食品工业科技
SCIENCE AND TECHNOLOGY OF FOOD INDUSTRY
半月刊 ISSN 1002-0306 CN 11-1759/TS

☑ EI
☑ Scopus
☑ DOAJ
☑ EBSCO
☑ CA
☑ FSTA
☑ JST
☑ 北大核心期刊
☑ 中国精品科技期刊
☑ 中国科技核心期刊CSTPCD
☑ 中国核心学术期刊RCCSE
☑ 世界期刊影响力指数（WJCI）报告
☑ 食品科学与工程领域高质量科技期刊分级目录第一方阵T1

沙米面包配方优化及其品质研究

董 平，徐向波，周 奎，曹娜娜，吴华昌，邓 静

Formula Optimization and Quality of Bread with *Agriophyllum squarrosum*

DONG Ping, XU Xiangbo, ZHOU Kui, CAO Nana, WU Huachang, and DENG Jing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060188

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

响应面优化无麸质大米面包复合改良剂配方的研究
Optimization of Gluten Free Rice Bread Composite Additives by Response Surface Methodology
食品工业科技. 2021, 42(2): 130-137 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030297

响应面法优化葡萄干天然酵母面包的配方
Optimization of Formulation of Bread with Natural Leaven of Raisins by Response Surface Analysis
食品工业科技. 2021, 42(3): 179-185 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020309

响应面法优化马铃薯泥面包的加工工艺
Process optimization of potato mud bread by response surface method
食品工业科技. 2017(24): 201-205 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.24.039

豌豆蛋白面包的制作工艺优化及其品质
Optimization of Preparation Process of Pea Protein Bread and Its Quality Characteristics
食品工业科技. 2020, 41(11): 194-199 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.11.030

荞麦苗粉面包的配方和工艺优化
Formula of Buckwheat Seedlings Powder Bread and Optimization of Production Technology
食品工业科技. 2021, 42(15): 177-182 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110092

食用菌馒头粉的配方设计及其品质改良
The Design of the Formula for Edible Mushroom Steamed Bread Flour and Its Quality Improvement
食品工业科技. 2019, 40(24): 144-151 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.24.024

关注微信公众号，获得更多资讯信息

董平，徐向波，周奎，等. 沙米面包配方优化及其品质研究 [J]. 食品工业科技，2024，45(14)：1−10. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060188

DONG Ping, XU Xiangbo, ZHOU Kui, et al. Formula Optimization and Quality of Bread with *Agriophyllum squarrosum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 1−10. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060188

· 工艺技术 ·

沙米面包配方优化及其品质研究

董　平[1]，徐向波[2]，周　奎[1]，曹娜娜[1]，吴华昌[1]，邓　静[3,*]

（1.四川旅游学院食品学院，四川成都 610100；
2.四川旅游学院烹饪学院，四川成都 610100；
3.四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：以沙米粉和小麦粉为主要原料，开发一款沙米面包（SMMB）。本文以比容和感官评价为指标进行单因素和响应面试验，以获得 SMMB 面包的最佳配方。利用质构仪、色差仪以及气相色谱-离子迁移谱（GC-IMS）技术对优化条件下 SMMB 和普通面包（BMB）的质构、色泽及风味进行比较。结果表明：当混合粉中沙米粉占比量为 19.1%，并以混合粉总量为基准，添加 2.5% 酵母、14.5% 白砂糖、10% 黄油、1% 食用盐、0.5% 改良剂以及 50% 水，此条件下制作的 SMMB 色泽金黄，形态饱满，内部组织细腻均匀无大空洞，具有沙米的独特风味，感官评分最高为 86.96 分。与 BMB 相比，SMMB 亮度下降，红度和黄度升高，色泽明显改变；硬度、内聚性和弹性增加；两种面包主要风味物质种类相似，但 SMMB 中醇类、醛类和酮类物质相对含量较高，酯类和杂环类物质则低于 BMB，从而赋予 SMMB 更高的醇香、柑橘香、青草香和麦芽香味，而酯香、坚果味和烘烤味则较低。研究结果为沙米在面包中的应用提供了理论参考。

关键词：沙米，面包，配方优化，响应面，品质

中图分类号：TS213.2　　**文献标识码：**B　　**文章编号：**1002−0306(2024)14−0001−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060188　　本文网刊：

Formula Optimization and Quality of Bread with *Agriophyllum squarrosum*

DONG Ping[1]，XU Xiangbo[2]，ZHOU Kui[1]，CAO Nana[1]，WU Huachang[1]，DENG Jing[3,*]

（1.College of food science and technology, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China；
2.Culinary college of Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China；
3.Culinary Science Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China）

Abstract: A kind of *Agriophyllum squarrosum* bread (SMMB) was developed with *Agriophyllum squarrosum* flour and wheat flour as main raw materials. In this study, the formula of SMMB was optimized by single factor test and response surface test. Then the texture, color and flavor of SMMB under optimized condition were compared with traditional bread (BMB) by using texture analyzer, colorimeter and gas chromatography-ionmobility spectrometry (GC-IMS). The results showed that when the proportion of *Agriophyllum squarrosum* flour in the mixed powder was 19.1%, and based on the total amount of mixed powder, adding of 2.5% yeast, 14.5% sugar, 10% butter, 1% edible salt, 0.5% ameliorant as well as 50% water, the SMMB was golden in color, full in shape, exquisite and uniform in internal organization, and had a unique flavor of *Agriophyllum squarrosum*. The SMMB also had the highest sensory score of 86.96 under the optimized condition. Compared with BMB, the color of SMMB was obviously different with decreased lightness, but increased redness and yellowness. The hardness, cohesion and elasticity were also increased in SMMB. The main flavor substances of the two types of bread were similar, but the contents of alcohols, aldehydes and ketones in SMMB were relatively higher, while the contents of esters and heterocyclic substances were lower than that of BMB. The different relative contents of flavor

收稿日期：2023−06−20

基金项目：四川旅游学院大学生科研项目（2024XKZ39）；川菜发展研究中心项目（CC21Z33）。

作者简介：董平（1987−），男，博士，研究方向：农产品加工与储藏，E-mail: 346932644@qq.com。

*** 通信作者：**邓静（1970−），女，博士，教授，研究方向：农产品加工与储藏，E-mail: ln@126.com。

优先发表

substances endowed SMMB with higher mellow, citrus, grass and malty flavor, while the flavor of ester, nutty and toasty was lower. This project provided theoretical basis for the application of *Agriophyllum squarrosum* in bread.

Key words: *Agriophyllum squarrosum*; bread; formula optimization; response surface test; quality

沙米(*Agriophyllum squarrosum*)又名沙蓬,属于藜科沙蓬属一年生草本植物,是干旱、半干旱荒漠地区特有的沙生植物[1],主要分布于我国西北、华北和东北各省的沙漠地带[2],是一种野生特产食品原料。沙米不仅富含蛋白质、淀粉、粗脂肪、粗纤维和灰分[3],而且还含有对人体有利的生物活性物质,如绿原酸和生物碱具有抵抗致癌物和致癌突变物的功效,SOD、异黄酮和皂甙等抗氧化剂能清除体内的自由基,延缓衰老[4]。此外,文献 [5−6] 报道沙米淀粉热稳定性和抗剪切力较高,具备良好的加工特性。基于其较高的营养价值和功能特性,开发沙米相关产品,既能够满足人们对保健食品的需求,又能拓宽沙米市场、提高沙米附加值。

