杂粮复合粉添加量对馕品质及其挥发性物质变化的影响

祖力皮亚·艾麦提[1]，祖力皮牙·买买提[2]，于明[2]，毛红艳[2]，岳丽[2]，王佳敏[2]，尼格尔热依·亚迪卡尔[1*]

（1.新疆农业大学食品科学与药学学院，乌鲁木齐 830052）

（2.新疆农业科学院粮食作物研究所，乌鲁木齐 830091）

摘要：该文旨在探讨了当小麦中加入杂粮复合粉后对馕品质的影响，通过测定糊化特性、面团流变学特性、馕的质构特性、色泽以及感官评价，研究小麦粉中被添加不同比例的（0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%）杂粮粉后的影响，并采用气相色谱－离子迁移色谱（Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS）分析了杂粮馕的挥发性物质。结果显示，随着杂粮复合粉添加量的增长，馕的糊化温度从 67 ℃上升到 84.20 ℃；弱化度从 16 FU 上升到 36.50 FU；形成时间从 6.60 min 下降到 5.25 min；最大拉伸阻力从 478.25 BU 下降到 169.60 BU。面团的粉质、拉伸特性、馕的质构、色泽以及感官评价均随着杂粮复合粉的添加而发生了不同程度的变化。综合考虑，认为 20% 的杂粮复合粉被添加到小麦粉中较为合适。通过 GC-IMS 共鉴定出 55 种挥发性物质，包括环类化合物 2 种，呋喃类 3 种、酸类 4 种、酮类 5 种、醛类 9 种、醇类 9 种、酯类 15 种，其他类 8 种。与普通馕相比，杂粮馕中酯类（14.44%~19.36%）、醇类（15.25%~17.23%）、呋喃类（1.13%~1.54%）等挥发性风味物质含量有明显上升。将 20% 的杂粮粉添加到小麦面粉中，不仅能提高馕的营养价值，还能为杂粮馕的质量控制及风味鉴定提供理论和技术支持，这有利于杂粮馕产品的开发。

关键词：杂粮复合粉；杂粮馕；质构特性；气相色谱－离子迁移色谱

文章编号：1673-9078(2025)10-375-385 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1050

Effect of Adding Mixed Grains on the Quality of Naan and Changes in Volatile Flavor Substances

ZULIPIYA Aimaiti[1], ZULIPIYA Maimaiti[2], YU Ming[2], MAO Hongyan[2], YUE Li[2], WANG Jiamin[2], NIGARY Yadikar[1*]

(1. School of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2. Institute of Grain Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: The effect of adding multigrain composite flour on the quality of naan was investigated in this study. Gelatinization characteristics, dough rheological properties, texture characteristics, color, and sensory evaluation of naan were measured after adding different proportions (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30%) of multigrain flour to wheat flour. The volatile substances

引文格式：

祖力皮亚·艾麦提,祖力皮牙·买买提,于明,等.杂粮复合粉添加量对馕品质及其挥发性物质变化的影响[J].现代食品科技, 2025,41(10):375-385.

ZULIPIYA Aimaiti, ZULIPIYA Maimaiti, YU Ming, et al. Effect of adding mixed grains on the quality of naan and changes in volatile flavor substances [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 375-385.

收稿日期：2024-07-22；修回日期：2024-10-05；接受日期：2025-10-09

基金项目：自治区区域协同创新专项（科技援疆计划）项目 (2022E02092)；中央引导地方创新基金项目新疆特色粮油加工技术创新平台建设 (ZYYD2022B14)

作者简介：祖力皮亚 · 艾麦提（1993-），女，硕士研究生，研究方向：食品科学，E-mail：m13009662703@163.com

通讯作者：尼格尔热依 · 亚迪卡尔（1987-），女，博士，副教授，研究方向：药食两用植物功能性成分分析，E-mail：nigary-sy@xjau.edu.cn

of multigrain naan were analyzed using gas chromatography-ion mobility spectrometry. The results indicated that with the increase in the amount of multigrain composite flour, the gelatinization temperature of naan increased from 67 to 84.20 ℃, degree of weakening increased from 16 to 36.50 FU, formation time decreased from 6.60 to 5.25 min, and maximum tensile resistance decreased from 478.25 to 169.60 BU. The flour quality, tensile properties of the dough, and the texture, color, and sensory evaluation of naan changed to varying degrees with the addition of multigrain composite flour. Thus, adding 20% multigrain composite flour to wheat flour was considered appropriate. A total of 55 volatile substances were identified using gas chromatography-ion mobility spectrometry, including two types of cyclic compounds, three of furan compounds, four of acids, five of ketones, nine of aldehydes, nine of alcohols, 15 of esters, and eight of others. Compared with that of ordinary naan, the content of volatile flavor substances such as esters (14.44%~19.36%), alcohols (15.25%~17.23%), and furan compounds (1.13%~1.54%) in multigrain naan increased significantly. Hence, adding 20% multigrain flour to wheat flour not only improves the nutritional value of naan but also provides theoretical and technical support for the quality control and flavor identification of multigrain naan, which is beneficial for the development of multigrain naan products.

Key words: multigrain composite flour; multigrain naan; texture property; gas chromatography-ion mobility spectrometry

馕含有碳水化合物、维生素、蛋白质以及多种人体必需的矿物质元素，其风味独特、便于携带、能够长时间贮藏等特点[1]，已在食用历史中流传两千多年[2]，是新疆各族人民最常食用的主食之一。在新疆群众之中馕的种类也很多，比如芝麻馕、洋葱馕、玫瑰花酱馕、圆馕、油馕、辣皮子馕等。随着居民饮食结构的改善和消费水平的提高，消费者对馕的种类和营养健康提出新需求。杂粮营养丰富且具有一定保健功能，向馕中适量添加一些有益于人体健康的杂粮成分，成为了馕产业新的发展方向。杂粮中含有丰富的矿物质、膳食纤维以及蛋白质等多种人体所需的营养物质，这些营养物质使得杂粮具有降血脂、预防疾病等多种功效，有益于人体健康，即成为功能性食品的研究热点[3]。燕麦含有膳食纤维，给人一种饱腹感，推进肠道蠕动，有益于预防和缓解便秘。豌豆中的优质蛋白可以提高机体的抵抗力，有助于抵抗病原体的侵袭。玉米中的纤维素，既可以对胃肠蠕动有促进作用，又加快胆固醇的代谢。丁俊豪[4]在馕饼中添加油莎豆粉展开研究，发现当油莎豆粉添加量为 10% 时，馕在软硬适中，口感酥脆。

本研究以燕麦、豌豆、玉米为原料，不同添加量的杂粮复合粉为研究对象，探究杂粮复合粉添加量对面粉糊化特性、流变学特性、杂粮馕的感官品质、色泽以及挥发性物质的变化，为开发出营养健康、品质优良的杂粮馕提供理论基础和试验依据。将杂粮复合粉添加小麦粉加工成馕，不仅可以提高馕的营养成分，还可以丰富小麦馕的种类，提升杂粮附加值和杂粮馕产品的研发。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

豌豆、燕麦、玉米，源自乌鲁木齐江河市场采购；小麦粉，源自新疆天山面粉有限公司采购；食盐，源自新疆盐湖制盐有限责任公司采购；牛奶，源自西域春有限公司采购；酵母，源自安琪酵母股份有限公司采购；菜籽油，鸡蛋为市售。

1.2 仪器与设备

810114 型电子式粉质仪 +10 克揉面钵，德国布拉班德公司；860702 型电子式拉伸仪，德国布拉班德公司；DFY-600 型高速粉碎机，温岭市林大机械有限公司；风味分析仪 ®（配自动顶空进样装置），德国 G.A.S 公司；RVA-TECMASTER 型快速粘度仪，澳大利亚 Newport 公司；DA7250 型整粒谷物近红外品质分析仪，瑞典 Perten 公司；FX-6J-A 型面食发酵箱，广州威尔宝有限公司；PFA-T 型流变发酵仪，佩克昂科技有限公司；MM-HM55E101 型和面机，广东美的生活电器制造有限公司；TMS-PRO 型质构仪，美国 FTC 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 复合粉的制备

