

GC-MS/O结合香气活性值表征烧麦中关键香气成分及其贮存过程中的变化情况

刘斌善¹, 魏晓明², 邵丹青², 董志忠², 刘玉平^{1,*}

(1.北京工商大学轻工科学技术学院, 北京 100048; 2.中粮营养健康研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:为确定烧麦中的关键香气成分及其贮存过程中的变化情况,采用溶剂萃取结合溶剂辅助风味成分蒸发提取烧麦中的挥发性成分,所得提取物经气相色谱-嗅闻联用仪与气相色谱-质谱联用仪分析,共鉴定出50个香气活性成分。通过香气提取物稀释分析,测定香气活性成分的香气稀释因子,其中1-辛烯-3-醇、茴香脑、愈创木酚、2-戊基呋喃等具有最高的香气稀释因子(6 561)。采用内标标准曲线法对37个香气稀释因子不低于81的成分进行定量分析;根据定量结果和阈值,计算物质的香气活性值,其中21个香气活性成分的香气活性值不低于1,被确定为烧麦的关键香气成分。通过分析室温贮存0~13个月后烧麦中37个成分含量并计算其香气活性值,发现烧麦贮存过程中关键香气成分的数量不变,除酱油酮、己醛和4-乙烯基愈创木酚的含量下降外,烧麦中多数重要香气活性成分含量变化较小。

关键词:烧麦;香气活性成分;香气提取物稀释分析;香气活性值;关键香气成分;贮存

Characterization of the Key Odorants in Shaomai and Their Changes during Storage by Gas Chromatography-Mass Spectrometry/Olfactometry Coupled with Odor Activity Value Calculation

LIU Binshan¹, WEI Xiaoming², SHAO Danqing², DONG Zhizhong², LIU Yuping^{1,*}

(1. School of Light Industry, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. COFCO Nutrition & Health Research Institute Co. Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: In order to determine the key odorants in Shaomai (SM) and to investigate the changes of the odorants during SM storage, volatiles were extracted by solvent extraction combined with solvent-assisted flavor evaporation. A total of 50 odor-active compounds were identified by gas chromatography-olfactometry (GC-O) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Among these compounds, 1-octen-3-ol, anethole, guaiacol and 2-pentylfuran had the highest flavor dilution (FD) of 6 561 as determined by aroma extract dilution analysis (AEDA). Thirty-seven compounds with FD factors ≥ 81 were quantitated by the internal standard method. Based on the quantitative results and odor thresholds reported in the literature, their odor activity values (OAVs) were calculated. Totally 21 odorants with $OAV \geq 1$ were determined as the key odorants of SM. The contents of the 37 compounds in SM stored for up to 13 months at room temperature were analyzed and their OAVs were calculated. The results showed that the number of key odorants in SM did not change during storage. The levels of 5-ethyl-4-hydroxy-2-methyl-3(2H)-furanone, hexanal and 4-vinylguaiacol decreased greatly, while most of the other compounds changed little.

Keywords: Shaomai; odor active compounds; aroma extract dilution analysis; odor activity value; key odorants; storage

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220728-315

中图分类号: TS201.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)06-0268-09

引文格式:

刘斌善, 魏晓明, 邵丹青, 等. GC-MS/O结合香气活性值表征烧麦中关键香气成分及其贮存过程中的变化情况[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 268-276. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220728-315. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-07-28

基金项目: 国家科技计划项目申报中心重点研发计划(子课题)(2017YFD0400501)

第一作者简介: 刘斌善(1995—)(ORCID: 0000-0003-0665-3347), 男, 硕士, 研究方向为食品风味化学。

E-mail: 2389220150@qq.com

*通信作者简介: 刘玉平(1969—)(ORCID: 0000-0001-6680-8385), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品风味化学。

E-mail: liuyup@th.btbu.edu.cn

LIU Binshan, WEI Xiaoming, SHAO Danqing, et al. Characterization of the key odorants in Shaomai and their changes during storage by gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry coupled with odor activity value calculation[J]. Food Science, 2023, 44(6): 268-276. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220728-315. <http://www.spkx.net.cn>

传统食品的工业化生产已是大势所趋,烧麦作为我国的传统面点小吃,其制作工艺的改进与品种的开发十分重要^[1-3]。烧麦的制作工艺包括面团和制、配料拌料、擀皮、包馅、蒸制、冷却包装和贮存7个步骤^[2]。烧麦馅料是赋予烧麦香气的主要原料,由于各地制作烧麦所用馅料不同,使其香气各具特色,然而目前鲜见关于烧麦香气的相关报道。

糯米通常是烧麦中用量最大的食材,对烧麦的香气具有一定贡献。Fukuda等^[4]使用顶空吸附萃取结合气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用技术分析了煮黑糯米中的挥发性物质,从煮黑糯米中共鉴定出35种挥发性物质,醛酮是煮黑糯米中的主要挥发性物质;定量分析结果表明2-戊基呋喃、己醛、1-辛烯-3-醇在煮黑糯米中含量较高。徐睿等^[5]使用固相微萃取结合GC-MS和气相色谱-嗅闻(gas chromatography-olfactometry, GC-O)联用技术分析了普通糯米粉和焙烤糯米粉中的香气成分,在焙烤前后的糯米粉中分别鉴定出了22种和51种挥发性成分,从焙烤糯米粉中鉴定出了20种香气活性成分,其中己醛、辛醛、(反,反)-2,4-癸二烯醛、2-戊基呋喃、1-辛烯-3-醇等被认为是焙烤糯米粉的重要香气物质。

火腿作为我国传统特色美食之一,作为烧麦馅料时可以赋予烧麦肉香。王藤等^[6]使用GC-MS结合相对香气活性值表征了风干火腿的风味成分,结果表明醛类物质和醇类物质对火腿风味具有最大贡献,火腿腌制时间对1-辛烯-3-醇、异戊醛、辛醛、柠檬烯的浓度影响较大。Jiang Shui等^[7]使用GC-MS、GC-O、香气提取物稀释分析法(aroma extract dilution assay, AEDA)和频率检测法分析了云南火腿中的香气活性成分,结果表明3-甲基丁醛、己醛、2,6-二甲基吡嗪、1-辛烯-3-醇、二甲基三硫醚和壬醛是火腿中最重要的香气物质。

酱油和黑胡椒是中式菜肴中常见的调味料,它们可以丰富烧麦的香气。3-甲硫基丙醛、酱油酮、呋喃酮、麦芽酚、愈创木酚、4-乙基愈创木酚等是酱油的关键香气成分^[8-11],它们使酱油呈现出特征性的酱香、焦糖香和烟熏香。酱油的加入还能在减盐的基础上增咸增鲜,使食品配方更加健康合理^[12]。黑胡椒具有特征的辛香和辛辣滋味,且具有良好的防腐和抗氧化功效^[13],可作为食品配方中天然的防腐剂和抗氧化剂^[14], β -石竹烯、芳樟醇、 α -水芹烯、柠檬烯、月桂烯是黑胡椒中的主要香气成分^[15-17]。

