奥斯曼·努尔艾合麦提, 冯作山, 尼格尔热依·亚迪卡尔, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析不同品种馕挥发性风味特征及关键成分[J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 406−418. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070214
OSMAN Nurahmat, FENG Zuoshan, NIGARY Yadikar, et al. Based on HS-SPME-GC-MS Analysis of Volatile Flavor Characteristics and Key Components in Multiple Varieties of Naan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 406−418. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070214

· 分析检测 ·

基于 HS-SPME-GC-MS 分析不同品种馕挥发性风味特征及关键成分

奥斯曼·努尔艾合麦提[1], 冯作山[1], 尼格尔热依·亚迪卡尔[1,*], 白羽嘉[2,*]
（1.新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
2.新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091）

摘　要: 为推动新疆馕产业升级中的风味标准化控制，本文选取芝麻馕、洋葱馕及窝窝馕三种新疆特色馕为研究对象，利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Head Space Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry，HS-SPME-GC-MS）技术，系统分析了采用电加热馕坑烤制的三种馕的挥发性成分组成与差异。结果表明：三种馕样品共鉴定出 110 种挥发性化合物，包括醇类 5 种、醛类 22 种、酮类 19 种、羧酸类 4 种、酯类 6 种、醚类 4 种、烃类 28 种、吡嗪类 14 种及其他类 8 种。其中，芝麻馕、洋葱馕与窝窝馕分别检出 66、87 与 56 种挥发性成分，三者共有成分为 42 种。通过相对气味活性值（Relative Odor Activity Value，ROAV）与正交偏最小二乘判别分析（Orthogonal Projections to Latent Structures Discriminant Analysis，OPLS-DA），筛选出 22 种对整体风味具有重要贡献的关键风味物质（ROAV>1），并确定了 21 种用于区分不同馕品的大于等于 1 的差异标志物（Variable Importance in Projection，VIP）。三类馕的主体香气特征差异显著，具体表现为洋葱馕的含硫化合物贡献突出，芝麻馕以不饱和醛类与吡嗪类协同呈香，而窝窝馕则以吡嗪类主导其烘烤风味。本研究证实，原料配方的不同是导致馕品风味差异的主要原因，研究结果为新疆馕的风味定向调控与标准化工业生产提供了重要的数据支撑与理论依据。

关键词: 馕, 感官评价, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（HS-SPME-GC-MS）, 香气特征, 正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA）
中图分类号: TS213.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0406−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070214
本文网刊:

Based on HS-SPME-GC-MS Analysis of Volatile Flavor Characteristics and Key Components in Multiple Varieties of Naan

OSMAN Nurahmat[1], FENG Zuoshan[1], NIGARY Yadikar[1,*], BAI Yujia[2,*]
（1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2.Institute of Food Science and Technology, Academy of Agricultural Sciences of Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Urumqi 830091, China）

Abstract: To support the flavor standardization in the industrial upgrading of Xinjiang naan, this study investigated three characteristic varieties-sesame naan, onion naan, and wowo naan. The volatile aroma profiles of electric-baked naan were systematically analyzed using headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography–mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). A total of 110 volatile compounds were identified across the samples, categorized into 5 alcohols, 22 aldehydes, 19 ketones, 4 carboxylic acids, 6 esters, 4 ethers, 28 hydrocarbons, 14 pyrazines, and 8 other compounds. Specif-

收稿日期: 2025−07−17
基金项目: 自治区重点研发计划项目（2021B02001-2）。
作者简介: 奥斯曼·努尔艾合麦提（1992−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: OSMANNUR2022@126.com。
*** 通信作者:** 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研究, E-mail: nigary-sy@xjau.edu.cn。
白羽嘉（1984−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工与综合利用, E-mail: saintbyj@126.com。

ically, 66, 87, and 56 volatile components were detected in sesame naan, onion naan, and wowo naan, respectively, with 42 compounds common to all three. By applying relative odor activity value (ROAV) and orthogonal projections to latent structures discriminant analysis (OPLS-DA), 22 key aroma compounds (ROAV>1) and 21 discriminant markers (VIP≥1) were identified. Significant differences were observed in the dominant aroma characteristics: Sulfur-containing compounds imparted a distinct note to onion naan, unsaturated aldehydes and pyrazines synergistically contributed to the aroma of sesame naan, while pyrazines were the primary contributors to the roasted flavor of wowo naan. These findings demonstrate that ingredient composition is the main factor driving flavor differences, which providing a scientific basis for the targeted flavor regulation and standardized production of Xinjiang naan.

Key words: naan; sensory evaluation; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); aroma characteristics; orthogonal projections to latent structures discriminant analysis (OPLS-DA)

馕是中国新疆地区的传统主食，以其独特烤制风味和松酥口感著称，富含碳水化合物与蛋白质，兼具优良的便携性与贮藏性[1−2]。随着馕产业规模持续扩大，其标准化生产已成为推动区域经济发展的重要方向[3]。目前，电加热红外馕坑因环保、高效、操作便捷等优势，逐步替代传统燃煤馕坑，有利于实现馕的标准化加工[4]。然而，烤制工艺差异导致电烤馕与传统馕的风味特征有所不同，可能影响消费者接受度[5]。因此，开展电加热馕坑烤制馕的风味研究，对促进馕产业标准化与品质提升具有重要意义。

馕的香气是决定其感官品质的核心要素，不仅直接影响消费者的接受度，也关系到产品的市场附加值。馕的香气成分主要来源于原料自身以及在烤制过程中发生的美拉德反应、油脂氧化等热化学反应，后者对形成其独特风味具有关键作用[6]。在面包、馕等焙烤食品的质量评价体系中，香气成分的构成与含量占据重要地位[7]。近年来，随着风味化学理论的深化和仪器分析技术的进步，顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术因其高灵敏度、高效分离能力和良好的重现性，已成为复杂食品基质中挥发性成分分析的核心手段。该技术无需有机溶剂、前处理简便，能够较好地保留原始风味轮廓，在实际生产中广泛应用于原料筛选、工艺优化及产品质量控制等领域，为食品风味品质的标准化与提升提供了可靠支持。在馕的风味研究方面，毛红艳等[8] 借助固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, SPME-GC-MS）技术从新疆馕中鉴定出 46 种挥发性成分，并筛选出 1-癸炔、己醛、石竹烯等 6 种关键香气物质。王露飞等[9] 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Head Space Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS）方法，比较了不同烤制设备加工的新疆馕的香气组成，共识别出 50 种挥发性成分，并确立了苯甲醛、苯乙醛、2,5-二甲基吡嗪等 8 种可作为区分不同烤制工艺的关键差异成分。然而，当前关于新疆传统馕制品香气特征的系统研究仍相对匮乏，尤其在电加热红外烤制条件下，其香气成分的具体种类、相对含量及其风味贡献尚未得到全面解析。因此，本研究提出假设：电加热红外烤制工艺会形成区别于传统馕坑的特征香气组成，并通过 HS-SPME-GC-MS 技术系统鉴定其挥发性成分，旨在明确其主体香气构成及其潜在差异。本研究的创新点在于首次系统揭示电加热红外工艺所制馕品的香气特征，为新疆馕的工艺优化与风味标准化提供理论依据和数据支持。

因此，为深入探究以电加热馕坑烤制的馕所蕴含的风味物质、香气特征及关键香气差异成分，本研究选取新疆市场上具有代表性的洋葱馕、芝麻馕和窝窝馕作为研究对象，采用 HS-SPME-GC-MS 技术对其香气组分及含量进行测定。在此基础上，结合主成分分析法（Principal Component Analysis, PCA）与相对气味活性值（Relative Odor Activity Value, ROAV），对三种馕的关键差异香气成分展开分析与对比，在一定程度上填补了传统食品风味研究领域的相关空白。通过多技术联用，揭示香气成分的贡献度与差异规律，为新疆馕标准化生产、风味调控及工业化转型提供理论依据，对电加热烤馕装置风味一致性控制具重要参考价值。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

精制小麦粉（蛋白质含量 11.0 g/100 g、碳水化合物 73.1 g/100 g、脂肪 1.3 g/100 g）　新疆仓麦园有限责任公司；加碘精制盐　新疆盐湖制盐有限责任公司生产；高活性干酵母　安琪酵母股份有限公司生产；菜籽油　中粮（昌吉）粮油工业有限公司；白砂糖　新疆绿华糖业有限责任公司生产；纯牛奶（蛋白质含量 3.0 g/100 g、脂肪 3.5 g/100 g）　新疆西域春乳业有限责任公司；饮用自来水　实验室；洋葱（圆白皮）、孜然、新鲜鸡蛋、白芝麻等　市售；C_6~C_{24} 正构烷烃标准品（混合物）　纯度≥99%，Sigma-Aldrich 公司。

JNB 5002 型电子天平　群安科学仪器（浙江）有限公司；JSB 15-05 型电子计重称　上海浦春计量仪器有限公司；H20F 型立式双速和面机　广东力丰机制造有限公司；QSJ-C03M1 型切碎机（绞肉机）　小熊电器股份有限公司；NT-TA80 型电加热馕坑　新疆阿克苏馕坑王设备制造有限公司；VICTOR 360S 型手持测温热像仪　深圳市驿生胜利科技有限

公司; 8890-5977B 型气相色谱-质谱联用仪　美国安捷伦科技有限公司; 57330-U 型固相微萃取手动进样器、57310-U 型 30/50 μm PDMS/DVB/CAR 萃取头　美国 Supelco 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　三种馕样品的制备　本研究以市售芝麻馕、洋葱馕和窝窝馕制作配方为基础, 通过添加不同比例辅料的方式改良三种馕的配方。前期预实验已完成三种馕配方优化研究, 并确定了三种馕的最佳配方组成。选用配方优化后的三种馕, 每种馕制备的样品数量均为 3 个, 共计 9 个样品。三种馕的基础配方, 以 1000 g 小麦面粉为基准添加其他配料, 详见表 1。

