文章编号：1008-1542(2026)04-0407-10

食叶草全粉不同添加量对馒头风味品质和营养特性的影响

尹梓如[1]，郑智哲[2]，张美娜[3]，赵鑫燕[3]，李研东[4]，吴晓菲[2]，周　涛[2]，韩　雪[2]

(1. 河北科技大学技术转移中心，河北石家庄　050018；
2. 河北科技大学食品与生物学院，河北石家庄　050018；
3. 河北同福健康产业有限公司，河北石家庄　050000；
4. 河北省兽药饲料工作总站，河北石家庄　050000)

摘　要：为探究食叶草全粉不同添加量在传统馒头中的应用价值，解决馒头营养结构单一的问题，以质构特性、感官品质作为评价指标，研究不同添加量的食叶草全粉对面团特性及馒头品质的影响，并综合运用电子舌、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(HS-SPME-GC-MS)、全自动氨基酸分析仪等技术，分析馒头的风味与营养特性。结果表明：随着食叶草全粉从 0%添加至 10%，馒头比容和白度显著降低，硬度显著升高，咸味与涩味的味感指标值呈逐步上升趋势；当添加量超过 2%时，面团醒发体积显著减小，其醒发能力和持气性能受到抑制；添加量为 10%的馒头相较于未添加的馒头，甜味氨基酸的相对含量增加了 10%，而鲜味氨基酸的相对含量降低了 9%；感官评价中，2%添加量组得分最高(84.33 分)，而过高添加量(>6%)会导致感官评价总分明显降低；此外，在食叶草全粉馒头中共检测出 77 种挥发性有机化合物，酮类、烯烃类在中低添加量(<6%)下显著富集，其中部分短链醇类、酯类、酮类仅存在于 2%添加量组，且酮类占比达 17%。适度添加(2%～4%)食叶草全粉既能强化馒头的营养功能特性，又能保留其良好的食用品质，可为食叶草全粉在功能性主食中的开发应用提供理论参考。

关键词：食品营养学；食叶草全粉；添加量；面团及馒头；感官特性；风味品质；营养特性

中图分类号：TS201.4　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.7535/hbkd.2026yx04007

Effects of different proportions of *Rumex hanus by*. whole powder addition on the flavor quality and nutritional characteristics of steamed bread

Yin Ziru[1], Zheng Zhizhe[2], Zhang Meina[3], Zhao Xinyan[3], Li Yandong[4],

收稿日期：2026-04-08；修回日期：2026-05-12；责任编辑：胡姝洋
基金项目：中央引导地方科技发展资金项目(246Z2501G)；河北省教育厅青年基金项目(QN2025254)
第一作者简介：尹梓如(1991—)，女，河北石家庄人，助理研究员，硕士，主要从事食品科学与营养方面的研究。
通信作者：韩雪，教授。E-mail：hanxue_h@163.com

尹梓如，郑智哲，张美娜，等. 食叶草全粉不同添加量对馒头风味品质和营养特性的影响[J]. 河北科技大学学报，2026，47(4)：407-416.
Yin Ziru, Zheng Zhizhe, Zhang Meina, et al. Effects of different proportions of *Rumex hanus by*. whole powder addition on the flavor quality and nutritional characteristics of steamed bread[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2026, 47(4): 407-416.

Wu Xiaofei[2], Zhou Tao[2], Han Xue[2]

(1. Technology Transfer Center, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
2. College of Food Science and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
3. Hebei Tongfu Health Industry Company Limited, Shijiazhuang, Hebei 050000, China;
4. Hebei Provincial Station of Veterinary Drug and Feed, Shijiazhuang, Hebei 050000, China)

Abstract: In order to investigate the application value of different addition levels of *Rumex hanus by*. (RHB) whole powder in traditional steamed bread, and solve the problem of single nutritional structure of steamed bread, the effects of different addition levels of RHB whole powder on dough characteristics and steamed bread quality were studied using texture properties and sensory quality as evaluation indicators. The flavor and nutritional properties of steamed bread were analyzed by comprehensive application of electronic tongue, headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), automatic amino acid analyzer and other techniques. The results show that as the addition level of RHB whole powder is increased from 0% to 10%, the specific volume and whiteness of steamed bread are significantly decreased, while the hardness is significantly increased. The taste values of saltiness and astringency are found to exhibit a gradual upward trend. When the addition level exceeds 2%, the proofing volume of dough is significantly reduced, indicating that its proofing ability and gas retention performance are inhibited. Compared with the control steamed bread, the relative content of sweet amino acids in steamed bread with 10% addition is increased by 10%, while the relative content of umami amino acids is decreased by 9%. In sensory evaluation, the highest score(84.33 points) is obtained by the group with 2% addition, while a significant reduction in sensory evaluation score is caused by excessive addition(>6%). In addition, a total of 77 volatile organic compounds are detected in the RHB whole powder-added steamed bread. Ketones and olefins are significantly enriched at low and medium addition levels(<6%). Among them, some short-chain alcohols, esters and ketones are only present in the 2% addition group, and ketones account for 17% of the total volatile compounds. Therefore, the nutritional and functional properties of steamed bread can be enhanced and its good eating quality can be maintained by moderate addition(2%~4%) of RHB whole powder, which can provide a theoretical reference for the development and application of RHB whole powder in functional staple foods.

Keywords: food nutrition; RHB whole powder; addition amount; dough and steamed bread; sensory properties; aroma and flavor quality; nutritional characteristics

食叶草为蓼科酸模属(*Rumex*.*L*)植物,又名蛋白草,广泛分布于东北、华北、西北等地区。2021年国家卫生健康委员会发布《关于食叶草等15种"三新食品"的公告》[1],正式批准食叶草为新食品原料。食叶草具备显著的营养优势,蛋白质含量高达30%以上,且富含膳食纤维、多酚、黄酮、超氧化物歧化酶(SOD)等多种营养素及生物活性成分,兼具抗氧化、调节代谢等生理功能[2]。馒头是中国居民的主要主食,然而当前传统小麦馒头的生产制备存在营养结构单一问题,缺乏优质蛋白、膳食纤维及生物活性成分,难以契合现代消费者对主食营养功能化的需求。食叶草所具备的丰富营养特性及其添加应用,可有效解决传统馒头营养结构单一的问题,实现营养强化的效果。