香气是食品的最重要的感官指标,食品在贮存过程中有时感官指标会发生变化^[18],甚至会产生异味,而导致异味的原因主要有两方面,一是贮存过程中某些香气成分浓度增加会导致异味,如己醛(青香)是葱油饼和花生粉的香气成分,但随着贮存时间的延长,己醛的浓度上升,青香香气强度增加,使得葱油饼和花生粉具有明显的豆腥异味^[19-20];导致异味的另一个原因是贮存过程中有新的异味成分生成。本研究采用分子感官科学的方法确定烧麦中的关键香气成分,考察贮存过程中烧麦关键香气成分的变化情况,为确定烧麦的最佳保质期和优化烧麦的配方提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 样品

烧麦由中粮营养健康研究院提供。烧麦蒸熟后采用独立真空包装,每个烧麦质量约60 g,在室温下贮存,食用前进行复热处理。原料(比例由高到低):糯米、面粉、水、火腿、淀粉、食用油、酱油、红烧肉调料(主要成分有白砂糖、味精、酱油粉、乳糖、姜粉、蒜粒、酵母抽提物、香辛料)、盐、黑胡椒。

1.1.2 试剂

正戊醇、正己醇、苯乙醇、己醛、苯乙醛、2(5H)-呋喃酮、2-戊基呋喃、乙酸、 β -蒎烯、二丙基三硫醚、无水硫酸钠 上海麦克林生化科技有限公司;1-辛烯-3-醇、乙偶姻 上海阿达玛试剂有限公司;2-乙基-1-己醇、(R,R)-(-)-2,3-丁二醇(CAS号24347-58-8)、2,3-丁二醇(CAS号513-85-9)、壬醛、香兰素、丙酮醇、草蒿脑、茴香脑、石竹烯氧化物、大茴香基丙酮、丁香酚、 α -古巴烯、 β -石竹烯梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;芳樟醇、糠醇、 α -松油醇、3-甲硫基丙醇、(反,反)-2,4-癸二烯醛、2-环戊烯-1-酮、 γ -丁内酯、麦芽酚、愈创木酚、4-乙基愈创木酚、香草乙酮、2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2-乙酰基噻唑、2-乙酰基吡咯、异丁酸 北京百灵威科技有限公司;糠醛、呋喃酮 阿拉丁试剂(上海)有限公司;苯甲醛、1,8-桉叶素 北京北大正元科技有限公司;酱油酮 美国Ark pharm公司; α -姜黄烯 法国Extrasynthese Chemical S.A.S公司;以上标准品纯度均

大于95%。二氯甲烷(色谱级) 美国Fisher Chemical公司; $C_7 \sim C_{28}$ 正构烷烃 西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司; 液氮、高纯氮气 北京锐志汉兴科技有限公司。

1.2 仪器与设备

7890B GC-5977A MS联用仪、DB-WAX毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m)、HP-5毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m) 美国安捷伦科技有限公司; Gerstel ODP3嗅闻仪 德国哲思泰公司; TIC pumping station高真空泵组 英国爱德华公司; SAFE用蝶形反应器 山东省莘县京兴玻璃器皿有限公司; DKB-501A型超级恒温水槽 上海森信实验仪器有限公司; DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器 河南省予华仪器有限公司; 15 cm韦氏分馏装置 北京化玻站生物分析技术有限公司; MSE225S-000-DU电子天平 德国赛多利斯公司; ZWY-100H恒温培养振荡器 上海智城分析仪器制造有限公司; P115型破壁机 九阳股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 溶剂萃取-溶剂辅助风味成分蒸发提取烧麦中的挥发性物质

将烧麦切成1 cm³小块, 用液氮冷冻后置于破壁机中, 同时向破壁机中加入等质量的用液氮冷冻过的无水硫酸钠, 用破壁机将烧麦打碎成粉末。向250 mL锥形瓶中加入80 g烧麦粉末(内含50%质量的无水硫酸钠)和80 mL二氯甲烷, 封好瓶塞后置于摇床上180 r/min萃取1 h。萃取结束后收集滤液, 并再次按上述方法萃取滤渣, 萃取一共进行3次。将滤液置于溶剂辅助风味成分蒸发装置中, 在真空度 2.5×10^{-5} mbar、水浴温度45 $^{\circ}$ C、循环水温度40 $^{\circ}$ C蒸馏2 h, 蒸馏结束后向所得馏出物中加入15 g无水硫酸钠, 并置于-20 $^{\circ}$ C冰箱静置过夜。使用长15 cm韦氏柱蒸馏去除馏出物中的二氯甲烷, 蒸馏温度48 $^{\circ}$ C, 当馏出物体积剩余约2 mL时停止蒸馏, 得到烧麦中的挥发性成分提取物。将提取物转移至2 mL小瓶中, 并使用温和的氮气流浓缩至1 mL, 密封, 贮存在-40 $^{\circ}$ C冰箱内, 用于下一步分析。

1.3.2 烧麦提取物的GC-O分析

烧麦提取物的GC-O分析在连有Gerstel ODP3嗅闻仪和7890B GC仪上进行。1 μ L烧麦提取物通过柱上进样模式被注射至进样口。

GC-O条件: DB-WAX(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m)毛细管柱; 载气为氦气, 流速1.0 mL/min; 进样口温度240 $^{\circ}$ C; 氢火焰离子检测器点火温度280 $^{\circ}$ C; 升温程序: 初始温度40 $^{\circ}$ C, 以8 $^{\circ}$ C/min升温至120 $^{\circ}$ C, 保持2 min, 再以6 $^{\circ}$ C/min升温至230 $^{\circ}$ C, 保持15 min; 进样口温度随柱箱温度同步变化且恒定高于柱箱3 $^{\circ}$ C。提取物从色谱柱末端流出后以1:1的流量比例进入氢火焰离子检测器和

嗅闻仪, 嗅闻仪传输线和嗅闻口的温度分别为240 $^{\circ}$ C和120 $^{\circ}$ C。湿润的空气伴随提取物在嗅闻口前共同流出保护嗅闻人员并防止嗅觉疲劳。嗅闻实验由3名经过训练的人员进行, 记录在嗅闻口嗅闻到的香气特征和保留时间; 一个物质的香气至少被两人所记录时, 认为该物质是烧麦提取物中的香气活性成分。

1.3.3 烧麦提取物的GC-MS分析

GC条件: 挥发性化合物的分离分别在DB-WAX(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m)和HP-5(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m)两根色谱柱上进行; 载气为氦气, 流速1.7 mL/min; 升温程序同1.3.2节; 进样口温度240 $^{\circ}$ C; 进样量为1 μ L; 不分流进样。

MS条件: 电子电离源; 电离电压为70 eV; 传输线、离子源、四极杆温度分别为240、230、150 $^{\circ}$ C; 扫描模式为全扫描, 扫描范围33~350 u。

1.3.4 香气活性成分的鉴定

将 $C_7 \sim C_{28}$ 正构烷烃置于GC上分析(GC条件与1.3.2节或1.3.3节相同), 记录保留时间, 通过Van Den Dool和Kratz方程计算每个香气物质的保留指数^[21]。当物质的保留指数、质谱数据和香气特征与标准品数据一致时, 该物质被肯定性鉴定。