表 1　三种馕的基础配方

Table 1　Basic formulations of three naan varieties

原辅料	添加量(%)		
	芝麻馕	洋葱馕	窝窝馕
小麦面粉	100	100	100
食盐	1.25	1.35	1.75
酵母	0.62	0.72	0.52
白砂糖	4.5	2.0	1.5
食用植物油	11.0	2.0	1.2
鸡蛋	3.5	5.0	5.0
鲜牛奶	20.5	12.0	30.5
饮用水	25.0	38.0	18.0
白芝麻	4.22	0	2.01
洋葱碎	0	4.83	0
孜然粒	0	1.61	0

注: 以上配料添加量(馕的配方), 经前期预试验确定。

1.2.2　三种馕的制备工艺流程　技术路线: 本实验选取三种代表性馕制品为研究对象, 馕样品制备流程如图 1 所示, 其工艺均以小麦面粉为基础原料, 按照表 1 配料比例, 参考古丽乃再尔·斯热依力等[10] 的方法, 并根据前期三种馕的烤制工艺优化试验的经验和积累的知识, 依次添加经活化处理的酵母、食盐、鸡蛋、鲜牛奶、食用植物油以及白砂糖等辅料至和面机, 加入温水后启动设备搅拌 20 min 至形成光滑面团; 为增强面团延展性, 取出后手工揉制 5 min, 用保鲜膜包裹后进行静置发酵, 其中芝麻馕和洋葱馕醒发 65 min, 窝窝馕醒发 45 min。将发酵面团分割为 300 g 等量面剂, 揉搓光滑后覆盖保鲜膜进行二次醒发, 芝麻馕和洋葱馕约 30 min, 窝窝馕 21 min。醒发完成后, 将面团擀压成圆饼状并手工修整: 芝麻馕和洋葱馕馕坯直径约 22 cm, 中间厚 0.5 cm, 馕边宽 2 cm、厚 1.5 cm; 窝窝馕边缘捏制窝边造型, 馕坯直径约 13 cm, 中间凹型部分厚 1 cm、小窝直径 4 cm, 馕边宽 4.5 cm、厚 3.5 cm。然后选用适宜规格的馕针, 在芝麻馕和洋葱馕的馕坯表面及窝窝馕馕坯小窝处均匀戳孔(压出花纹), 以防止烘烤时排气不充分, 导致成品馕出现鼓包现象。洋葱馕和芝麻馕馕坯表面刷涂牛奶后, 分别撒上洋葱碎 9.0 g、孜然粒 3.0 g 和浸泡处理的生白芝麻 7.6 g; 窝窝馕馕坯表面喷撒清水后, 均匀粘上干的生白芝麻 3.8 g。

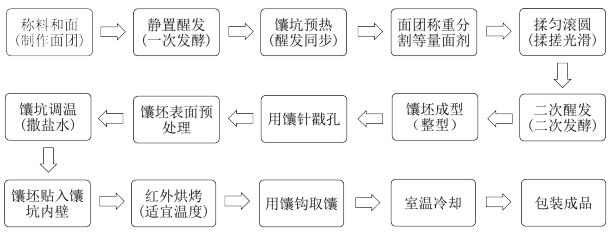


图 1　馕的主要制备工艺流程

Fig.1　Main production process flow of naan

操作要点: 在开始醒发时, 需提前开启电加热馕坑开关, 将温度设置至 300 ℃, 输出电压 350~400 V, 持续预热约 60 min; 烤制前, 先降低设定温度和输出电压(烤制窝窝馕, 需关闭电源), 在馕坑内壁均匀喷洒盐水进行调温。芝麻馕对应下温(馕坑内壁温度)约 195 ℃、上温(馕表面或红外加热源的温度)255 ℃, 洋葱馕对应下温 200 ℃、上温 275 ℃。将表面处理好的芝麻馕与洋葱馕馕坯反放在馕枕上, 背面用刷子刷一层牛奶鸡蛋液(500 mL 牛奶添加一个鸡蛋)后, 握馕枕边快速贴至馕坑内壁。持续烘烤芝麻馕约 8.5 min, 洋葱馕约 9.5 min, 直至散发出特有的香味且表面金黄后, 用馕钩取出, 并室温冷却后进行真空包装。贴入窝窝馕馕坯前, 先关闭电源, 向馕坑内壁喷洒盐水调温至约 190 ℃, 将表面处理好的馕坯背面涂盐水(盐水浓度为 500 g 水添加 200 g 食盐)后徒手快速贴入馕坑内壁, 然后向馕坑内壁(馕坯表面)均匀喷热水水(50 ℃ 左右), 盖紧馕坑盖, 以水蒸气焖熟 7 min; 然后, 开启红外加热, 温度调至 285 ℃ 烘烤 13 min, 再降至 200 ℃ 烘烤 15 min 以促进表皮上色, 内外烤熟均匀。最后, 馕的表面颜色达到金黄色(或巴旦木仁颜色)时, 用馕钩取出烤制好的馕, 放置于金属网架上, 在室温条件下自然冷却, 采用食品级塑料袋进行真空包装。将烤制后的芝麻馕、洋葱馕、窝窝馕分别标记为 ZMN、PYZN、WWN。

1.2.3　成品馕的感官评定方法　基于馕的产品特性, 参照 GB/T 20981-2021《面包》感官评分标准、参考古丽乃再尔·斯热依力等[11]、吴立根等[12] 的评价方法, 制定馕的感官评分表(如表 2 所示)。将烤制的三种成品馕置于室温下冷却 30 min, 随机编号后, 组织 10 名身体健康、经专业培训、具备感官评价知识与评分经验的研究生(5 男, 5 女), 组成感官评价小组。评价小组从外观形态、色泽、风味、组织结构和口感 5 个方面进行综合评分, 满分为 100 分。评分等级划分如下: ≥80 分为“优”, 70~79 分为“良好”, 60~69 分为“合格”, <60 分为“不合格”。最终感官得分取小组成员评分的平均值。

1.2.4　馕样品的前处理及顶空固相微萃取(SPME)条件　基于预实验结果优化烤制后, 参考王露飞等[9] 的方法稍作修改。每个馕样品在中心和四个角 5 个

表 2　馕的感官评分标准

Table 2　Sensory evaluation criteria for naan

感官指标	评价标准	评分（分）
色泽（20分）	表面光泽均匀，呈金黄色或淡杏仁色，无焦糊、泛白或异色斑点	16~20
	光泽感较弱，颜色偏淡黄或轻微泛白，局部有浅焦斑	11~15
	色泽不均，存在明显焦黑、大面积泛白或异色，焦糊味明显	0~10
风味（20分）	麦香与发酵香气浓郁，配料香味协调（如芝麻等），无不良气味	17~20
	馕香气较淡，配料香味不突出，无异味	13~16
	香气寡淡，配料味过浓或有轻微酸败、焦糊味	9~12
	无特征香气，存在明显酸败、霉味或强烈焦糊味	0~8
外观形态（20分）	馕外形完整饱满，厚薄均匀，表面花纹清晰，无鼓泡、裂纹或破损	15~20
	馕形态较规则，略有厚度不均或少量小鼓泡，花纹较清晰	9~14
	形状不完整，变形严重，表面鼓泡密集或花纹模糊不清	0~8
组织结构（15分）	内部组织细腻，气孔细小均匀，弹性与柔软度适宜	11~15
	气孔大小不均，组织略粗糙，弹性较弱	6~10
	质地僵硬或黏软，气孔极少或无气孔，断面有杂质或塌陷	0~5
口感（25分）	软硬适中，咀嚼有韧性，麦香与配料味协调，不粘牙、不糊口	20~25
	偏硬或偏软，咀嚼时略有粘牙感，配料香味较淡	14~19
	过硬或过软导致难以下咽，严重粘牙或有明显粉质感，口感粗糙	0~13

位置取样，考虑到馕的结构，中心取样量和四角位置取样总量基本一致，取样量不少于 50 g，打碎充分混合后准确称取 3.0 g 样品，置于 20 mL 带密封垫的顶空瓶中，加入 0.6 g 氯化钠，充分搅拌后，立即密封顶空瓶盖，置于 60 ℃（±0.5 ℃）恒温金属浴槽中平衡 15 min。将已在 250 ℃ 老化 15 min 的 SPME 萃取头通过瓶盖垫片插入顶空瓶内，推出吸附头并保持距样品表面约 1~2 mm 处，静止吸附 40 min。吸附结束后，将 SPME 萃取头插入 GC-MS 联用仪的进样口，于 250 ℃ 条件下进样，持续脱附（解析）5 min，然后进行 GC-MS 分析。

1.2.5　GC-MS 测定条件　气相色谱（GC）条件：采用 HP-5MS Ultra Inert 色谱柱（30.0 m×0.25 mm，0.25 μm）；以纯度>99.999% 的氦气（He）为载气，载气流速为 1.20 mL/min；升温方式为程序升温法；色谱柱的初始温度设定为 50 ℃ 恒温保持 3 min，以 3 ℃/min 速度升到 100 ℃ 恒温保持 5 min，以 5 ℃/min 速率程序升温至 150 ℃ 保持 2 min；再以 6 ℃/min 速率升温至 240 ℃ 后保持 10 min。进样口温度 250 ℃，连接线温度 240 ℃，进样口模式：设置为不分流进样[13−14]。

质谱（MS）分析条件：离子源类型（电离方式）为 EI，离子源温度设定为 230 ℃；电子能量为 70 eV；检测方式为全扫描（Scan）；质量扫描范围设置为 m/z 40~500，传输线温度为 240 ℃，四极杆温度为 150 ℃。

1.2.6　挥发性风味物质定性和定量分析　定性分析：基于馕样品的 HS-SPME-GC-MS 检测数据，对其挥发性成分进行定性分析时，对于有标准品的挥发性风味成分，通过比对其保留时间（出峰时间）和质谱图来确认，若与标准品一致即可确定；对于未知化合物，先将质谱图与 NIST20.L、Willey 谱库进行比对，筛选匹配度≥80% 的挥发性风味成分，再结合 C_6~C_{24} 正构烷烃各色谱峰的保留指数（Retention Index，RI）及质谱图信息，经质谱数据与 RI 值验证化合物，并参考已报道的相关文献 [11] 进行比较，从而准确确定馕样品中挥发性风味成分的化学组成，完成定性分析。RI 值按以下公式计算：

$$RI = 100n + 100 \times \frac{t_R(x) - t_R(n)}{t_R(n+1) - t_R(n)}$$

式中：n 为正构烷烃碳原子数（Cn）；$t_R(x)$为目标化合物的保留时间（min）；$t_R(n)$和 $t_R(n+1)$分别为碳原子数 n 和 n+1 的正构烷烃的保留时间（min），且满足 $t_R(n)<t_R(x)<t_R(n+1)$。