面包具有食用方便、营养价值高、口味丰富等特点[7]。在面包中加入其它谷类物质,不仅可以改变面包的品质,还可以增加面包的风味,使面包具有一定的特色。如刘小飞等[8] 将小米粉加入到面包中提高了面包黄度,改善了面包风味;路飞等[9] 使用预糊化处理的大米粉制作大米面包口感柔软且具有大米的香气。然而,目前以沙米粉为添加成分制作面包的研究还鲜有报道。本实验采用单因素实验结合响应面试验优化 SMMB 的配方,同时比较最佳配方下的 SMMB 和 BMB,研究沙米对面包色泽、质构以及风味的影响,探索沙米作为一种面包制作原料的可行性,以拓展沙米的开发应用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

去壳沙米 由民勤当地农户提供;高筋小麦粉、高活性干酵母 新乡良润全谷物食品有限公司;白砂糖 广东福正东海食品有限公司;黄油 内蒙古伊利实业集团股份有限公司金山分公司;加碘精制盐 四川久大制盐有限责任公司;面包改良剂(复配面包酶制剂抗氧化剂) 安琪酵母股份有限公司。

DFY-400C 摇摆式高速粉碎机 温岭市林大机械有限公司;SM-25 搅拌机 新麦机械有限公司;DC-236SZ 型醒发箱 新麦机械有限公司;MB2-623+3S 电烤炉 新麦机械有限公司;Flavour Spec®气相离子迁移谱(GC-IMS)联用仪 德国 G.A.S.公司;NH310 色差仪 深圳市三恩时科技有限公司;TMS-Pro 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司。

1.2 实验方法

1.2.1 面包的制作工艺流程 沙米经过摇摆式高速粉碎机粉碎后呈粉末状,过 80 目筛,在常温下密封保存备用。参考文献 [10] 的快速一次发酵法制作甜面包的加工工艺流程,并稍加修改:将高筋面粉和沙米粉称量后过 80 目筛,按照试验配方以混合粉总质量 300 g 为基准称取其它配料,混合均匀,加适量水,将面团揉至成团后,放入搅拌机中至面团面筋形成,盖上保鲜膜松弛 10 min;将面团分割成团,50 g/个,并均匀搓成表面光滑的圆球状面包坯;将面包坯放在烤盘,然后放入醒发湿度 80%、醒发温度 36 ℃ 的醒发箱中醒发 70 min;将醒发好的面团放入面火 220 ℃、底火 160 ℃ 的烤箱内,烘烤 12 min 后取出待测。

1.2.2 单因素实验 按照 SMMB 的制作工艺流程,以高筋粉和沙米粉总质量 300 g 为基准,通过改变沙米粉占比量、酵母添加量以及白糖添加量,以感官评分和比容为指标,确定各个因素与 SMMB 的品质关系。沙米粉占比量为 10%、15%、20%、25% 和 30%,白砂糖 15%、酵母 2%、加碘精制盐 1%、黄油 10%、面包改良剂 0.5%、水 50%;白砂糖添加量为 9%、12%、15%、20%、25%,沙米粉 10%、酵母 2%、黄油 10%、加碘精制盐 1%、面包改良剂 0.5%、水 50%;酵母添加量为 1%、1.5%、2%、2.5% 和 3%,沙米粉 10%、白砂糖 15%、黄油 10%、加碘精制盐 1%、面包改良剂 0.5%、水 50%

1.2.3 面包比容的测定 使用小米排重法[11] 测面包比容:将一个固定容器用小米摇实填满,把已知质量的面包放入固定容器中,使小米全部把面包掩盖,摇实后使用直尺将小米刮平,使用量筒测量余下小米的体积,即为面包体积。面包焙烤完成后,放在室温下完全冷却后,使用精度为 0.01 g 的电子秤测量面包的质量。比容测量三次取平均值。根据下列公式计算面包比容。

$$P=V/m$$

式中:P 为面包比容,单位 mL/g;V 为面包体积,单位 mL;m 为面包质量,单位 g。

1.2.4 响应面试验 在单因素实验的基础上,以沙米粉占比量、酵母添加量、白砂糖添加量这三个因素为自变量,以感官评分为响应值,对 SMMB 的制作进行三因素三水平的响应面分析试验,优化 SMMB 的最佳制作配方,响应面试验的因素与水平设计见表 1。

表 1 响应面试验因素与水平设计

Table 1 Factors and levels of response surface experiments

水平	因素		
	A沙米粉占比量(%)	B白砂糖添加量(%)	C酵母添加量(%)
−1	15	12	2.0
0	20	15	2.5
1	25	18	3.0

1.2.5 感官评分标准 参照 GB/T 20981-2021《面包质量通则》制定 SMMB 的感官评分标准,见表 2。选

优先发表

择 10 名食品专业从业人员对给定的试验样品进行感官评价，满分 100 分。

表 2　面包的感官评分标准

Table 2　Sensory evaluation criteria of bread

项目	评分标准	评分(分)
外观形状(20分)	外形完整饱满，无塌陷，面包无裂痕	16~20
	外形较完整饱满，表面轻微塌陷，面包有轻微裂痕	12~15
	表面粗糙，表面塌陷，面包裂痕严重	0~11
表面色泽(20分)	表皮呈金黄色；颜色均匀一致	16~20
	表皮呈淡金黄色；颜色基本均匀	12~15
	表皮呈褐色；颜色不均	0~11
组织结构(20分)	气孔细小均匀，纹理清晰，富有弹性	16~20
	气孔基本均匀，有大空洞，弹性较好	12~15
	气孔大小不均，大空洞较多，弹性弱	0~11
气味(20分)	有浓郁的面包香味，沙米香味适宜	16~20
	有淡淡的面包香味，沙米味较淡	12~15
	无面包香味，沙米味重	0~11
口感(20分)	口感细腻，甜味适口，不粘牙	16~20
	口感无粗糙感，甜味较淡，稍粘牙	12~15
	口感粗糙，没有甜味或有苦味，粘牙	0~11

1.2.6　质构测定　参考钟艳等[11]的方法并稍作修改。将响应面试验中成品形态完整的 BMB 和 SMMB 的面包芯切成 3 cm×3 cm×2 cm 的面包块，取样后立即置于 TMS-Pro 型号的质构仪上进行检测。选择 P50 的柱型挤压探头，对每个样品分别进行测定，探头回升到样品表面上面的高度 30 mm，形变量为 50 %，检测速度 60 mm/min，起始力 0.375 N，两次挤压之间停顿时间 5 min，对每个样品测定 3 次，取平均数，结果保留两位小数。

1.2.7　色差测定　参考刘小飞等[8]的方法并稍作修改。面包冷却后将面包芯分割成的面包块，白板校正后直接测量。采用全自动色差仪测定面包的色泽，色泽指标为 L^*值、a^*值、b^*值以及 ΔE^*值。每个样品测定 3 次，取平均数，结果保留两位小数。ΔE^*计算公式如下：

$$\Delta E^* = \sqrt[2]{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

其中，$\Delta L^*=L^*_{SMMB}-L^*_{BMB}$；$\Delta a^*=a^*_{SMMB}-a^*_{BMB}$；$\Delta b^*=b^*_{SMMB}-b^*_{BMB}$。

1.2.8　GC-IMS 测定挥发性风味成分　参照江彩艳等[12]的方法并稍作修改。准确称量 3.5 g 用粉碎机粉碎处理后的 SMMB 和 BMB 样品，置于 20 mL 顶空进样瓶中并加盖密封，置于孵化炉中，在 60 ℃ 条件下孵化 15 min，进样体积为 500 μL。GC 条件：为 FS-SE-54-CB-1 色谱柱（15 m×0.53 mm），柱温为 60 ℃，载气气体为 N_2(纯度≥99.999%)。IMS 温度为 45 ℃，漂移气为 N_2(纯度≥99.999%)，漂移气流速为 150 mL/min。