1.3.5 AEDA法测定香气活性成分的香气稀释(flavor dilution, FD)因子

使用二氯甲烷将烧麦提取物按1:3¹、1:3²、1:3³……进行梯度稀释, 用GC-O分析每个稀释样品, 直到不能在嗅闻口闻到任何香气, 香气活性成分的FD因子为其可以被嗅闻到的最高稀释梯度。

1.3.6 重要香气活性成分的定量及其香气活性值(odour activity value, OAV)计算

使用内标标准曲线法对烧麦中FD因子不低于81的物质进行定量分析, 内标为2-辛醇、2-甲基-3-庚酮、2-异丙基苯酚和丁二酸二乙酯。萃取前将300 μ L混合内标溶液(4种内标质量浓度均为 1×10^{-4} g/mL)注入到烧麦粉末中, 按1.3.1节的步骤萃取。GC-MS分析在选择离子模式下进行, 其他条件同1.3.3节。OAV为香气活性成分在烧麦中的浓度与其香气阈值之比。使用OAV评估单一香气活性成分对烧麦样品整体香气轮廓的贡献^[22-23]: $OAV \geq 1$ 时, 认为该物质对烧麦样品的香气轮廓有贡献, 是关键香气化合物。

1.3.7 香气评价实验

香气评价由5名从事风味化学研究的人员组成。进行1.3.1节的实验前, 对烧麦的香气进行评价: 1) 评价其整体香气强度; 2) 评价烧麦中是否有异味。进行1.3.1节的实验后, 取100 μ L提取物, 用丙二醇稀释提取物至4 g, 得到稀释液, 对比烧麦与稀释液的香气轮廓。

1.4 数据处理

定量实验重复进行3次, 结果为 $\bar{x} \pm s$, 使用TBtools软件进行层次聚类分析。

2 结果与分析

2.1 香气评价分析

香气评价结果表明烧麦和提取的香气轮廓相似, 说明采用溶剂萃取-溶剂辅助风味成分蒸发可将烧麦中的香气成分提取出来。预实验中对贮存后的烧麦整体香气进行评价时发现, 随着贮存时间的延长, 烧麦的整体香气减弱, 但是没有嗅闻到异味。

2.2 烧麦中香气活性成分的鉴定

通过与标准品的质谱、香气特征和保留指数进行对比, 共鉴定出50种香气活性成分。由表1可知, 50种香气活性成分中, 包括醇类、醛类、酮类、醚类、烯烃类、吡嗪类、酚类、酸类和其他类化合物。

表1 烧麦中鉴定出的香气活性成分及其FD因子
Table 1 Aroma active compounds identified in Shaomai and their FD factors

序号	香气活性成分 ^a		保留指数		香气特征	FD因子
	中文名称	英文名称	DB-Wax	HP-5		
醇类						
1	正戊醇	<i>n</i> -pentanol	1 246	776	醇香	1
2	正己醇	<i>n</i> -hexanol	1 346	880	青香	9
3	1-辛烯-3-醇	1-octen-3-ol	1 439	982	蘑菇香	6 561
4	2-乙基-1-己醇	2-ethyl-1-hexanol	1 481	1 030	青香	2 187
5	(<i>R</i> *, <i>R</i> *)-2,3-丁二醇	(<i>R</i> *, <i>R</i> *)-2,3-butanediol	1 529	786	甜香、奶香	81
6	芳樟醇	linalool	1 537	1 100	花香、木香	243
7	<i>meso</i> -2,3-丁二醇	<i>meso</i> -2,3-butanediol	1 567	797	甜香、奶香	81
8	糠醇	furfuranol	1 646	860	甜香	243
9	α -松油醇	α -terpineol	1 689	1 198	松香、丁香	9
10	3-甲硫基丙醇	methionol	1 704	—	酱香、甜香	243
11	苯乙醇	phenylethanol	1 893	1 121	花香、甜香	243
醛类						
12	己醛	hexanal	1 092	805	青香	81
13	壬醛	nonanal	1 391	1 105	醛香、皂香	81
14	糠醛	furfural	1 448	844	甜香、烤香	729
15	苯甲醛	benzaldehyde	1 514	968	苦杏仁香	81
16	苯乙醛	2-phenylethanal	1 627	1 049	花香、甜香	9
17	(反,反)-2,4-癸二烯醛	(<i>E,E</i>)-2,4-decadienal	1 798	1 320	油脂香	2 187
18	香兰素	vanillin	2 539	1 406	香荚兰香	243
酮类						
19	乙偶姻	acetoin	1 258	723	甜香	27
20	丙酮醇	acetol	1 288	<500	甜香	81
21	2-环戊烯-1-酮	2-cyclopentene-1-one	1 351	845	烤香	81
22	2(5 <i>H</i>)-呋喃酮	2(5 <i>H</i>)-furanone	1 737	923	黄油香	243
23	麦芽酚	maltol	1 947	1 124	焦甜香	729
24	呋喃酮	4-hydroxy-2,5-dimethylfuran-3(2 <i>H</i>)-one	2 015	1 069	焦糖香	27
25	酱油酮	5-ethyl-4-hydroxy-2-methyl-3(2 <i>H</i>)-furanone	2 075	1 156	酱油香	81
26	大茴香基丙酮	4-methoxyphenylacetone	2 137	—	甜香、果香	1
27	香草乙酮	acetovanillone	2 612	1 495	甜香	81

续表1

序号	香气活性成分 ^a		保留指数		香气特征	FD因子
	中文名称	英文名称	DB-Wax	HP-5		
醚类						
28	1,8-桉叶素	1,8-cineole	1 216	1 037	桉叶香、药香	243
29	草蒿脑	estragole	1 662	1 203	药香	9
30	茴香脑	anethole	1 816	1 292	茴香	6 561
31	氧化石竹烯	β -caryophyllene oxide	1 974	1 600	青香	9
烯烃类						
32	α -蒎烯	α -pinene	1 045	942	松香、青香	81
33	β -蒎烯	β -pinene	1 118	984	松香、青香	9
34	α -古巴烯	α -cubonene	1 492	1 386	甜香、青香	243
35	β -石竹烯	β -caryophyllene	1 600	1 436	青香、花香	81
36	α -姜黄烯	α -curcumene	1 764	1 487	姜香、甜香	27
吡嗪类						
37	2-甲基吡嗪	2-methylpyrazine	1 264	833	烤香	6 561
38	2,5-二甲基吡嗪	2,5-dimethylpyrazine	1 319	914	烤香、坚果香	81
39	2,6-二甲基吡嗪	2,6-dimethylpyrazine	1 326	915	烤香、坚果香	243
40	三甲基吡嗪	trimethylpyrazine	1 402	1 003	烤香、坚果香	2 187
酚类						
41	愈创木酚	guaiacol	1 842	1 094	烟熏香	6 561
42	丁香酚	eugenol	2 147	1 363	丁香、甜香	81
43	4-乙烯基愈创木酚	4-vinylguaiacol	2 175	1 322	烟熏香	729
酸类						
44	乙酸	acetic acid	1 429	—	酸香	9
45	异丁酸	isobutyric acid	1 549	—	汗香	9
其他类						
46	2-戊基呋喃	2-pentylfuran	1 231	993	青香、壤香	6 561
47	γ -丁内酯	γ -butyrolactone	1 618	923	奶香、甜香	729
48	2-乙酰基噻唑	2-acetylthiazole	1 637	1 023	烤香	6 561
49	2-乙酰基吡咯	2-acetylpyrrole	1 951	1 074	坚果香	243
50	二丙基三硫醚	dipropyl trisulfide	1 662	—	含硫的、蒜香	81