在面制品改良研究中,植物源辅料添加对馒头品质的调控作用已被广泛证实。吴海霞等[3]研究发现,红豆、马铃薯、杜仲叶等谷物及植物全粉的添加,能够显著改变馒头的质构特性与风味品质;梅鑫等[4]以白茶为功能性添加物,完成了白茶馒头的配方优化与综合品质评价,为特色植物原料应用于馒头品质改良提供了理论依据与技术参考。文献[5-7]探究了酸模属植物羊蹄(*Rumex Japonicus Houtt*.)的抗炎、抗结肠癌等生物活性,证实酸模属植物普遍具备良好的营养与功能价值,也从侧面说明食叶草作为该属植物,拥有较高的开发潜力与营养价值。

现阶段,食叶草的相关研究多集中于饲料利用及基础营养成分解析领域[8-9]。已有成分检测结果表明,食叶草富含18种氨基酸、多种维生素及矿物微量元素,其中铁元素平均含量可达0.50%[10-12]。在食用安全性方面,楼敏涵等[10,12]通过动物试验验证发现,食叶草在试验条件下对SD大鼠无母体毒性、胚胎毒性与致畸性,食用安全风险较低。目前,食叶草已成功应用于蛋白饮料、功能性茶饮等食品领域[13-14],但其在馒头制品中的深加工研究十分有限。梁靖等[15]采用溶剂萃取、蒸馏萃取结合感官评价的方式,分析了食叶草全粉对面团及面条品质的影响,但未针对其风味特征、营养特性等核心指标进行深度分析。

基于此，本文系统评价食叶草全粉不同添加量对面团特性与馒头品质的影响，探析其对馒头质构、感官及营养风味的调控规律，并采用电子舌、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱（HS-SPME-GC-MS）、全自动氨基酸分析仪等技术，深入解析食叶草全粉馒头的味觉特征、氨基酸组成与挥发性风味物质构成。

1　实　验

1.1　材料与试剂

食叶草（蛋白质 32.5%，粗纤维 9.85%，水分 2.3%），石家庄三草农业科技有限公司提供；五得利五星特精小麦粉（蛋白质 9.6%，碳水化合物 73%），五得利面粉集团有限公司提供；安琪高活性干酵母，安琪酵母股份有限公司提供；食用盐，河北中盐龙祥盐化有限公司提供；去离子水，河北科技大学食品与生物学院提供；2,4,6-三甲基吡啶，天津市永大化学试剂有限公司提供。

1.2　仪器与设备

JMTY 面包体积测定仪，杭州大吉光电仪器有限公司提供；WSB-Ⅳ型智能白度测定仪，杭州大吉光电仪器有限公司提供；Multi Test 2.5-i 质构仪，英国 MECMESIN 公司提供；B7LB 自动和面机，上海丽麦机械设备有限公司提供；PXF-16A 面食发酵箱，北京市恒诺利兴科技有限公司提供；SA402B 型电子舌，日本 Insent 公司提供；HS-SPME-GC-MS 仪，美国安捷伦科技公司提供；全自动氨基酸分析仪，英国 Biochrom 公司提供。

1.3　方法

1.3.1　食叶草全粉-小麦粉复合体系的制备

食叶草经干燥后采用粉碎机粉碎，并通过 120 目（1 目＝25.4 mm）筛进行筛分，收集筛下部分作为实验用粉体。根据筛网规格，所得食叶草全粉粒径≤125 μm。将食叶草全粉分别以 0%、2%、4%、6%、8%和 10%的比例（质量分数，下同）替代小麦粉进行制备，食叶草全粉-小麦粉复合体系标记为 S0、S2、S4、S6、S8、S10。

1.3.2　食叶草全粉面团与馒头的制作流程

食叶草全粉面团与馒头的制作工艺流程如下：将食叶草全粉-小麦粉复合体系、干酵母、水和食盐混合，进行和面、成型、醒发、蒸制等步骤，最后得到成品馒头。在食叶草全粉-小麦粉复合体系中，加入干酵母（0.5%）、食盐（1%）和去离子水（52%），手工揉面 6 min，直至面团表面光滑，形成食叶草全粉面团。将每 50 g 面团搓圆成型，放入醒发箱中（温度 36 ℃，湿度 85%）醒发 30 min[16]，随后在蒸箱内，水沸腾后上锅蒸 18 min，焖制 3 min，即可得到食叶草全粉馒头。各配料比例均以混粉质量为基准。

1.3.3　发酵性能的测定

发酵性能采用量筒法进行测定[17]。称取 60 g 制备好的面团，置于 250 mL 量筒中，充分压实以排除内部空隙。将量筒置于恒温恒湿箱中，在温度 36 ℃、湿度 85%的条件下进行发酵。记录面团发酵体积达到 40 mL 时所需要的时间，并测定发酵 60 min 时面团的发酵体积，以此评价其发酵性能。

1.3.4　食叶草全粉馒头质构特性的测定

采用 Multi Test 2.5-i 质构仪进行 TPA 测试，将制作出的食叶草全粉馒头冷却至室温后从中间切成厚度为 25 mm 的薄片，参数设置如下：探头 P/36，预测试、测试和后测试速度均设为 1 mm/s，触发力为 5 N，压缩程度为 50%。记录试样的硬度，质构测试重复 3 次并取平均值[18]。

1.3.5　食叶草全粉馒头比容和白度的测定

将制作出的食叶草全粉馒头冷却至 25 ℃后，准确称取其质量，采用 JMTY 面包体积测定仪测定馒头的体积，馒头体积与质量之比为馒头比容。将馒头从正中间切成厚度为 10 mm 的横截面，采用 WSB-Ⅳ型智能白度测定仪测定馒头内部横截面的白度。重复 3 次测定并取其平均值。

1.3.6　食叶草全粉馒头感官特性的测定

将制作出的食叶草全粉馒头冷却至 25 ℃，然后由 12 名经专业培训过的感官评价人员，从食叶草全粉馒头的蓬松度、表皮颜色、表面结构、内部结构、弹性、黏性、口感和香气等方面进行评价，评价标准如表 1 所示。

