

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240508006

基于电子鼻/电子舌结合顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱法分析烤包子关键风味物质

毛红艳, 王佳敏, 祖力皮牙·买买提, 岳丽*, 于明*

(新疆农业科学院粮食作物研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: **目的** 基于电子鼻/电子舌结合顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱法(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)分析烤包子关键风味物质。**方法** 采用 HS-SPME-GC-MS 联合电子舌、电子鼻技术, 并结合相对气味活度值对烤包子中的挥发性物质以及关键香气成分进行分析。**结果** 电子鼻能有效区分不同烤包子挥发性物质; 电子舌分析发现不同烤包子滋味接近。GC-MS 共鉴定出 152 种挥发性成分, 其中 27 种共有化合物, 主要为醛类和硫醚类。相对气味活度值结合共有挥发性物质表明, (*E*)-2-壬烯醛、壬醛、丙烯基丙基二硫醚为烤包子关键性挥发性物质, 庚醛、4-异丙基苯甲醛、3-甲硫基丙醛、4-异丙基-1,3-环己二烯-1-甲醛、2-戊基呋喃、二丙基二硫醚对烤包子风味具有关键辅助作用。烤包子的香气主要为脂肪香、焦香、葱蒜香、青香及果香。**结论** 本研究结果为烤包子的生产提供了基础性数据, 电子鼻结合 HS-SPME-GC-MS 对风味物质研究更全面、可靠, 研究为烤包子挥发性风味特征提供了理论支持, 为后续烤包子指纹图谱的建立提供了方法指导。

关键词: 气相色谱-质谱法; 相对气味活度值; 电子舌; 电子鼻; 烤包子

Analysis of key flavor components of baking steamed stuffed bun by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry coupled with electronic nose/electronic tongue

MAO Hong-Yan, WANG Jia-Min, ZULIPIYA Maimaiti, YUE Li*, YU Ming*

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

ABSTRACT: Objective To analyze the key flavor components of baking steamed stuffed bun by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) coupled with electronic nose/electronic tongue. **Methods** The volatile substances of baking steamed stuffed buns were analyzed by HS-SPME-GC-MS and electronic tongue and electronic nose combined with relative odor activity value. **Results** The

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01B63)、新疆农业科学院自主培育项目(nkyzzkj-005)、中央引导地方科技发展专项资金项目(ZYYD2022B14)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2021D01B63), the Independent Cultivation Project of Xinjiang Academy of Agricultural Sciences (nkyzzkj-005), and the Central Leading Local Science and Technology Development Special Project (ZYYD2022B14)

*通信作者: 岳丽, 副研究员, 主要研究方向为食品营养与风味研究。E-mail: 2660222437@qq.com

于明, 研究员, 主要研究方向为食品营养与加工技术研究。E-mail: 2435742497@qq.com

*Corresponding author: YUE Li, Associate Professor, Institute of Grain and Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China. E-mail: 22660222437@qq.com

YU Ming, Professor, Institute of Grain and Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China.

E-mail: 2435742497@qq.com

electronic nose could distinguish the volatile substances of different baking steamed stuffed buns effectively. Electronic tongue analysis found that different baking steamed stuffed bun tasted similar. A total of 152 volatile compounds were identified by HS-SPME-GC-MS, of which 27 were common compounds, mainly aldehydes and thioethers. The common compounds combined with relative odor activity value analysis showed that (*E*)-2-nonanal, nonanal, and propenyl propyl disulfide were the key aroma compounds of baking steamed stuffed bun and heptanal, 4-isopropylbenzaldehyde, 3-methylthiopropional, 4-isopropyl-1, 3-cyclohexadien-1-aldehyde, 2-pentylfuran, and dipropyl disulfide have important modification effects on the flavor of baking steamed stuffed bun. **Conclusion** The results of this study provide basic data for the production of baking steamed stuffed bun, and the electronic nose combined with HS-SPME-GC-MS is a more comprehensive and reliable method for the study of flavor substances, and the results provide theoretical support for the volatile flavor characteristics of baking steamed stuffed bun, and provide method guidance for the subsequent establishment of the fingerprint of baking steamed stuffed bun.

KEY WORDS: gas chromatography-mass spectrometry; relative odor activity value; electronic nose; electronic tongue; baking steamed stuffed bun

0 引言

烤包子, 维吾尔语叫“Shamusa”, 馅以羊肉丁和羊尾油为主要原料, 辅以洋葱、孜然粉、胡椒粉和盐, 加入少量水, 拌匀而成^[1]。烤包子皮用死面擀薄, 四边折合成方形^[2], 把生坯贴入馕坑烤制而成。作为一种风味独特的新疆传统主食, 烤包子因皮酥肉嫩、味道鲜香, 深受新疆人民的喜爱。

固相微萃取在食品分析中是一种非常重要的样品制备技术, 可用于气相色谱-质谱法的前处理过程, 为挥发性成分的类型和浓度分析提供准确的方法, 并可作为食品风味分析的传感工具^[3]。固相微萃取和气相色谱-质谱联用在挥发性物质的分析和未知化合物的鉴定方面有非常理想的效果。电子鼻和电子舌是由一系列传感器组成的仿生设备, 电子舌模仿人的味觉, 具有高敏度、可靠性和重复性等优点^[4], 电子鼻模拟人的嗅觉, 避免了生理味觉和嗅觉的主观影响和缺陷, 可以无偏地测量食品的滋味和风味^[5], 被广泛应用到肉^[6]、橄榄油^[7]、奶制品^[8]等食品的滋味和风味品质的检测中。近年来, 电子鼻和电子舌结合气相色谱-质谱法在蔬菜、水果、茶和咖啡、牛奶、葡萄酒、鱼和肉等^[9-13]食品中得到广泛应用。

虽然烤包子的制作材料和工艺基本一致, 但由于烤制时间、配方比例等细微差别, 导致风味也存在一定的差异^[14]。目前关于烤包子的风味物质还鲜见报道, 为深入研究烤包子的关键香气组成, 本研究以不同市购烤包子为原料, 采用电子舌、电子鼻结合气相色谱-质谱法对烤包子的关键挥发性物质检测分析, 结合相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)解析烤包子中的关键挥发性成分, 为烤包子关键风味物质形成机制及后续烤包子指纹图谱的建立提供方法指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

烤包子, 乌鲁木齐市售。

BSA124S 型电子天平(精度 0.1 mg, 德国赛多利斯公司); QP-2020NX 型天平气质联用仪、WAX 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(日本岛津公司); HERACLES II 型电子鼻、Astress II/LS16 型电子舌(法国阿尔法莫斯公司); 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 自动固相微萃取纤维萃取头、萃取手柄(上海安谱公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 电子舌测定

