallery 进行指纹图谱分析; OPLS-DA 利用 SIMCA 14.1 进行分析处理; 主成分分析采用 Origin 2023 b 进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 醪糟青稞面包与甜面包的感官分析

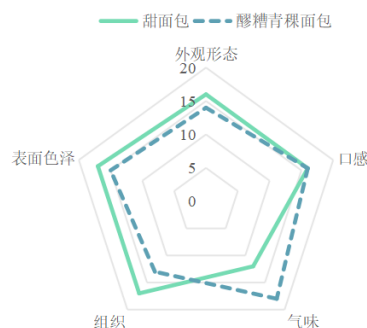


图 1 醪糟青稞面包和甜面包的感官分析

Fig.1 Laozhao highland barley bread and sensory analysis of sweet bread

从外观状态、表面色泽、组织、气味和口感五个维度评价醪糟青稞面包和甜面包之间的感官差异。由图 1 可知, 两种面包整体轮廓具有差异, 其中甜面包在外观状态、表面色泽、组织维度的感官得分较高, 而醪糟青稞面包则在气味维度上具有较高的得分, 为 18 分, 说明青稞粉和醪糟的加入会丰富面包的整体香气, 使其感官得分较高。

2.2 醪糟青稞面包与甜面包的比容差异

为进一步观察青稞添加至面包中对面团发酵、面包持气能力的影响, 对面包比容进行了测定。由图 2 可知, 甜面包和醪糟青稞面包的比容具有显著性差异 ($P<0.05$), 分别为 4.50、3.91, 其中甜面包的比容比醪糟青稞面包的比容大, 说明面包中加入青稞可能会影响面团的持气能力和面团发酵, 进而影响最终面包的体积。面筋蛋白网络结构有利于截留二氧化碳, 使面包形成多孔结构, 青稞膨化粉的加入可能给面包中的面筋蛋白网络结构带来了不利的影响, 导致面包持气能力降低^[14]。

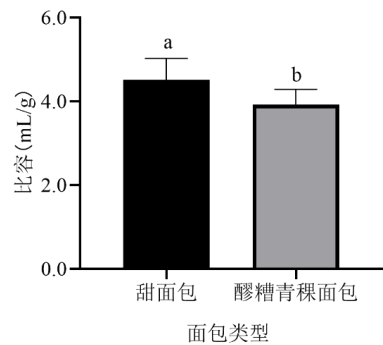


图 2 醪糟青稞面包和甜面包的比容

Fig.2 The specific volume of Laozhao highland barley bread and sweet bread

注：小写字母代表显著性差异， $P<0.05$ ，下同。

2.3 醪糟青稞面包与甜面包的质构特性

表 3 醪糟青稞面包与甜面包的质构特性

Table 3 Texture characteristics of Laozhao highland barley bread and sweet bread

样品	硬度/N	内聚性	弹性/mm	咀嚼性/mJ
甜面包	25.69±2.68 ^a	0.40±0.01 ^a	20.10±2.02 ^a	208.10±39.58 ^a
醪糟青稞面包	22.15±1.45 ^a	0.39±0.00 ^a	16.95±1.00 ^a	196.57±32.40 ^a

注：小写字母代表显著性差异， $P<0.05$ 。下表同。

对比分析两种面包（醪糟青稞面包、甜面包）在硬度、内聚性、弹性和咀嚼性上的差异，由表 3 可知，两种面包的质构特性差异较小，不具有显著性差异（ $P>0.05$ ）。有研究表明^[3]，当青稞添加量小于 10%时，对面包质构特性没有显著性影响，而当青稞膨化粉添加量继续增加时，硬度和咀嚼性的值增大，而弹性、回复性、内聚性等值减小，最终影响样品整体感官接受度。

2.4 电子鼻分析

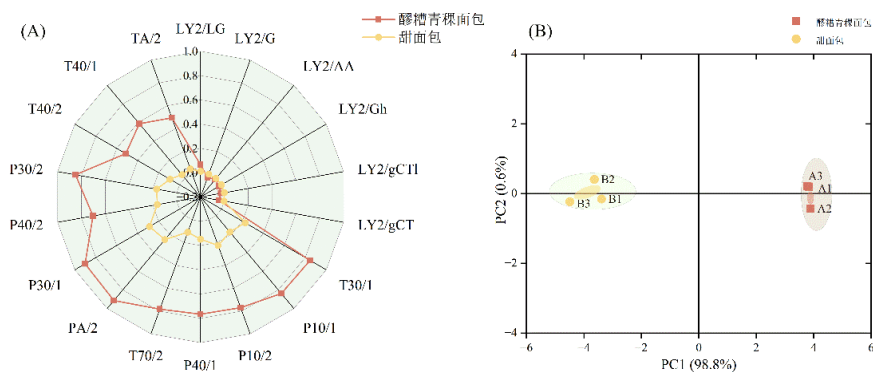


图 3 基于电子鼻分析两种面包之间的整体风味差异，(A) 雷达图，(B) 主成分分析

Fig.3 The overall flavor differences between the two breads were analyzed based on the electronic nose, (A) Radar map (B) Principal component analysis