表 1 馒头感官评价表

Tab.1 Sensory evaluation form for steamed breads

指标	评分标准	总分
蓬松度	体积适中,且表皮未与内瓤分离(8～10);体积较小,质量大,蓬松程度一般(4～7);体积过大且表皮与内瓤分离(1～3)	10
表皮颜色	颜色均匀有亮泽(8～10);适中(4～7);颜色分散暗淡(1～3)	10
表面结构	表面光滑挺立饱满(11～15);表面有气泡烫斑(6～10);表面塌陷皱缩(1～5)	15
内部结构	气孔大小适中均匀,层析纹理均匀清晰,呈海绵状(11～15);气孔大小不均(6～10);气孔不均且质地粗糙无纹理(1～5)	15
弹性	手指按压回弹好(8～10);手指按压回弹弱(4～7);手指按压不回弹或按压困难(1～3)	10
黏性	咬一小口馒头,咀嚼 6 次后,馒头在口中聚集成团(8～10);聚集成 2～3 块(4～7);馒头在口中散开,不能聚合(1～3)	10
口感	咬劲适中、口感细腻不黏牙(11～15);咬劲差、口感不细腻不黏牙(6～10);咬劲较大,口感粗糙黏牙(1～5)	15
香气	有明显好闻的香气(11～15);气味一般(6～10);气味较差,有异味(1～5)	15

1.3.7 电子舌味感测定

为探究高浓度区间内食叶草添加对馒头品质的影响,后续研究设置分组:S2 为低添加量组,S6 为中添加量组,S10 为高添加量组。该分组可扩大添加量浓度跨度,增大不同处理组间理化指标差异。取适量的 S0、S2、S6、S10 样品 1∶20 加水均质处理,离心过滤后上机检测,后置于电子舌测定专用的小杯中,利用电化学传感器原理测定综合味觉信息,从而对被测试样进行定量和定性分析。本次实验测定酸味、苦味、涩味、咸味、鲜味、丰富性、回味-A(涩味的回味)、回味-B(苦味的回味)共 8 个指标。每次测试开始前需要对传感器进行活化、校正和自检,通过后取样品 30 mL 装入电子舌检测杯中进行测定。

1.3.8 氨基酸含量的测定

参照淳新月等[19]的方法并稍作改进,测定样品中游离氨基酸含量。准确称取馒头样品 1.0 g,加入 5%(m/V)三氯乙酸溶液 1 mL,室温避光浸泡提取 20～24 h,实现蛋白质变性沉淀与杂质去除。提取完成后离心分离,吸取上清液 800 μL,经 0.22 μm 水系滤膜过滤后,装入 2 mL 氨基酸专用进样瓶中低温保存待测。采用全自动氨基酸分析仪进行测定,检测波长分别设置为 570、440 nm。氨基酸组分含量根据仪器标准品外标曲线进行定量计算,以每克样品中氨基酸质量计算(mg/g)。风味氨基酸相对含量计算公式如下:

$$\text{风味氨基酸相对含量}=\frac{\text{该风味氨基酸含量(mg/g)}}{\text{样品中总游离氨基酸含量(mg/g)}}\times 100\%\ 。$$

1.3.9 挥发性风味成分的测定

根据邹涵等[20]的 HS-SPME-GC-MS 方法稍作修改。称量每个馒头样品 3.0 g,将其放入一个 20 mL 的顶空瓶中,预加热温度 40 ℃,预热时间 20 min,萃取头老化温度 250 ℃,老化时间 5 min,萃取温度 60 ℃,萃取时间 4 min,搅拌速度 300 r/min,搅拌时间 10 min,解吸温度 270 ℃,解吸时间 5 min。DB-5ms 色谱柱:30 m×0.25 mm×0.25 μm。柱温:初始温度 40 ℃,保持 2 min,然后以 6 ℃/min 速率升温至 160 ℃,再以 10 ℃/min 速率升温至 250 ℃,保持 10min。流速为 1.4 mL/min。检测器:MSD 检测器。载气 He 为 40 mL/min。流速为 1.4 mL/min。分流进样:分流比 5∶1;隔垫吹扫流量为 3 mL/min。进样口温度:270 ℃。离子源:EI 源,电子能量 70 eV。离子源温度:230 ℃。四极杆温度为 150 ℃。传输线温度:280 ℃。采集方式:扫描模式 Scan/SIM。扫描质量范围:35～550 m/z。溶剂延迟 1.0 min。

1.4 数据处理与统计分析

HS-SPME-GC-MS 样品中未知挥发性成分通过工作站 NIST23.L 标准谱库自动检索,导出样品检索报告后筛选匹配,保留匹配度大于 80 的物质,去除柱流失物质(聚甲基硅氧烷化合物)。以 2,4,6-三甲基吡啶为内标进行定量分析,根据待测化合物的峰面积与内标的比值计算待测化合物的含量。利用 SPSS 26 和 Origin 2022 软件对数据进行分析和绘图,通过 Duncan 分析评价实验结果的显著性差异($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 食叶草全粉对面团发酵性能的影响

食叶草全粉添加量显著影响面团的发酵性能。如图 1 所示,随添加量增加,面团发酵 60 min 后体积下

降。当添加量超过 2%时，面团醒发体积显著减小，达到相同膨胀程度所需时间明显延长，表明其醒发能力和持气性能受到抑制。这可能源于食叶草全粉抑制了酵母活性、降低产气效率，直接影响发酵动力；也可能是因为其中某些成分与面筋蛋白发生非功能性交联，阻碍延展和气体包埋；此外，食叶草中的纤维组分和颗粒形态可能破坏面筋网络连续性，削弱其机械强度，导致面团无法有效保持气体，限制发酵潜力[21]。可见，过量添加食叶草全粉对面团醒发与持气能力产生不利影响。

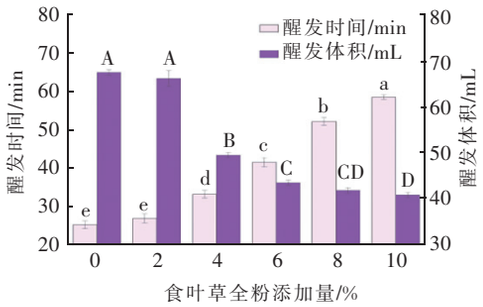


图 1　食叶草全粉添加量对面团发酵性能的影响

Fig. 1　Effect of RHB whole powder content on the fermentation performance of dough