参照胡金祥等^[15]的方法稍作修改, 精确称取 7.5 g 样品于烧杯中, 用蒸馏水定容至 120 mL, 振荡混匀孵育 30 min, 离心机 4000 r/min 离心 15 min, 将上清液用 0.45 μm 滤膜过滤后上机测定。清洗时间 10 s, 样品采集时间 120 s, 重复 7 次, 取最后 4 次数据进行分析。

1.2.2 电子鼻测定

参考于明等^[16]的方法略作修改, 精确称取 1 g 样品, 用含有硅胶垫盖的顶空瓶密封, 电子鼻测定参数: 进样量 5000 μL, 注射速度 125 μL/s, 清洗时间 120 s, 填充速度 500 μL/s, 进样口温度 200 °C, 进样口压力 10 kPa, 出口 30 mL/min, 注射时间 45 s, 捕集温度 50 °C, 加热振荡器搅拌速度 500 r/min, 40 °C 孵育 30 min, 阀温 250 °C, 检测器温 260 °C。实验重复 5 次, 分析最后 3 次稳定数据。

1.2.3 风味成分的测定

参考汪修意等^[17]的方法, 并略作修改。精确称取 2 g 粉碎样品, 密封于带有硅胶垫帽盖的顶空萃取瓶中, 60 °C 水浴平衡 15 min 后, 将老化后的 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 纤维萃取头插入顶空瓶中吸附 45 min, 将纤维萃取头在进样口解析 5 min。

GC 条件^[17]: 色谱柱为 WAX 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 进样口温度为 250 °C, 程序升温为: 35 °C 保持 5 min, 3 °C/min 升到 100 °C, 保持 3 min, 4 °C/min 升到 240 °C, 保

持 4 min; 高纯氦气(≥99.999%)为载气, 流速为 1 mL/min, 不分流进样。

MS 条件: 离子源温度 230 ℃, 电子轰击离子源, 电离能量 70 eV, 无溶剂延迟, 扫描范为 45~500 u, 标准调谐。

1.2.4 相对气味活度值分析

利用 ROAV^[16,18]定义对样品风味贡献最大的挥发性风味物质, 即 ROAV_{max}=100, 其他挥发性成分 ROAV 按公式(1)计算。

$$ROAV_A = \frac{C_A}{T_A} \times \frac{T_M}{C_M} \times 100 \tag{1}$$

注: C_A——各成分相对含量(%); T_A——各成分感觉阈值(μg/kg); C_M——最大贡献成分相对含量(%); T_M——最大贡献成分感觉阈值(μg/kg)。

1.3 数据分析

挥发性化合物利用 NIST 17 质谱数据库检索结合经典气相色谱保留时间数据和相关化学经验进行鉴定, 面积归一法计算各挥发物的相对含量。利用 SPSS 23.0、Origin 2021 进行数据分析与绘图。数据统计以平均值±标准偏差表示。

准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 电子舌检测分析

利用电子舌对烤包子的滋味品质进行测定, 味觉分析是通过信号响应值的相对强度大小来判断的^[19], 对烤包子味觉分析如表 1 和图 1 所示, 在 AHS(酸)、CTS(咸)、NMS(鲜)、ANS(甜)4 根传感器中最大值为 6.40, 极值差异为 0.60~0.90, 表明 5 种烤包子在酸、咸、鲜、甜 4 根传感器上差异较小且酸、咸、鲜、甜味道较均衡; SCS(苦)、PKS(通用型)、CPS (通用型)3 根传感器中极值差异分别是 2.00、1.20、2.10, 表明不同烤包子在 SCS、PKS、CPS 3 根传感器上部分差异较大。区分指数(discrimination index, DI)最大值为 100, 其值越大表明不同组数据之间区分度越好, 一般≥80 表示能够有效区分^[20-21]。由表 2 可知, DI 在 0.53~4.78 之间, 表明不同烤包子样品存在重叠, 口感滋味非常接近, 表明电子舌系统对这 5 个样品的滋味不能有效区分。

表 1 电子舌对不同烤包子的味觉分析
Table 1 Taste analysis of different baking steamed stuffed bun by electronic tongue

样品名称	AHS (酸)	CTS (咸)	NMS (鲜)	ANS (甜)	SCS (苦)	PKS (通用型)	CPS (通用型)
KB1	5.80±0.06 ^{ab}	6.30±0.06 ^a	5.80±0.06 ^a	5.80±0.10 ^a	4.90±0.10 ^a	5.70±0.10 ^{ab}	7.10±0.15 ^a
KB2	5.50±0.06 ^a	6.30±0.10 ^a	5.50±0.15 ^d	6.40±0.11 ^b	5.20±0.10 ^a	6.80±0.06 ^d	5.50±0.17 ^b
KB3	6.00±0.15 ^{bc}	6.20±0.10 ^a	6.00±0.20 ^{ab}	6.20±0.20 ^{bc}	6.60±0.15 ^b	5.80±0.15 ^{ac}	6.20±0.20 ^c
KB4	6.20±0.10 ^{cd}	5.80±0.06 ^b	6.20±0.20 ^{bc}	5.90±0.10 ^{ac}	6.90±0.15 ^b	6.20±0.21 ^c	5.08±0.15 ^d
KB5	6.40±0.10 ^d	5.40±0.10 ^c	6.40±0.20 ^c	5.80±0.20 ^a	6.20±0.20 ^c	5.60±0.20 ^{bc}	5.00±0.10 ^c

注: KB1~5 分别表示 5 种烤包子; 同列数据后不同小写字母表示在 P<0.05 水平差异有统计学意义。

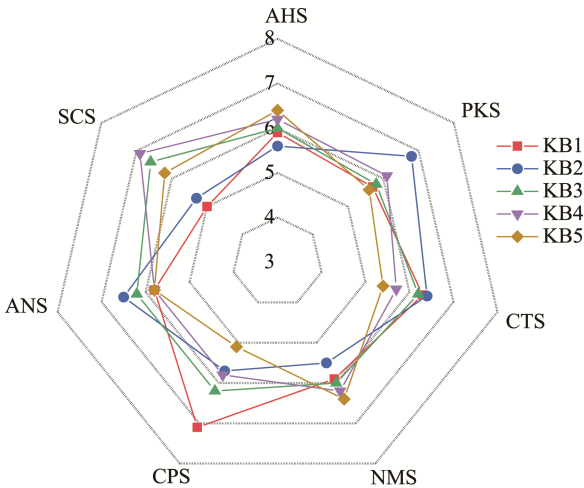


图 1 不同烤包子的电子舌分析雷达图
Fig.1 Radar chart analysis of baking steamed stuffed buns for E-tongue

表 2 电子舌对不同烤包子的区别指数
Table 2 Discrimination index analysis for different baking steamed stuffed buns of electronic tongue