粉碎过筛（100 目）的鹰嘴豆粉：燕麦粉：玉米粉按质量分数 1:1:1 比例混合制备复合粉。复合粉按质量分数 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30% 添加到小麦粉中，混合均匀后装袋备用。

1.3.2 复合粉理化特性检测

湿面筋含量采用 GB/T 5506-2008 的方法测定；粘度测定按 LS/T 61012002 的方法测定；蛋白，灰分含量按 GB/T 18868-2002 的方法测定；粉质特性参照 GB/T 14614；拉伸特性参照 GB/T 14615；面团的发酵特性用 PFA-T 型流变发酵仪分析。

1.3.3 馕的制作

准确称量杂粮复合粉 300 g，30 g 食用油，2.4 g 酵母粉，3 g 盐，约 120 g 牛奶，加入一颗鸡蛋（约 50 g）揉成面团，35 ℃醒发 50 min，面团分割揉匀表面光滑为止，成型，上面用馕针印出来自己喜欢的花纹，230 ℃烘烤 18 min，成品。

1.3.4 馕的感官评价

馕的感官评价参考曹俊梅等[5]的方法，馕烤制冷却 10 min 后由经专业培训的技术人员 10 人评定[6]，评分标准见表 1。

表 1 馕评分和标准

Table 1 Nang scoring and standards

感官指标	评分标准	评分
外表形态（15分）	表面平整－光滑	11~15
	表面较为平整－无明显塌陷或鼓包	6~10
	表面有明显塌陷或鼓包	0~5
色泽（15 分）	金黄色	11~15
	浅黄－焦色不足或棕黄－焦色略重	6~10
	白色－无焦色或焦黑色过重	0~5
风味（20分）	有烘烤香味	15~20
	滋味一般－无异味	9~14
	有不可接受的气味	0~8
内部结构（15分）	切面平整－气孔均匀－掉渣少－发酵好	11~15
	切面较平整－气孔较均匀－掉渣较少－发酵较好	6~10
	切面不平整－气孔不均匀－掉渣多－发酵差	0~5
硬度（15分）	软硬适中－易下咽	11~15
	硬度偏软或偏硬－较易下咽	6~10
	硬－不易下咽	0~5
酥脆性（10分）	酥脆感好	8~10
	比较酥脆	5~7
	无酥脆感	0~4
咀嚼性（10分）	咀嚼适中－较柔软－不粘牙	6~10
	咀嚼干硬－粘牙－挂嗓	0~5

1.3.5 馕的质构特性

首先，将杂粮馕冷却 0.5 h。待冷却完成后，将馕芯切割成 3 cm×3 cm 的小块，用以测定其硬度、粘附性、弹性、胶粘性以及咀嚼性。质构分析（Texture Profile Analysis, TPA）参数测试条件如下：采用 P/35 圆柱型探头，测前速率：1 mm/s，测试速率：5 mm/s，压缩比 50%，每个样本重复测试 3 次。

1.3.6 馕的色泽测定

采用色差仪测定杂粮馕的色泽。L^* 表明明暗度，a^* 表明红绿色，b^* 表明黄蓝色。总色差用 ΔE 表示，其计算如下：

$$\Delta E=\sqrt{(\Delta L)^2+(\Delta b)^2+(\Delta a)^2} \quad (1)$$

式中：

L^*——明暗度；

a^*——红绿色；

b^*——黄蓝色。

1.3.7 馕挥发性物质检测

精确称取 1 g 杂粮馕样品，放入 20 mL 顶空进样瓶中，75 ℃振荡孵育 20 min，振荡转速 500 r/min。顶空进样针温度 95 ℃，进样体积 500 μL。气相色谱（Gas Chromatography, GC）条件如下：采用 MXT-5 型色谱柱（15 m×0.53 mm, 1 μm），色谱柱温度 60 ℃，载气为氮气（N_2，纯度≥99.999%）。漂移气流量（E1）为 75 mL/min；载气流量（E2）设置如下：0~2 min，2 mL/min；2~10 min，10 mL/min；10~20 min，100 mL/min；20~30 min，150 mL/min。离子迁移谱（Ion Mobility Spectrometry-IMS）条件设置为：IMS 探测器温度为 45 ℃，IMS 漂移管流速为 150 mL/min，漂移管长度为 5.3 cm，管内线性电压为 500 V/cm。

1.3.8 数据分析

采用 Excel 2016，SPSS 25.0 分析数据，采用 Origin 2021 作图，结果用平均值 ± 标准差表示。运用 GC-IMS Library Search 软件内置的 NIST（National Institute of Standards and Technology）数据库与 IMS 数据库进行定性分析。

2 结果与分析

2.1 杂粮添加量理化对复合粉特性的影响

由表 2 可知，随着复合粉添加量的增加，湿面筋从 30.19% 下降到 26.90%，蛋白质从 9.86% 增长到 10.33%，灰分从 0.35% 增长到 0.64%。当添加量超出 10% 时，复合粉的湿面筋含量呈显著减低趋势且显著低于对照组（$P<0.05$）。适量添加复合粉，有益于形成面团中的面筋网络，进而增加面团筋力。然而，过量添加杂粮粉会对其面团的面筋网络造成破坏。杂粮复合粉的添加致使复合粉的蛋白质含量呈升高趋势，是因为燕麦和豌豆中的高蛋白质含量有关。小麦粉中面筋主要由麦谷蛋白和麦胶蛋白组成[7]，但随着添加量减少了复合粉中的麦谷蛋白和麦胶蛋白，会引致湿面筋含量下降的现象，由于不

溶性物质的增加灰分也呈上升趋势。

表 2 杂粮粉添加量对复合粉理化特性影响

Table 2 Effect of the amount of multigrain powder added on the physicochemical properties of composite powder

添加比例/%	蛋白质/%	灰分/%	湿面筋/%
0	9.86 ± 0.13[b]	0.35 ± 0.01[f]	30.19 ± 1.09[a]
5	9.89 ± 0.13[b]	0.40 ± 0.01[e]	29.36 ± 0.37[a]
10	9.91 ± 0.07[b]	0.47 ± 0.01[d]	27.88 ± 0.11[b]
15	10.31 ± 0.07[a]	0.61 ± 0.01[b]	27.13 ± 0.00[b]
20	10.22 ± 0.10[a]	0.56 ± 0.01[c]	27.64 ± 0.11[b]
25	10.42 ± 0.01[a]	0.60 ± 0.01[b]	27.23 ± 0.27[b]
30	10.33 ± 0.01[a]	0.64 ± 0.00[a]	26.90 ± 0.31[b]

注：不同小写字母表示不同添加量间显著性差异（$P<0.05$）。表 3~7 同。

2.2 杂粮添加量对复合粉糊化特性的影响

面粉的糊化特性可以影响面制品的加工特性进而影响面粉的品质。如表 3 所示，随着添加量的增加，峰值粘度由 2 760.5 cP 上升至 3 262 cP，低谷粘度由 1 694 cP 上升至 1 854 cP，稀懈值由 1 066.5 cP 上升至 1 215 cP，最终粘度 2 944.5 cP 上升至 4 202.5 cP，回生值 1 250.5 cP 上升至 2 241.0 cP。稀懈值体现淀粉的热稳定性，稀懈值越大，复合粉稳定性越差[8]，随着复合粉的添加稀懈值呈上升趋势，回生值可用于体现杂粮复合粉中淀粉冷却后的回生状况，并且回生值越大，面制品的老化速度也就越快[9]。当复合粉添加量为 25% 时，糊化温度 67 ℃上升至 84.20 ℃，糊化温度随着杂粮复合粉添加量的增长而升高。