风味是评价面包品质的重要指标。电子鼻是一种智能感官技术，能区分不同类型面包的整体风味特性。如图 3A 所示，两种面包整体风味差异较大，尤其在 T、P 传感器上具有显著性差异（ $P<0.05$ ），其中 P 传感器主要对氧化能力较强和非极性化合物较敏感，比如一些烷烃和甲硫醇等物质；而 T 传感器上主要对有机化合物和芳香族化合物敏感，醪糟青稞面包在传感器上的响应值均高于甜面包，说明醪糟青稞面包的风味比普通甜面包的风味更佳。

同理，采用主成分分析两种面包之间的整体风味差异，由图 3B 可知，PC1=98.8%，PC2=0.6%，累计贡献大于 85%，说明数据可靠。在 PC1 上，样品 A、B 具有较远的距离，说明醪糟青稞面包与普通甜面包的风味特性差异较大，与雷达图结果一致。醪糟是一种典型的发酵食品，由于微生物的作用，使得其含有大量的醇类物质，加入进面包中，使得面包也具有淡淡的醇香味^[15]。青稞不仅营养的丰富，同时还具有一定的苦涩味，通过与醪糟的结合可以很好的改善其口感，使得面包的整体风味更佳。电子鼻只能对样品的整体风味特性进行区分，而不能对挥发性化合物进行定性定量分析，要确定醪糟和青稞膨化粉对甜面包中挥发性化合物的影响，还需进一步结合其他风味分析仪器。

2.5 GC-IMS 分析

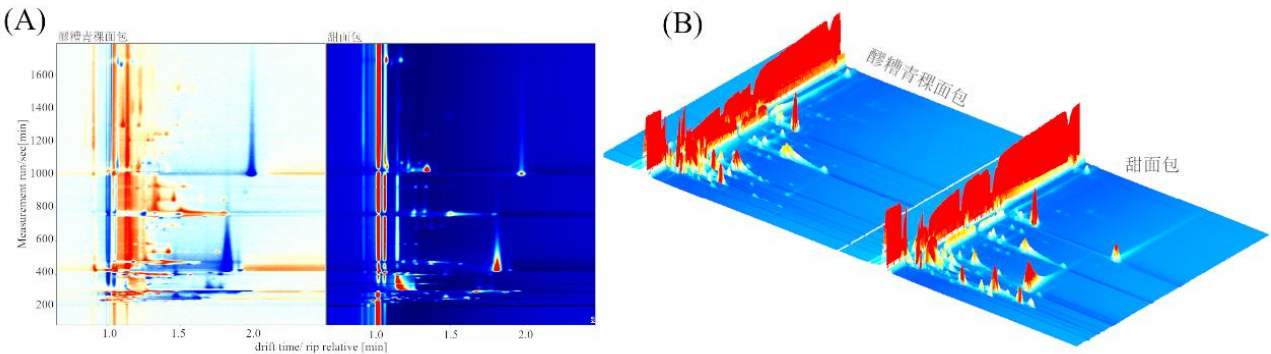


图 4 基于 GC-IMS 分析面包中的挥发性化合物 (A) 2D 谱图, (B) 3D 谱图

Fig.4 Analysis of volatile compounds in bread based on GC-IMS (A) 2D spectrum and (B) 3D spectrum

GC-IMS 可对面包中的挥发性化合物进行定性定量分析，并且具有高效快捷、样品不需要前处理等优点^[16]。如图 4 所示，图中的每个点代表一种化合物，其中红色表示化合物浓度较高，而蓝色则代表化合物浓度低^[17]。与普通面包相比，醪糟青稞面包中乙醇含量更高，形成较高浓度的乙醇二聚体峰。除此之外，面包中加入一定比例的青稞和醪糟之后会丰富样品中化合物的种类和数量。同理，在 3D 图谱中可以看出，两种面包之间挥发性化合物具有差异，其中醪糟青稞面包中化合物的峰体积更高，且信号峰的数量也更多，说明醪糟青稞面包中化合物的数量会更多。