DI/%	KB2	KB3	KB4	KB5
KB1	1.44	0.84	1.93	3.15
KB2		1.19	2.93	4.78
KB3			0.83	2.25
KB4				0.53

2.2 电子鼻检测分析

由图 2A 主成分分析(principal component analysis, PCA)可知, 第 1 主成分 PC1 (94.30%)与第 2 主成分 PC2 (3.65%)贡献率之和为 97.95%, 表明前 2 个主成分能对不同烤包子挥发性成分进行概括分析。电子鼻整体 DI 为 93 (>80), 表示电子鼻能有效区分不同烤包子中挥发性成分。判别因子分析(discriminant factor analysis, DFA)是在 PCA

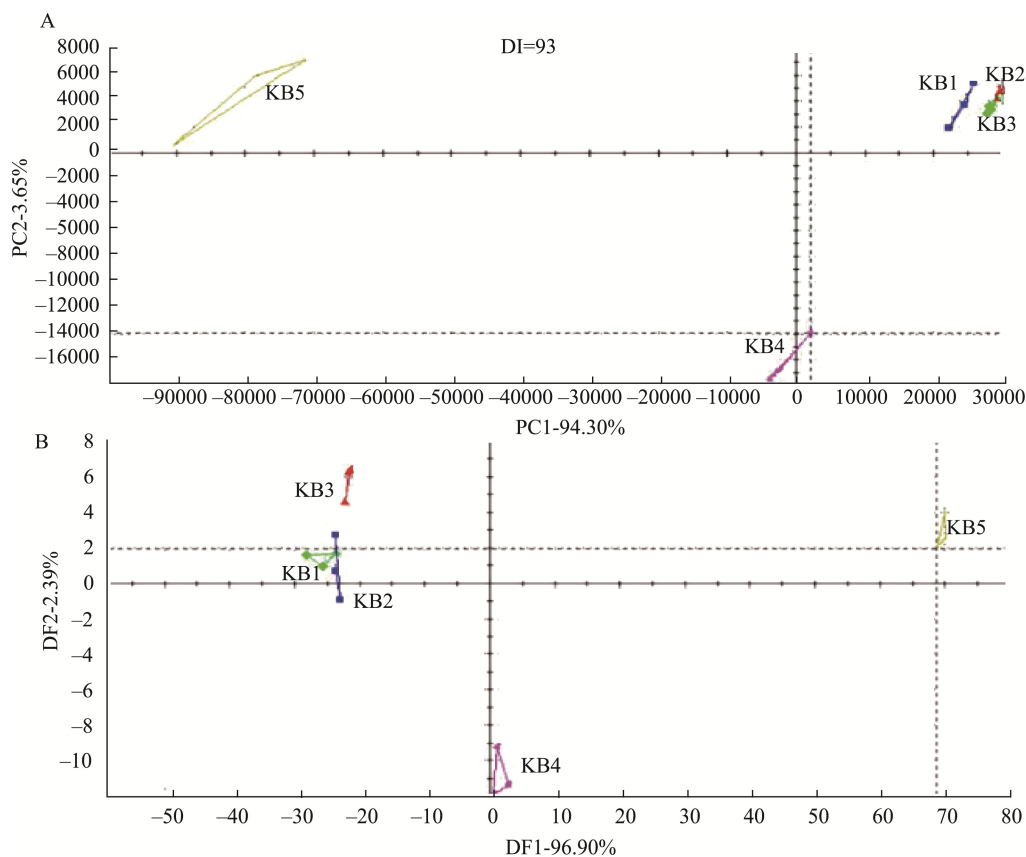


图 2 不同烤包子的电子鼻 PCA、DFA 图

Fig.2 PCA and DFA diagrams for E-nose of different baking steamed stuffed bun

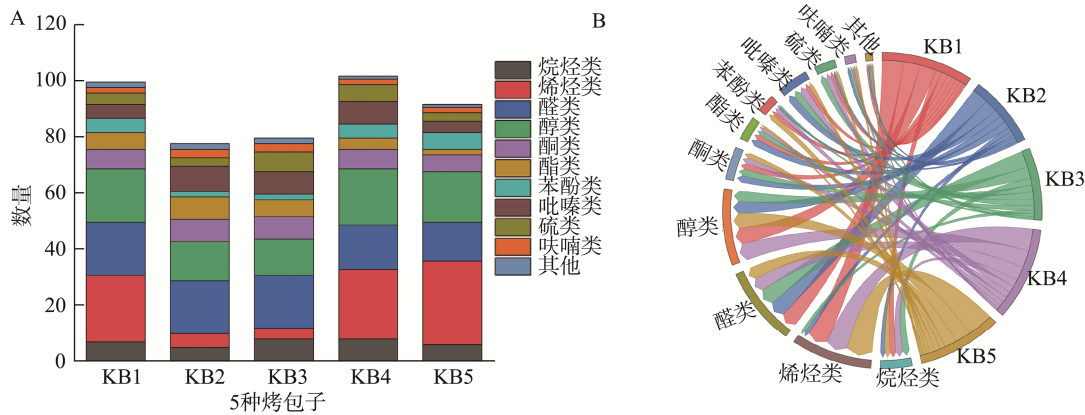
分析数据基础上扩大组间差距, 缩小组内差距, 以更加直观的形式体现不同样品间差异的分析方法^[21]。在图 2B 中, 第一判别因子 DF1 为 96.90%, 第二判别因子 DF2 为 2.39%, 两者累计贡献率为 99.29%, DFA 分析验证了 PCA 分析的结论。

2.3 挥发性成分分析

2.3.1 挥发性成分总体分析

5 种烤包子共鉴定出 152 种挥发性成分, 其中包括烯烃 34 种、醇类 29 种、醛类 26 种、酮类 11 种、烷烃 13 种、酯类 9 种、吡嗪 9 种、苯酚类 9 种、硫类 7 种、呋喃 3 种以

及其他化合物 2 种。由图 3 可知, KB1 共鉴定出 100 种化合物, 烯烃、醛类相对含量较高, 分别为 60.3%、15.4%; KB2 共鉴定出 78 种挥发性成分, 醛类、醇类、硫类相对含量较高, 分别为 30.8%、13.9%、11.6%; KB3 共鉴定出 80 种化合物, 其中醛类、硫类、醇类相对含量较高, 分别为 30.3%、24.3%、11.9%; KB4 共鉴定出 102 种挥发性成分, 其中烯烃、醛类、醇类相对含量较高, 分别为 41.4%、29.7%、10.9%; KB5 共鉴定出 92 种化合物, 其中烯烃、醛类、醇类相对含量较高, 分别为 41.28%、30.54%、12.6%。



注: A. 种类; B. 相对含量桑基图。

图 3 不同烤包子挥发性成分种类和相对含量

Fig.3 Classification and relative content statistics of volatile components of different baking steamed stuffed buns