注: a.除(*R**,*R**)-2,3-丁二醇和*meso*-2,3-丁二醇外, 其余化合物都通过与标准品的香气特征、质谱和保留指数进行比对后进行定性。—未检出。

烧麦中共鉴定出11个醇类物质, 其FD因子范围是1~6 561。1-辛烯-3-醇具有最高的FD因子, 它是火腿的重要香气物质, 具有蘑菇香气, 火腿加工过程中火腿中的脂肪酸可发生氧化反应生成1-辛烯-3-醇^[24]; 1-辛烯-3-醇也是糯米加热后形成的重要香气物质, 曾在焙烤过的糯米粉中被鉴定出^[5]; 此外, 1-辛烯-3-醇也是烧麦中所用酱油的香气成分之一^[25]。2-乙基-1-己醇的FD因子为2 187, 它具有青草的香气特征, 存在于火腿、酱油以及多种谷物中^[11,26-27]。芳樟醇、糠醇、3-甲硫基丙醇和苯乙醇的FD因子是243。2,3-丁二醇结构中含有两个手性碳和一个对称面, 所以存在一对手性异构体(*R,R*-2,3-丁二醇和*S,S*-2,3-丁二醇)和一个内消旋体(*meso*-2,3-丁二醇), 所用色谱柱虽然能将一对手性异构体与内消旋体分开, 但是不能将*R,R*-2,3-丁二醇和*S,S*-2,3-丁二醇分开, 所有烧麦中手性2,3-丁二醇的结构和比例无法确定。参考相关文献和相关手性化合物的信息^[28], 确定分离出的2,3-丁二醇为(*R**,*R**)-2,3-丁二醇和*meso*-2,3-丁二醇, 它们都具有奶甜香, 且FD因子均为81。 α -松油醇、正己醇和正戊醇的FD因子较低(均 ≤ 9), 其香气强度相对较弱。

7个被鉴定的醛类物质包括己醛、壬醛、糠醛、苯甲醛、苯乙醛、(反,反)-2,4-癸二烯醛和香兰素,其FD因子在9~2 187之间。其中,(反,反)-2,4-癸二烯醛的FD因子最高,具有浓烈的油脂香气,是脂质氧化的产物^[29]。糠醛的FD因子为729,是美拉德反应的产物。香兰素的FD因子是243;己醛、壬醛、苯甲醛的FD因子是81;苯乙醛的FD因子是9;这些醛类物质多数可能来自于加热过程中氨基酸、油脂或糖类的降解^[30-31]。

鉴定出的酮类香气活性成分一部分是烧麦制作过程中美拉德反应的产物,一部分可能来自添加的调味品,它们主要贡献了焦甜香、烤香和甜香。9个酮类物质的FD因子在1~729之间。其中,麦芽酚的FD因子最高为729;2(5*H*)-呋喃酮的FD因子为243;丙酮醇、2-环戊烯-1-酮和酱油酮的FD因子为81;乙偶姻和呋喃酮的FD因子为27。这些物质都曾在酱油中被鉴定出^[8]。

鉴定出的4个醚类化合物和5个烯炔类化合物推测可能来自烧麦中使用的黑胡椒或红烧肉调料,这些成分都是香辛料中的香气成分。1,8-桉叶素、茴香脑、氧化石竹烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、 β -石竹烯是烧麦中所用黑胡椒的香气成分^[14-16]; α -姜黄烯来源于红烧肉调料中所用的姜粉。醚类中茴香脑的FD因子最高,为6 561;1,8-桉叶素的FD因子为243;草蒿脑和氧化石竹烯的FD因子仅为9。烯炔中 α -古巴烯的FD因子最高,为243; α -蒎烯和 β -石竹烯的FD因子为81; β -蒎烯和 α -姜黄烯的FD因子分别是9和27。

鉴定出的4个吡嗪类化合物中,2-甲基吡嗪和三甲基吡嗪的FD因子较高,分别为6 561和2 187;2,5-二甲基吡嗪和2,6-二甲基吡嗪的FD因子较低,分别为81和243。吡嗪类物质是美拉德反应的产物,它们既是酱油的香气成分^[11],也是火腿风味的重要组成成分^[7],能够赋予食品特征的烤香和坚果香。

鉴定出的酚类物质有3种。其中,愈创木酚的FD因子最高,为6 561;丁香酚和4-乙炔基愈创木酚的FD因子分别是81和729。推测它们主要来自所用的酱油、火腿和红烧肉调料,因为愈创木酚和4-乙炔基愈创木酚是酱油和火腿的香气成分^[7-9],丁香酚是丁香、肉桂等香辛料的香气成分,与所用的红烧肉调料有关。

酸类成分中只鉴定出了乙酸和异丁酸,且FD因子都为9,推测对烧麦的香气贡献不大。乙酸和异丁酸主要来自所用的酱油和火腿,其中乙酸在酱油中的含量超过300 mg/L^[8]。

鉴定出5种其他类化合物分别是2-戊基呋喃、 γ -丁内酯、2-乙酰基噻唑、2-乙酰基吡咯和二丙基三硫醚。其中,2-戊基呋喃和2-乙酰基噻唑的FD因子都为6 561;

γ -丁内酯、2-乙酰基吡咯和二丙基三硫醚的FD因子分别是729、243、81。2-戊基呋喃是糯米加热产生的重要香气物质^[5],二丙基三硫醚可能与红烧肉调料中的香辛料有关^[32],2-乙酰基噻唑和2-乙酰基吡咯可能是烧麦加热过程中美拉德反应产物^[33-34]。

2.3 烧麦中重要香气活性成分的定量分析与OAV分析

采用内标标准曲线法对烧麦中鉴定出的FD因子不低于81的37种香气活性成分进行定量分析,并结合其阈值计算OAV,结果如表2所示。

表2 烧麦中重要香气活性成分含量及其OAV
Table 2 Concentrations of important odor active compounds in Shaomai and their OAVs