定量分析：采用峰面积归一化法计算各组分样品的相对含量，并运用内标半定量法（内标物选用 2-甲基 3-庚酮，添加量为 50 μL 的 0.1 mg/mL 标准溶液）测定未知挥发性化合物相对含量，实现馕样品挥发性成分全面准确的定量分析。

峰面积归一化法公式：

$$相对含量(\%) = \frac{A_i}{\sum A} \times 100$$

式中，A_i 为组分 i 的峰面积；$\sum A$为所有检出组分峰面积的总和。

内标半定量法公式：

$$C_i = \frac{A_i}{A_{is}} \times C_{is}$$

式中：C_i 为待测组分 i 的浓度（mg/kg）；A_i 为待测组分的峰面积；A_{is} 为内标物的峰面积；C_{is} 为内标物的添加浓度（mg/kg）。

1.2.7　三种馕的主体香气成分分析　本研究采用相对气味活度值（ROAV）法进行分析、评价挥发性化合物对三种馕样品总体风味的贡献强度。参考刘登勇等[15] 的方法，将对馕总体风味贡献最大的组分设定为 $ROAV_{max}$=100，并依据 ROAV 划分风味作用等级：当 ROAV≥1.0 时，该成分被判定为关键性风味物质，对总体风味起重要作用；当 0.1≤ROAV<1.0 时，则认定为修饰性风味物质，可对风味起到修饰效果，且 ROAV 越大，表明该组分对总体风味的贡献越显著。挥发性风味成分的 ROAV 通过公式（1）进行计算。

$$ROAV_i = \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中：C_i 为各挥发性物质的相对含量（%）；C_{max} 为对样品总体风味贡献最大组分的相对含量

(%)；T_i 为对应香气物质在水中的香味阈值(mg/kg)；T_{max} 为对应该物质在水中的识别阈值(mg/kg)。

1.3 数据处理

重复做 3 次平行，实验结果以“平均值±标准差”表示。采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理与统计分析；运用 Microsoft PowerPoint 2016 软件绘制馕的烤制流程图，采用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件进行方差分析；采用 Origin 2022 软件绘制质谱总离子流图；采用迈维云平台(https://cloud.metware.cn)绘制聚类热图。采用 SIMCA 14.1 软件开展主成分分析(PCA)和正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)计算预测变量重要性投影(VIP)值，最终以 VIP≥1 且 ROAV≥1 为标准筛选出关键差异香气成分。

2 结果与分析

2.1 三种馕的感官特征评价

对经馕坑红外烤制后的芝麻馕(ZMN)、洋葱馕(PYZN)及窝窝馕(WWN)进行感官评价，结果显示：三种馕的总得分依次为 94.29、94.88、93.75 分，三种馕的感官评分雷达图如图 2 所示。从图 2 可见，风味与口感指标得分显明显高于其他指标，其中风味方面，适宜温度的烤制使芝麻、洋葱等配料产生独特香气，ZMN、PYZN、WWN 得分分别为 19.58、19.82、19.35 分；口感方面，三种馕均表现出软硬适中、咀嚼有韧性的特点。ZMN 因芝麻颗粒而酥脆，PYZN 因洋葱纤维而富有咀嚼性，WWN 则蓬松柔软、不粘牙，三者口感得分依次为 24.45、24.38、24.27 分。此外，三种馕的色泽、外观形态和组织结构感官特征得分差异较小，色泽均呈诱人的金黄色(类似巴旦木仁的颜色)，外观形态规整，内部组织结构较均匀。总体而言，原料配方与红外烤制工艺的协同作用，既赋予三种馕差异化的独特风味与口感特色，又保持了基础感官属性的稳定性。

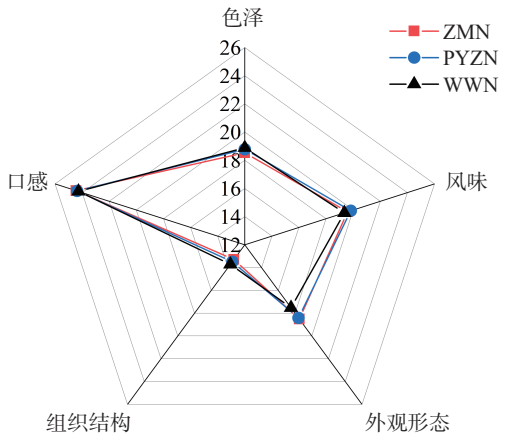


图 2 三种馕感官特征评分

Fig.2 Sensory characteristics scores of three naan varieties

2.2 三种馕的挥发性成分数量与组分分析

为探究电加热馕坑红外烤制下芝麻馕(ZMN)、洋葱馕(PYZN)与窝窝馕(WWN)的挥发性风味特征差异，采用顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱(HS-SPME-GC-MS)技术对三者挥发性成分进行鉴定。总离子流图(图 3)与定量分析结果表明，尽管三者烤制环境相同，但因配料与工艺参数的差异，其香气组成存在显著区别。

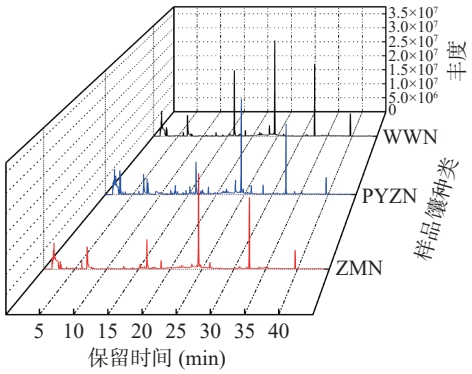


图 3 三种馕挥发性成分总离子流图(TIC)

Fig.3 Total ion chromatograms (TIC) of volatile components in three naan varieties

由附表 1(详见本刊官网 http://www.spgykj.com/ 文章的网络版)和图 4 可知，三种馕样品中检测出的挥发性化合物共计 110 种，包括醇类 5 种、醛类 22 种、酮类 19 种、羧酸类 4 种、酯类 6 种、醚类 4 种、烃类 28 种、吡嗪类化合物 14 种以及其他类物质 8 种。从挥发性成分物质种类数量来看，PYZN、ZMN 和 WWN 分别检测出 87 种、66 种和 56 种挥发性成分，其中三者共有成分为 42 种。PYZN 鉴定

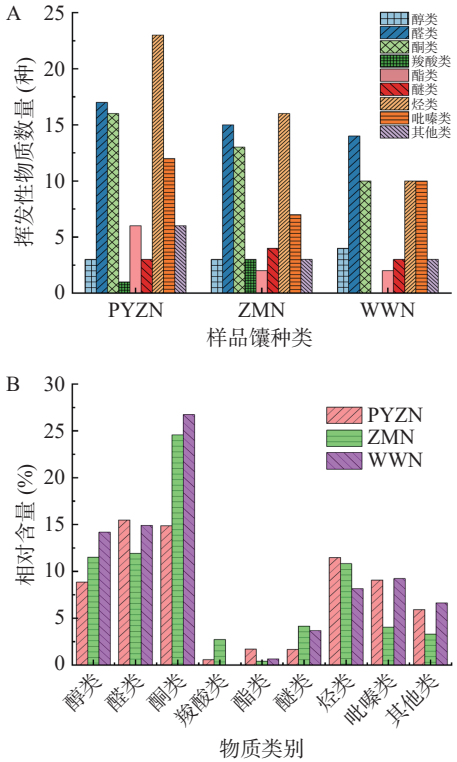


图 4 三种馕中的挥发性物质数量(A)和相对含量(B)

Fig.4 Categories (A) and relative content (B) of volatile compounds in three naan varieties

出的挥发性成分数量(87 种)明显多于 ZMN(66 种)和 WWN(56 种)，表明其在挥发性风味物质的种类丰富度上更为复杂，这可能与洋葱原料中丰富的风味前体物在加工过程中发生多样化的热反应有关。进一步结合相对含量分析发现，酮类在三种样品中均占有最高比例，其中 WWN 中酮类相对含量最高(26.73%)，主要以丙酮(10.40%)为代表，赋予其突出的溶剂甜香和清凉感；ZMN 中酮类相对含量为 24.57%，其中 2,3-丁二酮相对含量高达 12.26%，贡献明显的奶油和黄油香气；PYZN 中酮类相对含量为 14.88%，相对较低。醛类在 PYZN 和 WWN 中相对含量也较高，分别为 15.48% 和 14.91%，如苯乙醛和糠醛等共同贡献花香、焦糖和坚果香，增强了风味的层次感。醇类在 WWN 中相对含量最高(14.18%)，其中乙醇和 2-呋喃醇等带来酒香和烟熏气息；ZMN 中醇类相对含量为 11.49%，以乙醇为主(6.11%)。此外，吡嗪类在 PYZN 和 WWN 中相对含量接近(分别为 9.07% 和 9.22%)，主要提供烤坚果、咖啡等烘烤香气，而 ZMN 中吡嗪类相对含量较低(4.03%)，可能与其芝麻添加所带来的脂香主导、烘烤风味相对减弱有关。综合来看，不同馕样品的挥发性成分在种类与含量上均存在明显差异，反映出原料配比和加工方式对整体风味轮廓的显著影响。

将三种馕样品香气组分绘制成热图，结果如图 5 所示。通过对 PYZN、ZMN 和 WWN 三种馕样品中 110 种挥发性成分，包括醇类、醛类、酮类、羧酸类、酯类、醚类、烃类、吡嗪类和其他类 9 类物质的聚类热图分析，可以清晰地观察到不同香气物质在各组样品中的分布特征及其相对含量差异。热图中的颜色梯度从蓝色到红色，代表了 Z-score 值的变化，红色表示相对较高的含量，蓝色表示相对较低的含量。结合定量分析数据，可以发现三种馕的香气物质谱呈现清晰的组内聚类与组间分化特征，直观反映不同品种馕的风味轮廓特异性，香气特征呈现显著差异(P<0.05)。