2.3.2 共有挥发性物质分析

由表 3 可知, 5 种市售烤包子共鉴定出 27 种共有化合物, 其中包含烃类(2 种)、醛类(9 种)、醇类(2 种)、吡嗪(4 种)、炔类(2 种)、醚类(3 种)、酮类(3 种)、其他(2 种)。其中平均相对含量超过 1% 的化合物有 9 种, 分别是: 己醛(4.16%)、庚醛(1.03%)、壬醛(1.24%)、4-异丙基苯甲醛(9.70%)、石竹烯(4.31%)、糠醇(4.62%)、甲基丙基二硫醚(1.55%)、二丙基二硫醚(5.44%)、丙烯基丙基二硫醚(1.35%), 这 9 种化合物相对总含量达到 33.4%, 占共有化合物相对含量的 83.5%。

醛类物质来自微生物作用、糖类的美拉德反应以及脂

肪氧化水解, 其阈值较低, 对食品最终的香气影响较大^[9]。醛的阈值一般很低, 具有脂肪香味, 是肉香味的主要成分^[22]。醇类主要是肉中共轭亚油酸被脂肪氧合酶和过氧化氢酶降解以及羰基化合物还原产生, 气味柔和, 可赋予产品植物香味^[9]。醚类化合物在风味物质中也非常重要, 特别是含苯环的醚, 大多具有强烈而愉快的香气^[23]。硫醇类、硫醚类是洋葱挥发性风味成分的主要贡献物质^[24], 本研究检测出的二丙基二硫醚、甲基丙基三硫醚、丙烯基丙基二硫醚是洋葱的特征香气, 这与魏永生等^[24]研究结果一致。酮类阈值较低, 由多不饱和脂肪酸氧化以及氨基酸降解生成, 赋予食品花香和水果香^[25]。

表 3 气相色谱-质谱法分析不同烤包子共有挥发性味成分

Table 3 Volatile common components of baking steamed stuffed buns identified by gas chromatography-mass spectrometry method						
挥发性成分	风味特点	相对含量/%				
		KB1	KB2	KB3	KB4	KB5
己醛	油脂、青草气、苹果香味	2.28±0.18	7.89±0.09	10.03±0.41	0.30±0.06	0.31±0.01
庚醛	青香、焦香	0.28±0.03	1.97±0.11	2.68±0.14	0.11±0.06	0.13±0.05
辛醛	玫瑰和橙皮的香气	0.30±0.06	1.02±0.10	0.83±0.05	0.09±0.06	0.13±0.02
壬醛	青香、霉味	0.94±0.08	2.74±0.15	1.95±0.13	0.29±0.07	0.26±0.04
苯甲醛	特殊的杏仁气味	0.44±0.10	1.64±0.07	1.08±0.09	0.19±0.03	0.14±0.01
(E)-2-辛烯醛	呈脂肪和肉类香气	0.14±0.06	0.35±0.07	0.58±0.14	0.14±0.04	0.08±0.01
(E)-2-壬烯醛	呈肉香气	0.19±0.07	0.38±0.08	0.43±0.04	0.11±0.03	0.12±0.02
4-异丙基苯甲醛	茴香香气	6.07±0.69	2.98±0.15	1.78±0.09	18.55±1.14	19.13±0.53
5-羟甲基糠醛	甘菊花味	0.05±0.03	0.53±0.09	0.45±0.07	0.10±0.04	0.03±0.01
十二烷	汽油的气味	0.14±0.03	0.30±0.06	0.29±0.07	0.24±0.04	0.26±0.03
石竹烯	辛香、木香、柑橘香、丁香	6.59±0.11	0.24±0.08	0.09±0.04	5.69±0.18	8.95±0.47
麦芽醇	焦糖香、草莓香	0.12±0.03	0.42±0.06	0.46±0.09	0.11±0.05	0.03±0.02
糠醇	具有特殊的苦辣气	2.26±0.11	10.68±0.90	8.82±0.93	1.14±0.11	0.21±0.06
2,6-二甲基吡嗪	咖啡和炒花生的气	0.10±0.05	0.45±0.10	0.29±0.07	0.12±0.02	0.04±0.02
2-乙基吡嗪	烘烤、坚果香、咖啡、肉香	0.20±0.05	1.37±0.10	1.18±0.26	0.19±0.07	0.06±0.02
2,3-二甲基吡嗪	烤焦的蛋白质和可可果气	0.13±0.05	0.78±0.07	0.44±0.11	0.10±0.06	0.02±0.01
2-乙基-6-甲基吡嗪	烤马铃薯气	0.10±0.05	0.27±0.06	0.19±0.07	0.06±0.04	0.03±0.02
甲基丙基二硫醚	具有肉香, 葱韭气	0.11±0.05	0.65±0.07	6.59±0.44	0.30±0.04	0.09±0.01
二丙基二硫醚	浓郁的洋葱和大蒜香	1.51±0.15	9.95±0.24	11.24±0.34	2.83±0.27	1.65±0.11
丙烯基丙基二硫醚	洋葱气味	0.39±0.07	1.37±0.10	3.99±0.60	0.48±0.11	0.52±0.05
2-正戊基呋喃	豆香、果香、泥土、菜香	0.41±0.05	1.61±0.13	0.98±0.11	0.32±0.09	0.07±0.05
2-乙酰基呋喃	杏仁、坚果、烤香、烟熏香	0.40±0.10	1.75±0.07	1.30±0.16	0.38±0.07	0.08±0.04
3-羟基-2-丁酮	牛奶香气	1.04±0.10	2.37±0.17	0.73±0.06	0.26±0.07	0.15±0.03
羟基丙酮	刺激性气味	0.15±0.03	0.66±0.09	0.35±0.03	0.10±0.03	0.06±0.04
2,3-二氢-3,5 二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	焦糖样香味	0.06±0.02	0.22±0.05	0.11±0.03	0.12±0.04	0.07±0.05
2-糠酸甲酯	果香、蘑菇、香菌似的香气	0.05±0.02	0.26±0.05	0.14±0.01	0.08±0.03	0.07±0.05
2-乙酰基吡咯	面包香气	0.07±0.02	0.27±0.02	0.20±0.02	0.12±0.05	0.04±0.01