香气活性成分	定量离子 <i>m/z</i>	斜率	相关系数	内标	含量/ ($\mu\text{g/kg}$)	阈值/ ($\mu\text{g/kg}$)	OAV
丙酮醇	74	0.454 9	0.991	内标3	11 214.4 $\pm$ 137.5	10 000 ^e	1
(<i>R^*</i> , <i>R^*</i>)-2,3-丁二醇	45	1.133 2	0.996	内标1	6 151.4 $\pm$ 12.7	95.1 ^c	65
<i>meso</i> -2,3-丁二醇	45	1.148 7	0.998	内标1	3 881.7 $\pm$ 146.1	95.1 ^c	41
麦芽酚	126	0.845 3	0.990	内标4	2 436.2 $\pm$ 141.5	210 ^e	12
糠醇	98	1.733 4	1.000	内标3	1 942.8 $\pm$ 17.3	4 500 ^e	<1
2(5 <i>H</i>)-呋喃酮	55	1.486 6	0.999	内标3	652.4 $\pm$ 40.2	714 ^c	<1
己醛	56	1.409 6	0.999	内标3	644.4 $\pm$ 7.9	2.4 ^c	268
酱油酮	142	0.842 5	0.984	内标3	449.9 $\pm$ 33.1	0.49 ^a	918
香兰素	152	1.278 9	0.991	内标4	368.4 $\pm$ 4.2	53 ^c	7
茴香脑	148	1.144 8	0.999	内标2	366.8 $\pm$ 5.0	15 ^c	24
苯乙醇	122	0.908 2	0.999	内标4	310.3 $\pm$ 0.9	140 ^c	2
2-环戊烯-1-酮	82	0.892 2	0.997	内标1	261.6 $\pm$ 27.7	—	—
α -古巴烯	161	0.986 6	0.995	内标3	251.4 $\pm$ 3.3	—	—
γ -丁内酯	86	0.770 9	0.999	内标3	235.7 $\pm$ 8.1	1 000 ^e	<1
β -石竹烯	133	0.642 0	1.000	内标4	125.9 $\pm$ 4.1	64 ^c	2
2-乙酰基吡咯	94	0.711 8	0.999	内标4	118.3 $\pm$ 0.4	58 582 ^c	<1
4-乙炔基愈创木酚	150	1.447 0	0.998	内标4	105.5 $\pm$ 0.7	5.1 ^a	21
苯甲醛	106	1.373 6	0.997	内标4	103.9 $\pm$ 3.4	750 ^c	<1
糠醛	96	1.045 9	0.997	内标1	95.8 $\pm$ 1.0	9 562 ^c	<1
2-甲基吡嗪	94	1.695 5	0.999	内标1	92.4 $\pm$ 0.1	30 000 ^e	<1
2-戊基呋喃	81	2.550 2	0.998	内标1	67.4 $\pm$ 1.9	5.8 ^c	12
丁香酚	149	0.657 8	0.995	内标4	27.7 $\pm$ 0.2	0.71 ^c	39
2-乙酰基噻唑	127	0.670 9	1.000	内标4	26.4 $\pm$ 0.6	3 ^c	9
1-辛烯-3-醇	57	1.974 0	0.999	内标1	25.7 $\pm$ 0.3	1.5 ^c	17
愈创木酚	109	0.932 1	0.999	内标2	23.5 $\pm$ 0.2	0.84 ^a	28
壬醛	98	1.113 5	0.998	内标3	23.3 $\pm$ 3.1	2.8 ^c	8
(反,反)-2,4-癸二烯醛	81	1.050 0	1.000	内标4	18.2 $\pm$ 2.7	0.027 ^c	672
二丙基三硫醚	182	0.696 1	1.000	内标4	16.4 $\pm$ 0.2	0.19 ^b	86
2,5-二甲基吡嗪	108	1.710 4	0.999	内标1	14.2 $\pm$ 0.1	1 750 ^c	<1
三甲基吡嗪	122	1.338 2	0.998	内标1	13.2 $\pm$ 0.2	350.12 ^c	<1
3-甲磺基丙醇	106	0.645 2	0.991	内标4	11.5 $\pm$ 0.8	36 ^c	<1
芳樟醇	93	0.482 7	1.000	内标2	11.2 $\pm$ 0.5	0.22 ^c	51
香草乙酮	151	1.294 6	0.998	内标2	8.3 $\pm$ 0.1	780 ^c	<1
α -蒎烯	77	1.702 0	1.000	内标1	8.1 $\pm$ 0.2	41 ^c	<1
2-乙基-1-己醇	57	1.695 3	0.998	内标1	3.5 $\pm$ 0.2	300 ^c	<1
1,8-桉叶素	154	0.475 5	0.996	内标1	2.1 $\pm$ 0.1	1.1 ^c	2
2,6-二甲基吡嗪	108	2.367 5	0.996	内标1	1.5 $\pm$ 0.0	718 ^c	<1

注: 内标1. 2-甲基-3-庚酮; 内标2. 丁二酸二乙酯; 内标3. 2-辛醇; 内标4. 2-异丙基苯酚。a.来源于文献[22]; b.来源于文献[20]; c.来源于文献[23]。
—.阈值未见报道, OAV未计算, 表4同。

由表2可知,醇类和酮类在烧麦中含量较高。其中,丙酮醇含量为11 214.4 $\mu\text{g/kg}$,是烧麦中含量最高的物质。丙酮醇是美拉德反应的产物,由五碳糖或六碳糖转化而来^[35],也可与氨基酸反应生成具有含硫香气和爆米花香气的杂环类化合物,如吡嗪、噻唑类等^[36-37]。(R*,R*)-2,3-丁二醇、*meso*-2,3-丁二醇、麦芽酚和糠醇含量分别是6 151.4、3 881.7、2 436.2 $\mu\text{g/kg}$ 和1 942.8 $\mu\text{g/kg}$,这些物质也可以通过美拉德反应生成。烧麦的配方中使用了大量的面粉、糯米和火腿,这些食材的使用为美拉德反应提供了丰富的反应底物。除了上述5个物质,其他物质含量都小于1 000 $\mu\text{g/kg}$ 。其中,13个物质的含量在100~1 000 $\mu\text{g/kg}$ 之间;19个物质的含量低于100 $\mu\text{g/kg}$ 。

吡嗪类物质含量都小于100 $\mu\text{g/kg}$,且2,6-二甲基吡嗪含量只有1.5 $\mu\text{g/kg}$ 。

由表2可知,有21个物质的OAV不低于1,这些物质是烧麦中的关键香气物质。酱油酮、(反,反)-2,4-癸二烯醛、己醛的OAV大于100。其中,酱油酮的OAV最高,为918,对新鲜烧麦的酱香贡献最大;(反,反)-2,4-癸二烯醛和己醛的OAV分别是672和268,对烧麦的脂肪香贡献最大。二丙基三硫醚、(R*,R*)-2,3-丁二醇、芳樟醇、*meso*-2,3-丁二醇、丁香酚、愈创木酚、茴香脑、4-乙烯基愈创木酚、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃、麦芽酚的OAV在10~100之间,主要赋予了烧麦辛香、烟熏香、焦甜香。2-乙酰基噻唑、壬醛、香兰素、苯乙醇、 β -石竹烯、

表3 烧麦贮存期间(0~13个月)重要香气活性成分的含量变化
Table 3 Changes in contents of important odor active compounds in Shaomai during storage