整体而言，酮类物质在所有样品中均占据显著地位，其中丙酮和 2,3-丁二酮的相对含量尤为突出，但呈现明显的馕种特异性：WWN 中丙酮相对含量最高(10.40%)，而 ZMN 则富含 2,3-丁二酮(12.26%)，PYZN 中这两者含量相对较低。这种差异可能反映了不同原料(如添加物)及焙烤过程中美拉德反应和脂质氧化路径的强度差异。

醛类物质同样表现出丰富的多样性，ZMN 以苯乙醛(2.76%)和 2-甲基丙醛(3.07%)为特征，PYZN 则显著富集糠醛(2.56%)和 2-呋喃醇(3.79%)，并含有独特的 4-(1-甲基乙基)-苯甲醛(1.42%)，这与洋葱原料带来的特征风味前体物密切相关；WWN 中苯乙醛(2.51%)含量也较高。

吡嗪类化合物作为重要的焙烤香、坚果香贡献者，在 WWN 中整体丰度较高，特别是 2,5-二甲基吡嗪(2.27%)和 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪(1.10%)；PYZN 则含有较高浓度的甲基吡嗪(2.21%)和乙基吡嗪(0.58%)。醇类物质中，ZMN 的乙醇(6.11%)相对含量最高。此外，PYZN 中检测到特有的含硫化合物(如二丙基二硫醚，0.72%)和较高相对含量的麦芽酚(4.01%)，后者是重要的焦甜香物质；WWN 中的麦芽酚相对含量最高(5.28%)，是其风味的重要贡献者。烃类、酯类、醚类及羧酸类物质在各组间也呈现不同的分布模式，共同构成了三种馕各自独特而复杂的香气轮廓。

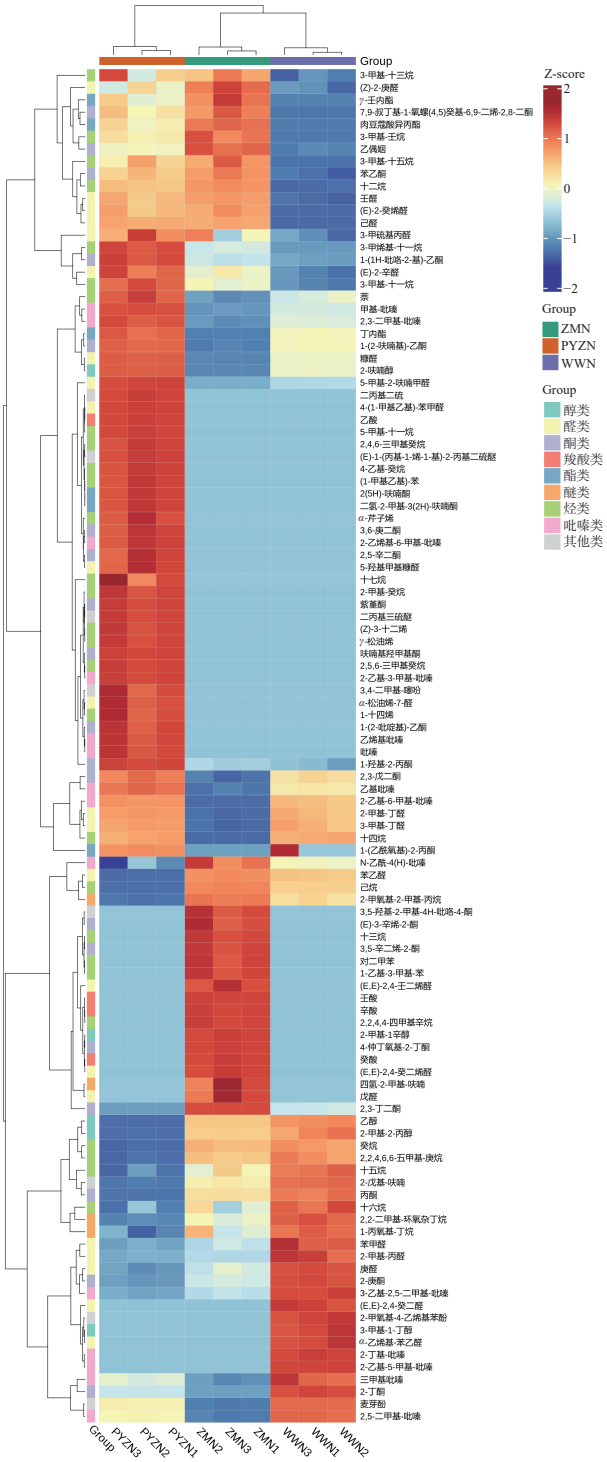


图 5　三种馕的挥发性成分聚类热图

Fig.5　General characteristics of aroma of three naan varieties

图 5 结果显示，特定的加工工艺是形成洋葱馕、芝麻馕和窝窝馕差异化香气特征的关键因素。组内样品的香气丰度高度一致，反映了工艺的稳定性；组间差异则揭示原料、配方对香气轮廓的塑造作用，为馕的风味差异解析提供风味化学层面的支撑。

热图上方的树状图（dendrogram）显示了不同样品组之间的聚类关系，左侧的树状图则反映了香气成分之间的聚类关系。从树状图中可以看出，ZMN、PYZN 和 WWN 三组样品在香气组成上明显聚为三类，表明三种馕的香气轮廓具有显著差异，与定量分析和 PCA 结果一致。总体而言，热图分析不仅直观地展示了三种馕样品中香气物质的分布特征，还揭示了它们在香气组成上的显著差异，为理解不同馕样品的风味特性和品质提供了重要的科学依据[16]。

主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）是一种线性变换，消除了随机变量之间的依赖关系，并能够形成主成分（PC）变量以展示数据特征[17]。通过主成分分析（PCA）对三种馕样品（ZMN、PYZN、WWN）的挥发性成分组成进行降维与差异解析，结果如图 6 所示。PCA 得分图以第一主成分（t[1]）和第二主成分（t[2]）构建二维可视化空间，其中 t[1] 的方差解释率 R^2X[1] 为 0.607，可解释原始数据 60.7% 的变异信息；t[2] 的方差解释率 R^2X[2] 为 0.386，可解释 38.6% 的变异信息；前两个主成分累计解释率达 99.3%，表明该模型能高度概括数据的核心特征。在 PCA 图中，样本点之间的空间距离反映其风味组成的相似程度，距离越近表明差异越小，反之则差异越大[18]。分析结果显示，ZMN、PYZN 和 WWN 三组样品在得分图上呈现出明显的空间分离，其中 ZMN 组与 WWN 组分布区域相距最远，表明二者的整体风味轮廓存在本质差异。各组内三个平行样本在得分图上均高度聚集，说明样品制备和检测的重现性良好。该 PCA 模型有效区分了不同品类馕样品的香气特征，证实了原料与工艺对整体风味构成的显著影响（P<0.05），后续可结合载荷分析进一步揭示造成组间差异的关键风味物质。

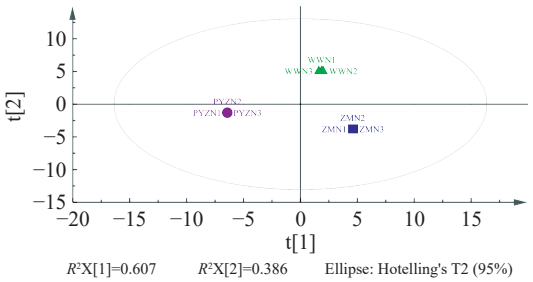


图 6 三种馕的 PCA 得分图

Fig.6 PCA score plot of three naan varieties

2.3 三种馕的特征风味分析及主体香气成分确定

2.3.1 特征风味成分比较 根据采用电加热红外烤制的三种馕样品的挥发性成分相对含量测定结果（附表 1），其主要香气物质包括：醇类如乙醇、2-甲基 2-丙醇和 2-呋喃醇；醛类如 2-甲基丙醛、3-甲基丁醛、糠醛、苯乙醛和壬醛；酮类如丙酮、2,3-丁二酮和 2-丁酮；羧酸类如乙酸和壬酸；酯类如 1-（乙酰氧基）-2-丙酮、丁内酯和肉豆蔻酸异丙酯；醚类如 2-甲氧基-2-甲基丙烷和 2,2-二甲基环氧杂丁烷；烃类如十二烷、2,2,4,6,6-五甲基庚烷、3-甲基十一烷、3-甲烯基-十一烷、己烷和癸烷；吡嗪类如甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、N-乙酰-4（H）-吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪和 2-乙基-5-甲基吡嗪；其他类如麦芽酚、2-戊基-呋喃和二丙基二硫。

分析表明，窝窝馕（WWN）、洋葱馕（PYZN）和芝麻馕（ZMN）的香气特征既存在共性，也表现出显著差异（P<0.05）。三类馕共有的核心香气成分中，麦芽酚（具焦甜香）在 WWN（5.28%）、PYZN（4.01%）和 ZMN（2.27%）中均具有较高含量，为其提供了基础的焙烤甜香；苯乙醛（蜂蜜香）在三类馕中的含量介于 1.31% 至 2.76% 之间，贡献了甜润的底韵。在特征香气成分上，各类馕展现出其独特性。PYZN 中独有 4-（1-甲基乙基）-苯甲醛（茴香醛，1.42%），赋予其明显的茴香风味；同时检测出的二丙基二硫（0.72%）及二丙基三硫醚（0.24%），形成了典型的洋葱特征辛香，这与其中“洋葱”的原料特性高度相符。ZMN 中的 2,3-丁二酮（奶油香）相对含量（12.26%）显著高于 PYZN（2.49%）和 WWN（5.30%），该成分与芝麻烘烤产生的乳脂香紧密关联；此外，其独有的壬酸（蜡香，1.84%）可能源于芝麻脂质的氧化。WWN 的酮类物质总量最高，其中丙酮（青草香，10.40%）与 2-丁酮（果香，8.49%）相对含量尤为突出，反映出较强的美拉德反应程度；其独有的 2-乙基-5-甲基吡嗪（坚果香，1.14%）和含量较高的 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪（烤香，1.26%），进一步强化了其焙烤风味的层次感。从具体成分的含量差异来看，2,3-丁二酮表现为 ZMN>WWN>PYZN；丙酮表现为 WWN>ZMN>PYZN；而呋喃类物质中的 2-呋喃醇在 PYZN 中的相对含量（3.79%）显著高于 WWN（1.78%）。