2.3.3 烤包子关键挥发性物质分析

烤包子的风味由挥发性化合物的感觉阈值及相对含量共同决定, 虽然有些化合物相对含量较高, 但由于感觉阈值较大而对整体风味贡献不大, 有些化合物虽然含量低, 但感觉阈值较低而导致对整体香气贡献较大^[17]。一般认为挥发性化合物对总体风味的贡献度与 ROAV 呈正相关^[26], 通过查阅文献^[27-28]中已报道的感觉阈值计算烤包子挥发性化合物的 ROAV, 共查询到 89 种物质的感觉阈值, 筛选出 ROAV 大于 0.1 的 39 种挥发性物质进行分析, 由表 4 可知, (*E*)-2-壬烯醛对烤包子风味贡献最大, 将其 ROAV 定义为 100, 0.1≤ROAV<1 的化合物对烤包子风味形成有辅助修饰作用, ROAV≥1 的化合物对烤包子风味起关键作用。研究表明, (*E*)-2-壬烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、(*E,E*)-2,4-壬二烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、(*Z*)-癸-2-烯醛、3-甲硫基丙醛、苯乙醛、庚醛、4-异丙基苯甲醛、壬醛、4-异丙基-1,3-环己二烯-1-甲醛、1-庚醇、芳樟醇、苯甲醇、2-蒎烯、月桂烯、石竹烯、邻异丙基甲苯、4-异丙基甲苯、二丙基二硫醚、丙基丙基二硫醚、甲基丙基二硫化物、二甲基二硫醚以及 2-戊基呋喃等 24 种化合物为新疆烤包子关键性香气化合物, 其余化合物 ROVA 值介于 0 与 1 之间, 对新疆烤包子香气起重要修饰作用。

烤包子的主要原料为羊肉, 辅料为洋葱、胡椒和孜然, 羊肉的风味化合物主要有支链脂肪酸、醛类、酚类及酮类

等^[29], 杜文斌等^[30]研究发现, 羊肉脂肪氧化水解后会降解出(*E,E*)-2,4-庚二烯醛、(*E*)-2-壬烯醛、(*E,E*)-2,4-辛二烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、(*E,Z*)-2,4-癸二烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、3-甲硫基丙醛等特征风味醛类物质。费雨婕等^[31]研究表明, (*E*)-2-壬烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、3-甲硫基丙醛等物质为羊肉氧化水解后产生的特征醛类物质, 这些研究结果与本研究基本一致。羊肉特有的膻味是影响消费者选购的原因之一^[32], 天然香辛料在烹调过程中能够起到增加羊肉香味物质的作用, 研究发现添加天然香辛料的情况下, 经高温煮制后羊肉中挥发性物质醛类、脂类、酸类和醚类含量增多^[33], 孜然中的胆碱类能与膻味物质发生中和反应, 胡椒中的低沸点易挥发物质能溶解部分膻味物质, 在加热过程中与膻味物质一起挥发出来^[34]。王蓉等^[35]研究表明, 二异丙基二硫醚和(*E*)-1-丙基-2-丙基二硫醚是洋葱的特征风味物质, 胡雪芳等^[36]测定孜然油中主要呈香物质为 β -蒎烯、对伞花烃、 γ -萜品烯和枯茗醛。在烤包子制作中, 添加香辛料能掩盖羊肉膻味腥味等异味, 使得烤包子深受消费者喜爱。共有香气结合 ROAV 分析表明, (*E*)-2-壬烯醛、壬醛、丙基丙基二硫醚为烤包子关键性挥发性物质, 庚醛、4-异丙基苯甲醛、3-甲硫基丙醛、4-异丙基-1,3-环己二烯-1-甲醛、2-戊基呋喃、二丙基二硫醚为烤包子关键辅助性香气化合物。烤包子的香气主要为脂肪香、焦香、葱蒜香、青香及果香。

表 4 烤包子香气成分感觉阈值和 ROAV
Table 4 Aroma thresholds and ROAV of volatile compounds of baking steamed stuffed bun

香气成分	感觉阈值 /(μg/kg)	ROAV				
		KB1	KB2	KB3	KB4	KB5
2-蒎烯	6	5.65±0.44	—	—	5.16±0.66	1.27±0.09
桉烯	75	0.02±0.01	—	—	0.11±0.01	0.14±0.01
3-蒎烯	770	0.28±0.01	—	—	0.06±0.004	0.05±0.003
α -水芹烯	160	0.26±0.02	—	—	0.06±0.008	0.07±0.01
β -蒎烯	140	0.38±0.03	—	—	—	—
月桂烯	13	2.36±0.10	—	—	3.37±0.29	2.94±0.25
右旋萜二烯	500	0.68±0.02	0.003±0.0001	—	0.22±0.008	0.08±0.004
γ -松油烯	1000	0.09±0.004	—	—	0.21±0.008	0.19±0.01
石竹烯	64	1.72±0.03	0.06±0.02	0.02±0.01	1.48±0.05	2.33±0.12
己醛	230	0.16±0.01	0.57±0.01	0.73±0.03	0.02±0.004	0.02±0.001
庚醛	3	1.52±0.18	10.93±0.6	14.91±0.75	0.61±0.33	0.70±0.27
辛醛	170	0.03±0.01	0.10±0.01	0.08±0.005	0.01±0.006	0.01±0.002
(<i>E</i>)-2-庚烯醛	13	0.24±0.04	—	0.65±0.05	—	0.18±0.04
壬醛	1	15.67±1.31	45.72±2.52	32.5±2.11	4.83±1.21	4.33±0.59
(<i>E</i>)-2-辛烯醛	3	0.78±0.21	1.76±0.34	—	0.52±0.07	0.46±0.09
3-甲硫基丙醛	0.2	5.28±1.04	18.61±3.07	9.44±2.19	4.17±1.36	—
苯乙醛	4	0.50±0.10	1.75±0.24	1.17±0.24	—	—
(<i>E</i>)-2-癸烯醛	0.3	—	18.15±2.77	—	5.37±0.69	—
(<i>Z</i>)-癸-2-烯醛	2.2	1.36±0.22	—	2.30±0.09	—	—
(<i>E</i>)-2-壬烯醛	0.07	39.68±4.05	88.09±8.47	97.62±3.37	26.19±2.24	27.78±2.97
(<i>E,E</i>)-2,4-壬二烯醛	0.1	—	3.33±1.36	5.56±0.79	—	—
<i>E</i> -2-十一烯醛	0.78	0.71±0.27	—	—	—	—
4-异丙基苯甲醛	60	1.68±0.19	0.83±0.04	0.49±0.02	5.15±0.32	5.31±0.15

表 4(续)