2.3 杂粮添加量对面粉粉质特性的影响

图 1 可知，随着复合粉添加量，面团的吸水率、弱化度、形成时间、稳定时间均显现不同的变化趋势。当添加量为 5%~25% 范围时，吸水率呈先上升后下降的趋势，添加量为 5% 时，吸水率最小；当添加量处于 10%~20% 范围时，相较于对照组，吸水率显著增加（$P>0.05$）。吸水率的上下影响面团的加工性能，吸水率越大，越有益于进行面团加工，越少面团品质下降，随着添加量的增加，形成时间与稳定时间均呈下降趋势。添加量为 15% 时，复合面团的形成时间有所降低，这是由于复合粉中含有的淀粉与其他营养组分相互作用，从而形成了一定的胶凝体系所致。稳定时间降低是由于在面团中，面筋蛋白含量减少，不能建立优质的网络结构，使得面团稳定性劣，不益于面团进行加工处理。复合粉添加量越多，弱化度越高，面团筋力越弱，弱化度呈升高趋势且显著高于对照组（$P>0.05$），表明面团韧性降低，面筋强度变弱，复合粉品质呈劣变的趋势。

表 3 杂粮粉添加量对复合粉糊化特性的影响

Table 3 Influence of the amount of multigrain powder added on the properties of composite powder paste

添加比例/%	峰值粘度/cp	低谷粘度/cp	稀懈值/cp	最终粘度/cp	回生值/cp	峰值时间/min	糊化温度/℃
0	2 760.5 ± 150.61[c]	1 694.0 ± 98.99[b]	1 066.5 ± 51.61[b]	2 944.5 ± 133.64[d]	1 250.5 ± 34.64[f]	6.00 ± 0.09[a]	67.00 ± 0.00[d]
5	2 909.0 ± 50.91[bc]	1 670.5 ± 91.92[b]	1 238.5 ± 41.71[a]	3 115.0 ± 48.08[cd]	1 444.5 ± 38.89[e]	6.00 ± 0.18[a]	67.53 ± 0.60[cd]
10	2 923.5 ± 28.99[bc]	1 728.5 ± 28.99[ab]	1 195.0 ± 0.00[ab]	3 252.0 ± 26.87[c]	1 523.5 ± 2.12[d]	6.20 ± 0.00[a]	68.70 ± 0.00[c]
15	3 122.0 ± 38.18[ab]	1 854.5 ± 58.68[a]	1 267.5 ± 20.50[a]	3 845.0 ± 70.71[c]	1 990.5 ± 12.02[b]	6.10 ± 0.04[a]	82.88 ± 0.60[a]
20	3 170.5 ± 95.45[ab]	1 811.0 ± 73.53[ab]	1 259.5 ± 21.92[a]	3 812.0 ± 94.75[b]	1 901.0 ± 21.21[c]	6.10 ± 0.04[a]	83.40 ± 0.00[a]
25	3 218.5 ± 163.34[abc]	1 782.5 ± 20.50[ab]	1 236.0 ± 142.83[a]	3 827.0 ± 28.28[b]	2 044.5 ± 7.77[b]	6.04 ± 0.23[a]	84.20 ± 1.20[a]
30	3 262.0 ± 151.32[a]	1 761.5 ± 98.28[ab]	1 215.5 ± 53.03[ab]	4 202.5 ± 149.19[a]	2 241.0 ± 50.91[a]	6.10 ± 0.04[a]	81.32 ± 0.60[b]

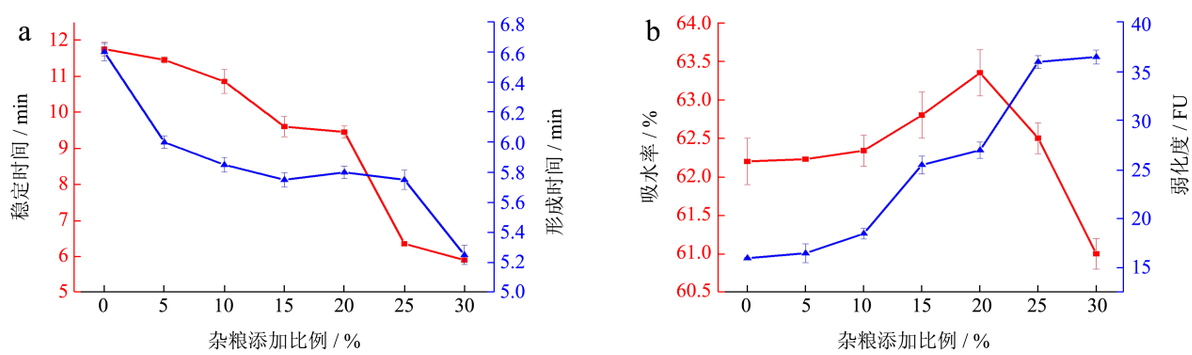


图 1 不同杂粮粉添加量下粉质特征的变化

Fig.1 Changes in powder characteristics under the amount of different coarse grain powder

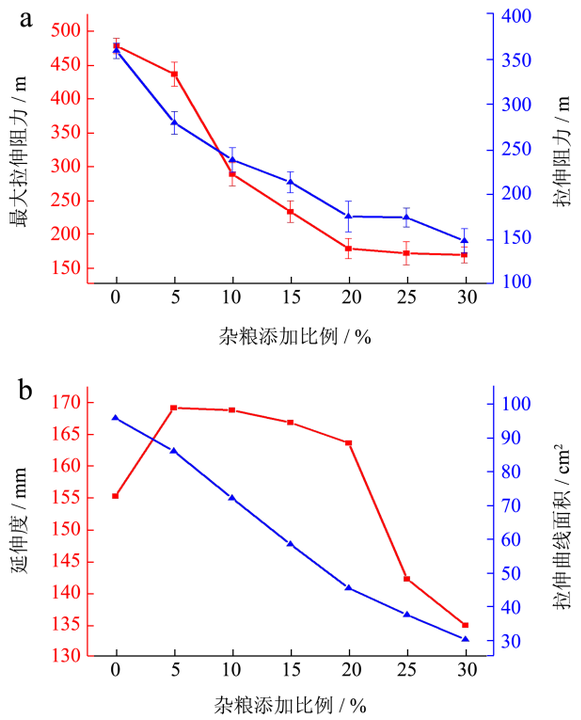


图 2 不同杂粮粉添加量下面团拉伸特征的变化

Fig.2 Changes in the tensile characteristics of the mass under the added amount of different miscellaneous grain powder

2.4 杂粮添加量对面团拉伸特性的影响

杂粮复合粉添加量对面团拉伸特性的影响见图 2。面团拉伸指标表明面团筋力强度，影响面粉烘焙品质。拉伸阻力越大，表明面团面筋强度越大，面团持气能力越强[10]。由图 2 可知，拉伸阻力随着复合粉添加量的增加呈下降趋势，表明添加量的增加导致面团品质和产气能力下降。延伸度表明面团的可塑性和膨胀能力，复合粉的添加对面团的持气性能由显著影响。最大拉伸阻力表征面筋网络的持气能力，最大拉伸阻力和拉伸曲线面积随着添加量的增加呈下降趋势，表明面筋网络的持气能力逐渐下降，面团拉伸特性降低。