综合分析，PYZN 的特征风味由其硫醚类物质与茴香醛共同塑造，呈现辛香风格；ZMN 的风味则以 2,3-丁二酮的奶油香和壬酸的蜡香为主导；而 WWN 则通过 C_2~C_4 酮类与烷基吡嗪类物质构建出独特的烘烤香气轮廓。这些香气特征的差异与各自的原料配方及加工工艺密切相关：PYZN 的含硫化合物直接来源于洋葱的添加；ZMN 的特征成分与芝麻原料的高温焙炒过程相关；而 WWN 中吡嗪类化合物的多样性及酮类物质的高含量，表明其在加工过程中经历了更为充分的热化学反应，这可能与其特定的面团形态、较高的烘烤温度或较长的烤制时间有关，从而形成了其独特的焙烤香气特征。

2.3.2 主体香气成分确定 相对气味活性值（Relative Odor Activity Value，ROAV）是评估香气物质在食品中贡献度的重要指标，通过结合成分浓度与嗅觉

阈值的相对关系，量化不同香气物质对整体风味的影响程度。在众多香气组分中，香气含量的高低并不能够作为判定馕样品香气特征的依据。为了进一步确定三种馕的关键风味物质，将各挥发性组分浓度、感官阈值[19]与 ROAV 相结合，评估出不同香气组分对样品整体香气的贡献程度，进而筛选出三种馕的主体香气成分。基于相对气味活性值（ROAV）的分析结果（表 3），可明确洋葱馕（PYZN）、芝麻馕（ZMN）和窝窝馕（WWN）中不同挥发性物质对整体风味的贡献差异。根据 ROAV 判定标准：ROAV≥1 为主体香气成分，则香气组分对馕样品香气贡献最大；0.1≤ROAV<1 为重要香气物质，对馕样品总体风味具有重要修饰作用，值越大贡献越强；ROAV<0.1 贡献微弱，可忽略[20]。三种馕的风味特征主要由多类主体香气成分协同决定，同时伴随重要香气物质的修饰作用。

将二丙基二硫（洋葱味、大蒜味），以及 ZMN 和 WWN 中感官阈值极低（0.00009 mg/kg）的 3-乙基-

表 3　主体香气成分及 ROAV

Table 3　Main body aroma components and ROAV

序号	香气物质名称	CAS号	感官阈值（mg/kg）	香气特征描述	ROAV		
					PYZN	ZMN	WWN
1	乙醇	64-17-5	14300	酒精味、微甜	<0.1	<0.1	<0.1
2	2-呋喃醇	98-00-0	8	焦糖味、甜味	<0.1	–	<0.1
3	2-甲基丙醛	78-84-2	0.001	麦芽味、苹果香	37.78	41.85	33.5
4	3-甲硫基丙醛	3268-49-3	0.0005	煮土豆味、硫磺味	6.39	5.73	2.57
5	3-甲基丁醛	590-86-3	0.002	巧克力味、果香	12.22	7.63	6.14
6	2-甲基丁醛	96-17-3	0.01	苹果香、青草味	2.1	0.97	1.02
7	戊醛	110-62-3	0.01	果香、青草味	–	0.1	–
8	糠醛	98-01-1	3	焦糖味、面包味	<0.1	<0.1	<0.1
9	己醛	66-25-1	0.16	青草味、绿叶味	<0.1	–	–
10	苯甲醛	100-52-7	0.35	杏仁味、樱桃味	<0.1	<0.1	<0.1
11	（Z）-2-庚醛	57266-86-1	0.0008	脂肪味、青草味	4.17	5.11	1.61
12	庚醛	111-71-7	0.03	果香、脂肪味	<0.1	0.11	0.1
13	苯乙醛	122-78-1	0.01	玫瑰香、蜂蜜味	1.82	3.76	1.79
14	（E）-2-辛醛	2548-87-0	0.0007	脂肪味、青草味	7.34	5.45	1.84
15	（E,E）-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	0.0005	脂肪味、油炸味	–	3.54	–
16	壬醛	124-19-6	0.015	玫瑰味、柑橘味	1.29	1.32	0.37
17	（E,E）-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	0.0002	脂肪味、油炸味	–	34.09	–
18	（E）-2-癸烯醛	3913-81-3	0.002	脂肪味、青草味	0.63	0.68	–
19	4-（1-甲基乙基）-苯甲醛	122-03-2	0.02	辛香（类似孜然）	0.99	–	–
20	2,3-丁二酮	431-03-8	0.01	黄油味、奶油味	3.46	16.71	3.79
21	2,3-戊二酮	600-14-6	0.02	黄油味、奶油味	0.19	<0.1	<0.1
22	苯乙酮	98-86-2	0.06	花香、甜味	<0.1	0.1	<0.1
23	（E）-3-辛烯-2-酮	18402-82-9	0.01	蘑菇味、脂肪味	–	0.15	–
24	癸酸	334-48-5	0.005	脂肪味、蜡味	–	1.15	–
25	（1-甲基乙基）-苯	98-82-8	0.008	辛香（类似孜然）	0.26	–	–
26	萘	91-20-3	0.025	樟脑丸味、霉味	0.22	0.1	<0.1
27	甲基吡嗪	109-08-0	0.6	坚果味、巧克力味	<0.1	<0.1	<0.1
28	乙基吡嗪	13925-00-3	0.005	坚果味、土味	1.61	0.22	0.56
29	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	1	坚果味、烘烤味	<0.1	<0.1	<0.1
30	2,3-二甲基吡嗪	5910-89-4	0.005	坚果味、土味	1.92	0.33	0.47
31	2-乙基-6-甲基吡嗪	13925-03-6	0.0004	坚果味、土味	29.17	–	13.04
32	2-乙基-5-甲基吡嗪	13360-64-0	0.0005	坚果味、烘烤味	–	–	16.29
33	三甲基吡嗪	14667-55-1	0.0001	坚果味、巧克力味	47.22	27.27	40.71
34	2-乙基-3-甲基吡嗪	15707-23-0	0.0002	坚果味、土味	39.58	–	–
35	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	13360-65-1	0.00009	坚果味、烘烤味	77.16	100	100
36	麦芽酚	118-71-8	0.005	焦糖味、甜味	11.14	6.19	7.54
37	2-戊基呋喃	3777-69-3	0.006	青豆味、果香	0.93	1.99	1.42
38	二丙基二硫	629-19-6	0.0001	洋葱味、大蒜味	100	–	–
39	二丙基三硫醚	6028-61-1	0.00005	洋葱味、刺激性气味	66.67	–	–

注：“–”为无法查询感官阈值或未检出该物质；感官阈值为该物质在水中的感觉阈值；气味特征描述依据气味特征数据库http://www.perflavory.com/index.org。

2,5-二甲基吡嗪(坚果味、烘烤味)的 ROAV 设定为 100,进行相对气味活度值(ROAV)分析[21−23](表 3)。

ROAV 分析结果表明,三种馕样品中 ROAV 大于 1 的香气组分共有 23 种,包括:2-甲基丙醛、3-甲硫基丙醛、3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、(Z)-2-庚醛、苯乙醛、(E)-2-辛醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E)-2-癸烯醛、2,3-丁二酮、乙基吡嗪、2,3-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2-乙基-3-甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、麦芽酚、2-戊基呋喃、二丙基二硫、二丙基三硫醚。这些物质是构成三种馕样品主体香气的关键成分,对总体风味贡献较大。PYZN、ZMN 和 WWN 的主体香气成分构成及贡献度存在显著差异。在 PYZN 中,主体香气成分包括 2-甲基丙醛(ROAV=37.78,麦芽味、苹果香)、3-甲基丁醛(ROAV=12.22,巧克力味、果香)、(E)-2-辛醛(7.34,脂肪味、青草味)、三甲基吡嗪(ROAV=47.22,坚果味、巧克力味)、2-乙基-3-甲基吡嗪(39.58,坚果味、土味)、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪(77.16,坚果味、烘烤味)以及特征性的二丙基二硫(100,洋葱味、大蒜味)和二丙基三硫醚(66.67,洋葱味、刺激性气味),其中含硫化合物的高 ROAV 直接体现了洋葱原料的特征风味。ZMN 的主体香气成分则以 2-甲基丙醛(ROAV=41.85)、(E,E)-2,4-癸二烯醛(ROAV=34.09,脂肪味、油炸味)、2,3-丁二酮(ROAV=16.71,黄油味、奶油味)、三甲基吡嗪(ROAV=27.27)及 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪(100)为核心,不饱和醛类与吡嗪类物质的协同作用凸显了其烘烤油脂香与坚果香。WWN 的主体香气成分则集中在 2-甲基丙醛(33.5)、3-甲基丁醛(ROAV=6.14)、2-乙基-5-甲基吡嗪(16.29,坚果味、烘烤味)、三甲基吡嗪(40.71)及 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪(ROAV=100)上,吡嗪类物质的高贡献使其烘烤风味更为纯粹和突出。

吡嗪类化合物阈值极低,主要来源于美拉德反应、氨基酸热解及硫胺素降解,具有杏仁、面包、烤坚果等气味,能有效协调整体风味,是构成馕主体香气的重要组分[24]。值得注意的是,3-乙基-2,5-二甲基吡嗪在三种馕中均具有极高的 ROAV(77.16~100),其极低的阈值(0.00009 mg/kg)及典型的坚果、烘烤味特征使其成为调控整体风味轮廓的关键物质。醛类物质如 3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、苯乙醛等,主要由美拉德反应和不饱和脂肪酸氧化降解产生,具有苦杏仁、可可等特征风味,因阈值较低而对面包、披萨、馕等焙烤食品的风味起到重要作用[25];三种馕中部分醛类(如庚醛,ROAV<1)则通过脂肪味、玫瑰香等对整体风味起到修饰作用。尽管醇类(如乙醇、2-呋喃醇)在焙烤食品中相对含量较高[26],但由于其感官阈值高且 ROAV 值均小于 0.1,因此对馕的整体香气直接贡献较弱,属于潜在的风味物质。