香气活性成分	含量/($\mu\text{g/kg}$)													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
芳樟醇	11.2 $\pm$ 0.5	17.8 $\pm$ 0.4	17.7 $\pm$ 0.1	21.8 $\pm$ 0.2	22.5 $\pm$ 0.4	20.4 $\pm$ 0.3	21.7 $\pm$ 0.1	17.5 $\pm$ 0.5	19.8 $\pm$ 0.6	18.7 $\pm$ 0.1	23.8 $\pm$ 0.2	22.3 $\pm$ 0.1	18.5 $\pm$ 0.1	18.5 $\pm$ 0.1
香草乙酮	8.3 $\pm$ 0.1	8.0 $\pm$ 0.1	7.2 $\pm$ 0.1	8.8 $\pm$ 0.1	9.4 $\pm$ 0.3	9.8 $\pm$ 0.1	9.7 $\pm$ 0.2	9.6 $\pm$ 0.1	9.7 $\pm$ 0.0	10.0 $\pm$ 0.1	9.1 $\pm$ 0.0	8.9 $\pm$ 0.4	7.5 $\pm$ 0.2	7.3 $\pm$ 0.3
1,8-桉叶素	2.1 $\pm$ 0.1	15.3 $\pm$ 0.1	12.2 $\pm$ 0.1	18.6 $\pm$ 0.2	16.5 $\pm$ 0.2	15.6 $\pm$ 0.2	17.1 $\pm$ 0.0	18.5 $\pm$ 0.1	15.0 $\pm$ 0.1	12.6 $\pm$ 0.1	16.2 $\pm$ 0.1	16.0 $\pm$ 0.5	11.0 $\pm$ 0.1	16.6 $\pm$ 0.0
茴香脑	366.8 $\pm$ 5.0	731.9 $\pm$ 12.4	985.4 $\pm$ 9.4	1 393.8 $\pm$ 1.1	1 568.2 $\pm$ 15.6	1 242.2 $\pm$ 2.9	1 428.8 $\pm$ 2.3	977.4 $\pm$ 4.5	1 309.0 $\pm$ 3.7	1 075.0 $\pm$ 2.1	1 355.1 $\pm$ 3.4	1 380.2 $\pm$ 15.6	919.5 $\pm$ 3.5	1 147.3 $\pm$ 4.0
α -蒎烯	8.1 $\pm$ 0.2	12.2 $\pm$ 0.3	10.7 $\pm$ 0.1	11.3 $\pm$ 0.3	15.6 $\pm$ 1.2	13.9 $\pm$ 0.1	12.7 $\pm$ 0.2	15.5 $\pm$ 0.5	13.8 $\pm$ 0.3	13.1 $\pm$ 0.1	15.9 $\pm$ 0.2	16.7 $\pm$ 1.3	14.4 $\pm$ 0.3	11.7 $\pm$ 0.2
α -古巴烯	251.4 $\pm$ 3.3	403.1 $\pm$ 1.4	367.2 $\pm$ 1.9	507.8 $\pm$ 5.9	476.4 $\pm$ 4.1	409.5 $\pm$ 13.3	415.5 $\pm$ 5.6	511.9 $\pm$ 0.2	455.3 $\pm$ 2.0	423.5 $\pm$ 4.5	467.3 $\pm$ 3.9	491.5 $\pm$ 4.4	435.0 $\pm$ 3.4	417.7 $\pm$ 5.9
β -石竹烯	125.9 $\pm$ 4.1	418.0 $\pm$ 15.7	823.9 $\pm$ 10.0	1 170.3 $\pm$ 5.6	1 107.0 $\pm$ 14.8	1 028.0 $\pm$ 4.0	968.0 $\pm$ 2.1	974.1 $\pm$ 4.0	900.8 $\pm$ 9.6	858.0 $\pm$ 8.0	915.5 $\pm$ 7.7	947.8 $\pm$ 12.1	760.5 $\pm$ 7.0	830.8 $\pm$ 7.5
丁香酚	27.7 $\pm$ 0.2	42.8 $\pm$ 0.7	37.2 $\pm$ 0.1	52.6 $\pm$ 0.6	50.2 $\pm$ 1.2	43.2 $\pm$ 0.6	49.6 $\pm$ 0.5	33.0 $\pm$ 0.3	40.3 $\pm$ 0.2	37.9 $\pm$ 0.1	43.7 $\pm$ 1.0	46.1 $\pm$ 0.7	30.7 $\pm$ 0.2	39.9 $\pm$ 0.2
二丙基三硫醚	16.4 $\pm$ 0.2	31.7 $\pm$ 0.1	35.4 $\pm$ 0.2	44.3 $\pm$ 0.3	33.7 $\pm$ 0.8	35.5 $\pm$ 0.3	37.3 $\pm$ 0.1	39.8 $\pm$ 0.5	35.9 $\pm$ 0.3	35.4 $\pm$ 0.3	36.1 $\pm$ 0.3	32.6 $\pm$ 0.5	33.2 $\pm$ 0.2	34.3 $\pm$ 0.0
3-甲硫基丙醇	11.5 $\pm$ 0.8	4.6 $\pm$ 0.3	36.7 $\pm$ 1.5	39.0 $\pm$ 2.3	30.5 $\pm$ 0.7	32.6 $\pm$ 0.9	18.8 $\pm$ 0.9	13.3 $\pm$ 0.1	3.1 $\pm$ 0.4	2.6 $\pm$ 0.1	2.3 $\pm$ 0.1	2.6 $\pm$ 0.2	2.0 $\pm$ 0.1	2.1 $\pm$ 0.2
糠醛	95.8 $\pm$ 1.0	58.5 $\pm$ 0.9	50.8 $\pm$ 0.2	51.9 $\pm$ 0.7	40.1 $\pm$ 1.3	37.8 $\pm$ 0.1	43.0 $\pm$ 0.6	43.4 $\pm$ 1.0	33.5 $\pm$ 0.3	32.6 $\pm$ 0.3	27.5 $\pm$ 0.5	32.4 $\pm$ 2.8	25.8 $\pm$ 0.2	23.9 $\pm$ 0.6
丙酮醇	11 214.4 $\pm$ 137.5	8 546.6 $\pm$ 78.4	10 098.7 $\pm$ 38.3	8 002.0 $\pm$ 42.5	8 287.8 $\pm$ 14.0	6 731.3 $\pm$ 91.1	8 664.1 $\pm$ 70.9	7 125.8 $\pm$ 203.4	5 492.7 $\pm$ 187.7	5 808.3 $\pm$ 62.9	4 465.1 $\pm$ 51.4	3 288.6 $\pm$ 56.4	3 814.9 $\pm$ 15.5	3 780.6 $\pm$ 23.2
2(5H)-呋喃酮	652.4 $\pm$ 40.2	475.1 $\pm$ 23.1	473.9 $\pm$ 32.9	518.2 $\pm$ 14.9	353.8 $\pm$ 11.8	375.6 $\pm$ 22.9	369.3 $\pm$ 40.1	403.5 $\pm$ 9.3	342.9 $\pm$ 10.6	325.4 $\pm$ 21.2	297.9 $\pm$ 2.0	278.4 $\pm$ 21.8	289.2 $\pm$ 23.6	322.3 $\pm$ 7.0