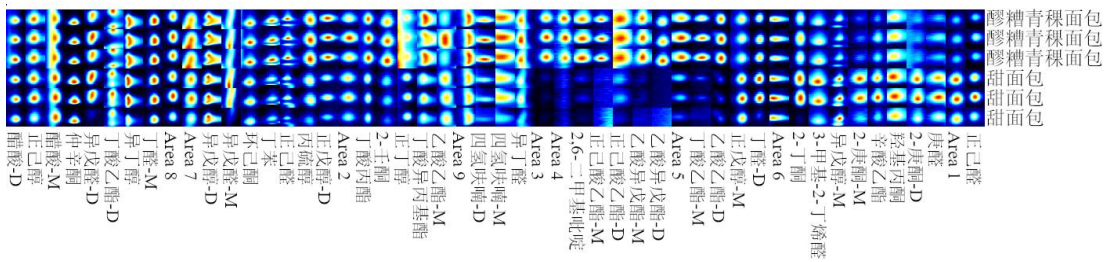


图 5 醪糟青稞面包和甜面包的指纹图谱

Fig.5 Fingerprint of Laozhao highland barley bread and sweet bread

为进一步分析两种面包之间的挥发性风味物质的差异，构建风味指纹图谱，由图 5 及表 4 可知，在两个样品中共检测出 50 种化合物，通过数据库比对共定性出 41 种化合物，其中包括 8 种醇类、9 种醛类、7 种酮类、2 种酸类、11 种酯类和 4 种其他。根据化合物在样品之间的变化趋势，可大致将化合物分为 4 类，其中一类化合物在两种面包中均保持较高的含量，比如 2-壬酮、丁酸丙酯、正戊醇-D、丙硫醇、正己醛、丁苯、环己酮、异戊醛-M、异戊醇-D、丁醛-M、异丁醇、丁酸乙酯-D、异戊醛-D、仲辛酮、醋酸-M、正己醇、醋酸-D。而异丁醛、四氢呋喃-M、四氢呋喃-D、乙酸乙酯-M、丁酸异丙基酯、正丁醇在醪糟青稞面包中含量较高，在普通甜面包中的含量则较低；正己醛、庚醛、2-庚酮-D、羟基丙酮、辛酸乙酯、2-庚酮-M、异戊醇-M、3-甲基-2-丁烯醛、2-丁酮、丁醛-D、正戊醇-M 则具有相反的变化趋势，这些化合物在普通甜面包中的含量高于在醪糟青稞面包。乙酸乙酯-D、丁酸乙酯-M、乙酸异戊酯-D、乙酸异戊酯-M、正己酸乙酯-D、正己酸乙酯-M、2,6-二甲基吡啶、异丁醛只在醪糟

青稞面包中具有较高的含量，说明这部分物质是两种面包的差异化化合物，可能由青稞和醪糟的加入而形成的。

面包风味物质的形成主要在发酵阶段和烘焙阶段，在发酵阶段，由于微生物的发酵作用，将面团中的碳水化合物等营养物质分解，形成其他风味物质或风味前体物质，如醇类、酸类等物质，从而丰富面团的风味特性^[18,19]；另一方面，在烘焙阶段，面团在高温下会发生美拉德反应，形成诱人的褐色和浓郁的面包香气，除此之外，在加热过程中，面团中的各种成分也会发生降解，如脂质的热降解、糖类的降解和氨基酸的降解，从而形成大量的风味物质，如醇类、醛类、酮类和吡嗪类物质，赋予面包独特的风味^[20,21]。

醇类，是面包中重要一种风味物质，具有浓郁的醇香风味，通过面团的微生物发酵过程所形成。在醪糟青稞面包和甜面包中醇类物质的含量分别为 29.49%、28.15%，是样品中含量最高的一类物质，并且在两种面包中，醇类物质的含量具有显著性差异（ $P<0.05$ ），其中醪糟青稞面包中的醇类物质含量更高，说明在面包中适当加入青稞和醪糟有助于醇类物质的积累，可能是醪糟中本身含有大量的醇类物质。异戊醇-D 和异丁醇是样品中含量较丰富的两种醇类物质。

酮类，是脂肪氧化产物和美拉德反应的产物，对风味具有修饰作用^[22]。在醪糟青稞面包和甜面包中酮类物质的含量分别为 19.86%、26.07%，酮类物质在两种面包中具有显著性差异（ $P<0.05$ ），且醪糟青稞面包中酮类物质的含量低于普通甜面包，说明醪糟和青稞的加入不利于酮类物质的积累。样品中仲辛酮是含量较丰富的一种酮类物质，呈苹果似香气。

酸类，主要通过面团的微生物发酵过程形成，在样品中仅仅检测到醋酸-D、和醋酸-M，并且在酸类物质在两个样品之间的差异较小，说明青稞和醪糟的加入可能对酸类物质的影响较小。

醛类，阈值较低，对面包的整体风味具有较高的贡献作用。其中丁醛和正己醛是样品中含量较丰富的醛类物质，主要源于原料中不饱和脂肪酸在内源性过氧化物酶和脂氧合酶的催化作用下生成的氧化产物^[23]。而有报道称正己醛可能与面包的香气成负相关^[24]。醛类在醪糟青稞面包和普通甜面包之间的含量差异不显著（ $P>0.05$ ），说明青稞和醪糟对面包中醛类物质的形成影响较小。

酯类，具有浓郁的果香味，是发酵食品中重要一种风味物质。酯类物质在醪糟青稞面包中的含量（12.02%）显著高于普通甜面包（8.83%），说明醪糟和青稞的加入可能会促进面包中酯类化合物的形成。关天琪等^[25]研究两种粗粮面包中挥发性化合物的差异，发现粗粮面包中的挥发性化合物以醛类、酯类和醇类为主。面包中的不饱和脂肪酸通过氧化产生的过氧化物然后分解形成酮、醛等羰基化合物，以及有机酸等挥发性化合物，可以使面包具有令人愉快的风味^[26]。