1.3　数据处理

所有试验处理进行三次重复测定。利用 Excel 2016 对数据进行整理和计算，利用 Origin 2021 进行绘图，运用 SPSS 26 进行统计学分析。GC-IMS 数据采用机器自带 Gallery Plot 绘制指纹图谱，根据内置 IMS 数据库和 NIST 数据库对挥发性风味物质进行定性，其中保留指数(RI)由系统导出，其计算原理是将正构烷烃的保留指数定为它的碳数的 100 倍，以色谱图上位于待测物质两侧的相邻正构烷烃的保留值为基准，用对数内插法求得；采用峰体积归一化法计算各风味物质的相对含量。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果

2.1.1　沙米粉占比量对面包比容与感官评分的影响

由图 1 可以看出，随着沙米粉占比量的增加，面包比容逐渐下降，但在占比量小于 20% 时，下降趋势不显著(P>0.05)，而比容与面团醒发过程中膨胀程度有关，说明适量沙米粉的添加不影响面团的醒发；而当沙米粉占比过量时，由于沙米蛋白主要是由清蛋白和球蛋白组成，较难形成小麦粉特有的麦谷蛋白和麦醇溶蛋白相互作用而产生的黏弹性面筋网络结构，降低面团持气能力[13]。随着沙米粉占比量的增加，面包的感官评分先升高后降低，占比量较少时，沙米特有的风味不够明显；当占比量为 20% 时，面包的组织松软、气孔分布均匀、口感最好、沙米味适宜，感官评分最高；进一步增加沙米粉占比量，面包颜色变深，口感开始变得粗糙，这可能与沙米粉本身颜色较深、且含有较多的粗纤维有关。综合 SMMB 的感官评分和比容，选择沙米粉占比量 15%、20%、25% 进行响应面优化试验。

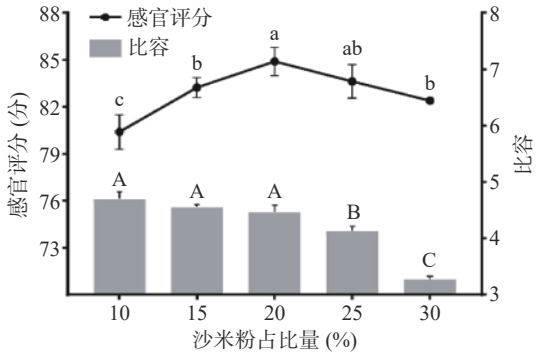

图 1　沙米粉占比量对面包比容与感官评分的影响

Fig.1　Effect of the proportion of *Agriophyllum squarrosum* flour on bread specific volume and sensory score

注：图中不同字母表示差异性显著(P<0.05)；图 2~图 3 同。

2.1.2　白砂糖添加量对面包比容与感官评分的影响

从图 2 可以看出，随着白砂糖添加量的增加，面包比容呈现先升高后降低的趋势。糖是酵母发酵的主要能源物质，提高糖含量会促进酵母生长繁殖，然而糖含量过高时，酵母的生长繁殖会由于环境中渗透压过高而被抑制，因此过高或过低的糖均会影响酵母生长，进而降低面包比容。单因素实验中，糖含量为 18% 时，面包比容最大。从感官评价来看，当白砂糖

优先出版

添加量低于 15% 时，面包甜度低；当白砂糖添加量达到 15% 时，面包甜度适中，口感最佳，感官评分最高；当白砂糖添加量进一步增加时，过多的糖使面包口感甜腻，且由于焦糖化反应或美拉德反应严重使面包颜色过深，品相不好，降低了感官评分。因此，综合 SMMB 的比容和感官评分，选择白砂糖添加量 12%、15%、18% 进行响应面优化试验。

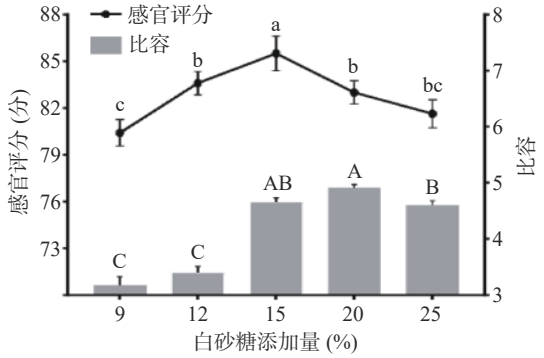

图 2　白砂糖添加量对面包比容与感官评分的影响

Fig.2　Effect of sucrose amount on bread specific volume and sensory score

2.1.3　酵母添加量对面包比容与感官评分的影响　由图 3 可以看出，随着酵母添加量的增加，SMMB 的比容逐渐增加，说明在该范围内酵母添加量与产气量成正比。面包的感官评分呈现先增加后减小的趋势，酵母添加量过少会导致面团发酵不足，烤出的面包回弹力差且粘牙，面包的风味也不足；当酵母添加量为 3.0% 时，可能由于酵母过多导致面团发酵时面筋过度延伸，烤出来的面包表面颜色出现碳黑。因此，综合 SMMB 的感官评分和比容，选择酵母添加量 2.0%、2.5%、3.0% 进行响应面优化试验。

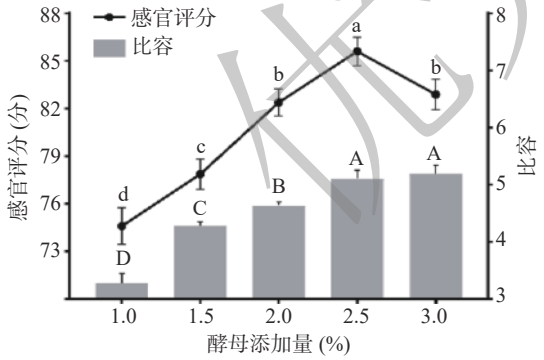

图 3　酵母添加量对面包比容与感官评分的影响

Fig.3　Effect of yeast amount on bread specific volume and sensory score

2.2　沙米面包响应面试验结果

2.2.1　响应面试验设计及结果　以 SMMB 的感官评分作为响应值，响应面试验设计及结果见表 3。

2.2.2　回归模型拟合及方差分析　利用 Design Expert 软件对试验结果进行二元回归拟合数据进行回归分析，得到感官评分 Y 的三元二次回归方程：感官评分 $Y=87.66-0.45A-0.5875B+0.6625C-0.15AB+0.7AC+0.225BC-1.02A^2-1.69B^2-3.34C^2$。感官评分的回归模型方差分析见表 4。

表 3　响应面试验设计与结果

Table 3　Design and results of response surface experiments

实验号	A沙米粉占比量（%）	B白砂糖添加量（%）	C酵母添加量（%）	感官评分（分）
1	15	12	2.5	86.2
2	25	12	2.5	85.3
3	15	18	2.5	84.9
4	25	18	2.5	83.4
5	15	15	2.0	83.3
6	25	15	2.0	81.3
7	15	15	3.0	83.9
8	25	15	3.0	84.7
9	20	12	2.0	82.9
10	20	18	2.0	81.7
11	20	12	3.0	83.1
12	20	18	3.0	82.8
13	20	15	2.5	87.3
14	20	15	2.5	88.1
15	20	15	2.5	87.4
16	20	15	2.5	87.9
17	20	15	2.5	87.6

由表 4 可知，感官评分回归模型 $P<0.001$，回归模型显著。失拟项 $P=0.0968>0.05$ 不显著，表示回归模型与预测值之间的拟合度较好，可以利用上述模型对 SMMB 配方进行分析和预测。$R^2=0.9765$、$R^2_{Adj}=0.9462$ 表明模型与实际试验具有很好的拟合度；有效信号与噪声的比值为 16.273>4，表明试验精度较高。因而，该回归模型能将沙米粉占比量、白砂糖添加量和酵母添加量这 3 个因素对 SMMB 的感官评分的影响较为准确地进行模拟，其中的一次项 C 及二次项 A^2、B^2、C^2 极显著（$P<0.01$），一次项 A、B 和二次项 AC 显著（$P<0.05$），AB、BC 不显著，3 个因素对 SMMB 感官评分的影响顺序为 C（酵母添加量）>B（白砂糖添加量）>A（沙米粉占比量）。