酱油酮	449.9 $\pm$ 33.1	334.3 $\pm$ 7.1	464.1 $\pm$ 16.8	142.7 $\pm$ 9.5	36.8 $\pm$ 5.0	2.4 $\pm$ 0.2	0.9 $\pm$ 0.0	1.1 $\pm$ 0.0	1.1 $\pm$ 0.0	1.1 $\pm$ 0.0	0.4 $\pm$ 0.0	0.5 $\pm$ 0.2	0.7 $\pm$ 0.1	0.7 $\pm$ 0.1
4-乙烯基愈创木酚	105.5 $\pm$ 0.7	75.0 $\pm$ 0.7	70.8 $\pm$ 0.1	49.1 $\pm$ 0.2	31.7 $\pm$ 0.6	22.4 $\pm$ 0.8	18.6 $\pm$ 0.4	16.5 $\pm$ 0.6	14.0 $\pm$ 0.4	16.5 $\pm$ 0.3	14.2 $\pm$ 0.7	14.1 $\pm$ 0.7	11.6 $\pm$ 0.5	10.2 $\pm$ 0.4
(R*,R*)-2,3-丁二醇	6 151.4 $\pm$ 126.5	5 989.0 $\pm$ 71.2	5 098.4 $\pm$ 23.5	6 222.1 $\pm$ 84.5	5 391.6 $\pm$ 125.5	5 557.5 $\pm$ 105.0	6 497.3 $\pm$ 101.2	7 990.9 $\pm$ 66.3	6 862.0 $\pm$ 59.4	5 955.3 $\pm$ 26.8	5 596.0 $\pm$ 15.3	4 302.3 $\pm$ 429.6	5 717.3 $\pm$ 70.4	5 939.0 $\pm$ 62.3
<i>meso</i> -2,3-丁二醇	3 881.7 $\pm$ 146.1	3 826.8 $\pm$ 138.7	3 341.5 $\pm$ 9.7	5 124.4 $\pm$ 37.1	3 693.4 $\pm$ 46.6	3 491.6 $\pm$ 71.3	4 324.0 $\pm$ 48.7	5 427.8 $\pm$ 27.2	4 699.8 $\pm$ 70.2	4 010.7 $\pm$ 104.9	3 929.7 $\pm$ 72.9	3 547.2 $\pm$ 53.2	4 023.5 $\pm$ 24.6	4 022.3 $\pm$ 192.6
γ -丁内酯	235.7 $\pm$ 8.1	284.0 $\pm$ 5.4	278.4 $\pm$ 1.9	330.2 $\pm$ 1.4	262.5 $\pm$ 9.6	260.5 $\pm$ 4.4	286.3 $\pm$ 0.8	316.5 $\pm$ 4.5	255.8 $\pm$ 2.7	267.5 $\pm$ 1.9	232.2 $\pm$ 1.5	239.1 $\pm$ 9.4	219.4 $\pm$ 0.6	247.8 $\pm$ 1.6
愈创木酚	23.5 $\pm$ 0.2	24.8 $\pm$ 0.0	22.2 $\pm$ 0.1	26.8 $\pm$ 0.2	24.8 $\pm$ 0.6	23.2 $\pm$ 0.4	27.2 $\pm$ 0.0	23.7 $\pm$ 0.3	23.8 $\pm$ 0.1	24.1 $\pm$ 0.3	24.2 $\pm$ 0.1	23.2 $\pm$ 0.8	21.3 $\pm$ 0.2	22.5 $\pm$ 0.2
己醛	644.4 $\pm$ 7.9	465.7 $\pm$ 10.4	403.4 $\pm$ 9.9	328.3 $\pm$ 1.7	260.2 $\pm$ 21.0	298.9 $\pm$ 4.8	334.4 $\pm$ 2.2	398.7 $\pm$ 24.0	395.9 $\pm$ 3.4	319.0 $\pm$ 1.3	339.7 $\pm$ 1.5	288.0 $\pm$ 4.5	328.0 $\pm$ 1.6	309.3 $\pm$ 18.3
(反,反)-2,4-癸二烯醛	18.2 $\pm$ 2.7	40.2 $\pm$ 3.0	31.1 $\pm$ 0.6	31.6 $\pm$ 1.5	16.2 $\pm$ 0.2	25.4 $\pm$ 1.2	11.6 $\pm$ 0.2	72.0 $\pm$ 1.4	28.07 $\pm$ 0.2	12.9 $\pm$ 0.5	18.4 $\pm$ 1.0	15.9 $\pm$ 0.2	9.4 $\pm$ 0.1	11.7 $\pm$ 0.8
1-辛烯-3-醇	25.7 $\pm$ 0.3	40.0 $\pm$ 0.8	37.6 $\pm$ 0.4	53.3 $\pm$ 0.4	43.6 $\pm$ 0.2	47.5 $\pm$ 2.1	48.6 $\pm$ 0.3	52.1 $\pm$ 0.2	80.4 $\pm$ 1.0	74.5 $\pm$ 0.9	69.2 $\pm$ 1.0	63.1 $\pm$ 0.4	61.9 $\pm$ 0.8	74.6 $\pm$ 1.7
壬醛	23.3 $\pm$ 3.1	58.7 $\pm$ 0.5	53.1 $\pm$ 0.6	35.4 $\pm$ 10.0	28.9 $\pm$ 5.0	27.1 $\pm$ 1.3	23.7 $\pm$ 1.1	32.8 $\pm$ 2.9	44.5 $\pm$ 0.4	28.8 $\pm$ 0.4	33.1 $\pm$ 4.6	32.1 $\pm$ 4.2	32.4 $\pm$ 0.5	42.7 $\pm$ 0.6
2-戊基呋喃	67.4 $\pm$ 1.9	95.2 $\pm$ 3.2	111.0 $\pm$ 1.8	122.0 $\pm$ 1.4	140.8 $\pm$ 2.8	138.3 $\pm$ 1.2	146.5 $\pm$ 0.0	143.2 $\pm$ 1.5	55.1 $\pm$ 0.7	75.3 $\pm$ 0.9	112.0 $\pm$ 1.0	132.4 $\pm$ 0.5	109.7 $\pm$ 1.1	94.5 $\pm$ 0.7
2-甲基吡嗪	92.4 $\pm$ 0.1	83.8 $\pm$ 1.4	95.8 $\pm$ 0.6	108.0 $\pm$ 1.1	98.6 $\pm$ 3.7	97.8 $\pm$ 0.3	131.8 $\pm$ 1.1	121.7 $\pm$ 1.9	110.3 $\pm$ 1.1	123.1 $\pm$ 1.4	114.5 $\pm$ 1.0	115.2 $\pm$ 1.8	112.9 $\pm$ 0.8	129.7 $\pm$ 1.1
2,5-二甲基吡嗪	14.2 $\pm$ 0.1	28.5 $\pm$ 0.3	64.2 $\pm$ 0.3	107.1 $\pm$ 0.5	108.2 $\pm$ 2.6	98.0 $\pm$ 0.4	166.1 $\pm$ 0.2	138.8 $\pm$ 1.3	132.2 $\pm$ 0.8	189.7 $\pm$ 0.7	161.4 $\pm$ 0.1	183.0 $\pm$ 4.5	157.4 $\pm$ 1.0	213.6 $\pm$ 1.0