表 4 醪糟青稞面包和甜面包中挥发性化合物定性定量表

Table 4 Qualitative determination of volatile compounds in Laozhao highland barley bread and sweet bread							
化合物	Rt [sec]	CAS	分子式	RI	Dt [a.u.]	相对含量/%	
						醪糟青稞面包	甜面包
正丁醇	584.726	71-36-3	C ₄ H ₁₀ O	1148.8	1.17992	0.76±0.05 ^a	0.49±0.03 ^b
正己醇	1246.106	111-27-3	C ₆ H ₁₄ O	1371	1.33297	0.67±0.02 ^a	0.63±0.07 ^a
异戊醇-D	761.431	123-51-3	C ₅ H ₁₂ O	1216	1.49749	14.67±0.26 ^a	12.81±0.69 ^b
异戊醇-M	761.431	123-51-3	C ₅ H ₁₂ O	1216	1.24643	3.89±0.14 ^b	6.08±0.80 ^a
正戊醇-D	926.379	71-41-0	C ₅ H ₁₂ O	1266.7	1.51021	0.50±0.01 ^a	0.36±0.03 ^b
正戊醇-M	921.981	71-41-0	C ₅ H ₁₂ O	1265.4	1.258	1.04±0.05 ^b	1.27±0.08 ^a
丙硫醇	264.98	107-03-9	C ₃ H ₈ S	859.9	1.17627	0.32±0.01 ^a	0.23±0.05 ^b
异丁醇	479.055	78-83-1	C ₄ H ₁₀ O	1102.5	1.37261	7.64±0.07 ^a	6.27±1.05 ^a
醇类						29.49±0.53 ^a	28.15±0.40 ^b
2,6-二甲基吡啶	848.304	108-48-5	C ₇ H ₉ N	1242.7	1.45236	0.83±0.02 ^a	0.21±0.03 ^b
丁苯	1026.877	104-51-8	C ₁₀ H ₁₄	1297.8	1.21046	6.84±0.17 ^a	5.90±0.20 ^b
四氢呋喃-D	264.36	109-99-9	C ₄ H ₈ O	858.9	1.2288	0.12±0.01 ^a	0.09±0.01 ^b
四氢呋喃-M	265.871	109-99-9	C ₄ H ₈ O	861.5	1.0649	0.12±0.00 ^a	0.12±0.01 ^a
其他						7.91±0.16 ^a	6.32±0.17 ^b