2.2　食叶草全粉添加量对馒头品质的影响

如图 2 所示，随着食叶草全粉添加量的增加，馒头比容显著下降，硬度显著升高。这主要是由于食叶草全粉削弱了面团的醒发及持气能力，导致膨胀受限，从而降低比容并增加硬度。白度是表征馒头表面亮度的重要指标。如图 2 b)所示，食叶草全粉的添加使馒头白度显著降低($P<0.05$)，这主要源于食叶草全粉本身所含的天然绿色色素。尽管颜色发生变化，但这种独特的黄绿色调丰富了传统馒头的视觉多样性，可能提升产品的吸引力，并为开发食叶草系列食品提供了创新视觉元素[22]。硬度反映了食叶草全粉馒头在压缩至最大形变时所需力的大小，是评价其质构特性的关键指标，如图 2 c)所示，当食叶草全粉添加量为 2%时，硬度为 393 g，与对照组无显著差异；但随着添加量的增加，硬度显著上升。食叶草可能抑制气室膨胀，阻碍柔软质地的形成[23]，该效应与面筋蛋白被稀释及网络结构受损密切相关[24]。图 3 为食叶草全粉不同添加量的实验组和对照组直接感官图，随着添加量的增加，成品体积逐渐变小，色泽逐渐变深。因此，2%～4%为保持馒头品质的适宜添加量。

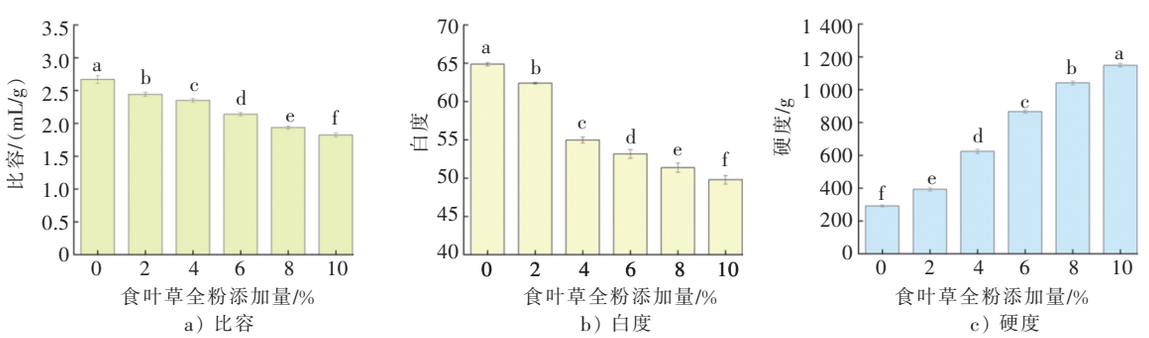


图 2　食叶草全粉添加量对馒头比容、白度和硬度的影响

Fig. 2　Effect of the addition amount of RHB whole powder on the specific volume, whiteness and hardness of steamed bread

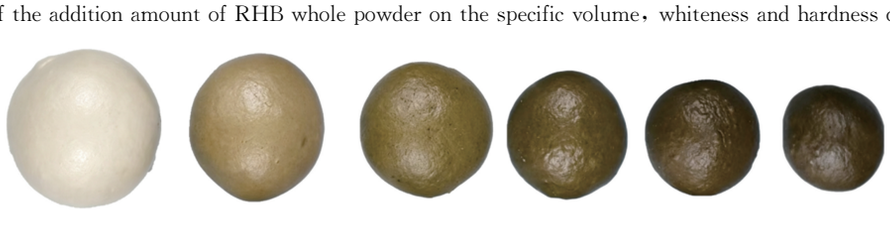


图 3　实验组与对照组成品图

Fig. 3　Finished product images of the experimental group and control group

2.3　食叶草全粉对馒头感官特性的影响

感官评价结果如表 2 所示。当食叶草全粉添加量为 2%、4%时，感官总分与对照组无显著差异，馒头整体品质较好，其中 2%添加量组得分最高(84.33 分)。随着添加量进一步增加，感官评分逐渐下降，10%添加量时评分仅为 64.67 分，较最高值下降 23.31%。感官品质的下降主要与面筋网络结构受损有关，食叶草全粉的高吸水性及其颗粒空间位阻作用，妨碍了面筋蛋白的伸展与交联，削弱了网络结构的连续性和稳定性[25]。当添加量超过 6%时，馒头口感粗糙、颜色加深、气味过重，品质显著下降。因此，适量添加(2%～4%)可在保持感官接受度的同时提升营养价值，而过高添加量(>6%)则导致感官评价总分明显下降。

表 2 食叶草全粉的添加对馒头感官评价的影响

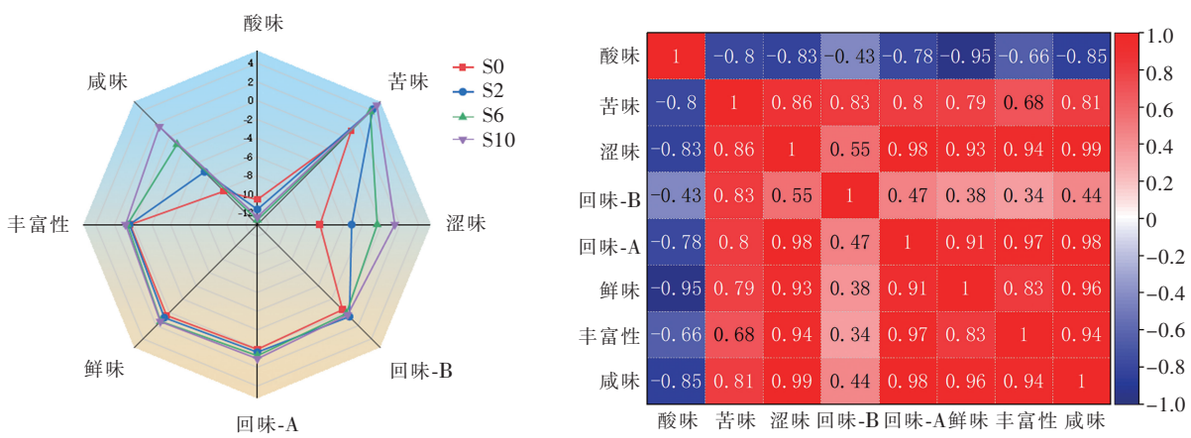
Tab. 2 Effects of the addition of RHB whole powder on the sensory evaluation of steamed bread