综上所述,PYZN、ZMN 和 WWN 的主体香气特征由低阈值、高 ROAV 的吡嗪类与醛类化合物共同主导,这些成分主要源于烤制过程中的美拉德反应、脂质氧化降解以及原料自身的特征代谢物(如 PYZN 中的含硫化合物),共同塑造了三种馕独特的风味轮廓。其中,ZMN 因(E,E)-2,4-癸二烯醛和 2,3-丁二酮而呈现的油炸特征与奶油香气尤为突出。

2.4 三种馕的关键差异香气分析

2.4.1 关键差异香气成分的 VIP 分析 基于 OPLS-DA 模型,通过变量投影重要性(Variable Importance in Projection, VIP)分析来筛选导致三种馕样品香气差异的关键成分。通常将 VIP 值≥1.0 的变量视为重要差异标志物。分析结果(图 7)表明,共有 21 种香气物质的 VIP 值>1,被鉴定为关键差异香气成分。这些物质按 VIP 值降序排列包括:2-丁酮(3.19)、丙酮(2.56)、2-甲基 2-丙醇(2.31)、2-呋喃醇(2.00)、2-甲基丙醛(1.54)、壬酸(1.53)、2-甲氧基-2-甲基丙烷(1.52)、糠醛(1.45)、己烷(1.35)、甲基吡嗪(1.35)、4-(1-甲基乙基)-苯甲醛(1.32)、苯乙醛(1.27)、2-乙基-5-甲基吡嗪(1.23)、呋喃基羟甲基酮(1.21)、2,5,6-三甲基癸烷(1.08)、2,5-二甲基吡嗪(1.05)和十二烷(1.05)等。这些成分的详细相对含量如附表 1 所示,其作为主体香气成分的潜力(ROAV)如表 3 所示。结合其高 VIP 值,这些物质对区分 PYZN、ZMN 和 WWN 的整体风味轮廓具有最重要的贡献。

2.4.2 芝麻馕与洋葱馕的关键差异香气成分分析 基于 OPLS-DA 与 ROAV 分析,从芝麻馕(ZMN)与洋葱馕(PYZN)中筛选出二丙基二硫、2,3-丁二酮、麦芽酚、2-甲基丙醛和苯乙醛作为关键差异香气成分(ROAV>1, VIP≥1)。如图 8 所示,OPLS-DA 得分图显示 ZMN 与 PYZN 样本在投影空间中分布区域明显分离,模型解释率 $R^2X[1]=0.995$,置换检验 Q^2 截距为−0.91(图 8),远小于 0,说明模型未出现过拟合,具有良好的预测能力,表明两类样品香气组成具有显著差异($P<0.05$)。

在这些关键成分中,二丙基二硫具有明显葱蒜类刺激性气味,为 PYZN 所特有,其 ROAV 值达 100,相对含量为 0.72%($P<0.05$),是形成 PYZN 标志性辛香特征的核心物质。2,3-丁二酮呈现黄油和奶油香气,在 ZMN 中的 ROAV(16.71)和相对含量(12.26%)均显著($P<0.05$)高于 PYZN(3.46, 2.49%),表明该物质对区分两类馕的乳脂风味具有决定性作用[27]。在共有成分方面,麦芽酚(焦糖甜香)在 PYZN 中的 ROAV(11.14)和相对含量(4.01%)均高于 ZMN(6.19, 2.27%),强化了 PYZN 的焦糖风味;2-甲基丙醛(麦芽、苹果香)在 ZMN 中的 ROAV(41.85)高于 PYZN(37.78),表明其对 ZMN 的麦芽甜香贡献更为突出;苯乙醛(玫瑰、蜂蜜香)在 ZMN 中的相对含量(2.76%)和 ROAV(3.76)均高于 PYZN(1.31%, 1.82),进一步增强了 ZMN 的花香调特征。

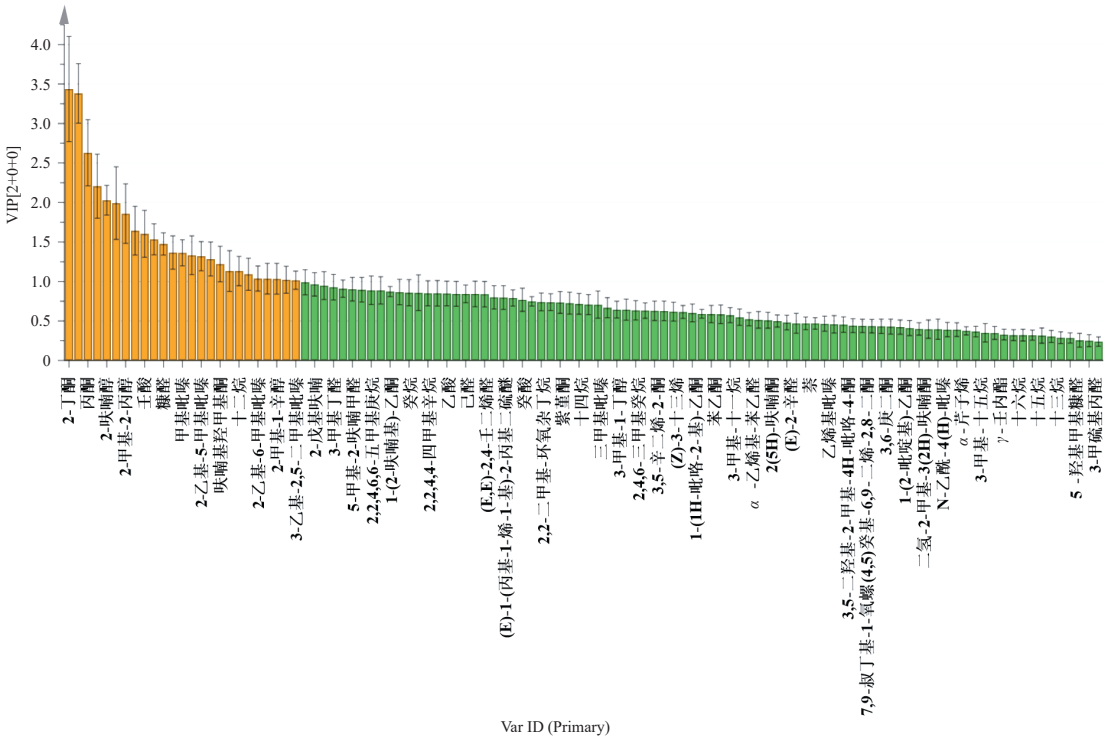


图 7　三种馕中香气物质的 OPLS-DA VIP 结果

Fig.7　OPLS-DA VIP results of volatile compounds in three naan varieties

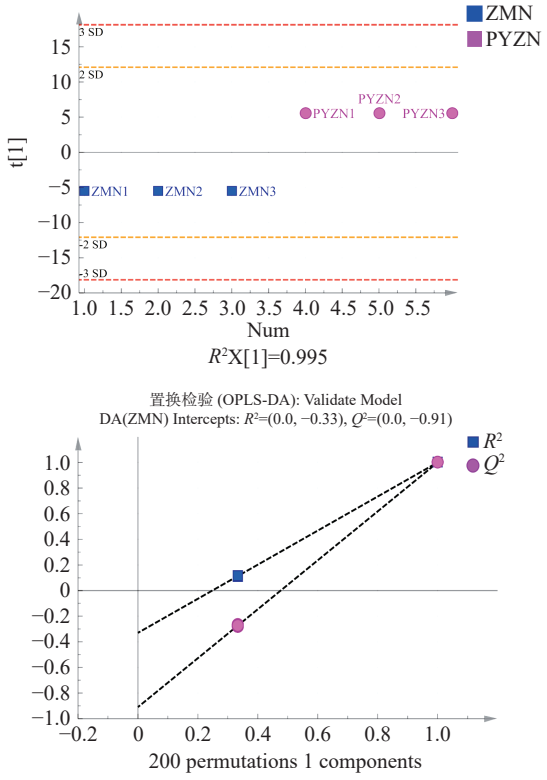


图 8　芝麻馕和洋葱馕的 OPLS-DA 得分图与其置换检验结果

Fig.8　OPLS-DA score plot and its permutation test results for sesame naan and onion naan

注：基于 200 次置换检验，图中呈现了随机模型 R^2 和 Q^2 值的聚类整体分布及回归趋势；图 9~图 10 同。

综上所述，PYZN 的香气轮廓以含硫化合物（二丙基二硫）所带来的辛香为主导，并辅以较强的焦糖甜香（麦芽酚）；而 ZMN 则以高强度的乳脂香（2,3-丁二酮）、麦芽苹果香（2-甲基丙醛）和花香（苯乙醛）为核心风味特征。两类馕在关键香气成分的种类与贡献强度上存在本质差异，构成了其风味特征分化的化学基础。

2.4.3　洋葱馕与窝窝馕的关键差异香气成分分析

基于 OPLS-DA 与 ROAV 分析，从洋葱馕（PYZN）与窝窝馕（WWN）中筛选出二丙基二硫、二丙基三硫醚、2-乙基-5-甲基吡嗪、麦芽酚、2-甲基丙醛、苯乙醛及三甲基吡嗪作为关键差异香气成分（ROAV≥1，VIP≥1）。如图 9 所示，OPLS-DA 得分图中 PYZN 与 WWN 样本在投影空间中分布区域明显分离，模型第一主成分解释率 $R^2X[1]=0.985$，置换检验 Q^2 截距为−0.889（图 9），远小于 0，说明模型稳定性良好，未出现过拟合，具备可靠的判别能力，表明两类样品香气组成具有显著差异（$P<0.05$）。