香气成分	感觉阈值 /(μg/kg)	ROAV				
		KB1	KB2	KB3	KB4	KB5
4-异丙基-1,3-环己二烯-1-甲醛	1	19.33±2.04	2.92±1.85	3.61±0.64	97.28±1.70	—
(<i>E,E</i>)-2,4-癸二烯醛	0.07	19.05±5.14	34.13±6.83	19.05±3.37	—	—
1-庚醇	3	—	2.06±0.27	1.87±0.20	—	—
(2 <i>R</i> ,3 <i>R</i>)-(-)-2,3-丁二醇	95.1	0.03±0.003	0.03±0.01	—	—	—
芳樟醇	6	1.31±0.12	—	—	0.85±0.14	1.24±0.14
苯甲醇	3	1.52±0.23	1.89±0.25	2.04±0.25	—	—
3-羟基-2-丁酮	55	0.32±0.03	0.72±0.05	0.22±0.02	0.08±0.02	0.05±0.01
2-癸酮	3	0.24±0.05	0.41±0.07	0.50±0.21	—	—
2-十一酮	7	0.13±0.05	—	—	0.11±0.03	0.15±0.05
邻异丙基甲苯	4	—	—	—	21.88±0.37	16.28±0.89
4-异丙基甲苯	11.4	1.82±0.15	—	—	3.85±0.14	3.04±0.29
二丙基二硫醚	130	0.19±0.02	1.28±0.03	1.44±0.04	0.36±0.04	0.21±0.01
丙烯基丙基二硫醚	2.2	2.98±0.56	10.38±0.78	30.23±4.54	3.66±0.80	3.94±0.34
甲基丙烯基二硫化物	6.3	—	—	3.54±0.45	—	—
二甲基二硫醚	0.3	—	—	19.07±3.43	1.85±0.69	—
2-戊基呋喃	6	1.15±0.15	4.46±0.37	2.71±0.31	0.89±0.26	0.14±0.05

注：—表示未检测到样品。

2.3.4 聚类热图分析

热图是一种能将大量数据简单合并并以渐进色带直观展现，观察数据疏密以及频率高低程度的统计方法^[37]。采用 ward 最小方差和欧氏距离法对不同市售烤包子进行分层聚类^[38]。由图 4 可知，上方为不同烤包子的聚类，中间颜色的深浅代表不同烤包子中不同挥发性风味化合物含

量的高低。聚类分析结果表明，烤包子样品分为 3 类，A、B、C 3 个区域内化合物相对含量变化差异较大，这些物质可能是由于原料产地差异、品种以及制作工艺的细微差异导致的，后续可以针对原料差异对烤包子风味变化开展研究，深入分析烤包子风味变化，为烤包子风味指纹图谱建立奠定基础。

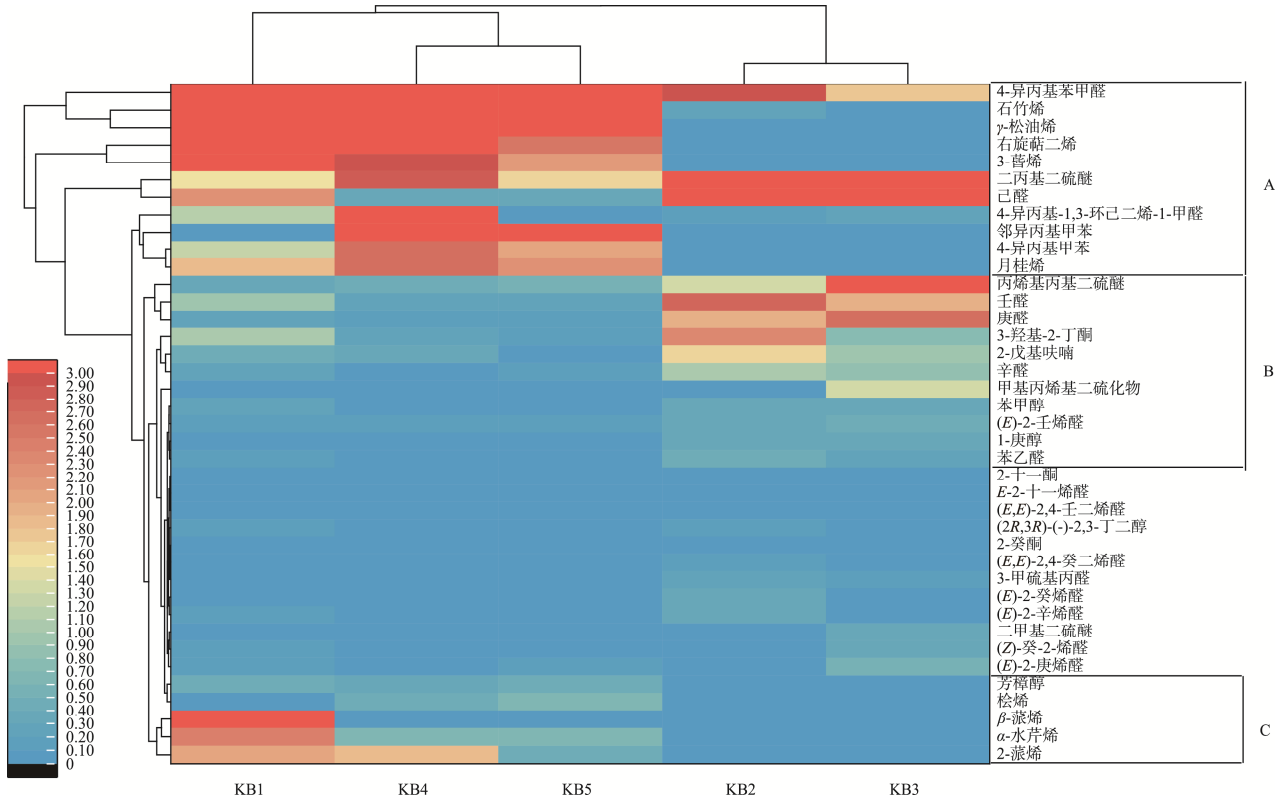


图 4 烤包子聚类热图分析
Fig.4 Clustering heat map of baking steamed stuffed bun samples

3 结 论

本研究利用电子鼻、电子舌结合气相色谱-质谱法对烤包子挥发性物质进行检测分析, 结果发现电子鼻能有效区分不同烤包子挥发性物质, 电子舌不能有效区分烤包子中的滋味。气相色谱-质谱法共鉴定出 152 种挥发性物质, 包括烯烃(34 种)、烷烃(13 种)、醛类(26 种)、醇类(29 种)、酮类(11 种)、酯类(9 种)、苯酚类(9 种)、吡嗪(9 种)、硫类(7 种)、呋喃(3 种)、其他(2 种), 共有香气化合物 27 种。共有香气结合 ROAV 分析表明, (*E*)-2-壬烯醛、壬醛、丙烯基丙基二硫醚为烤包子关键性挥发性物质, 庚醛、4-异丙基苯甲醛、3-甲硫基丙醛、4-异丙基-1,3-环己二烯-1-甲醛、2-戊基呋喃、二丙基二硫醚为烤包子关键辅助性香气化合物。烤包子的香气主要为脂肪香、焦香、葱蒜香、青香及果香。然而, 由于受原料产地、品种以及环境的影响, 对于烤包子风味物质还需要进一步分析研究, 在后期研究中, 将继续考察原料差异、加工条件以及制作工艺对风味物质影响, 进一步明确烤包子中挥发性化合物, 为标准化生产风味保持提供科学依据。