样品	蓬松度	表皮颜色	表面结构	内部结构	弹性	黏性	口感	香气	总分
S0	8.67±0.52^{a}	8.33±0.82^{ab}	12.50±0.55^{a}	12.83±0.75^{a}	9.00±0.63^{a}	8.00±0.63^{a}	12.50±0.84^{a}	11.50±0.55^{cd}	83.33±1.75^{a}
S2	8.33±0.52^{ab}	9.00±0.55^{a}	12.33±0.52^{a}	12.33±0.82^{ab}	8.83±0.41^{a}	8.00±0.89^{a}	12.50±0.63^{a}	13.00±0.52^{a}	84.33±1.21^{a}
S4	8.17±0.75^{ab}	8.67±0.52^{a}	12.17±0.41^{a}	12.17±0.75^{ab}	8.50±0.55^{ab}	8.33±0.82^{a}	12.17±0.75^{ab}	12.83±0.75^{a}	83.00±1.41^{a}
S6	7.50±0.55^{b}	7.50±0.55^{bc}	11.67±0.52^{a}	11.50±0.55^{b}	7.67±0.82^{b}	7.83±0.75^{ab}	11.00±0.63^{b}	12.67±0.82^{ab}	77.33±1.51^{b}
S8	6.17±0.75^{c}	7.00±0.63^{cd}	10.33±1.21^{b}	10.00±0.89^{c}	6.33±0.52^{c}	6.83±0.75^{bc}	9.50±1.05^{c}	11.67±1.03^{bc}	67.83±0.98^{c}
S10	5.67±0.52^{c}	6.33±0.52^{d}	10.33±1.21^{b}	10.17±0.98^{c}	6.17±0.75^{c}	6.50±0.84^{c}	9.00±1.41^{c}	10.50±0.84^{d}	64.67±1.86^{d}

注：同列数据后不同小写字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

2.4 电子舌评价分析

采用电子舌传感器对食叶草全粉不同添加量馒头的酸、苦、涩、鲜、丰富性、咸等 8 种味感指标展开测定。如图 4 a)所示，丰富性、鲜味、回味的味感指标数值相对较大，而酸的味感指标数值最小。伴随食叶草全粉添加量的增加，咸味和涩味的味感指标数值亦逐渐上升。原因可能为食叶草富含 Na^{+}、K^{+} 等呈味矿物质，随添加量的增加引入更多咸味物质，增强了馒头的咸味感知[9]。另外，食叶草富含多酚类、黄酮类、单宁及蒽醌类化合物，此类物质是食品中典型的苦、涩味呈味因子[26]。一方面，添加量越高，多酚、单宁浓度越高，直接引发电子舌的苦味和涩味传感器的高强度响应；另一方面，单宁、多酚类物质会与味觉受体蛋白结合产生收敛感，进一步增强涩味，且在高浓度下苦味物质会产生叠加效应，致使苦味同步升高[19,27]。与未添加食叶草全粉的馒头相比，丰富性、鲜味、回味的味感指标数值无明显变化，这表明食叶草全粉对这些风味的影响较小。如图 4 b)所示，酸味与其余 7 种感官属性均呈显著负相关，其中与鲜味的相关系数 $r=-0.95$，拮抗作用最为强烈，这表明酸味是抑制复合风味感知的核心维度。苦味、涩味、回味-A、鲜味、丰富性、咸味之间存在极强正相关（$r>0.80$），形成高度协同的风味集群。这表明食叶草全粉馒头的风味结构呈现出“酸味拮抗轴”与“协同风味集群”的二元结构模式。此结果阐释了高添加量致使风味降低的原因并非单一指标超出阈值，而是酸味的强烈拮抗作用破坏了协同风味的平衡状态。



a) 味感值雷达图　　b) 味感值热图

图 4 食叶草全粉不同添加量对馒头味感值雷达图与相关性热图

Fig. 4 Radar chart and correlation heatmap of steamed bread flavor scores with different RHB whole powder additions

2.5 氨基酸测定结果

采用全自动氨基酸分析仪测定食叶草全粉不同添加量的馒头样品中游离氨基酸的组成与含量，并利用 Origin 2025 软件对数据进行处理，结果如表 3 与图 5 所示。随着馒头中食叶草全粉添加比例的增加，样品中检测到的游离氨基酸总量呈现出显著的增长趋势，S10 与 S0 相比甜味氨基酸相对含量增加了 106.2%，鲜味氨基酸增加了 28.3%。其中，丝氨酸的含量增长幅度最为突出，甜味氨基酸中脯氨酸、丙氨酸的含量也表现出持续、稳定的上升趋势。鲜味氨基酸总相对含量有所上升，其中，天冬氨酸和组氨酸的含量随着食叶草全粉添加量的增加而显著升高，而另一种关键的鲜味氨基酸（谷氨酸）的含量却出现了明显的减少。这一现象与面团发酵的生化过程密切相关，在发酵过程中，面团内存在的游离氨基酸会受到酵母等微生物的作用，通过复杂的氨基酸代谢途径被转化，可能生成了各类风味物质或其前体物质，从而导致特定氨基酸如谷氨酸

表 3　食叶草全粉不同添加量馒头的氨基酸含量

Tab. 3　Amino acid content of steamed breads with different amounts of RHB whole powder added

氨基酸风味	氨基酸种类	S0(mg/g)	S2(mg/g)	S6(mg/g)	S10(mg/g)
甜味氨基酸	脯氨酸	0.284±0.003^{b}	0.307±0.017^{b}	0.336±0.057^{ab}	0.424±0.083^{a}
	苏氨酸	0.043±0.001^{c}	0.064±0.002^{bc}	0.115±0.011^{b}	0.232±0.071^{a}
	丝氨酸	0.218±0.007^{c}	0.305±0.027^{c}	0.670±0.087^{b}	0.913±0.119^{a}
	甘氨酸	0.063±0.003^{a}	0.033±0.007^{c}	0.036±0.002^{c}	0.051±0.005^{b}
	丙氨酸	0.124±0.002^{b}	0.124±0.019^{b}	0.156±0.017^{b}	0.242±0.031^{a}
	胱氨酸	0.329±0.005^{a}	0.307±0.017^{a}	0.315±0.014^{a}	0.326±0.020^{a}
甜味氨基酸小计		1.061±0.145^{b}	1.140±0.298^{b}	1.628±0.434^{ab}	2.188±0.574^{a}
鲜味氨基酸	谷氨酸	0.301±0.031^{a}	0.264±0.029^{a}	0.212±0.007^{b}	0.211±0.011^{b}
	天冬氨酸	0.273±0.029^{c}	0.273±0.031^{c}	0.354±0.021^{b}	0.424±0.026^{a}
	组氨酸	0.052±0.006^{d}	0.082±0.006^{c}	0.122±0.018^{b}	0.168±0.020^{a}
鲜味氨基酸小计		0.626±0.257^{a}	0.619±0.257^{a}	0.688±0.214^{a}	0.803±0.239^{a}
苦味氨基酸	缬氨酸	0.103±0.021^{d}	0.132±0.021^{c}	0.210±0.017^{b}	0.381±0.034^{a}
	蛋氨酸	0.039±0.008^{ab}	0.037±0.009^{b}	0.062±0.004^{a}	0.047±0.008^{ab}
	异亮氨酸	0.111±0.017^{b}	0.108±0.011^{b}	0.220±0.007^{a}	0.230±0.004^{a}
	亮氨酸	0.023±0.006^{c}	0.062±0.011^{bc}	0.156±0.019^{a}	0.149±0.021^{ab}
	酪氨酸	0.091±0.012^{c}	0.111±0.019^{bc}	0.167±0.034^{ab}	0.183±0.014^{a}
	苯丙氨酸	0.040±0.007^{d}	0.087±0.007^{c}	0.140±0.011^{b}	0.179±0.009^{a}
	赖氨酸	0.091±0.013^{ab}	0.073±0.006^{b}	0.073±0.012^{b}	0.116±0.014^{a}
	精氨酸	0.186±0.021^{d}	0.210±0.011^{c}	0.261±0.024^{b}	0.315±0.018^{a}
苦味氨基酸小计		0.684±0.324^{b}	0.820±0.308^{b}	1.289±0.358^{ab}	1.600±0.349^{a}
总游离氨基酸合计		2.371±0.852^{b}	2.579±0.929^{b}	3.605±1.003^{ab}	4.591±1.078^{a}