2.2.3　响应面交互作用分析　响应面图可以反映各个因素对响应值的交互作用，响应图曲面坡度越陡峭，表示该因素对响应值的影响越大；等高线可以反应两因素交互作用的显著程度，其中椭圆形表示交互作用显著[14]。

由图 4A~图 4B 可知，白砂糖添加量的陡峭度大于沙米粉占比量，说明白砂糖添加量对感官评分影响较大；对应的等高线接近圆形，说明上述两者的交互作用对沙米面包感官评分影响较小。图 4C~图 4D 中，酵母添加量的陡峭度大于沙米粉占比量，说明酵母添加量对感官评分影响较大；对应的等高线呈椭圆形，说明上述两者的交互作用对沙米面包感官评分影响较大。图 4E~图 4F 中，酵母添加量的陡峭度大于砂糖添加量，说明酵母添加量对感官评分影响较大；对应的等高线接近圆形，说明上述两者的交互作用对沙米面包感官评分影响较小。

2.2.4　响应面分析验证试验　通过本次的响应面优

优先出版

表 4　回归模型方差分析表

Table 4　Variance analysis of regression model

方差来源	平方和	自由度	标准差	*F*值	*P*值	显著性
模型	79.05	9	8.78	32.28	<0.0001	**
A	1.62	1	1.62	5.95	0.0447	*
B	2.76	1	2.76	10.15	0.0154	*
C	3.51	1	3.51	12.91	0.0088	**
AB	0.09	1	0.09	0.3308	0.5832	
AC	1.96	1	1.96	7.20	0.0314	*
BC	0.2025	1	0.2025	0.7443	0.4169	
A^2	4.36	1	4.36	16.02	0.0052	**
B^2	12.06	1	12.06	44.33	0.0003	**
C^2	47.04	1	47.04	172.90	<0.0001	**
残差	1.9	7	0.2721			
失拟项	1.45	3	0.4842	4.28	0.0968	
纯误差	0.4520	4	0.1130			
总误差	80.96	16				

注: **表示差异极显著, $P<0.01$; *表示差异显著, $P<0.05$。

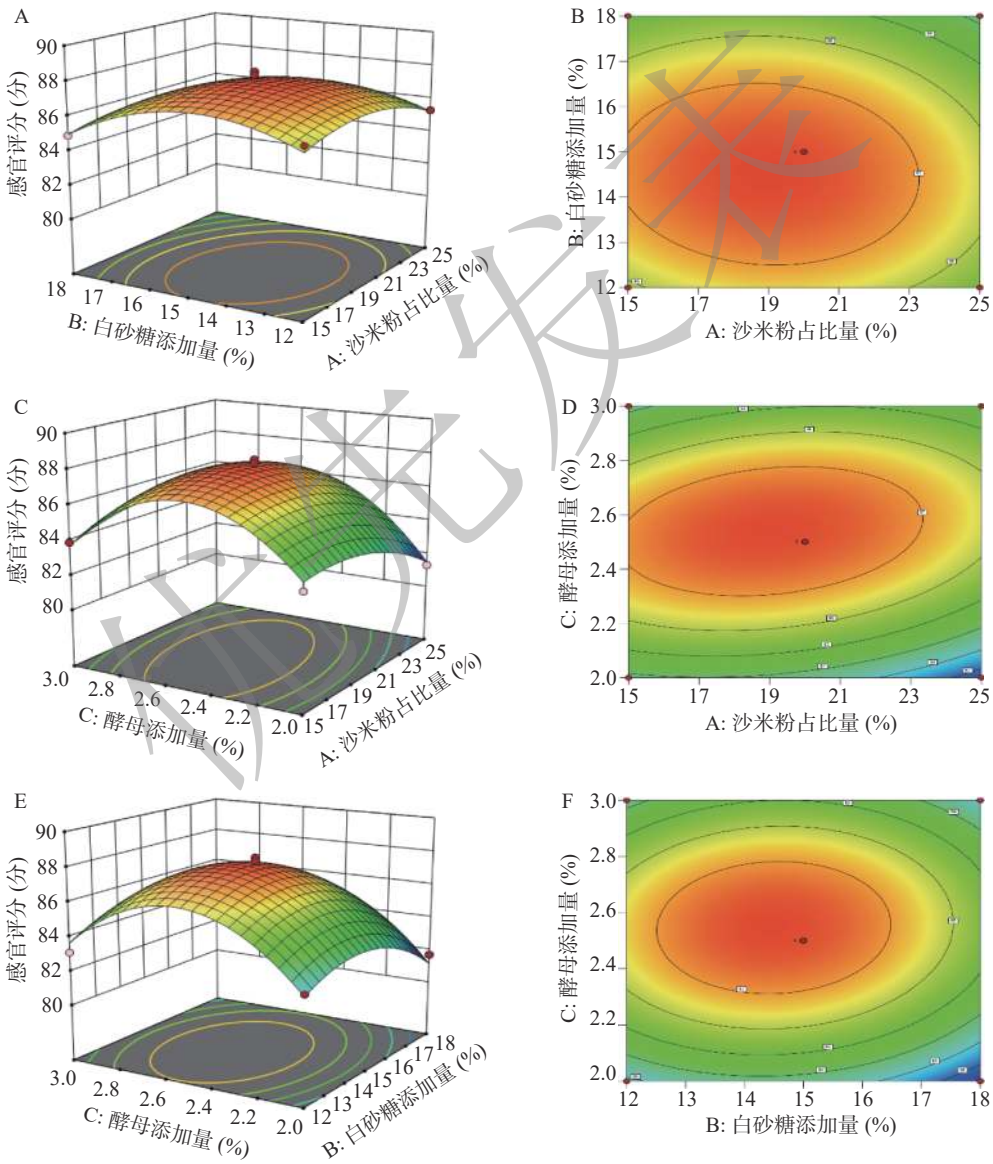

图 4　各因素交互作用对 SMMB 感官评分的影响

Fig.4　Response surface and contour plots showing individual and interactive effects of variables on SMMB sensory score

化试验, 使用 Design-Expert 软件进行 SMMB 配方的优化分析, 所得出理论最佳配方为: 沙米粉占比量 19.078%, 白砂糖添加量 14.518%, 酵母添加量 2.537%, 理论最高评分为 87.78 分。考虑实际试验

操作情况，将最佳配方调整为：沙米粉占比量 19.1%，白砂糖添加量 14.5%，酵母添加量 2.5%。用此最佳工艺配方进行 3 次重复验证试验，取 3 次感官评分的平均值，发现实际的感官评分为 86.96±0.92，与理论值 87.78 接近，说明此模型可以用于 SMMB 制作配方的分析预测，响应面法也可以有效地优化 SMMB 的配方。

2.3　SMMB 与 BMB 品质比较

2.3.1　SMMB 和 BMB 的外观、质构与色差比较　采用最佳工艺条件制备 SMMB 后与 BMB 进行对比，如图 5 所示，两种面包皮均呈现出金黄色泽，且形态饱满；从横切面可以看出，BMB 面包芯颜色较白，SMMB 颜色较深；BMB 内部组织细腻均匀，无大气孔，SMMB 内部气孔略大于 BMB。