化合物	Rt [sec]	CAS	分子式	RI	Dt [a.u.]	相对含量/%	
						醪糟青稞面包	甜面包
正己醛-D	466.038	66-25-1	C ₆ H ₁₂ O	1096.7	1.5638	0.61 ±0.07 ^a	0.90 ±0.21 ^a
正己醛-M	473.695	66-25-1	C ₆ H ₁₂ O	1100.2	1.25971	4.12 ±0.06 ^a	3.47 ±0.39 ^b
异丁醛	241.935	78-84-2	C ₄ H ₈ O	819.8	1.09174	0.33 ±0.01 ^a	0.28 ±0.01 ^b
异戊醛-D	303.114	590-86-3	C ₅ H ₁₀ O	926.3	1.40228	1.93 ±0.16 ^a	1.63 ±0.99 ^a
异戊醛-M	302.451	590-86-3	C ₅ H ₁₀ O	925.1	1.15963	0.31 ±0.03 ^a	0.34 ±0.14 ^a
3-甲基-2-丁烯醛	683.355	107-86-8	C ₅ H ₈ O	1192	1.36559	0.63 ±0.01 ^b	0.85 ±0.15 ^a
丁醛-D	257.851	123-72-8	C ₄ H ₈ O	847.5	1.28245	0.46 ±0.01 ^a	0.55 ±0.24 ^a
丁醛-M	260.007	123-72-8	C ₄ H ₈ O	851.3	1.1132	4.71 ±0.12 ^a	4.62 ±0.42 ^a
庚醛	693.252	111-71-7	C ₇ H ₁₄ O	1195.1	1.33089	0.18 ±0.02 ^b	0.33 ±0.04 ^a
醛类						13.29 ±0.21 ^a	12.97 ±2.52 ^a
醋酸-D	1688.376	64-19-7	C ₂ H ₄ O ₂	1518.5	1.15795	4.96 ±0.39 ^a	4.43 ±0.30 ^a
醋酸-M	1684.564	64-19-7	C ₂ H ₄ O ₂	1517.2	1.05613	12.47 ±0.12 ^a	13.24 ±1.39 ^a
酸类						17.43 ±0.48 ^a	17.67 ±1.69 ^a
羟基丙酮	1030.847	116-09-6	C ₃ H ₆ O ₂	1299.2	1.23718	1.50 ±0.04 ^b	2.24 ±0.06 ^a
2-丁酮	295.985	78-93-3	C ₄ H ₈ O	913.9	1.2525	0.57 ±0.04 ^a	0.61 ±0.44 ^a
2-庚酮-D	683.355	110-43-0	C ₇ H ₁₄ O	1192	1.63747	0.44 ±0.01 ^b	0.74 ±0.09 ^a
2-庚酮-M	688.853	110-43-0	C ₇ H ₁₄ O	1193.7	1.26147	0.10 ±0.01 ^b	0.22 ±0.06 ^a
2-壬酮	1242.293	821-55-6	C ₉ H ₁₈ O	1369.7	1.39661	0.50 ±0.02 ^a	0.32 ±0.02 ^b
仲辛酮	1036.409	111-13-7	C ₈ H ₁₆ O	1301	1.3457	15.02 ±0.24 ^b	20.32 ±0.60 ^a
环己酮	1072.629	108-94-1	C ₆ H ₁₀ O	1313.1	1.16114	1.74 ±0.03 ^a	1.61 ±0.06 ^b
酮类						19.86 ±0.31 ^b	26.07 ±0.11 ^a
乙酸异戊酯-D	532.656	123-92-2	C ₇ H ₁₄ O ₂	1126	1.75048	0.28 ±0.04 ^a	0.09 ±0.04 ^b
乙酸异戊酯-M	535.719	123-92-2	C ₇ H ₁₄ O ₂	1127.4	1.3124	0.45 ±0.02 ^a	0.11 ±0.02 ^b
乙酸乙酯-D	287.861	141-78-6	C ₄ H ₈ O ₂	899.7	1.33937	2.12 ±0.17 ^a	0.67 ±0.21 ^b
乙酸乙酯-M	287.695	141-78-6	C ₄ H ₈ O ₂	899.4	1.09373	0.31 ±0.15 ^a	0.40 ±0.01 ^a
丁酸乙酯-D	397.662	105-54-4	C ₆ H ₁₂ O ₂	1040.7	1.5616	1.93 ±0.10 ^b	2.68 ±0.12 ^a
丁酸乙酯-M	400.52	105-54-4	C ₆ H ₁₂ O ₂	1043	1.20293	0.23 ±0.03 ^a	0.09 ±0.01 ^b
丁酸丙酯	586.258	105-66-8	C ₇ H ₁₄ O ₂	1149.5	1.27175	1.19 ±0.02 ^a	0.80 ±0.01 ^b
正己酸乙酯-D	850.503	123-66-0	C ₈ H ₁₆ O ₂	1243.4	1.79597	0.55 ±0.03 ^a	0.20 ±0.05 ^b
正己酸乙酯-M	853.802	123-66-0	C ₈ H ₁₆ O ₂	1244.4	1.34361	0.32 ±0.00 ^a	0.21 ±0.10 ^a
辛酸乙酯	1349.048	106-32-1	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	1405.3	1.48412	0.58 ±0.11 ^a	0.93 ±0.18 ^a
丁酸异丙基酯	400.928	638-11-9	C ₇ H ₁₄ O ₂	1043.3	1.2523	4.05 ±0.13 ^a	2.65 ±0.10 ^b
酯类						12.02 ±0.21 ^a	8.83 ±0.37 ^b

2.6 OPLS-DA 分析

正交偏最小二乘分析（OPLS-DA）作为一种有监督的判别分析统计方法，可用于建立挥发性风味物质与样品类别的关联模型，以实现样品类别预测^[27,28]。如图 6 所示，R2X1=0.727，R2X2=0.242，累计贡献大于 85%，说明模型具有较高的可靠性，在得分图中，样品 A 与 B 距离较远，说明醪糟青稞面包与普通甜面包的整体风味差异较大，与电子鼻结果吻合。为进一步验证模型的可靠性，进行 200 次交叉验证，其中 R² 的斜率大于 0，Q² 的截距小于 0，说明模型可靠，可用于进一步分析。变量重要投影值（VIP）可用于判断样品之间的差异性化合物，其中当 VIP>1 时，可视该化合物为样品之间的关键性化合物，对样品整体之间的风味具有重要贡献作用。通过 VIP 计算，在醪糟青稞面包和甜面包中共筛选出 12 种差异性化合物（VIP>1），分别是异戊醇-D、异戊醇-M、正己醛-M、异

丁醇、2,6-二甲基吡啶、仲辛酮、乙酸乙酯-D、醋酸-D、醋酸-M、丁苯、丁醛-M、丁酸异丙基酯。其中异戊醇-D 的 VIP 值最大, 说明其对面包的整体风味贡献作用最突出。