2.5 杂粮添加量对面团发酵特性的影响

发酵良好的面团具有坚固稳定的面筋网络和较好的持气力，这能更好的保存气体并使馕具有良好的质地[11]。复合粉添加量对面团发酵特性的影响如表 4 所示。随着添加量的增加，杂粮面团的发酵最大高度、面团出现空洞时间、总释放体积、面团的产气能力均呈下降趋势。复合粉的添加稀释了面团面筋蛋白，进而导致面团难以构建保持气体的面筋网络结构。在添加量 5%~10% 时，面团的产气量上升，产气能力提高，这主要是因为杂粮复合粉促进了面筋蛋白和淀粉颗粒的结合，增加了面筋结构的稳定性，从而增大了面团体积；然而过多添加的复合粉与面筋蛋白争夺水分，面筋网络难以延伸展开，致使面团体积减小[12]，因此总释放体积呈下降趋势。保留系数是一个重要的指标，保留系数越高表明面团发酵能力越好。由表 4 可知，随着复合粉添加量的递增，面团保留系数呈降低趋势，这表明在面团发酵过程中二氧化碳放出的量越多，面团品质就会相应地下降。

2.6 杂粮添加量对馕品质的影响

从表 5 可以观测到，随着杂粮复合粉添加量的持续递增，馕的感官评价、色泽、组织结构、酥脆性以及风味分值呈显著下降的趋势，而硬度、外表形态及感官评分呈现曲线式变化（$P<0.05$）。总体来看，添加量范围在 5%~20% 时，杂粮馕的总体感官评价较好。添加量为 20% 时，杂粮馕感官评价最高 85.38 分，色泽均匀一致，香气浓郁、具有杂粮特有的滋味和豆香味、口感协调、软硬适中、质地细腻、气孔均匀，过量的杂粮粉使馕的口感粗糙，颜色变暗。

表 4 不同杂粮粉添加量下面团发酵特征值的变化

Table 4 Changes of group fermentation characteristic value under different multigrain powder addition amount

添加比例/%	面团发酵最大高度 Hm/mm	总释放体积 Tv/mL	气体释放最大高度 Hm'/mm	面团出现孔洞时间 Tx/h	保留系 R/%
0	32.65 ± 0.74[ab]	2 888.82 ± 104.96[a]	126.53 ± 3.59[a]	0.30 ± 0.01[a]	93.00 ± 0.03[a]
5	35.10 ± 0.25[a]	3 439.08 ± 107.94[a]	146.13 ± 3.93[a]	0.32 ± 0.16[a]	92.00 ± 0.04[a]
10	33.30 ± 0.14[ab]	3 301.38 ± 70.94[a]	141.69 ± 4.32[a]	0.33 ± 0.18[a]	93.00 ± 0.02[a]
15	28.45 ± 0.89[ab]	3 129.19 ± 106.34[a]	139.59 ± 4.1[a]	0.28 ± 0.11[a]	92.00 ± 0.03[a]
20	29.90 ± 1.27[ab]	3 615.29 ± 101.81[a]	175.31 ± 5.58[a]	0.22 ± 0.02[a]	90.00 ± 0.02[a]
25	27.85 ± 0.20[ab]	3 574.06 ± 101.88[a]	153.83 ± 5.14[a]	0.22 ± 0.02[a]	90.00 ± 0.00[a]
30	26.75 ± 0.33[b]	3 057.53 ± 101.14[a]	134.49 ± 4.78[a]	0.21 ± 0.01[a]	90.00 ± 0.03[a]

表 5 不同杂粮复合粉添加量对馕感官品质的影响

Table 5 Effects of different multigrain compound flour supplemental levels on sensory quality of Naan

添加比例 /%	外表形态（15 分）	色泽 (15 分)	风味（20 分）	内部结构（15 分）	硬度（15 分）	酥脆性（10 分）	咀嚼性（10 分）	总分（100 分）
0	12.25 ± 1.98^{ab}	12.75 ± 1.39^{ab}	16.25 ± 2.60^{a}	12.38 ± 1.06^{a}	12.13 ± 1.89^{a}	8.38 ± 0.74^{a}	8.38 ± 0.52^{b}	82.50 ± 5.58^{bc}
5	12.50 ± 1.6^{ab}	13.50 ± 1.69^{a}	16.75 ± 1.98^{a}	12.88 ± 1.36^{a}	12.63 ± 1.30^{a}	7.75 ± 0.89^{ab}	7.75 ± 0.71^{bc}	83.75 ± 6.54^{b}
10	12.00 ± 1.41^{ab}	13.00 ± 1.41^{a}	16.00 ± 2.39^{ab}	12.38 ± 1.06^{a}	12.88 ± 0.99^{a}	8.25 ± 0.46^{a}	7.38 ± 0.92^{bc}	82.38 ± 5.88^{bc}
15	12.75 ± 1.28^{ab}	12.63 ± 1.30^{ab}	15.75 ± 2.60^{ab}	12.63 ± 1.30^{a}	12.63 ± 1.30^{a}	8.38 ± 0.52^{a}	8.38 ± 0.74^{b}	81.88 ± 6.62^{c}
20	13.63 ± 0.52^{a}	13.13 ± 0.83^{a}	16.50 ± 2.56^{a}	13.50 ± 1.07^{a}	11.50 ± 1.51^{ab}	7.63 ± 0.52^{ab}	7.00 ± 1.07^{c}	85.38 ± 4.07^{a}
25	12.38 ± 0.92^{ab}	11.25 ± 2.60^{b}	13.75 ± 3.28^{c}	12.25 ± 2.49^{a}	12.63 ± 2.70^{a}	7.88 ± 1.36^{ab}	7.38 ± 1.06^{bc}	76.75 ± 12.37^{cd}
30	11.63 ± 1.51^{b}	11.38 ± 1.30^{ab}	14.38 ± 2.20^{bc}	12.00 ± 1.41^{a}	12.75 ± 2.05^{a}	7.38 ± 0.92^{b}	8.50 ± 0.76^{a}	78.00 ± 6.32^{cd}

表 6 不同杂粮粉添加量下馕的质构特性主要特征值

Table 6 The main characteristic values of texture characteristics of Naan under different additive levels of coarse grain flour

添加比例/%	硬度/N	粘附性 N/mm	弹性/mm	胶粘性/N	咀嚼性/mj
0	12.05 ± 0.21^{c}	0.58 ± 0.17^{a}	3.76 ± 0.45^{ab}	3.48 ± 0.11^{b}	7.00 ± 0.99^{b}
5	5.99 ± 0.16^{e}	0.98 ± 0.42^{a}	4.57 ± 0.30^{ab}	1.73 ± 0.13^{e}	7.90 ± 1.13^{b}
10	8.08 ± 0.26^{d}	1.45 ± 0.70^{a}	4.97 ± 0.85^{a}	2.26 ± 0.25^{de}	10.60 ± 1.41^{a}
15	8.00 ± 0.69^{d}	1.59 ± 0.26^{a}	4.46 ± 0.26^{ab}	2.19 ± 0.17^{de}	10.75 ± 0.21^{a}
20	8.43 ± 0.42^{d}	2.10 ± 0.67^{a}	4.52 ± 0.06^{ab}	2.58 ± 0.13^{cd}	11.65 ± 0.21^{a}
25	15.63 ± 0.42^{b}	1.41 ± 0.01^{a}	4.08 ± 0.96^{ab}	3.15 ± 0.28^{bc}	11.80 ± 0.14^{a}
30	27.49 ± 0.26^{a}	0.65 ± 0.06^{a}	3.35 ± 0.21^{b}	4.35 ± 0.45^{a}	12.55 ± 0.49^{a}

表 7 不同杂粮粉添加量下馕的色泽特性主要特征值

Table 7 Main characteristic values of color characteristics of Naan under different mixed grain flour dosage