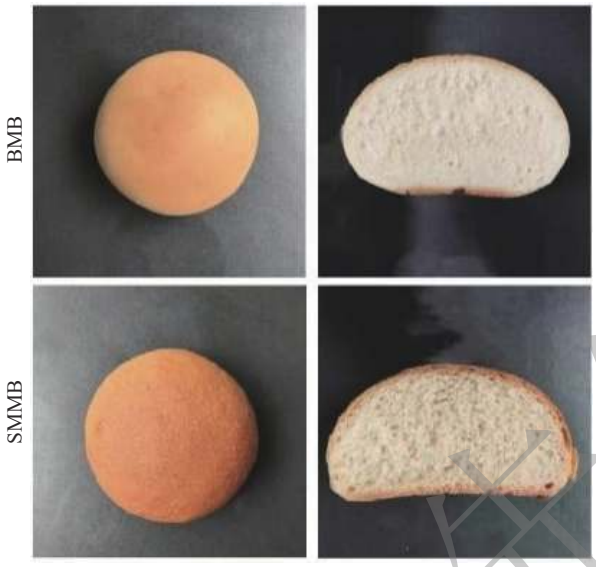

图 5　SMMB 与 BMB 的外观比较

Fig.5　Appearance comparison of SMMB and BMB

进一步对两种面包质构和色泽进行比较，从表 5 可以发现，SMMB 的硬度、内聚性和弹性都较 BMB 高（$P<0.05$）。其中硬度较高一方面是由于沙米粉的加入稀释了小麦粉的面筋蛋白，另一方面沙米粉中较高含量的纤维素与面筋蛋白的相互作用，干扰了面筋蛋白网络结构的形成，从而导致面包硬度增加[15]。弹性和内聚力是评价面包质量的正向参数[16]，添加沙米粉提高了面包的弹性和内聚力（$P<0.05$），说明沙米粉对面包的质构特性有一定的改善。

从色泽来看，SMMB 的 L^*值低于 BMB（$P<0.01$），表明 BMB 色泽较白，而 SMMB 更暗，光泽度低，这与两种面包外观比较结果相同；SMMB 的 a^*值和 b^*值高于 BMB（$P<0.05$），这可能是因为沙米本身色泽偏暗棕色。以 BMB 为色差参比样，SMMB 的总色差值 ΔE^*为 8.21±1.34，按照国际照明委员会（CIE）规定，当 ΔE^*值在 6.0~12.0 时色差程度有明显差异，说明添加沙米粉面包色泽发生了显著的变化。

2.3.2　SMMB 与 BMB 的挥发性风味成分比较　为研究添加沙米对面包风味的影响，采用 GC-IMS 对两种面包的挥发性风味进行检测。图 6 为两种样品的挥发性风味物质指纹图谱，每一行代表从样品中检测出来的挥发性风味物质，每一列代表同种挥发性风味物质在不同样品中的含量，蓝色越深表示挥发性风味物质的含量越少，红色越深表示挥发性风味物质的含量越高。有相同名称的化合物是该化合物的单体和二聚体，分别用 M 和 D 表示。结果显示在两种面包中共检测出 60 种挥发性风味物质（单体和二聚体按一种物质计），其中酯类 17 种、醇类 12 种、醛类 9 种、酮类 7 种、杂环类 9 种、其它类 2 种、未知化合物 4 种。从两种面包的指纹图谱（图 6）可以看出，虽然 SMMB 和 BMB 含有的挥发性风味物质的种类相似，但大部分物质的含量不同。其中红色方框中的 20 种化合物在 SMMB 含量较高，绿色方框中的 20 种化合物在 BMB 中含量较高，粉色方框中 20 种化合物在两种面包中含量差异不显著。

挥发性风味物质的相对含量为该挥发性风味物

表 5　两种面包质构与色泽比较

Table 5　Comparison of texture and color of two types of breads

	硬度（N）	内聚性	弹性（mm）	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
BMB	8.00±0.91[b]	0.55±0.02[b]	8.69±0.05[b]	83.19±1.19[a]	2.77±0.18[b]	13.96±0.36[b]	0
SMMB	10.49±1.04[a]	0.60±0.02[a]	9.89±0.14[a]	75.88±1.60[b]	5.33±0.39[a]	14.92±0.28[a]	8.21±1.34

注：同列不同字母表示差异性显著（$P<0.05$）。

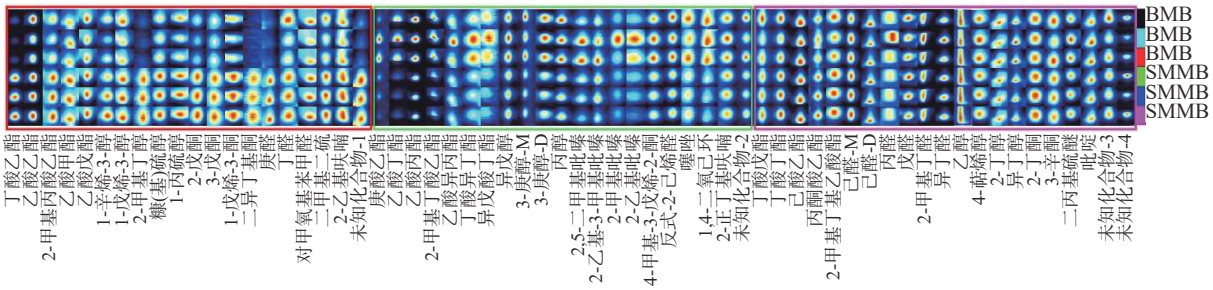

图 6　两种面包挥发性风味物质指纹图谱

Fig.6　Gallery fingerprint of volatile organic components of two types of breads

质的峰面积占所有挥发性风味物质总峰面积的百分比。由表 6 可知醇类、酯类和醛类化合物是两种面包挥发性风味物质相对含量最高的风味物质。醇类化合物中，乙醇含量最高，该化合物也是所有化合物中相对含量最高的，主要来自面团醒发过程中酵母的发酵，乙醇不仅赋予面包一定的醇香味，也是酯类物质的前体[12]；1-辛烯-3-醇在 SMMB 中相对含量较高，该物质源于亚油酸和花生四烯酸的氧化，能使 SMMB 具有更浓的蘑菇风味[17]；此外，1-戊烯-3-醇、2-甲基丁醇、糠(基)硫醇、1-丙硫醇的相对含量也在 SMMB 中含量更高，赋予 SMMB 更强烈的草香味、可可味以及烟熏味。酯类物质是由脂肪酸活化形成的酯酰 CoA 与醇缩合形成，是酵母的代谢产物[18]，能够赋予面包水果香、乳香味。酯类物质中己酸乙酯相对含量最高，且在两种面包中含量相当，文献报道该化合物气味阈值较低，是小麦粉面包中最具芳香活性的酯类化合物[19]；SMMB 中丁酸乙酯、乙酸乙酯、2-甲基丙酸乙酯、乙酸甲酯、乙酸戊酯等酯类化合物相对含量高于 BMB，这些酯类物质具有一定的果香和甜香味，共同构成了 SMMB 的酯香味。