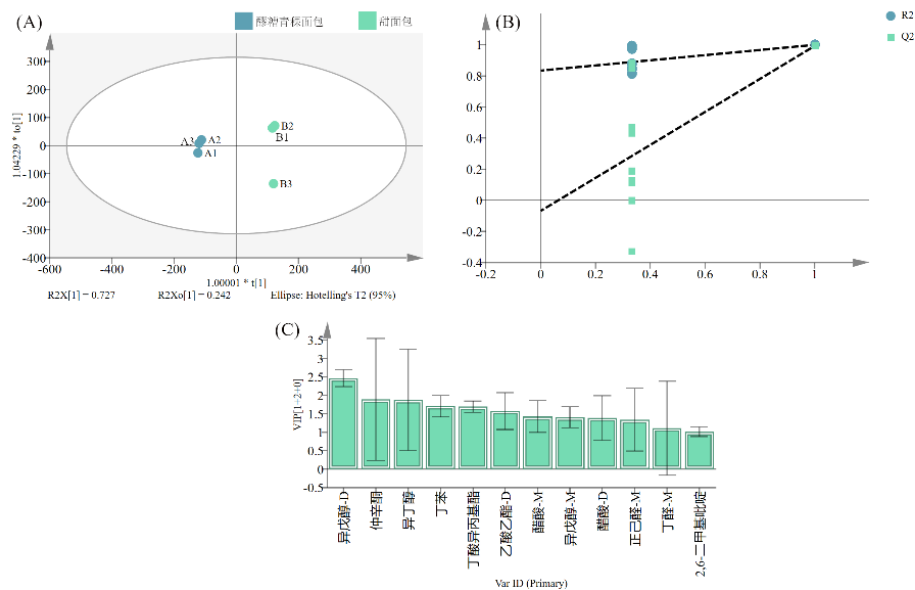


图 6 正交偏最小二乘分析两种面包之间的风味特性差异 (A) 得分图, (B) 交叉验证, (C) VIP 值
Fig.6 Orthogonal partial least squares analysis of differences in flavor characteristics between the two breads (A) Score plots, (B) Cross validation, and (C) VIP values

2.7 ROAV 分析

表 5 醪糟青稞面包和甜面包中物质的 ROAV

Table 5 ROAV of the substances in the Laozhao highland barley bread and sweet bread					
化合物	CAS	阈值/(mg/kg)	ROAV		香气描述
			醪糟青稞面包	甜面包	
丙硫醇	107-03-9	0.000 04	100.00	100.00	具有臭鼬鼠味
异戊醇-D	123-51-3	0.04	4.60	5.49	有苹果白兰地香气和辛辣味
异戊醇-M	123-51-3	0.04	1.22	2.61	有苹果白兰地香气和辛辣味
丁苯	104-51-8	0.014	6.14	7.22	-
2,6-二甲基吡啶	108-48-5	0.003	3.46	1.20	有吡啶和薄荷和混合气味
异戊醛-D	590-86-3	0.001 1	22.06	25.45	似苹果和桃子香味
异戊醛-M	590-86-3	0.001 1	3.57	5.24	似苹果和桃子香味
异丁醛	78-84-2	0.001 5	2.77	3.21	具有特殊强烈的刺激气味
仲辛酮	111-13-7	0.23	0.82	1.51	泥土味, 天然木质草本气息
乙酸异戊酯-D	123-92-2	0.002	1.79	0.78	香蕉味
乙酸异戊酯-M	123-92-2	0.002	2.85	0.91	香蕉味
乙酸乙酯-D	141-78-6	0.005	5.33	2.29	具有水果香味
乙酸乙酯-M	141-78-6	0.005	0.78	1.36	具有水果香味

相对香气活度值 (ROAV) 是用来判断化合物对样品整体风味的贡献度, 目前, 已知的挥发性化合物有上千种, 但并不是每种化合物都对样品的风味具有贡献作用, 因此需要将化合物的浓度和阈值相结合来判断^[29]。当化合物的 ROAV>1 时, 则该化合物对样品的整体贡献作用较突出^[30]。由表 5 可知, 丙硫醇, 阈值为 0.000 04 mg/kg, 阈值较低且其相对含量较高, 故定义其 ROAV=100。在醪糟青稞面包和甜面包中共计算出 13 种 ROAV>1 的化合物, 其中 2,6-二甲基吡啶、乙酸异戊酯-D、乙酸异戊酯-M、乙酸乙酯-D 在醪糟青稞面包中的 ROAV 高于在普通甜面包, 说明这部分化合物对醪糟青稞面包的风味贡献作用较突出。有研究表明^[31], 乙酸异戊酯是醪糟中的差异

性化合物，对醪糟的整体风味具有较高的贡献作用，与本文研究结果一致，说明醪糟的加入可能会增加面包的整体风味特征。同理，异戊醇-D、异戊醇-M、丁苯、异戊醛-D、异戊醛-M、异丁醛、仲辛酮、乙酸乙酯-M 则呈相反的趋势，在甜面包中具有较高的 ROAV，说明这部分化合物对普通甜面包的风味具有重要贡献作用。