添加比例/%	L^*	a^*	b^*	ΔE
0	62.51 ± 1.04^{a}	7.90 ± 0.67^{d}	28.83 ± 0.37^{a}	39.60 ± 0.64^{e}
5	57.12 ± 1.35^{b}	10.83 ± 1.00^{c}	27.03 ± 0.57^{b}	43.55 ± 1.07^{d}
10	52.42 ± 0.50^{c}	12.37 ± 0.34^{bc}	24.97 ± 0.49^{c}	46.98 ± 0.77^{c}
15	52.39 ± 1.04^{c}	12.79 ± 0.44^{bc}	24.54 ± 0.25^{c}	47.14 ± 1.09^{bc}
20	48.41 ± 0.78^{d}	13.07 ± 0.30^{b}	23.38 ± 0.33^{cd}	50.12 ± 0.63^{b}
25	46.80 ± 0.41^{d}	14.13 ± 0.37^{a}	21.34 ± 0.39^{cd}	50.50 ± 0.23^{b}
30	42.63 ± 0.90^{e}	14.97 ± 0.32^{a}	19.91 ± 0.40^{d}	54.35 ± 0.79^{a}

2.7 杂粮添加量对馕质构特性的影响

质构是表征食品质量和接受度的重要指标之一，能客观的反应馕的品质[13]，不同比例杂粮复合粉添加对馕品质的影响如表 6 所示，当添加比例在 30% 时，杂粮馕硬度为 27.49 N，是普通馕的 2.28 倍；咀嚼性为 12.55 mj，是普通馕的 1.79 倍；胶粘性为 4.35 N，是普通馕的 1.25 倍，这些参数整体上呈上升趋势。杂粮馕的硬度、咀嚼性、胶粘性与杂粮馕的品质呈负相关，数值越大表明杂粮馕品质越下降。张纷等[14]在对藜麦馒头展开研究时亦发现，随着藜麦粉的添加，藜麦馒头的硬度、咀嚼性显著增大。对于杂粮馕而言，弹性较大，口感更佳、比例适宜。由表 6 可知，随着添加量的增加馕的弹性呈渐渐下降趋势，面团面筋组织被损坏和弱化的程度增长。此外，由于燕麦和豌豆中存在膳食纤维含量，进而引起水分出现组合，引起面筋蛋白吸水不够，阻止了面筋网络组合的形成，从而使面团持气能力降低，以致面团和杂粮馕品质衰退。

2.8 杂粮添加量对馕色泽的影响

色泽是食品的主要属性之一，直接影响消费者对产品的喜爱度[15]。杂粮复合粉不同添加量所制成的杂粮馕如表 7 所示，随着添加量，L^* 值由 62.51 下降至 42.63，即杂粮馕白度渐渐减低，馕的表面颜色明显比普通馕表面颜色深；b^* 值由 28.83 下降至 19.91，馕的表面黄度明显比小麦粉馕表面色泽淡；ΔE 值呈上升趋势，由 39.60 上升至 54.35，从 ΔE 可知，添加复合粉的馕相对小麦面粉的馕颜色加深且偏红。a^* 值 7.90 上升至 14.97，即杂粮馕的红度增加，色泽变暗。杂粮复合粉相较于小麦面粉而言，蛋白质和膳食纤维含量较高，这会导致杂粮馕在烘焙过程中发生美拉德反应和焦糖化反应，对馕得色泽产生重要影响。

2.9 各项指标之间的相关性分析

由图 3 可知，复合粉添加比例与湿面筋、吸水率、拉伸阻力、面团发酵最大高度、弹性呈显著负相关（$P<0.05$），与弱化度、峰值粘度、回生值、硬度、咀嚼性呈显著正相关（$P<0.05$），这表明随着添加量的增加，馕硬度和咀嚼性分数高，感官评分会降低，馕品质下降。感官评价总分与稳定时间、总释放体积、面团持气率呈显著正相关（$P<0.05$），面团稳定时间代表面团稳定性，稳定时间越长代表面团弹性越好，品质越好。总释放体积和面团持气率越高表明面团发酵好，馕感官评价越高，表明面团的稳定性和发酵特性跟杂粮馕的品质有关。硬度与吸水率、稳定时间、总释放体积、感官评分呈显著负相关（$P<0.05$），稳定时间和总释放体积越大，感官评分越高，表明面团发酵好，馕的硬度会下降。

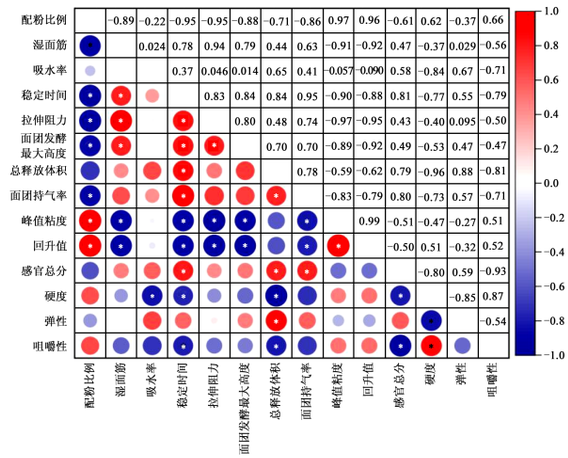
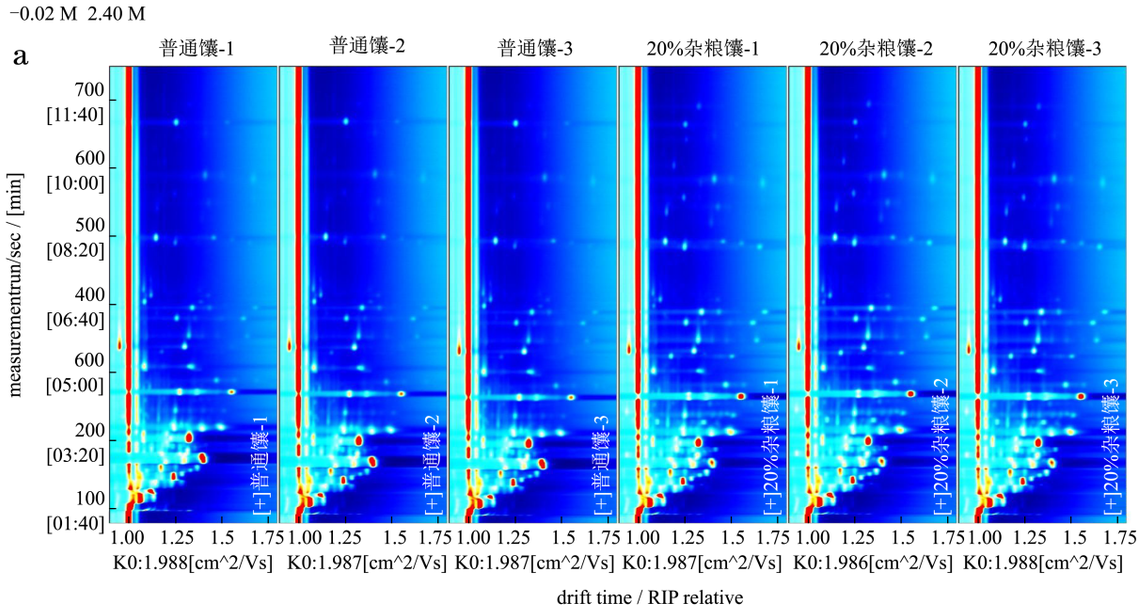


图 3 杂粮复合粉添加量与馕面团品质指标之间的相关性

Fig.3 Correlation between the added amount of multigrain composite flour and Naan dough quality index