醛类化合物主要由面包制作过程中原辅料所含的脂质氧化降解产生[20]，也可来自 Strecker 降解反

表 6　两种面包挥发性风味物质比较

Table 6　Comparison of volatile flavor compounds in two types of breads

类别	化合物名称 中文	化合物名称 英文	风味描述[27-30]	分子式	保留指数 RI	保留时间 Rt(s)	迁移时间 Dt(ms)	相对含量(%) BMB	相对含量(%) SMMB
酯类	丁酸乙酯	Ethyl butanoate	甜果香	$C_6H_{12}O_2$	1033	408.019	1.20006	0.22±0.02^b	1.32±0.02^a
	乙酸乙酯	Ethyl acetate	果香	$C_4H_8O_2$	876	286.533	1.33949	1.87±0.35^b	2.36±0.05^a
	2-甲基丙酸乙酯	Ethyl isobutyrate	水果味	$C_6H_{12}O_2$	985	345.087	1.22226	1.10±0.11^b	1.55±0.06^a
	乙酸甲酯	Methyl acetate	果香、花香	$C_3H_6O_2$	826	265.911	1.1991	0.49±0.06^b	0.65±0.01^a
	乙酸戊酯	1-Pentyl acetate	果味、甜味	$C_7H_{14}O_2$	1177	752.371	1.78761	1.60±0.01^b	1.69±0.01^a
	庚酸乙酯	Ethyl heptanoate	绿叶清香、水果香	$C_9H_{18}O_2$	1336	1332.525	1.93837	1.09±0.31^a	0.73±0.06^b
	乙酸丁酯	Butyl acetate	果味	$C_6H_{12}O_2$	1060	442.554	1.62015	0.36±0.06^a	0.13±0.01^b
	乙酸丙酯	Propyl acetate	水果香味	$C_5H_{10}O_2$	977	339.838	1.48162	4.51±0.23^a	2.79±0.20^b
	2-甲基丁酸乙酯	Ethyl 2-Methylbutanoate	水果味	$C_7H_{14}O_2$	1060	442.168	1.24298	1.18±0.12^a	0.74±0.03^b
	乙酸异丙酯	Acetic acid 2-propyl ester		$C_5H_{10}O_2$	902	297.592	1.16729	0.29±0.06^a	0.23±0.00^b
	丁酸异丁酯	Isobutyl butyrate	甜味、水果味	$C_8H_{16}O_2$	1158	680.501	1.33438	0.65±0.11^a	0.47±0.02^b
	异戊酸丁酯	Butanoic acid, 3-Methylbutyl ester		$C_9H_{18}O_2$	1273	1116.169	1.38294	0.09±0.02^a	0.06±0.00^b
	丁酸戊酯	Pentyl butanoate	甜美的水果味	$C_9H_{18}O_2$	1307	1231.317	1.39857	0.64±0.10^a	0.70±0.02^a
	丁酸丁酯	Butyl butanoate	果味	$C_8H_{16}O_2$	1217	913.331	1.328	1.77±0.16^a	1.85±0.07^a
	己酸乙酯	Ethyl hexanoate	青苹果香	$C_8H_{16}O_2$	1246	1016.157	1.33008	16.24±0.51^a	15.23±0.42^a
	丙酮酸乙酯	Ethyl pyruvate	水果味、甜味	$C_5H_8O_3$	1257	1061.703	1.16128	1.77±0.21^a	1.82±0.04^a
	2-甲基丁基乙酸酯	2-Methylbutyl acetate	果香、青香	$C_7H_{14}O_2$	1118	576.652	1.26673	0.51±0.03^a	0.54±0.01^a
总量								34.38±0.33^a	32.84±0.38^b
醇类	1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	蘑菇味	$C_8H_{16}O$	1435	1671.039	1.16309	1.91±0.38^b	2.82±0.26^a
	1-戊烯-3-醇	1-Penten-3-ol	甜味、果香味、草香味	$C_5H_{10}O$	1156	669.406	1.36301	1.53±0.06^b	1.69±0.04^a
	2-甲基丁醇	2-Methylbutanol	酒精味、酒味、可可味	$C_5H_{12}O$	1199	839.701	1.44904	0.08±0.01^b	0.31±0.01^a
	糠(基)硫醇	2-Furylmethanethiol	烧焦的烟熏味	C_5H_6OS	1427	1642.179	1.09066	1.33±0.03^b	1.68±0.02^a
	1-丙硫醇	1-Propanethiol	白菜味、甜洋葱味	C_3H_8S	823	264.918	1.17141	0.14±0.02^b	0.19±0.00^a
	异戊醇	3-Methyl-1-butanol	醇香、草香	C_5H_12O	1217	913.051	1.25929	2.25±0.11^a	1.92±0.03^b
	3-庚醇-M	Heptan-3-ol-M	草药味	$C_7H_{16}O$	1307	1231.559	1.3332	2.30±0.03^a	1.79±0.03^b
	3-庚醇-D	Heptan-3-ol-D	草药味	$C_7H_{16}O$	1306	1228.932	1.64688	0.71±0.03^a	0.56±0.03^b
	丙醇	1-Propanol	酒味、发酵味	C_3H_8O	1026	398.05	1.26118	2.23±0.06^a	1.85±0.02^b
	乙醇	Ethanol	酒香	C_2H_6O	947	317.606	1.13472	19.52±1.01^a	20.49±0.09^a
	4-萜烯醇	Terpinene-4-ol		$C_{10}H_{18}O$	1174	741.259	1.23808	0.75±0.02^a	0.76±0.01^a
	2-丁醇	Butan-2-ol	果味	$C_4H_{10}O$	1031	405.281	1.13935	2.09±0.02^a	2.08±0.02^a
	异丁醇	Isobutanol	草香	$C_4H_{10}O$	1080	481.385	1.17624	1.35±0.09^a	1.31±0.02^a
总量								36.19±1.21^a	37.47±0.42^a
酮类	2-戊酮	Pentan-2-one	酒和薄荷气味	$C_5H_{10}O$	1026	398.375	1.37997	0.37±0.06^b	0.80±0.01^a
	3-戊酮	3-Pentanone		$C_5H_{10}O$	993	355.301	1.32737	0.12±0.01^b	0.18±0.00^a
	1-戊烯-3-酮	1-Penten-3-one	辛辣味	C_5H_8O	1026	398.05	1.31174	0.69±0.07^b	1.03±0.01^a
	二异丁基酮	Isovalerone	果味、金属味	$C_9H_{18}O$	1198	836.307	1.78803	0.03±0.00^b	0.11±0.01^a
	4-甲基-3-戊烯-2-酮	4-Methyl-3-penten-2-one	坚果味、巧克力味、木质味	$C_6H_{10}O$	1159	681.424	1.43275	1.24±0.15^a	0.98±0.05^b
	2-丁酮	Butan-2-one	薄荷香气	C_4H_8O	894	293.748	1.24556	1.25±0.07^a	1.37±0.08^a
	3-辛酮	3-Octanone	草药味	$C_8H_{16}O$	1256	1059.302	1.28208	0.48±0.05^a	0.49±0.01^a