二丙基二硫与二丙基三硫醚为 PYZN 所特有，其 ROAV 值分别为 100 和 66.67，相对含量分别为 0.72% 和 0.24%（$P<0.05$），赋予样品显著的洋葱类刺激性辛香，是构成 PYZN 特征风味的关键成分[28]；WWN 中未检出该类含硫化合物。2-乙基-5-甲基吡嗪（坚果、烘烤香）为 WWN 特有成分，其 ROAV 为 16.29，相对含量为 1.14%，显著增强了 WWN 的烘烤坚果风味，是区分两组样品的关键标志物。在共有成分中，麦芽酚（焦糖甜香）在 PYZN 中的 ROAV（11.14）高于 WWN（7.54），尽管其在 PYZN 中的相对含量（4.01%）低于 WWN（5.28%），说明麦芽酚对 PYZN 的焦糖风味的贡献更为突出；三甲基吡嗪（坚果、巧克力香）在 PYZN 中的 ROAV（47.22）高于 WWN（40.71），尽管 WWN 中相对含量（0.57%）高于

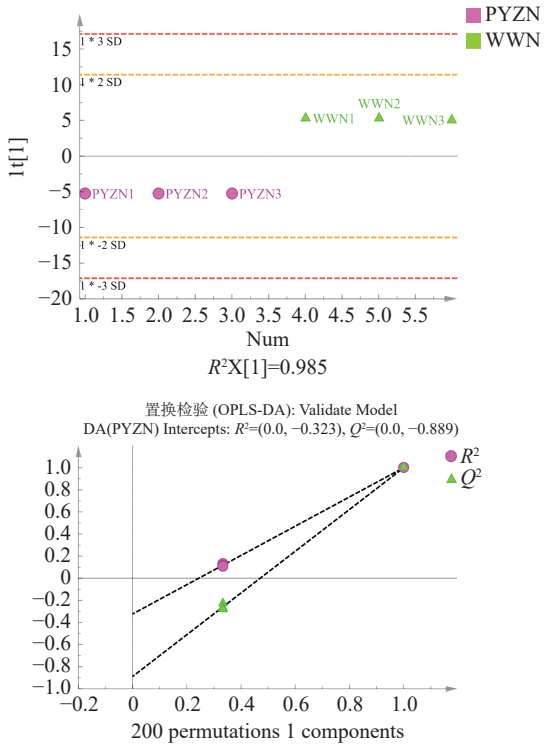


图 9 窝窝馕和洋葱馕的 OPLS-DA 得分图与其置换检验结果

Fig.9 OPLS-DA score plot and its permutation test results for wowo naan and onion naan

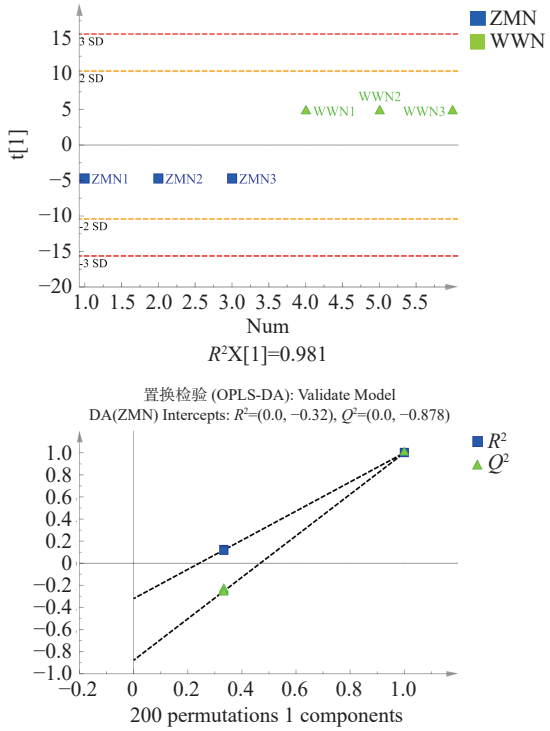


图 10 芝麻馕和窝窝馕的 OPLS-DA 得分图与其置换检验结果

Fig.10 OPLS-DA score plot and its permutation test results for sesame naan and wowo naan

PYZN(0.34%), 提示其在 PYZN 中香气活性更强; 2-甲基丙醛(麦芽、苹果香)在 PYZN 中 ROAV(37.78)略高于 WWN(33.5), 但 WWN 中相对含量(4.69%)高于 PYZN(2.72%), 表明该成分对两类样品的果香与麦芽香均具有重要贡献; 苯乙醛(玫瑰、蜂蜜香)在 WWN 中相对含量(2.51%)高于 PYZN(1.31%), ROAV 相近, 说明其对 WWN 的花香调形成贡献更大。

综上所述, PYZN 的香气特征以特有的含硫化合物(二丙基二硫、二丙基三硫醚)所带来的辛香为主导, 并辅以较强的焦糖甜香(麦芽酚)与坚果香(三甲基吡嗪); 而 WWN 则以特有的吡嗪类物质(2-乙基-5-甲基吡嗪)为核心, 凸显烘烤风格, 并兼具麦芽果香与花香底蕴。两者在含硫化合物分布及吡嗪类、醛类物质的组成与贡献强度上存在本质差异(P<0.05), 构成了其风味特征分化的内在基础[29]。

2.4.4 芝麻馕与窝窝馕的关键差异香气成分分析

基于 OPLS-DA 与 ROAV 分析, 从芝麻馕(ZMN)与窝窝馕(WWN)中筛选出(E,E)-2,4-癸二烯醛、2,3-丁二酮、2-乙基-5-甲基吡嗪、三甲基吡嗪、麦芽酚、2-甲基丙醛及苯乙醛为关键差异香气成分。如图 10 所示, OPLS-DA 得分图中 ZMN 与 WWN 样本在投影空间中分布区域明显分离, 模型第一主成分解释率 R^2X[1]=0.981, 置换检验 Q^2 截距为−0.878(图 10), 远小于 0, 说明模型稳定性良好, 未出现过拟合, 具备可靠的判别能力, 表明两类样品香气组成具有显著差异(P<0.05)。

在这些成分中, (E,E)-2,4-癸二烯醛(脂肪、油炸香)为 ZMN 所特有, 其 ROAV 为 34.09, 相对含量为 0.50%(P<0.05), 赋予 ZMN 典型的油炸风味特征[30]; 2-乙基-5-甲基吡嗪(坚果、烘烤香)为 WWN 特有成分, 其 ROAV 为 16.29, 相对含量为 1.14%, 显著增强了 WWN 的烘烤坚果香气。在共有成分中, 2,3-丁二酮(黄油、奶油香)在 ZMN 中的 ROAV(16.71)和相对含量(12.26%)均显著高于 WWN(3.79、5.30%), 表明其为 ZMN 乳脂风味的核心贡献成分; 三甲基吡嗪(具坚果、巧克力香)在 WWN 中的 ROAV(40.71)和相对含量(0.57%)均高于 ZMN(27.27、0.20%), 突显了 WWN 更浓郁的烘烤坚果特征; 麦芽酚(焦糖甜香)在 WWN 中的 ROAV(7.54)和相对含量(5.28%)均高于 ZMN(6.19、2.27%), 对 WWN 的焦糖风味贡献更为突出; 2-甲基丙醛(麦芽、苹果香)在 ZMN 中 ROAV(41.85)较高, 而在 WWN 中相对含量(4.69%)更高, 提示其在两类样品中均具重要香气作用但贡献侧重不同; 苯乙醛(玫瑰、蜂蜜香)在 ZMN 中的 ROAV(3.76)和相对含量(2.76%)均略高于 WWN(1.79、2.51%), 对 ZMN 的花香调形成贡献更大。

综上所述, ZMN 的香气轮廓以(E,E)-2,4-癸二烯醛带来的油炸脂肪香和 2,3-丁二酮赋予的乳脂香为主导, 辅以轻微花香; 而 WWN 则依托特有的 2-乙基-5-甲基吡嗪及含量更高的三甲基吡嗪构建出纯净的坚果烘烤风味, 并兼具突出的焦糖甜香与麦芽苹果香。两者在醛类、吡嗪类和酮类香气物质的组成与

强度上存在显著差异（P<0.05），构成了其风味特征分化的内在基础。

3　讨论

馕的风味品质是影响消费者喜好的核心要素，其形成主要取决于原料与加工工艺。本研究通过现代风味组学技术，证实了芝麻馕、洋葱馕与窝窝馕的香气特征存在本质差异，这些差异主要源于其特定原料及在烤制过程中所发生的化学反应。首先，原料配方是决定风味物质基础与形成路径的根本原因。洋葱馕中鉴定出的二丙基二硫与二丙基三硫醚等含硫化合物，是直接源自洋葱的特征风味前体物。这些前体物在加热过程中分解、释放，构成了其不可复制的辛香基调，这与古丽乃再尔·斯热依力等[11]的报道一致。相比之下，芝麻馕的香气形成路径更为复杂，其关键成分 2,3-丁二酮（奶油香气）和（E,E）-2,4-癸二烯醛（油炸香）是美拉德反应与脂质氧化降解协同作用的典型产物。芝麻本身富含的蛋白质与不饱和脂肪酸为这些反应提供了充足的底物。窝窝馕的特征吡嗪类物质（如 2-乙基-5-甲基吡嗪）则主要由美拉德反应生成，其特定的“坚果烘烤香”印证了该反应在其风味构成中的主导地位。其次，烤制温度与受热方式通过对反应动力学的影响，调控着关键风味物质的最终组成与含量。窝窝馕独特的厚壁窝窝形状，可能改变了热传导效率与内部蒸汽环境，这种受热模式更利于特定吡嗪类物质的积累。同样，芝麻与面团在馕坑高温下的热加工，是引发并推进前述美拉德反应与脂质氧化的关键驱动力。反应温度与时间的差异，直接导致了最终产物比例和风味强度的不同。

本研究发现的关键香气成分与毛红艳等[8]此前报道的馕（如以 1-癸炔、石竹烯为特征）存在显著区别。这一现象恰恰强有力地证明，原料配方的特异性是塑造馕品独一无二风味图谱的首要因素。不同的原料组合引入了不同的反应前体，从而导向了迥异的风味形成路径与最终产物。本研究从风味化学视角，深化了对于原料与工艺在馕风味形成中作用机制的理解，为后续的定向调控提供了明确的理论靶点。