2.10 普通馕和杂粮馕GC-IMS挥发性成分图谱差异

采用 GC-IMS 法测定了普通馕和杂粮馕的挥发性化合物，为了了解两种馕样品的挥发性化合物差异，根据每个化合物的信号强度创建了二维和三维图（图 4a、4b）。大多数信号出现在 0~750 s 保留时间和飘移时间 1~1.5 ms 内，普通馕和杂粮馕样品其挥发性风味物质的种类和浓度存在显著差异。X 标上的红色竖线表明离子峰，离子峰两边的每一个点代表一种挥发性化合物。白色表明浓度较低，红色表明浓度较高，颜色越深表明浓度越高。纵坐标表示保留时间（s）。



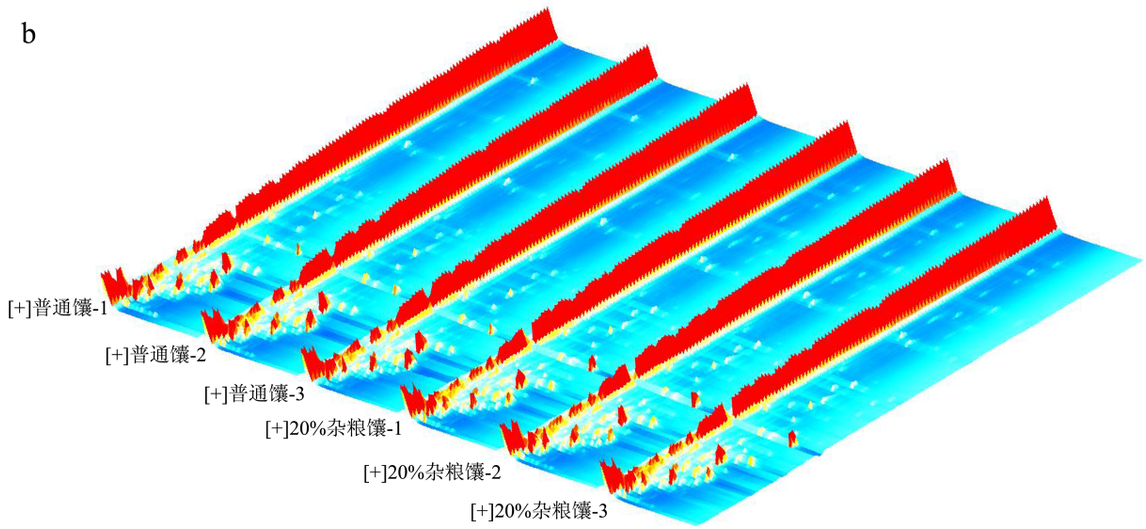


图 4 普通馕和杂粮馕挥发性成分气相 – 离子迁移分析图谱

Fig.4 Gas-phase ion migration analysis of volatile components of common Naan and multigrain Naan

注：（a）二维，（b）三维。

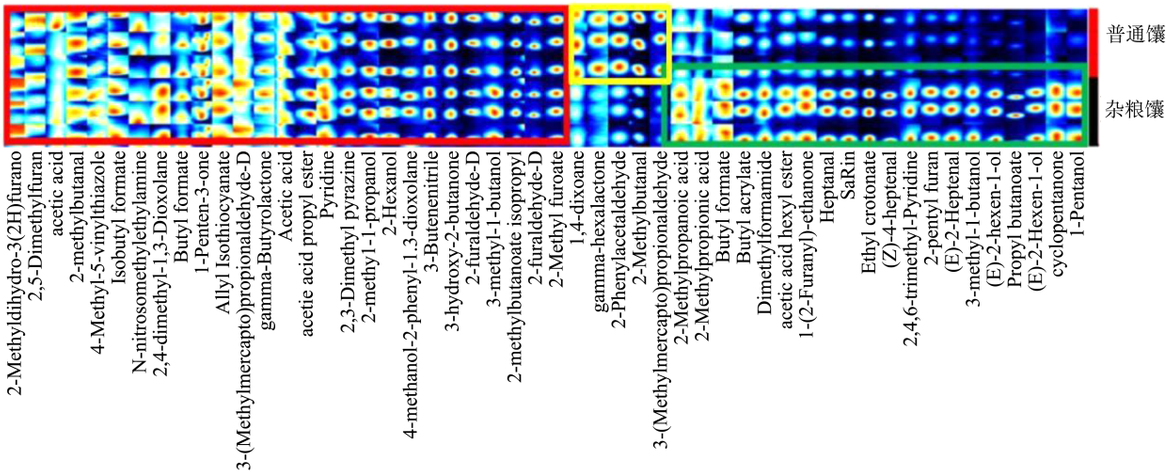


图 5 普通馕和杂粮馕挥发性成分指纹图谱

Fig.5 Volatile components fingerprint chromatograms of common Naan and multigrain Naan

2.11 馕中挥发性物质定性分析

风味在消费者喜好、接受度和购买行为中占主导地位[16]。研究表明，当杂粮粉添加量为 20% 时馕的综合评价最高。为了直观地观察样品中挥发性组分及样品之间挥发性成分的区别，基于 GC-IMS 技术构建了普通馕及杂粮馕的挥发性指纹图谱（图 5），共有且相对含量较高的挥发性化合物主要包括 2,3-二甲基吡嗪、异丁醇、2-己醇、苯甲醛丙三醇缩醛、烯丙基腈、3-羟基 -2-丁酮、糠醛、异戊醇、2-甲基丁酸异丙酯、乙酸丙酯、丁内酯、甲硫基丙醛、1-戊烯-3-酮、2,4 二甲基-1,3 二氧戊环、甲酸丁酯、2-甲基丁醇、2,5- 二甲基呋喃，共同形成了馕所具有的共同独特香味。黄色矩形框区域的挥发性物质在普通馕样品中相对含量较高，包括 3-甲硫基丙醛、2-甲基丁醛、苯乙醛、γ-己内酯、1,4-二氧六环，这些物质的存在为这些食品贡献了独特的风味特征。在杂粮馕中相对含量较高的挥发性物质，主要包括巴豆酸乙酯、2-甲基丁酸异丙酯、2-糠酸甲酯、异戊醇、2-正戊基呋喃，这些物质能够为杂粮馕带来特殊的香气成分，如杂粮复合粉的添加增加了馕中豆香味和杂粮香味。杂粮主要挥发性成分为醇类、酯类、酸类、呋喃类化合物，随着杂粮复合粉的添加，杂粮馕中的这些挥发性物质含量显著上升，进而使馕的风味更为丰足。

表 8 杂粮馕和普通馕中挥发性化合物的组成及相对含量

Table 8 The composition and relative content of volatile compounds in whole grain Naan and regular Naan