优先发表

续表 6

类别	化合物名称		风味描述[27−30]	分子式	保留指数 RI	保留时间 Rt(s)	迁移时间 Dt(ms)	相对含量(%)	
	中文	英文						BMB	SMMB
总量								4.19±0.06[b]	4.95±0.07[a]
醛类	庚醛	Heptanal	柑橘味	$C_7H_{14}O$	1198	838.38	1.34195	0.53±0.02[b]	1.16±0.02[a]
	丁醛	Butanal	辛辣味、草味、麦芽味	C_4H_8O	888	291.215	1.29242	0.10±0.02[b]	0.15±0.00[a]
	对甲氧基苯甲醛	Anisaldehyde	茴香味	$C_8H_8O_2$	1241	1007.238	1.20414	0.13±0.00[b]	0.16±0.00[a]
	反式-2-己烯醛	(E)-2-Hexenal	水果味、草药味	$C_6H_{10}O$	1217	912.84	1.51453	0.95±0.03[a]	0.81±0.03[b]
	己醛-M	Hexanal-M	青草香	$C_6H_{12}O$	1081	482.61	1.25309	1.94±0.10[a]	2.07±0.05[a]
	己醛-D	Hexanal-D	青草香	$C_6H_{12}O$	1072	459.729	1.56278	2.37±0.09[a]	2.53±0.05[a]
	丙醛	Propanal	酒精味、威士忌味、坚果味	C_3H_6O	792	252.033	1.06985	1.03±0.15[a]	0.93±0.02[a]
	戊醛	Pentanal	杏仁味、麦芽味、辛辣味	$C_5H_{10}O$	981	341.676	1.42297	1.26±0.02[a]	1.23±0.02[a]
	2-甲基丁醛	2-Methylbutanal	咖啡、可可味	$C_5H_{10}O$	909	301.418	1.39613	3.21±0.17[a]	3.51±0.07[a]
	异丁醛	Isobutanal		C_4H_8O	801	255.825	1.28227	0.71±0.07[a]	0.75±0.01[a]
总量								12.20±0.43[b]	13.27±0.08[a]
杂环	2-乙基呋喃	2-Ethylfuran	可可味、咖啡味、坚果味	C_6H_8O	974	338.123	1.2792	1.09±0.01[b]	1.12±0.00[a]
	2,5-二甲基吡嗪	2,5-Dimethylpyrazine	坚果味、花生味	$C_6H_8N_2$	1337	1335.558	1.48098	2.57±0.72[a]	1.75±0.29[b]
	2-乙基-3-甲基吡嗪	Pyrazine, 2-ethyl,3-methyl	坚果味、面包味	$C_7H_{10}N_2$	1336	1331.166	1.57081	1.26±0.08[a]	1.02±0.13[b]
	2-甲基吡嗪	Methylpyrazine	坚果味	$C_5H_6N_2$	1258	1064.702	1.10743	0.24±0.11[a]	0.15±0.01[b]
	2-乙基吡嗪	Ethylpyrazine	坚果味、烘烤味、肉味	$C_6H_8N_2$	1336	1333.316	1.51721	0.55±0.17[a]	0.34±0.05[b]
	噻唑	Thiazole	腥味、坚果味、肉味	C_3H_3NS	1273	1116.169	1.25696	0.21±0.00[a]	0.18±0.01[b]
	1,4-二氧己环	1,4-Dioxane		$C_4H_8O_2$	1060	442.154	1.34809	0.41±0.03[a]	0.23±0.01[b]
	2-正丁基呋喃	2-Butylfuran	果味、葡萄酒甜味、辣味	$C_8H_{12}O$	1119	577.312	1.18641	0.38±0.02[a]	0.36±0.01[b]
	吡啶	Pyridine	咖啡味	C_5H_5N	1180	765.821	1.2455	2.83±0.20[a]	2.63±0.02[a]
总量								9.46±1.32[a]	7.84±0.50[a]
其它	二丙基硫醚	Dipropyl sulfide	蒜味、洋葱味	$C_6H_{14}S$	1075	467.621	1.17463	0.35±0.03[a]	0.32±0.01[a]
	二甲基二硫	Dimethyl disulphide	洋葱味	$C_2H_6S_2$	1066	450.219	1.13449	0.63±0.05[b]	0.85±0.02[a]
总量								0.98±0.03[b]	1.17±0.02[a]

注: 表中不同字母表示差异性显著(P<0.05)。

应[21]。SMMB 中醛类化合物的相对含量高于 BMB，且该类化合物气味阈值较低，因而能赋予 SMMB 更加浓郁的香气[22]。SMMB 中庚醛、丁醛、对甲氧基苯甲醛、己醛(M+D)的相对含量以及醛类化合物总相对含量均明显高于 BMB，其中庚醛、己醛是面包中常见的醛类风味化合物，由脂质氧化产生[23]，丁醛本身就存在于小麦与小米等谷物中[24,25]，这些醛类物质使 SMMB 呈现更浓的柑橘、青草香和麦芽香；对甲氧基苯甲醛能够增强 SMMB 的茴香味[26]。2-甲基丁醛在两种面包中含量均较高，其可能来自于异亮氨酸 Strecker 降解反应[23]，具有咖啡和可可香味，这些醛类物质赋予 SMMB 特殊的香气。

呋喃、吡嗪、吡啶等杂环类化合物是焙烤食品中常见的香气成分，主要来自于焙烤过程中的美拉德反应[25]。大部分杂环化合物的相对含量在 BMB 中含量更高，从而使 BMB 拥有更浓的坚果味和烘烤味。酮类化合物和其他类化合物在两种面包中占比较少，对面包风味贡献相对较小。

2.3.3　面包挥发性风味物质主成分分析　基于挥发性风味物质的相对含量对两种面包样品进行主成分分析，结果如图 7，主成分 1(PC-1)的贡献率为 70.3%，主成分 2(PC-2)的贡献率为 21.0%，两者累计贡献率达到 91.3%，说明这两个主成分可以反映样品大部分特征。从图中可以看出，SMMB 和 BMB 分布在不同象限内且数据点不重叠，说明两种面包样品的挥发性风味成分差异性明显。

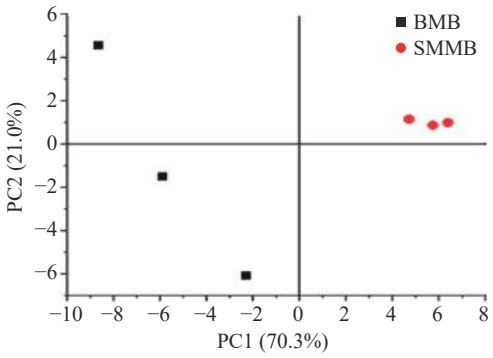

图 7　面包的 PCA 图

Fig.7　PCA diagram of breads

3　结论

本研究在单因素实验的基础上，通过响应面法得到了 SMMB 的最佳配方为沙米粉占比量 19.1%，同时添加 14.5% 白砂糖、2.5% 酵母、10% 黄油、1% 食用盐、0.5% 改良剂以及 50% 水，此配方下制作的 SMMB 形态完整，表面金黄，气孔均匀有弹性，并具有特有的沙米风味，感官评分最高。与 BMB 相比，最优条件下制作的 SMMB 亮度降低，黄度和红度升

高，二者色泽有明显差异；BMMB 的硬度、内聚性和弹性均高于 BMB，说明添加沙米粉部分改善了面包的质构特性。GC-IMS 结果以及基于 GC-IMS 的主成分分析均显示 SMMB 和 BMB 的风味存在显著差异，其中 SMMB 醇类和醛类相对含量较高，赋予其更高的醇香、柑橘香、青草香和麦芽香味，而 BMB 中酯类和杂环类相对含量较高，因而 BMB 具有更高的酯香、坚果味和烘烤味。本实验不仅优化了 SMMB 的制作配方，同时也明确了沙米粉对面包品质的影响，对于拓宽沙米深加工范围，提高其开发和利用价值具有重要意义。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 许海燕，冯鑫红，张金玉，等. 沙蓬的研究进展[J]. 食品科学，2020，41(13)：346−354. [XU Haiyan, FENG Xinhong, ZHANG Jinyu, et al. Recent progress in research on *Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq[J]. Food Science, 2020, 41(13): 346−354.]

[2] 魏林源，马彦军，马全林，等. 流动沙丘先锋植物沙米种子萌发影响因素[J]. 中国农学通报，2015，31(7)：18−22. [WEI Linyuan, MA Yanjun, MA Quanlin, et al. Influence factors analysis of *Agriophyllum squarrosum* germination of mobile sand dunes pioneer plant[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(7): 18−22.]

[3] 张德魁，马全林，魏林源，等. 沙米的主要营养成分及应用价值研究进展[J]. 现代农业科技，2019(16)：185−186,188. [ZHANG Dekui, MA Quanlin, WEI Linyuan, et al. Main nutritional components and application value of *Agriophyllum squarrosum*[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(16): 185−186, 188.]