注：同行数据后不同小写字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

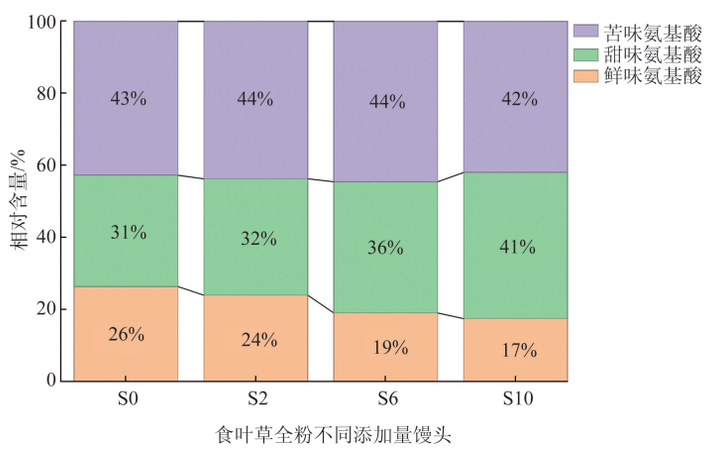


图 5　食叶草全粉馒头中不同风味氨基酸占比

Fig. 5　Proportion of different flavor amino acids in RHB whole powder steamed bread

的净含量发生变化[27-28]。此外，虽然具有苦味特征的氨基酸绝对含量在总体上有所增加，但其在总游离氨基酸中的相对占比得到了有效控制。这些苦味氨基酸主要来源于食叶草植物蛋白在加工过程中的水解，其过量积累，会直接导致馒头产生令人不悦的苦涩口感[8]。因此，控制其添加量（<6%）对于保障最终产品的感官品质具有重要意义。

2.6　HS-SPME-GC-MS 测定结果分析

采用 HS-SPME-GC-MS 技术对食叶草全粉馒头挥发性有机化合物进行分析，如图 6 所示。共鉴定出 77 种化合物，其中醇类 32 种、酯类 8 种、酮类 3 种、烷烃类 11 种、醛类 7 种、酸类 3 种、烯烃类 8 种、其他类 5 种。醇类是馒头的核心风味物质，在所有样品中占比最高，且在高添加量组（S10，73%）达到峰值，随着食叶草全粉添加量的增加呈“小幅上升—下降—显著升高”趋势。醇类物质通常具有芳香植物香，其过量会产生酸败等不良气味[29]。不同样品中各类挥发性成分占比如图 6 a）所示，醛类、酯类占比随添加量增加持续降低，其中酯类在 S6、S10 组中未检出；酮类、烯烃类在中低添加量（<6%）下显著富集，酮类在 S2 组达 17%，烯烃类在 S6 组达 13%，S10 组乙醇占比最高，其他成分占比始终较低，对整体风味贡献有限。上述结果表明，

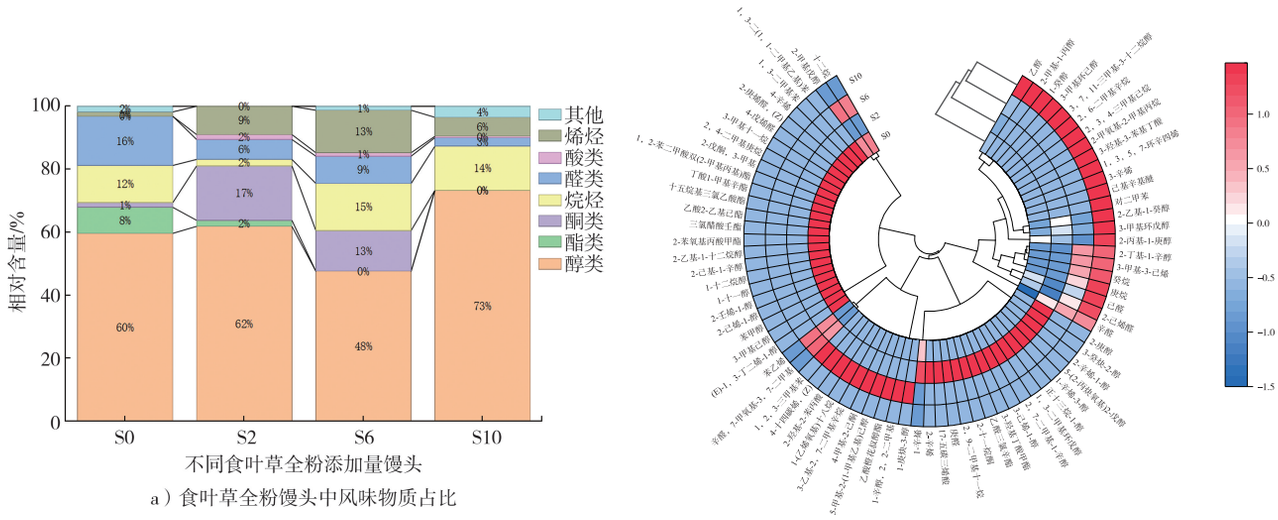


图 6 食叶草全粉不同添加量馒头的风味物质含量

Fig. 6 Contents of flavor compounds in steamed bread with RHB whole powder additive amounts