参考文献

- [1] 王静. 唇齿留香烤包子[J]. 农产品加工, 2013(1): 17.
WANG J. Roasted steamed stuffed bun with fragrant lips and teeth [J]. Farm Prod Process, 2013(1): 17.
- [2] 段美羽. 喀什市餐饮名称及翻译研究[D]. 喀什: 喀什大学, 2022.
DUAN MY. Study on the name of Kashgar restaurant and its translation [D]. Kashgar: Kashgar University, 2022.
- [3] 杨春英, 刘学铭, 王思远, 等. SPME-GC/MS 分析植物油挥发性风味成分[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 127-134.
YANG CY, LIU XM, WANG SY, *et al.* Volatile flavor compounds in vegetable oils using GC chromatography-mass spectrometry combined with solid-phase microextract [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2015, 30(10): 127-134.
- [4] 郭进, 孙学颖, 杜梅, 等. 不同犊牛肉加工产品中挥发性风味成分分析[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(12): 177-184.
GUO J, SUN XY, DU M, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in calf meat cooked using different methods [J]. Food Res Dev, 2022, 43(12): 177-184.
- [5] 高瑞萍, 刘辉. 电子鼻和电子舌在食品分析中的应用[J]. 肉类研究, 2010, 142(12): 61-67.
GAO RP, LIU H. The Application of electronic nose and electronic tongue in food detection [J]. Meat Res, 2010, 142(12): 61-67.
- [6] 王伟静, 张松山, 谢鹏, 等. 电子鼻和电子舌快速检测炖制下牛肉的品质[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(17): 124-128.
WANG WJ, ZHANG SS, XIE P, *et al.* Quick detection of the quality of stewed beef using E-nose and E-tongue [J]. Food Res Dev, 2017, 38(17): 124-128.
- [7] 陈岭, 张星海, 周晓红, 等. 基于电子舌和电子鼻技术的茶树花保健鲜啤酒辨识分析[J]. 浙江化工, 2014, 45(5): 45-49.
CHEN L, ZHANG XH, ZHOU XH, *et al.* Discrimination analysis of tea flower fresh beer by electronic tongue and electronic nose technique [J]. Zhejiang Chem Ind, 2014, 45(5): 45-49.
- [8] 刘立, 李代禧, 余华星, 等. 国内外五种著名全脂牛奶感官评价分析及其电子鼻、电子舌甄别初探[J]. 食品与发酵科技, 2014, 50(5): 90-96.
LIU L, LI DX, YU HX, *et al.* Evaluation of five kinds of whole milk domestic and abroad based on sensory and electronic nose, electronic tongue [J]. Food Ferment Technol, 2014, 50(5): 90-96.
- [9] 刘建林, 孙学颖, 张晓蓉, 等. GC-MS 结合电子鼻/电子舌分析发酵羊肉干的风味成分[J]. 中国食品学报, 2021, 21(5): 348-354.
LIU JL, SUN XY, ZHANG XR, *et al.* Analysis of flavor components of fermented mutton jerky by GC-MS combined with electronic nose/electronic tongue [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(5): 348-354.
- [10] ROSA ARD, LEONE F, CHELI F, *et al.* Fusion of electronic nose, electronic tongue and computer vision for animal source food authentication and quality assessment-A review [J]. J Food Eng, 2017, 210: 62-75.
- [11] ZHANG JH, CAO J, PEI ZS, *et al.* Volatile flavor components and the mechanisms underlying their production in golden pompano (*Trachinotus blochii*) fillets subjected to different drying methods: A comparative study using an electronic nose, an electronic tongue and SDE-GC-MS [J]. Food Res Int, 2019, 123: 217-225.
- [12] GAO LH, LIU T, AN XJ, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds influencing Chinese-type soy sauces using GC-MS combined with HS-SPME and discrimination with electronic nose [J]. J Food Sci Technol, 2017, 54(1): 130-143.
- [13] DONG WJ, HU RS, LONG YZ, *et al.* Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue and HS-SPME-GC-MS [J]. Food Chem, 2019, 272: 723-731.
- [14] 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 X, CHEN YY, ZHANG HY, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in Xinjiang Naan package of meat by GC-MS [J]. Fine Chem, 2014, 31(6): 727-732.
- [15] 胡金祥, 何莲, 王林, 等. 基于部分专一传感器电子舌和 HeraclesII 电子鼻评价川式相似复合味型(鱼香、荔枝和糖醋味)[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 244-250.
HU JX, HE L, WANG L, *et al.* Evaluation of Sichuan style similar complex flavors (fish flavor, litchi flavor and sweet and sour flavor) based on partial specific sensor electronic tongue and HeraclesII electronic nose [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(8): 244-250.
- [16] 于明, 毛红艳, 祖力皮牙·买买提, 等. HS-SPME-GC-MS 结合电子感官技术分析新疆抓饭的挥发性物质[J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 311-322.