[4] 任文明，刘雪峰，倪春梅. 毛乌素沙漠天然沙米营养成分的分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，2005，26(02)：88−90. [REN Wenming, LIU Xuefeng, NI chunmei. An analyse on nutritional composition of natural *Agriophyllum squarrosum* of Mao Wusu desert[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2005, 26(02): 88−90.]

[5] PENG J, WANG Y, CHEN G X, et al. Morphological and physicochemical properties of very small granules starch from *Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq. in comparison with maize starch[J]. Starch Starke, 2018, 70: 1700068.

[6] 李文婷，彭菁，孙旭阳，等. 双螺杆挤压对沙米复合粉理化及糊化特性的影响[J]. 中国粮油学报，2019，34(4)：112−117,125. [LI Wenting, PENG Jing, SUN Xuyang, et al. Effects of twin-screw extrusion on physicochemical and pasting properties of sand rice composite powder[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(4): 112−117,125.]

[7] 张宏康，黄悦怀，张清宇，等. 新型面包加工研究进展[J]. 农产品加工，2023(4)：91−95,100. [ZHANG Hongkang, HUANG Yuehuai, ZHANG Qingyu, et al. Review on the development of the new types of bread processing[J]. Farm Products Processing, 2023(4): 91−95,100.]

[8] 刘小飞，张雨欣，袁媛，等. 不同预处理小米粉对面团及面包品质的影响[J]. 粮食与油脂，2022，35(7)：48−52. [LIU Xiaofei, ZHANG Yuxin, YUAN Yua, et al. Effects of millet flour with different pretreatments on dough and bread quality[J]. Cereals and Oils, 2022, 35(7): 48−52.]

[9] 路飞，马涛，任文涛，等. 大米面包的生产配方及工艺条件的优化[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版)，2013，31(4)：482−487. [LU Fei, MA Tao, REN Wentao, et al. Optimization of ingredient and processing technology for rice bread[J]. Journal of Shenyang Normal University, 2013, 31(4): 482−487.]

[10] 尤香玲，徐向波. 甜面包制作工艺研究[J]. 江苏调味副食品，2018(3)：25−27. [YOU Xiangling, XU Xiangbo. On the production process of sweet bread[J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food, 2018(3): 25−27.]

[11] 钟艳，戢得蓉，何江红，等. 慈菇渣粉面包制备工艺及其配方研究[J]. 粮食与油脂，2019，32(7)：75−78. [ZHONG Yan, JI Derong, HE Jianghong, et al. Preparation technology and formula of *Sagittaria latifoliais* residue powder bread[J]. Cereals and Oils, 2019, 32(7): 75−78.]

[12] 江彩艳，白雨石，陈瑶，等. 不同酵母对红薯面包质地和风味的影响[J]. 食品工业科技，2022，43(24)：21−31. [JIANG Caiyan, BAI Yushi, CHEN Yao, et al. Effects of different yeasts on texture and flavor of sweet potato bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 21−31.]

[13] 彭菁. 沙米蛋白和淀粉的理化性质研究及应用[D]. 南京：南京农业大学，2017. [PENG Jing. Study on physicochemical properties of sand rice [D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2017.]

[14] 孙聪聪，庞道睿，黎尔纳，等. 响应面法优化 β-半乳糖苷酶法制备低聚半乳糖工艺[J]. 食品工业科技，2022，43(22)：246−255. [SUN Congcong, PANG Daorui, LI Erna, et al. Optimization of preparation of galactooligosaccharides by β-galactosidase using response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 246−255.]

[15] ROSELL C M, SANTOS E. Impact of fibers on physical characteristics of fresh and staled bake off bread[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98: 273−281.

[16] 张靖，蔺毅峰，周明. 山药面包配方的研究[J]. 粮油加工，2010(4)：83−86. [ZHANG Jing, LIN Yifeng, ZHOU Ming. Research on yam bread recipes[J]. Cereals and Oils Processing, 2010(4): 83−86.]

[17] MARIUTTI L R B, BRAGAGNOLO N. Influence of salt on lipid oxidation in meat and seafood products: A review[J]. Food Research International, 2017, 94: 90−100.

[18] TAMAI Y. Alcohol acetyl transferase genes and ester formation in brewer's yeast [J]. Biotechnology for Improved Foods & Flavors, 1996: 196-205.

[19] BIRCH A N, PETERSEN M A, HANSEN Å S. Review: Aroma of wheat bread crumb[J]. Cereal Chemistry, 2014, 91(2): 105−114.

[20] 胡宇薇，高梦祥. 气相离子迁移色谱解析白砂糖和黄油对面包感官品质和风味物质的影响[J]. 食品科学，2022，43(10)：66−72. [HU Yuwei, GAO Mengxiang. Effects of white sugar and butter on sensory quality and flavor substances of bread analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2022, 43(10): 66−72.]

[21] LUCA L D, AIELLO A, PIZZOLONGO F. Volatile organic compounds in breads prepared with different sourdoughs[J]. Applied Sciences, 2021, 11: 1330.

[22] 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(03): 282−290. [GUAN Tianqi, AN Yuhong, CHEN Xu, et al. Comparative analysis of volatile flavor components of two kinds of coarse grain bread by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(03): 282−290.]

[23] PICO J, BERNAL J, GÓMEZ M. Wheat bread aroma compounds in crumb and crust: A review[J]. Food Research International, 2015, 75: 200−215.

[24] 闫文芝, 杨蕾, 刘静. 内蒙古河套地区小麦粉风味物质 GC-IMS 分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(24): 151−157. [YAN Wenzhi, YANG Lei, LIU Jing. Wheat flour in hetao region of inner mongolia: analysis of flavor substances by gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(24): 151−157.]

[25] 金文刚, 赵萍, 姜鹏飞, 等. 基于 GC-IMS 技术结合多元统计模型分析不同色泽小米粥挥发性有机物差异[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 277−284. [JIN Wengang, ZHAO Ping, JIANG Pengfei, et al. Analysis of differential volatile organic compounds in different colored millet porridges by gas chromatographyion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2023, 44(6): 277−284.]

[26] BRUNSCHWIG C, SENGER-EMONNOT P, AUBANEL M L, et al. Odor-active compounds of Tahitian vanilla flavor[J]. Food Research International, 2012, 46(1): 148−157.

[27] 刘艳香, 关丽娜, 吴娜娜, 等. 基于 GC-IMS 技术分析糙米速食粥米储藏过程中风味物质的变化[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 113−131. [LIU Yanxiang, GUAN Lina, WU Nana, et al. Analysis of flavor changes of instant brown rice porridge rice during storage based on gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Grain, Oil and Food Science and Technology, 2022, 30(2): 113−131.]

[28] 金文刚, 刘俊霞, 赵萍, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱分析洋县不同色泽糙米蒸煮后挥发性风味物质差异[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 258−264. [JIN Wengang, LIU Junxia, ZHAO Ping, et al. Analysis of volatile flavor components in cooked unpolished rice of different colors from Yangxian county by headspace-gas chromatography-ion mobility spectroscopy[J]. Food Science, 2022, 43(18): 258−264.]

[29] 王金华, 叶晓仪, 母艳, 等. 贵州 3 种代表性猕猴桃种间特征香气成分比较分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6190−6197. [WANG Jinhua, YE Xiaoyi, MU Yan, et al. Comparative analysis of characteristic aroma components of 3 kinds of representative actinidia chinensis planch species in Guizhou[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(19): 6190−6197.]

[30] 张烁, 王倩, 郭志顶, 等. β-葡聚糖酶对青稞面包质构特性及其风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 11−19. [ZHANF Shuo, WANG Qian, GUO Zhiding, et al. Effect of β-glucanase on the texture and flavor compounds of highland barley bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 11−19.]

优先发表