4　结论

本文采用 HS-SPME-GC-MS 技术，系统分析了电加热红外馕坑烤制的新疆芝麻馕（ZMN）、洋葱馕（PYZN）及窝窝馕（WWN）的挥发性组成特征及关键差异。结果表明，三类馕品的挥发性成分在组成与相对含量上均存在显著差异（P<0.05）。共鉴定出 110 种挥发性成分，分属 9 类：醇类 5 种、醛类 22 种、酮类 19 种、羧酸类 4 种、酯类 6 种、醚类 4 种、烃类 28 种、吡嗪类 14 种及其他类（含硫化合物等）8 种。其中，芝麻馕、洋葱馕与窝窝馕分别检出 66、87 与 56 种挥发性成分，三者共有成分为 42 种。从种类丰富度来看，洋葱馕的香气成分数量明显多于芝麻馕和窝窝馕。进一步通过相对气味活度值（ROAV）分析，从 39 种候选主体香气成分中筛选出 23 种对总体香气具有重要贡献的关键成分（ROAV>1）。结合正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA），鉴定出 21 种 VIP 值大于 1 的关键差异标志物。三类馕的关键风味物质构成及其贡献度存在显著区别（P<0.05）：洋葱馕以 2-甲基丙醛、3-甲基丁醛、（E）-2-辛醛、三甲基吡嗪、2-乙基-3-甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪以及二丙基二硫、二丙基三硫醚等为核心，其中含硫化合物的高 ROAV（分别为 100 与 66.67）直接体现了洋葱原料的特征风味；芝麻馕的主体香气成分以 2-甲基丙醛、（E,E）-2,4-癸二烯醛、2,3-丁二酮、三甲基吡嗪及 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪为主，不饱和醛与吡嗪类物质的协同作用赋予其突出的烘烤油脂香与坚果香；窝窝馕则以 2-甲基丙醛、3-甲基丁醛、2-乙基-5-甲基吡嗪、三甲基吡嗪及 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪为关键成分，吡嗪类物质的整体高贡献使其烘烤风味更为纯粹。

本研究说明，三类馕的香气特征差异主要源于其配方中特征原料（如洋葱中的含硫前体物、芝麻中的脂质）在电加热红外馕坑特定烤制条件下经热反应生成的特征香气物质在组成与强度上的不同。研究结果为电加热红外馕坑烤制新疆馕产品的风味品质调控与标准化生产提供了理论依据与数据支撑，未来可结合工艺参数优化与风味导向型加工技术，进一步推动新疆传统馕产业的现代化与标准化发展。

© The Author(s) 2026. 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] 陈婷，钱其龙. 新疆馕文化及产业发展现状[J]. 现代食品，2022，28(14)：60−62，68. [CHEN Ting，QIAN Qilong. Xinjiang naan culture and its industrial development status[J]. Modern Food，2022，28(14)：60−62，68.]

[2] 曹雪琴，姜林慧，王文文，等. 新疆特色食品馕的营养成分分析[J]. 营养学报，2019，41(1)：99−101. [CAO Xueqin，JIANG Linhui，WANG Wenwen，et al. Analysis of nutritional components in Xinjiang characteristic food naan[J]. Acta Nutrimenta Sinica，2019，41(1)：99−101.]

[3] 聂文静. 新疆特色食品馕的类型及其文化分析[J]. 中外食品工业，2024(9)：126−128. [NIE Wenjing. Types and cultural analysis of Xinjiang characteristic food naan[J]. Sino-Global Food Industry，2024(9)：126−128.]

[4] 郭江峰，杨花明，袁丽萍，等. 克州馕产业标准化研究[J]. 农产品加工，2022(19)：103−105. [GUO Jiangfeng，YANG Huaming，YUAN Liping，et al. Study on standardization of naan industry in Kizilsu Kirghiz autonomous prefecture[J]. Farm Products Processing，2022(19)：103−105.]

[5] 谷亚文，肉孜·阿木提，史勇，等. 我国烤馕装置现状与分析[J]. 新疆农机化，2018(2)：29−31. [GU Yawen，Rouzi Amuti，SHI Yong，et al. Status and analysis of naan baking devices in China[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization，2018(2)：29−31.]

[6] 毛红艳，祖力皮牙·买买提，王佳敏，等. 基于电子感官技术结合 HP-SPME-GC-MS 分析不同馕的关键风味物质[J]. 中国粮油学报，2025，40(4)：176−185. [MAO Hongyan，Zulipiya · Maimaiti，

WANG Jiamin, et al. Analysis of key flavor compounds in different Naans based on electronic sensory technology combined with HP-SPME-GC-MS[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(4): 176−185.]
[7] 张文娟, 周考文. HS-SPME-GC-MS 在食品挥发性物质分析中的应用[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(17): 218−224. [ZHANG Wenjuan, ZHOU Kaowen. Application of HS-SPME-GC-MS in the analysis of food volatile compounds[J]. Food Research and Development, 2021, 42(17): 218−224.]
[8] 毛红艳, 徐鑫, 于明. 固相微萃取-气质联用分析新疆馕挥发性成分[J]. 食品工业, 2018, 39(6): 287−290. [MAO Hongyan, XU Xin, YU Ming. Analysis of volatile components in Xinjiang naan by SPME-GC-MS[J]. The Food Industry, 2018, 39(6): 287−290.]
[9] 王露飞, 安比芳, 白羽嘉, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析不同烤馕装置烤制 4 种新疆馕的香气特征差异[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 319−330. [WANG Lufei, AN Bifang, BAI Yujia, et al. Analysis of aroma characteristics differences of four kinds of Xinjiang Naans baked by different baking devices based on HS-SPME-GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 319−330.]
[10] 古丽乃再尔·斯热依力, 阿衣古丽·阿力木, 白羽嘉, 等. 复配改良剂对洋葱浆馕品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 298−307. [GULINAZAIER Sireyili, AYIGULI Alimu, BAI Yujia, et al. Effect of compound improver on the quality of onion pulp Naan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 298−307.]
[11] 古丽乃再尔·斯热依力, 阿衣古丽·阿力木, 付文欠, 等. 不同添加量洋葱浆对馕品质的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(3): 195−210. [GULINAZAIER Sireyili, AYIGULI Alimu, FU Wenqian, et al. Effect of different amounts of onion pulp on the quality of Naan[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 195−210.]
[12] 吴立根, 王涛, 屈凌波, 等. 藜麦全谷物粉对馕抗氧化性影响的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8): 2633−2639. [WU Ligen, WANG Tao, QU Lingbo, et al. Study on the effect of quinoa whole grain flour on the antioxidant properties of naan[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(8): 2633−2639.]
[13] ZHANG R, TANG C C, JIANG B Z, et al. Optimization of HS-SPME for GC-MS analysis and its application in characterization of volatile compounds in sweet potato[J]. Molecules, 2021, 26: 5808.
[14] ZIA A, WASO E, JELEN H H. Differentiation of wines according to grape variety and geographical origin based on volatiles profiling using SPME-MS and SPME-GC/MS methods[J]. Food Chemistry, 2016, 213: 714−720.
[15] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲, 等. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 7: 370−374. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian, et al. A new method for determining the key flavor compounds of food: "ROAV" method[J]. Food Science, 2008, 7: 370−374.]
[16] PARAS A, CHRY A, KOUTIDOU M. Characterization of volatile compounds of lupin protein isolate-enriched wheat flour bread[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 568−577.
[17] CHIBA M, MINAMISAWA M, KAWANO S, et al. Principal component analysis (PCA) applied to near infrared spectra for classifying wheat flours[J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 1995, 42(10): 796−801.
[18] ZHAO F, CHEN M J, JIN S, et al. Macro-composition quantification combined with metabolomics analysis uncovered key dynamic chemical changes of aging white tea[J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130593.
[19] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 80−570. [van HEMERT L. Compilation of odor and taste threshold values data[M]. Beijing: Science Press, 2015: 80−570.]
[20] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲, 等. 金华火腿主体风味成分及其确定方法[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(2): 173−176. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian, et al. The key flavor compounds of Jinhua ham and their determination method[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(2): 173−176.]
[21] PU D, ZHANG H, ZHANG Y, et al. Characterization of the key aroma compounds in white bread by aroma extract dilution analysis, quantitation, and sensory evaluation experiments[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(5): 1−15.
[22] CHO I H, PETERSON D G. Chemistry of bread aroma: A review[J]. Food Science and Biotechnology, 2010, 19(3): 575−582.
[23] NORBERT D K, CHRISTIN S. Syntheses of the principal bread flavor component, 6-acetyl-1,2,3, 4-tetrahydropyridine, and acetal protected precursors[J]. Tetrahedron, 1995, 51(8): 2387−2402.
[24] 张兴, 陈怡颖, 章慧莺, 等. 新疆馕包肉挥发性风味成分的分离与鉴定[J]. 精细化工, 2014, 31(6): 727−732. [ZHANG Xing, CHEN Yiying, ZHANG Huiying, et al. Isolation and identification of volatile flavor compounds in Xinjiang Nangbaorou[J]. Fine Chemicals, 2014, 31(6): 727−732.]
[25] SCHIEBERLE P. Intense aroma compounds-Useful tools to monitor the influence of processing and storage on bread aroma[J]. Advances in Food Sciences, 1996, 18: 237−244.
[26] BIRCH A N, PETERSON M A. Hansen A S. Review: Aroma of wheat bread crumb[J]. Cereal Chemistry, 2014, 91: 978814.
[27] RUIZ J, VENTANAS J, CAVA R. New device for direct extraction of volatiles in solid samples using SPME[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 11: 49.
[28] KIRCHHOFF E, SCHIEBERLE P. Determination of key aroma compounds in the crumb of a three-stage sourdough rye bread by stable isotope dilution assays and sensory studies[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2001, 49(9): 4304−4311.
[29] 袁桃静, 赵笑颍, 庞一扬, 等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 对 5 种食用植物油挥发性风味成分分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 102−111. [YUAN Taojing, ZHAO Xiaoying, PANG Yiyang, et al. Analysis of volatile flavor components in five kinds of edible vegetable oils based on electronic nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(9): 102−111.]
[30] SC ALONE G L. Impact of enzymatically generated peptides on the formation of alkyl pyrazines in Maillard model systems and baked food products[D]. Gent: Universiteit GENT, 2016.