食叶草全粉的添加显著改变了馒头挥发性成分的类别构成，高添加量组中以醇类物质为主导，同时抑制了醛类、酯类物质的生成，整体风味轮廓与对照组差异显著，中低添加量组则促进酮类与烯烃类物质的生成，可赋予馒头甜香与草本清香。

如图 6 b)所示，对照组 S0 中部分酯类、醇类未在 S2、S6、S10 中检出，这可能是由于食叶草中的多酚、膳食纤维抑制了酵母代谢酶及脂肪氧化酶活性，减少了传统风味物质生成[30]。部分短链醇类、酯类、酮类存在于 S2 组中，在其他组别未检出，例如，3-己烯-1-醇、2-辛烯-1-醇具有青草味，1-辛烯-3-醇具有青草及典型蘑菇香气[31]，2-十一烷酮具有脂、芸香或桃子香气，赋予了该组独特的风味。随着食叶草全粉添加量的增加，辛醛也逐渐增加，赋予馒头油脂、柠檬和青草香气。部分醇类、萜类与烃类(1，3，5，7-环辛四烯、2-丙基-1-庚醇、2，6-二甲基辛烷，己醛等)物质在 S10 组呈深红色，可能是由于高添加量下食叶草自身挥发性成分释放增加，或食叶草中的有机酸与醇类在发酵/蒸制过程中发生酯化反应生成[30]。感官评价中香气得分较高的 2 组添加量分别为 S2(13.00)、S4(12.83)，故食叶草全粉以中低添加量(＜6％)为宜。食叶草全粉添加并非简单的“风味叠加”，而是通过抑制原有风味、引入新风味的双重作用，从而彻底改变馒头的风味轮廓。

3 结 语

探讨了食叶草全粉不同添加量对馒头面团发酵、质构特性、感官品质、味觉特征、氨基酸组成及挥发性风味物质的影响，主要结论如下。

1)食叶草全粉显著影响面团发酵性能，添加量超过 2％会明显抑制醒发与持气能力，导致馒头比容与白度降低、硬度升高；2％添加量馒头质构特性与对照组无显著差异，品质最优。

2)馒头感官品质随食叶草全粉添加量呈先升后降趋势，2％添加组得分最高(84.33 分)，2％～4％添加可保持良好的感官接受度，超过 6％后品质显著下降。

3)食叶草全粉可显著提升馒头营养价值，随添加量升高，馒头游离氨基酸总量显著增加，甜味、鲜味、苦味等各类风味氨基酸相对含量均呈上升趋势，同时咸味与涩味味感有所增强。

4)食叶草馒头中共检出 77 种挥发性风味物质，中低添加量(2％～6％)可促进酮类、烯烃类等特征香气物质富集，风味协调性更佳。

综上可知，食叶草全粉在 2％～4％添加范围内，既能显著强化馒头的营养功能特性，又能保持较好的食用品质与风味特征，适宜开发营养强化型馒头产品。研究结果可为食叶草全粉在功能性主食中的开发利用与产业化应用提供理论依据与技术支撑，推动传统小麦馒头向营养强化、功能升级方向发展。

本文尚未深入剖析食叶草全粉抑制面团醒发的内在机理，未来可针对提升面团发酵性能、优化复配配方、增强产品营养功能性等实际生产问题，以及食叶草全粉降血糖等功能性效应开展研究。

参考文献/References：

[1] 国家卫生健康委. 关于食叶草等 15 种“三新食品”的公告[EB/OL]. (2021-10-13)[2025-12-25]. https://wjw.ah.gov.cn/public/7001/56001661.html.

[2] 刘威，蔡卫佳，王昊，等. 食叶草研究进展[J]. 中国农学通，2025，41(3)：36-41.
Liu Wei，Cai Weijia，Wang Hao，et al. Research progress on edible dock[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2025，41(3)：36-41.

[3] 吴海霞，田志芳. 马铃薯全粉馒头制作配方优化及其质构特性主成分分析[J]. 食品研究与开发，2020，41(13)：88-92.
Wu Haixia，Tian Zhifang. Optimization of potato steamed bread formula and principal component analysis of texture profiles[J]. Food Research and Development，2020，41(13)：88-92.

[4] 梅鑫，卢丽，李雅玲，等. 白茶馒头的配方优化及品质评价[J]. 食品安全质量检测学报，2021，12(19)：7716-7722.
Mei Xin，Lu Li，Li Yaling，et al. Formula optimization and quality evaluation of white tea steamed bread[J]. Journal of Food Safety & Quality，2021，12(19)：7716-7722.

[5] Kim H Y，Seo J E，Lee H，et al. *Rumex Japonicus Houtt*. Extract suppresses colitis-associated colorectal cancer by regulating inflammation and tight-junction integrity in mice[J]. Frontiers in Pharmacology，2022，13：946909.

[6] Beddou F，Bekhechi C，Ksouri R，et al. Potential assessment of *Rumex vesicarius* L. as a source of natural antioxidants and bioactive compounds[J]. Journal of Food Science and Technology，2015，52(6)：3549-3560.

[7] Chelly M，Chelly S，Ben Salah H，et al. Characterization，antioxidant and protective effects of edible *Rumex roseus* on erythrocyte oxidative damage induced by methomyl[J]. Journal of Food Measurement and Characterization，2020，14(1)：229-243.

[8] 何荣军，李佳炜，杨雨，等. 食叶草碱溶酸沉蛋白质的理化性质及功能特性研究[J]. 发酵科技通讯，2025，54(2)：63-69.
He Rongjun，Li Jiawei，Yang Yu，et al. Physicochemical and functional properties of alkaline extraction acid precipitation proteins of edible dock[J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology，2025，54(2)：63-69.

[9] 刘威，王昊，蔡卫佳，等. 不同生育期食叶草营养物质变化规律及饲用价值分析[J]. 中国奶牛，2025(4)：47-52.
Liu Wei，Wang Hao，Cai Weijia，et al. Analysis of nutrient changes and feeding value of edible dock at different growth stages[J]. China Dairy Cattle，2025(4)：47-52.