2.8 ROAV 和 OPLS-DA 对比分析

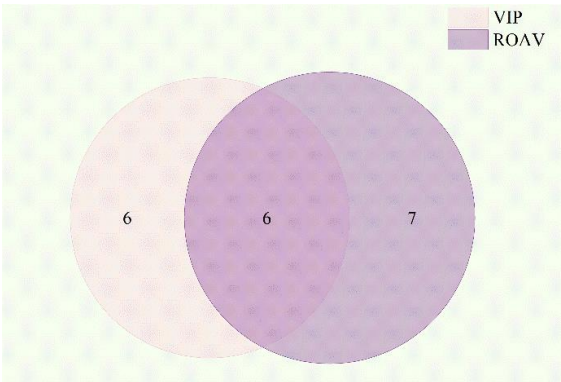
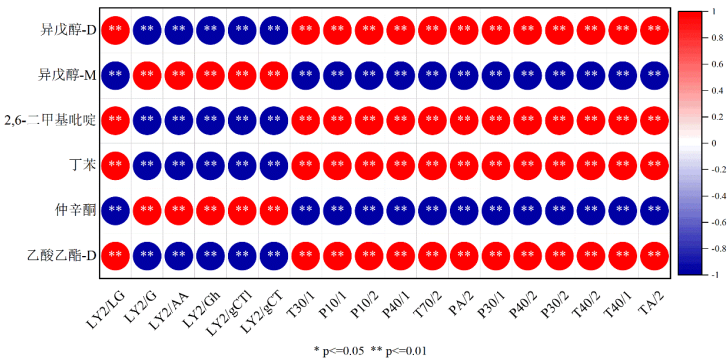


图 7 ROAV 和 VIP 法的对比分析

Fig.7 Comparative analysis of ROAV and VIP methods

ROAV 和多元统计分析均可用于筛选样品之间的差异性化合物^[32]。由图 7 可知，在两种面包中通过 ROAV 共计算出 13 种差异性化合物 (ROAV>1)，而通过 OPLS-DA 变量重要投影值共筛选出 12 种差异性化合物 (VIP>1)，其中两种方法的共有物质有 6 种，分别是异戊醇-D、异戊醇-M、2,6-二甲基吡啶、仲辛酮、乙酸乙酯-D、丁苯。说明这 6 种化合物对区分醪糟青稞面包和普通甜面包具有重要的贡献作用。

2.9 电子鼻与 GC-IMS 的相关性分析



* p<=0.05 ** p<=0.01

图 8 电子鼻传感器和差异性化合物的相关性

Fig.8 Correlation of electronic nose sensors and differential compounds

采用 Spearman 相关性分析电子鼻传感器与差异性化合物的相关性，由图 8 可知，异戊醇-D、2,6-二甲基吡啶、丁苯、乙酸乙酯-D 与电子鼻的 T、P 传感器具有较高的正相关性，比如 T30/1、P10/1、P10/2、P40/1、T70/2、PA/2、P30/1、P40/2、P30/2、T40/2、T40/1 和 TA/2。而异戊醇-M、仲辛醇则与 LY2/LG、LY2/G、LY2/AA、LY2/Gh、LY2/gCT1 和 LY2/gCT 具有显著性的正相关性 ($P<0.01$)。

3 结论

采用感官评价、质构分析、电子鼻结合气相离子迁移技术，分析两种面包（醪糟青稞面包、甜面包）的品质和挥发性化合物的差异。感官评价表明两种面包在气味维度上差异较大。同时甜面包具有较大的比容；通过电子鼻发现，醪糟青稞面包与普通甜面包之间风味差异较大，其中醪糟青稞面包在传感器上响应值更高，说明样品中挥发性化合物的含量更高；通过 GC-IMS 发现，在样品中共鉴定出 41 种化合物，其中醇类和醛类是其主要的风

味物质, 醪糟和青稞的加入会增加样品中酯类和醇类的含量, 而降低酮类的含量 ($P<0.05$), 通过 OPLS-DA 共筛选出 12 种差异性化合物 ($VIP>1$), 而通过 ROAV 共筛选出 13 种差异性化合物 ($ROAV>1$), 两者共有的化合物为异戊醇-D、异戊醇-M、2,6-二甲基吡啶、仲辛酮、乙酸乙酯-D、丁苯, 说明这 6 种化合物可作为区分醪糟青稞面包和普通甜面包的关键性化合物。通过 Spearman 相关性发现, 异戊醇-D、2,6-二甲基吡啶、丁苯、乙酸乙酯-D 与电子鼻的 T、P 传感器具有较高的正相关性。本研究为合理开发面包新产品提供理论依据和数据支撑。