类别	保留时间/s	中文名称	英文名称	CAS 号	分子式	相对含量/%	
						普通馕	杂粮馕
酯类	398.895	丁酸丙酯	Propyl butanoate	C105668	$C_7H_{14}O_2$	0.28 ± 0.01	0.51 ± 0.04
	588.208	乙酸己酯	acetic acid hexyl ester	C142927	$C_8H1_6O_2$	0.61 ± 0.03	0.81 ± 0.00
	667.489	γ-己内酯	γ-hexalactone	C695067	$C_6H_{10}O_2$	0.12 ± 0.00	0.07 ± 0.00
	608.747	异戊酸甲酯	Methyl isopentanoate	C556241	$C_6H_{12}O_2$	0.30 ± 0.01	0.69 ± 0.02
	496.185	2-糠酸甲酯	2-Methyl furoate	C611132	$C_6H_6O_3$	1.75 ± 0.06	1.79 ± 0.01
	419.264	γ-丁内酯	γ-Butyrolactone	C96480	$C_4H_6O_2$	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.00
	377.985	丙烯酸正丁酯	Butyl acrylate	C141322	$C_7H_{12}O_2$	0.94 ± 0.01	1.18 ± 0.02
	350.317	异硫氰酸烯丙酯	Allyl Isothiocyanate	C57067	C_4H_5NS	0.49 ± 0.00	0.47 ± 0.02
	335.895	2-甲基丁酸异丙酯	2-methylbutanoate-isopropyl	C66576714	$C_8H_{16}O_2$	2.38 ± 0.31	2.55 ± 0.34
	270.59	巴豆酸乙酯	Ethyl crotonate	C623701	$C_6H_{10}O_2$	3.02 ± 0.08	5.58 ± 0.12
	204.232	甲酸丁酯-M	Butyl formate-M	C592847	$C_5H_{10}O_2$	0.38 ± 0.14	0.58 ± 0.04
	189.271	甲酸丁酯-D	Butyl formate-D	C592847	$C_5H_{10}O_2$	0.75 ± 0.20	1.14 ± 0.16
	176.593	乙酸丙酯	acetic acid propyl ester	C109604	$C_5H_{10}O_2$	1.11 ± 0.05	1.30 ± 0.11
	163.886	甲酸异丁酯	Isobutyl formate	C542552	$C_5H_{10}O_2$	1.88 ± 0.30	1.92 ± 0.11
	150.573	乙酸乙酯	Ethyl acetate	C141786	$C_4H_8O_2$	0.35 ± 0.21	0.71 ± 0.04
合计						14.44 ± 0.10	19.36 ± 0.08
醛类	311.212	糠醛-M	2-furaldehyde-D	C98011	$C_5H_4O_2$	2.01 ± 0.03	1.68 ± 0.01
	172.869	2-甲基丁醛	2-methylbutanal	C96173	$C_5H_{10}O$	11.21 ± 0.07	6.31 ± 0.16
	667.261	苯乙醛	2-phenylacetaldehyde	C122781	C_8H_8O	1.18 ± 0.01	0.70 ± 0.05
	488.864	(*E*)-2-庚烯醛	(*E*)-2-Heptenal	C18829555	$C_7H_{12}O$	0.77 ± 0.03	1.62 ± 0.01
	498.49	苯甲醛丙三醇缩醛	4-methanol-2-phenyl-1.3-dioxolane	C1708390	$C_{10}H_{12}O_3$	0.45 ± 0.01	0.48 ± 0.05
	402.542	3-甲硫基丙醛-M	3-(Methylmercapto) propionaldehyde-M	C3268493	C_4H_8OS	1.12 ± 0.02	0.68 ± 0.04
	398.743	3-甲硫基丙醛-D	3-(Methylmercapto) propionaldehyde-D	C3268493	C_4H_8OS	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.04
	393.494	庚醛	Heptanal	C111717	$C_7H_{14}O$	0.95 ± 0.06	1.51 ± 0.05
	311.731	糠醛-D	2-furaldehyde-D	C98011	$C_5H_4O_2$	4.96 ± 0.14	3.87 ± 0.16
合计						22.37 ± 0.04	16.92 ± 0.06
醇类	382.432	CIS-4-庚烯醇	(*Z*)-4-heptenal	C6728310	$C_7H_{12}O$	0.46 ± 0.00	0.67 ± 0.02
	272.71	2-己醇	2-Hexanol	C626937	$C_6H_{14}O$	2.78 ± 0.03	2.77 ± 0.03
	219.917	异戊醇	3-methyl-1-butanol	C123513	$C_5H_{12}O$	3.57 ± 0.82	4.47 ± 0.19
	158.763	异丁醇	2-methyl-1-propanol	C78831	$C_4H_{10}O$	3.01 ± 0.03	3.03 ± 0.04
	331.605	反式-2-己烯醇-M	(*E*)-2-hexen-1-ol	C928950	$C_6H_{12}O$	0.38 ± 0.08	1.09 ± 0.03
	326.969	反式-2-己烯醇-D	(*E*)-2-Hexen-1-ol	C928950	$C_6H_{12}O$	0.13 ± 0.02	0.42 ± 0.01
	200.726	2-甲基丁醇	2-methyl-1-butanol	C137326	$C_5H_{12}O$	1.04 ± 0.06	0.99 ± 0.03
	133.933	仲丁醇	2-Butanol	C78922	$C_4H_{10}O$	3.76 ± 0.31	3.38 ± 0.12
	239.337	正戊醇	1-Pentanol	C71410	$C_5H_{12}O$	0.12 ± 0.02	0.41 ± 0.07
合计						15.25 ± 0.17	17.23 ± 0.06

续表 8

类别	保留时间/s	中文名称	英文名称	CAS 号	分子式	相对含量/%	
						普通馕	杂粮馕
酮类	165.265	羟基丙酮	1-Hydroxy-2-propanone	C116096	$C_3H_6O_2$	0.70 ± 0.51	0.84 ± 0.21
	261.607	2-甲基四氢呋喃-3-酮	2-Methyldihydro-3(2H)furanone	C3188009	$C_5H_8O_2$	0.41 ± 0.07	0.39 ± 0.06
	229.726	环戊酮	cyclopentanone	C120923	C_5H_8O	0.27 ± 0.03	0.56 ± 0.03
	201.895	3-羟基-2-丁酮	3-hydroxy-2-butanone	C513860	$C_4H_8O_2$	11.37 ± 0.28	9.49 ± 0.07
	170.24	1-戊烯-3-酮	1-Penten-3-one	C1629589	C_5H_8O	11.27 ± 0.88	10.71 ± 0.43
合计						24.02 ± 0.35	21.99 ± 0.16
酸类	148.922	醋酸-M	Acetic acid	C64197	$C_2H_4O_2$	5.83 ± 0.15	5.46 ± 0.26
	133.458	醋酸-D	acetic acid	C64197	$C_2H_4O_2$	0.92 ± 0.37	0.73 ± 0.04
	252.389	异丁酸-D	2-Methylpropionic acid-D	C79312	$C_4H_8O_2$	0.25 ± 0.03	0.34 ± 0.01
	229.246	异丁酸-M	2-Methylpropanoic acid-M	C79312	$C_4H_8O_2$	0.82 ± 0.07	0.87 ± 0.04
合计						7.82 ± 0.15	7.4 ± 0.08
呋喃类	177.504	2,5-二甲基呋喃	2,5-Dimethylfuran	C625865	C_6H_8O	0.60 ± 0.13	0.53 ± 0.03
	560.843	2-正戊基呋喃	2-pentyl furan	C3777693	$C_9H_{14}O$	0.26 ± 0.01	0.53 ± 0.01
	392.54	呋喃	1-(2-Furanyl)-ethanone	C1192627	$C_6H_6O_2$	0.27 ± 0.02	0.48 ± 0.03
合计						1.13 ± 0.05	1.54 ± 0.02
环类	185.52	1,4-二氧六环	1,4-dioxane	C123911	$C_4H_8O_2$	0.76 ± 0.10	0.52 ± 0.04
	180.527	2,4-二甲基-1,3-二氧戊环	2,4-dimethyl-1,3-Dioxolane	C3390123	$C_5H_{10}O_2$	0.40 ± 0.03	0.44 ± 0.05
合计						1.16 ± 0.06	0.96 ± 0.04
其他	629.453	4-甲基-5-乙烯基噻唑	4-Methyl-5-vinylthiazole	C1759280	C_6H_7NS	0.11 ± 0.00	0.13 ± 0.01
	542.006	2,4,6-三甲基吡啶	2,4,6-trimethyl-Pyridine	C108758	$C_8H_{11}N$	0.58 ± 0.05	1.06 ± 0.03
	412.731	2,3-二甲基吡嗪	2,3-Dimethyl pyrazine	C5910894	$C_6H_8N_2$	0.77 ± 0.08	0.65 ± 0.02
	286.325	沙林	Sarin	C107448	$C_4H_{10}FO_2P$	0.71 ± 0.06	1.20 ± 0.01
	217.324	吡啶	Pyridine	C110861	C_5H_5N	2.60 ± 0.35	2.78 ± 0.05
	144.522	烯丙基腈	3-Butenenitrile	C109751	C_4H_5N	6.91 ± 0.85	6.52 ± 0.09
	241.402	N,N-二甲基甲酰胺	Dimethylformamide	C68122	C_3H_7NO	1.37 ± 0.09	1.98 ± 0.03
	284.07	N-亚硝基甲基乙基胺	N-nitrosomethylethylamine	C10595956	$C_3H_8N_2O$	0.39 ± 0.10	0.36 ± 0.04
合计						13.44 ± 0.36	14.68 ± 0.06