[10] 楼敏涵，张丽婧，梅松，等. 食叶草粉对 SD 大鼠的致畸性研究[J]. 食品安全质量检测学报，2021，12(3)：945-950.
Lou Minhan，Zhang Lijing，Mei Song，et al. Study on the teratogenicity of edible dock powder on SD rats[J]. Journal of Food Safety & Quality，2021，12(3)：945-950.

[11] 刘白玉，陈增鑫，潘芸芸，等. 食叶草的应用价值及安全性研究进展[J]. 中国食品添加剂，2022，33(9)：252-257.
Liu Baiyu，Chen Zengxin，Pan Yunyun，et al. Research progress on the application value and safety of edible grass[J]. China Food Additives，2022，33(9)：252-257.

[12] 楼敏涵，曲雪峰，张丽婧，等. 新食品原料食叶草的安全性评估[J]. 食品安全质量检测学报，2021，12(10)：3919-3926.
Lou Minhan，Qu Xuefeng，Zhang Lijing，et al. Safety evaluation of edible dock as a new food raw material[J]. Journal of Food Safety & Quality，2021，12(10)：3919-3926.

[13] 北京军信泉盛环境科学技术研究院. 用食叶草生产全营养植物奶的工艺系统：CN202320648045.4[P]. 2023-09-19.

[14] 柏绿山，杨秀丽. 食叶草功能性茶叶及其制备方法：CN201710075060.3[P]. 2021-03-02.

[15] 梁靖，刘学强，邢芮蓁，等. 食叶草粉对面团及面条品质特性的影响[J]. 食品工业科技，2024，45(13)：67-74.
Liang Jing，Liu Xueqiang，Xing Ruizhen，et al. Effect of edible dock powder on quality characteristics of dough and noodles[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(13)：67-74.

[16] 孙军涛，武献锁，王怡博. 老面风味杂粮馒头的研制[J]. 食品工业，2025，46(10)：23-27.
Sun Juntao，Wu Xiansuo，Wang Yibo. Development of coarse cereals steamed bread with sourdough fermented flavor[J]. The Food Industry，2025，46(10)：23-27.

[17] 范会平，李瑞，郑学玲，等. 市售酵母对面团发酵特性和馒头品质的影响[J]. 粮食与油脂，2016，29(6)：9-13.
Fan Huiping，Li Rui，Zheng Xueling，et al. Effects on fermentation characteristics of dough and quality of steamed bread of yeast on the market[J]. Cereals & Oils，2016，29(6)：9-13.

[18] Cao Yanfei，Zhang Fengjie，Guo Peng，et al. Effect of wheat flour substitution with potato pulp on dough rheology，the quality of steamed bread and in vitro starch digestibility[J]. LWT，2019，111：527-533.

[19] 淳新月，任顺成. 食叶草蛋白的提取工艺优化及其氨基酸分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版)，2024，45(1)：24-30.
Chun Xinyue，Ren Shuncheng. Extraction optimization and amino acid analysis of edible dock protein[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition)，2024，45(1)：24-30.

[20] 邹涵，冯玉，孙名悦，等. 基于 HS-GC-MS 和电子感官技术研究不同产地白芍的质量差异[J]. 中草药，2026，57(4)：1481-1491.
Zou Han，Feng Yu，Sun Mingyue，et al. Quality differences of *Paeoniae RadixAlba* from different producing areas based on HS-GC-MS and electronic sensory technology[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs，2026，57(4)：1481-1491.

[21] Rezaei M N，Jayaram V B，Verstrepen K J，et al. The impact of yeast fermentation on dough matrix properties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2016，96(11)：3741-3748.

[22] Zhu Fan, Sakulnak R, Wang Sunan. Effect of black tea on antioxidant, textural, and sensory properties of Chinese steamed bread[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 1217-1223.

[23] Zhou Wei, Guo Siyu, Zhang Sheng, et al. Effects of *Siraitia grosvenorii* seed flour on the properties and quality of steamed bread[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1249639.

[24] Zhang Yueqiang, Shi Rongli, Rezaul K M, et al. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(23): 12268-12274.

[25] 兰向东，邓峰，付亭亭，等. 麸质馒头感官评价与质构测定指标相关性分析[J]. 食品科技，2023，48(12)：141-146.
Lan Xiangdong, Deng Feng, Fu Tingting, et al. Correlation analysis between sensory evaluation and texture measurement parameters of wheat bran steamed buns[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(12): 141-146.

[26] 赵斗，杨胜男，刘楠楠，等. 菜芙蓉花黄酮微胶囊的制备工艺及其贮藏稳定性[J]. 河北科技大学学报，2024，45(5)：508-517.
Zhao Dou, Yang Shengnan, Liu Nannan, et al. Preparation process and storage stability of *Abelmoschus Manihot* (L.) medic flowers flavonoids microcapsules[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(5): 508-517.

[27] Liu Mengjin, Nauta A, Francke C, et al. Comparative genomics of enzymes in flavor-forming pathways from amino acids in lactic acid bacteria[J]. Applied Environmental Microbiology, 2008, 74(15): 4590-4600.

[28] 朱翠玲，洪群燕，周超，等. 不同添加量香菇粉对面团特性及馒头品质的影响研究[J]. 食品科技，2024，49(8)：178-184.
Zhu Cuiling, Hong Qunyan, Zhou Chao, et al. Influence of different amounts of shiitake mushroom powder added on the characteristics of dough and the quality of steamed bread[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(8): 178-184.

[29] 吴澎，崔婷婷，王超，等. 顶空固相微萃取-气质联用对比分析紫糯配粉与普通馒头的挥发性成分[J]. 中国粮油学报，2016，31(1)：127-132.
Wu Peng, Cui Tingting, Wang Chao, et al. Analysis of volatile compounds of purple waxy flour and common steamed bread by headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(1): 127-132.

[30] 凌蓉平，吕文静，祖兴旺，等. 食叶草有效成分及药理作用研究进展[J]. 食品研究与开发，2026，47(6)：200-205.
Ling Rongping, Lü Wenjing, Zu Xingwang, et al. Research progress on active components and pharmacological effects of edible dock[J]. Food Research and Development, 2026, 47(6): 200-205.

[31] 向敏，徐茂，王子涵，等. 混合乳酸菌发酵对桑叶中挥发性关键异味组分的影响[J]. 食品与发酵工业，2020，46 (20)：241-247.
Xiang Min, Xu Mao, Wang Zihan, et al. Effects of mixed lactic acid bacteria fermentation on key volatile odor components in mulberry leaves[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(20): 241-247.