参考文献

- [1] CHO I H, PETERSON D G. Chemistry of bread aroma: A review [J]. Food Science and Biotechnology, 2010, 19(3): 575-582.
- [2] TEBBEN L, SHEN Y, LI Y. Improvers and functional ingredients in whole wheat bread: A review of their effects on dough properties and bread quality [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 81: 10-24.
- [3] 李清苗.青稞粉对面团特性和面包品质的影响及其机理研究[D].长沙:湖南农业大学,2022.
- [4] 关伟超,张炜佳,董立军,等.西北酵头发酵绿豆粉对绿豆面包品质的影响[J].食品工业科技,2024,45(22):141-149.
- [5] NIE C, LI Y, GUAN Y, et al. Highland barley tea represses palmitic acid-induced apoptosis and mitochondrial dysfunction via regulating AMPK/SIRT3/FoxO3a in myocytes [J]. Food Bioscience, 2021, 40: 100893.
- [6] TUERSUNTUOHETI T, WANG Z, ZHANG M, et al. Different preparation methods affect the phenolic profiles and antioxidant properties of Qingke barley foods [J]. Cereal Chemistry, 2021, 98(3): 729-739.
- [7] 包杰,朱天仪,王琪,等.青稞在面包中的应用研究及展望[J].粮食与油脂,2023,36(12):10-12.
- [8] 丁双鲲,杜恺,袁增慧,等.赖氨酸对青稞面包品质及风味特征的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(7):256-263.
- [9] 黄冰羽.青稞粉及品质改良剂对青稞-小麦混合粉面团特性及面包品质的影响[D].雅安:四川农业大学,2023.
- [10] 王宝贝,邱颖辉,陈玟璇,等.小球藻对青稞面包品质的影响及其抗氧化特性[J].食品与发酵工业,2019,45(23):157-162.
- [11] LIU A, SU S, SUN Y, et al. Enhancing the highland barley-wheat dough network structure and bread quality using freeze-dried sourdough powder with inulin as a protectant [J]. LWT, 2024, 191: 115599.
- [12] HE Y, WANG A, CHEN Z, et al. Effects of egg powder on the structure of highland barley dough and the quality of highland barley bread [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 240: 124376.
- [13] GAO L, ZHANG L, LIU J, et al. Analysis of the volatile flavor compounds of pomegranate seeds at different processing temperatures by GC-IMS [J]. Molecules, 2023, 28(6): 2717.
- [14] EKE-EJIOFOR. J, N. D J, A. B E. Effect of addition of three leaf yam flour on dough properties and sensory qualities of bread [J]. Journal of Food Research, 2015, 4(6): 133.
- [15] 朱镇华,李桂霞,徐晨希,等.醪糟黑青稞面包配方优化研究[J].粮食加工,2024,49(2):59-64.
- [16] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158.
- [17] 张浩,易宇文,朱开宪,等.基于 GC-IMS 结合化学计量法分析烧烤过程中温度对牦牛肉风味物质的影响[J].食品科学,2023,44(22):337-344.
- [18] YANG Y, ZHAO X, WANG R. Research progress on the formation mechanism and detection technology of bread flavor [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(9): 3724-3736.
- [19] LONGIN F, BECK H, GÜTLER H, et al. Aroma and quality of breads baked from old and modern wheat varieties and their prediction from genomic and flour-based metabolite profiles [J]. Food Research International, 2020, 129: 108748.
- [20] PU D, ZHANG H, ZHANG Y, et al. Characterization of the aroma release and perception of white bread during oral processing by gas chromatography-ion mobility spectrometry and temporal dominance of sensations analysis [J]. Food Research International, 2019, 123: 612-622.
- [21] XU J, ZHANG Y, WANG W, et al. Advanced properties of gluten-free cookies, cakes, and crackers: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103: 200-213.
- [22] JAKOBSEN H B, HANSEN M, CHRISTENSEN M R, et al. Aroma volatiles of blanched green peas (*Pisum sativum* L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(9): 3727-3734.
- [23] JIANG Z, PULKKINEN M, WANG Y, et al. Faba bean flavour and technological property improvement by thermal pre-treatments [J].

- LWT - Food Science and Technology, 2016, 68: 295-305.
- [24] PICO J, BERNAL J, GÓMEZ M. Wheat bread aroma compounds in crumb and crust: A review [J]. Food Research International, 2015, 75: 200-215.
- [25] 关天琪,安玉红,陈旭,等.电子鼻结合气相色谱-质谱联用技术分析 2 种粗粮面包的挥发性风味成分[J].食品科技,2023,48(3):282-290.
- [26] DELATOUR T, HUERTAS-PÉREZ J F, DUBOIS M, et al. Thermal degradation of 2-furoic acid and furfuryl alcohol as pathways in the formation of furan and 2-methylfuran in food [J]. Food Chemistry, 2020, 303: 125406.
- [27] CHEN H, NIE X, PENG T, et al. Effects of low-temperature and low-salt fermentation on the physicochemical properties and volatile flavor substances of chinese kohlrabi using gas chromatography–ion mobility spectrometry [J]. Fermentation, 2023, 9(2): 146.
- [28] YIN L, LIU Z, LU X, et al. Analysis of the nutritional properties and flavor profile of sweetpotato residue fermented with *Rhizopus oligosporus* [J]. LWT, 2023, 174: 114401.
- [29] WU B, ZHU C, DENG J, et al. Effect of sichuan pepper (*zanthoxylum* genus) addition on flavor profile in fermented ciba chili (*capsicum* genus) using GC-IMS combined with E-Nose and E-Tongue [J]. Molecules, 2023, 28(15): 5884.
- [30] ZHANG W, YANG X, ZHANG J, et al. Study on the changes in volatile flavor compounds in whole highland barley flour during accelerated storage after different processing methods [J]. Foods, 2023, 12(11): 2137.
- [31] 雷英杰,赵定锡,缪婷,等.非酿酒酵母筛选及协同发酵对醪糟挥发性风味影响[J].食品科学,2024,45(15):94-102.
- [32] WANG Y, He Y, Liu Y, et al. Analyzing volatile compounds of young and mature *docynia delavayi* fruit by HS-SPME-GC-MS and rOAV [J]. Foods, 2023, 12(1): 59.