2.12 馕挥发性物质分析

为了进一步分析杂粮复合粉添加对馕挥发性风味物质的影响，对普通馕及杂粮馕中挥发性风味物质进行定性分析[17]，结果如表 8 所示，普通馕和杂粮馕中共鉴别出 55 种挥发性物质，其中 15 种酯类、9 种醇类、9 种醛类、5 种酮类、3 种呋喃类，4 种酸类、8 种其他类。杂粮复合粉的添加，馕中酯类和醇类化合物分别由 14.44%、15.25% 增加到 19.36%、17.23%，增加了馕果香味、花香味、芳香味，共同形成了杂粮馕独特的风味特征，与普通馕相比，杂粮馕酯类和醇类化合物含量显著增加，酯类物质是在酵母发酵过程中，由醇和脂肪酸通过酯化反应形成的，酯类物质有果香味，气味浓烈，香气耐久[18,19]。醇类作为酵母发酵的重要产物，具有为馕赋予特殊香味的作用，同时醇类形成其他产物的基础物质[20]。醛类、酮类物质的相对含量减少，由 22.37%、24.02% 下降了 16.92%、21.99%，减少了馕中甜香味和花香味。醛类物质是酵母发酵所形成的代谢产物，而且是烘焙进程中美拉德反应的主要产物[21]。酮类物质来源于酯类的分解产物或是醇的氧化[22]。杂粮馕中相对含量较高的挥发性物质是酯类、醇类、呋喃类物质，杂粮复合粉的添加使杂粮馕中增加了这些物质的含量和浓度，增加了杂粮馕的杂粮味、果香味、豆香味。豌豆、燕麦、玉米本身就有自身的风味成分，添加到普通馕风味物质的种类没有变化，有可能是馕烘烤过程中有些挥发性物质被挥发掉，也有可能是 GC-IMS 仪器设备的误差所引起的。

3 结论

将杂粮复合粉添加到小麦粉中，分析不同杂粮复合粉添加量对面团及馕品质特性的影响。结果表明：复合粉的添加增加了复合粉的蛋白质含量、面团的湿面筋、流变学特性呈下降趋势；当添加范围 0%~15% 时，蛋白质、吸水率呈上升趋势，变化范围分别为 9.86%~10.31%、62.20%~62.80%；湿面筋、面团形成时间、稳定时间、拉伸阻力、拉伸曲线面积呈下降趋势，变化范围分别为 30.19%~27.13%、6.60~5.75 min、11.75~9.60 min、359.50~214 BU、95.95 ~58.65 cm^2，过量的添加导致面团品质下降。通过杂粮馕感官评分得知，在小麦粉中添加 10%~20% 的复合粉对面团流变学特性和馕的综合影响较小，复合粉添加量 20% 以上，会显著降低馕感官评分和色泽，硬度、弹性、咀嚼性等质构特性。综合评价添加范围在 0~20% 的杂粮馕总分较高。在添加比例 20% 时，杂粮馕的感官评分最高、馕的色泽和质构特性较好，可以优化出品质较好的杂粮馕。采用 GC-IMS 定性鉴定普通馕和杂粮馕中的挥发性成分差异，共鉴定出 55 种挥发性成分。构建了普通馕和杂粮馕的 HSGCIMS 风味指纹图谱。两种馕中挥发性风味物质不同，主要包含酯、醇、醛、酮、呋喃和其他类挥发性化合物，杂粮复合粉的添加增加了馕中杂粮味和豆香味。

参考文献

[1] 魏骊霏,许晶,王晓雨,等.核桃粕馕产品的研发及其品质分析[J].粮食与油脂,2024,37(5):74-78.

[2] 丁帅杰.全麦粉馕产品品质改良的研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2021.

[3] 马挺军.小杂粮营养价值及综合利用[M].北京:中国农业出版社,2020.

[4] 丁俊豪.油莎豆粉对面团及馕品质特性的影响研究[D].郑州:郑州轻工业大学,2019.

[5] 曹俊梅,哈力旦·依克热木,刘娜,等.新疆主栽冬小麦品质特性与普通馕感官评价的关系[J].新疆农业科学,2020,57(5):840-851.

[6] 毛红艳,于明,祖力皮牙·买买提.小麦胚芽粉对面团流变学特性及馕品质的影响[J].新疆农业科学,2021,58(12):2191-2199.

[7] 李蓓蓓.酥性饼干对小麦粉的品质要求[D].郑州:河南工业大学,2011.

[8] 杨文建,俞杰,孙勇,等.添加金针菇粉、茶树菇粉对面团流变学特性的影响[J].食品科学,2014,35(23):43-47.

[9] 张华,李银丽,李佳乐,等.竹笋膳食纤维对冷冻面团流变学特性、水分分布和微观结构的影响[J].食品科学,2018,39(1):53-57.

[10] 熊礼橙,牛猛,张宾佳,等.麦麸粒径对全麦面团流变学特性的影响[J].食品工业科技,2017,38(2):7.

[11] LI Z J, SONG K D, LI H F, et al. Effect of mixed *Saccharomyces cerevisiae* Y10 and *Torulaspora delbrueckii* Y22 on dough fermentation for steamed bread making [J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 303: 58-64.

[12] GUO J Y, LIU F, GAN C F, et al. Effects of Konjac glucomannan with different viscosities on the rheological and microstructur al properties of dough and the performance of steamed bread [J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130853.

[13] ZHENG H, QI S, HE J, et al.Cyanidin-3-glucoside from black rice ameliorates diabetic nephropathy via reducing blood glucose,suppressing oxidative stress and inflammation, and regulating transforming growth factor beta 1/Smad expression [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(15): 4399-4410.

[14] 张纷,赵亮,靖卓,等.藜麦-小麦混合粉面团特性及藜麦馒头加工工艺[J].食品科学,2019,40(14):323-332.

[15] WU D, SUN D W. Colour measurements by computer vision for food quality control-A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 29(1): 5-20.

[16] WANG S Q, CHEN H T, SUN B G. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158.

[17] SONG J X, SHAO Y, YAN Y M, et al. Characterization of volatile profiles of three colored quinoas based on GC-IMS and PCA [J]. LWT Food Science and Technology, 2021, 146: 111292.

[18] LIU T, LI Y, SADIQ F A, et al. Predominant yeasts in Chinese traditional sourdough and their influence on aroma formation in Chinese steamed bread [J]. Food Chemistry, 2018, 242: 404-411.

[19] SALIM M, AADREA R, VITTORIO C, et al. Volatile compound production during the bread-making process: Effect of flour, yeast and their interaction [J]. Food & Bioprocess Technology, 2015, 8: 1925-1937.

[20] 宋琛琛,韩小贤,张新阁,等.不同出粉率面粉和混合发酵剂所制馒头挥发性物质的分析[J].河南工业大学学报(自然科学版),2015,36(5):7-13.

[21] 高大禹,李一关,崔凤娇,等.高蛋白水解率对芝麻香型白酒发酵过程及原酒品质的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(6):8-15.

[22] 呼德,张颖,张甜甜,等.同时蒸馏萃取和动态顶空萃取法提取焙烤小麦胚芽中风味物质[J].食品科学,2012,33(18):236-242.