- YU M, MAO HY, ZULIPIYA MMT, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds of Xinjiang pilaf by HS-SPME-GC-MS coupled with electric-sense technology [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2023, 23(12): 311–322.
- [17] 汪修意, 徐文泱, 陈同强, 等. 气相色谱-质谱联用与相对气味活度值法分析坛子肉风味物质的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(24): 8450–8455.
- WANG XY, XU WY, CHEN TQ, *et al.* Gas chromatography-mass spectrometry combined with relative odor activity value for the analysis of flavor substances in fermented meat [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(24): 8450–8455.
- [18] 薛东, 易宇文, 夏翠群, 等. 基于电子鼻和气相色谱-质谱法结合相对气味活度值分析植物油对红油辣椒气味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 241–251.
- XUE D, YI YW, XIA CQ, *et al.* Analysis of the effects of plant oil on the odor of red pepper based on electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry combined with relative odor activity value [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(22): 241–251.
- [19] 柴冲冲, 曹妍, 毛民, 等. 基于电子舌技术评价黄芩酒炙前后滋味变化及其在黄芩饮片鉴别中的应用研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(11): 2552–2559.
- CHAI CC, CAO Y, MAO M, *et al.* Evaluation of taste changes of scutellariae radix before and after wine-frying based on electronic tongue technology and its application in identification of scutellariae radix pieces [J]. Chin J Chin Mat Med, 2020, 45(11): 2552–2559.
- [20] 顾赛麒, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 顶空固相微萃取-气质联用及电子鼻技术检测中华绒螯蟹不同可食部位中的香气成分[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 239–244.
- GU SQ, WANG XC, TAO NP, *et al.* Analysis of aroma compounds from different edible parts of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) by HS-SPME-GC-MS and E-nose [J]. Food Sci, 2013, 34(18): 239–244.
- [21] 陈静慧, 石浩, 张强, 等. 基于电子鼻和顶空固相微萃取-气质联用技术分析柠檬草中的挥发性成分[J]. 食品与发酵工艺, 2019, 4(3): 231–236.
- CHEN JH, SHI H, ZHANG Q, *et al.* Analysis and discrimination of volatile compounds of *Cymbopogon citratus* by electronic nose combined with HS-SPME-GC-MS [J]. Food Res Dev, 2019, 4(3): 231–236.
- [22] 陈海涛, 张宁, 孙宝国. SPME 或 SDE 结合 GC-MS 分析贾永信十香酱牛肉的挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 171–176.
- CHEN HT, ZHANG N, SUN BG. Analysis of volatile compounds in Jiayongxin spiced beef by solid phase microextraction or simultaneous distillation extraction coupled with gas chromatography-mass spectroscopy [J]. Food Sci, 2012, 33(18): 171–176.
- [23] 王依春, 王锡昌. 同时蒸馏萃取和固相微萃取与气相色谱-质谱法分析洋葱的挥发性风味成分[J]. 现代食品科技, 2006, 23(1): 87–90.
- WANG YC, WANG XC. Analysis of volatile flavour of onions by simultaneous distillation and extraction and solid-phase microextraction combined with GC-MS [J]. Mod Food Sci Technol, 2006, 23(1): 87–90.
- [24] 魏永生, 杨振, 郑敏燕, 等. GC/MS 研究洋葱挥发油的化学成分[J]. 西北农业学报, 2006, 15(5): 195–197.
- WEI YS, YANG Z, ZHENG MY, *et al.* Study on the components of essential oil in *Allium cepa* L. by GC/MS [J]. Acta Agric Bor Sin, 2006, 15(5): 195–197.
- [25] 马玲, 徐静, 宗学醒, 等. 酸凝干酪成熟过程中挥发性风味物质的分析[J]. 中国乳品工业, 2009, 37(3): 23–26.
- MA L, XU J, ZONG XX, *et al.* Analysis and research on volatile flavor compounds of acid-coagulated cheese [J]. Chin Dairy Ind, 2009, 37(3): 23–26.
- [26] 王婷婷, 许柠, 汪丽萍, 等. 麸胚水分含量对挤压稳定化回填法制备全麦挂面特征风味化合物的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 65–74.
- WANG TT, XU N, WANG LP, *et al.* Effect of wheat bran and embryo moisture content on the preparation of characteristic flavor compounds of whole wheat noodles by extrusion stabilization backfilling method [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2022, 43(1): 65–74.
- [27] 孙宝国, 陈海涛. 食用调香术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- SUN BG, CHEN HT. The technology of food flavoring [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [28] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- LEO JVG. Compilations of odour threshold values in air, water and other media [M]. Beijing: China Science Press, 2018.
- [29] 席继锋, 邓双义, 王香祖. 影响羊肉风味的因素研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2016, 43(5): 1237–1243.
- XI JF, DENG SY, WANG XZ. Research progress on influence factors of mutton flavor [J]. Chin Anim Husband Vet Med, 2016, 43(5): 1237–1243.
- [30] 杜文斌, 王羽桐, 徐玉霞, 等. 羊脂肪关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 198–203.
- DU WB, WANG YT, XU YX, *et al.* Analysis of key aroma compounds in sheep tallow [J]. Food Sci, 2022, 43(8): 198–203.
- [31] 费雨婕, 许芳瑞, 廖锐, 等. 羊肉及其制品特征挥发性风味物质的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(24): 201–207.
- FEI YJ, XU FR, LIAO R, *et al.* Research progress on characteristic volatile flavor compounds of mutton and its products [J]. Food Res Dev, 2023, 44(24): 201–207.
- [32] 张志超, 段子渊, 张新华, 等. 羊肉肉质风味研究进展[J]. 肉类研究, 2018, 32(10): 61–65.
- ZHANG ZC, DUAN ZY, ZHANG XH, *et al.* Recent progress in research on mutton quality and flavor [J]. Meat Res, 2018, 32(10): 61–65.
- [33] 张同刚, 刘敦华, 周静. 香辛料对手抓羊肉挥发性风味成分的影响[J]. 中国调味品, 2014, 39(10): 45–49.
- ZHANG TG, LIU DH, ZHOU J. Effect of spices on the volatile flavor compounds of hand-grasped mutton [J]. China Cond, 2014, 39(10): 45–49.
- [34] 刘磊, 李娟, 刘瑜, 等. 天然香辛料对烹调过程中羊肉风味物质影响的研究进展[J]. 高原农业, 2023, 7(5): 555–559.
- LIU L, LI J, LIU Y, *et al.* Research progress on effect of natural spices on the flavor compounds of lamb during cooking [J]. J Plateau Agric, 2023,

7(5): 555–559.

- [35] 王蓉, 曾文锦, 刘盼, 等. 顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用法对 3 种洋葱挥发性风味成分的分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 319–327.

WANG R, ZENG WJ, LIU P, *et al.* Analysis of volatile flavor components in three onion by headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(2): 319–327.

- [36] 胡雪芳, 戴蕴青, 李淑燕, 等. 孜然精油成分分析及超临界萃取联合分子蒸馏纯化效果研究[J]. 食品科学, 2010, 31(6): 230–234.

HU XF, DAI YQ, LI SY, *et al.* Essential oil of *Cuminum cyminum* L.: extraction by super critical fluid extraction, purification by molecular distillation and GC-MS analysis of volatile composition [J]. *Food Sci*, 2010, 31(6): 230–234.

- [37] 王颖, 田应金, 蒋伟, 等. 基于热图和聚类分析的马铃薯矿质元素含量评价[J]. 分子植物育种, 2019, 17(19): 6483–6488.

WANG Y, TIAN YJ, JIANG W, *et al.* Evaluation of potato mineral element content based on heatmap and cluster analysis [J]. *Mole Plat Bre*, 2019, 17(19): 6483–6488.

- [38] 田震, 徐亚元, 李大婧, 等. 基于 SPME-GC-MS 分析不同干燥方式对香葱挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 232–244.

TIAN Z, XU YY, LI DJ, *et al.* Analysis of volatile components in dried chives by SPME-GC-MS [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(4): 232–244.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)

作者简介

毛红艳, 副研究员, 主要研究方向为食品营养与风味检测。

E-mail: maohongyan1226@126.com

岳 丽, 副研究员, 主要研究方向为食品营养与风味研究。

E-mail: 2660222437@qq.com

于 明, 研究员, 主要研究方向为食品营养与加工技术研究。

E-mail: 2435742497@qq.com