2,6-二甲基吡嗪	1.5 $\pm$ 0.0	1.4 $\pm$ 0.1	23.3 $\pm$ 1.5	33.3 $\pm$ 0.5	24.1 $\pm$ 9.3	26.0 $\pm$ 0.8	36.6 $\pm$ 2.9	37.0 $\pm$ 0.9	31.7 $\pm$ 1.7	41.6 $\pm$ 0.2	36.4 $\pm$ 0.7	40.4 $\pm$ 0.7	33.3 $\pm$ 5.8	45.4 $\pm$ 0.7
三甲基吡嗪	13.2 $\pm$ 0.2	15.8 $\pm$ 0.2	20.2 $\pm$ 0.2	28.4 $\pm$ 0.1	26.2 $\pm$ 0.2	24.0 $\pm$ 0.2	32.3 $\pm$ 0.1	30.9 $\pm$ 0.3	26.9 $\pm$ 0.3	33.1 $\pm$ 0.2	31.0 $\pm$ 0.3	34.4 $\pm$ 0.2	29.4 $\pm$ 0.3	35.4 $\pm$ 0.3
2-乙酰基噻唑	26.4 $\pm$ 0.6	30.5 $\pm$ 0.6	30.8 $\pm$ 0.9	34.9 $\pm$ 0.1	30.7 $\pm$ 0.9	31.9 $\pm$ 0.3	38.5 $\pm$ 0.2	29.3 $\pm$ 0.6	32.0 $\pm$ 0.1	32.3 $\pm$ 0.4	31.6 $\pm$ 0.3	32.8 $\pm$ 0.8	27.3 $\pm$ 0.3	37.1 $\pm$ 0.1
2-乙酰基吡咯	118.3 $\pm$ 0.4	208.0 $\pm$ 79.7	223.5 $\pm$ 0.7	231.1 $\pm$ 0.9	212.5 $\pm$ 5.9	210.3 $\pm$ 1.2	252.4 $\pm$ 1.2	206.2 $\pm$ 3.7	241.7 $\pm$ 2.4	237.9 $\pm$ 0.0	255.6 $\pm$ 0.8	240.7 $\pm$ 6.2	234.4 $\pm$ 0.5	261.2 $\pm$ 0.8
2-乙基-1-己醇	3.5 $\pm$ 0.2	5.7 $\pm$ 0.2	6.0 $\pm$ 0.3	8.1 $\pm$ 0.1	8.0 $\pm$ 0.5	7.8 $\pm$ 0.6	7.4 $\pm$ 0.2	7.5 $\pm$ 0.6	7.5 $\pm$ 0.1	7.1 $\pm$ 0.4	7.7 $\pm$ 0.5	8.7 $\pm$ 0.6	7.7 $\pm$ 0.5	8.3 $\pm$ 0.6
苯甲醛	103.9 $\pm$ 3.4	85.1 $\pm$ 0.6	86.1 $\pm$ 0.2	113.3 $\pm$ 0.6	104.9 $\pm$ 2.3	113.5 $\pm$ 0.9	136.3 $\pm$ 0.5	128.4 $\pm$ 2.0	168.6 $\pm$ 0.8	164.3 $\pm$ 0.6	171.4 $\pm$ 0.6	156.0 $\pm$ 3.3	138.7 $\pm$ 0.7	179.1 $\pm$ 1.1
麦芽酚	2 436.2 $\pm$ 141.5	1 826.5 $\pm$ 35.6	1 934.7 $\pm$ 19.5	2 624.7 $\pm$ 25.5	1 651.8 $\pm$ 350.2	1 800.0 $\pm$ 53.9	2 149.3 $\pm$ 86.0	1 535.9 $\pm$ 8.4	1 445.4 $\pm$ 66.3	1 821.7 $\pm$ 39.0	1 610.6 $\pm$ 33.6	1 316.6 $\pm$ 238.3	1 305.6 $\pm$ 28.3	2 138.3 $\pm$ 13.2
糠醇	1 942.8 $\pm$ 17.3	1 457.0 $\pm$ 17.9	2 263.6 $\pm$ 15.6	2 390.9 $\pm$ 33.3	2 345.8 $\pm$ 45.3	1 948.5 $\pm$ 17.1	2 707.0 $\pm$ 27.2	2 099.7 $\pm$ 22.1	1 634.4 $\pm$ 28.5	2 167.9 $\pm$ 7.1	1 972.8 $\pm$ 23.6	2 139.3 $\pm$ 48.7	1 749.6 $\pm$ 3.6	2 014.7 $\pm$ 19.5
香兰素	368.4 $\pm$ 4.2	349.0 $\pm$ 1.1	369.7 $\pm$ 2.1	425.7 $\pm$ 0.9	407.2 $\pm$ 12.3	406.3 $\pm$ 2.4	450.0 $\pm$ 2.2	472.9 $\pm$ 3.9	435.8 $\pm$ 1.8	457.5 $\pm$ 1.8	417.2 $\pm$ 1.8	407.9 $\pm$ 18.0	380.9 $\pm$ 1.2	373.6 $\pm$ 0.3
苯乙醇	310.3 $\pm$ 0.9	348.3 $\pm$ 0.7	354.5 $\pm$ 1.0	423.7 $\pm$ 1.6	353.5 $\pm$ 5.0	358.8 $\pm$ 0.5	399.1 $\pm$ 1.1	408.7 $\pm$ 2.0	366.0 $\pm$ 1.0	375.0 $\pm$ 0.4	372.9 $\pm$ 0.8	362.5 $\pm$ 5.9	340.1 $\pm$ 0.5	372.1 $\pm$ 0.9
2-环戊烯-1-酮	261.6 $\pm$ 27.7	279.0 $\pm$ 4.2	326.9 $\pm$ 7.7	299.9 $\pm$ 2.8	308.7 $\pm$ 20.6	354.1 $\pm$ 10.5	343.8 $\pm$ 14.8	276.4 $\pm$ 16.9	270.3 $\pm$ 4.8	276.4 $\pm$ 5.5	317.7 $\pm$ 6.1	266.5 $\pm$ 0.8	284.5 $\pm$ 10.2	355.5 $\pm$ 9.6

1,8-桉叶素和丙酮醇的OAV在1~10之间,主要赋予烧麦坚果香、甜香。综上,由于酱油酮有着最高的OAV,说明酱油和红烧肉调料中的酱油粉对烧麦的香气贡献最大;(反,反)-2,4-癸二烯醛和己醛主要产生自食用油和火腿中的油脂,为烧麦提供了油脂香;来自香辛料的二丙基三硫醚、芳樟醇、丁香酚、茴香脑、 β -石竹烯、1,8-桉叶素丰富了烧麦的香气;其他香气成分使得烧麦的香气更加圆润丰满。

2.4 烧麦贮存期内的香气变化

为考察烧麦在贮存过程中关键香气成分的变化情况,将烧麦室温下避光保存0~13个月,每个月取样分析,结果如表3、4和图1所示。

表4 烧麦贮存期间(0~13个月)重要香气活性成分的OAV变化
Table 4 OAV changes of important odor active compounds in Shaomai during storage

香气活性成分	OAV													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
酱油酮	918	682	947	291	75	5	2	2	2	2	1	1	1	1
(反,反)-2,4-癸二烯醛	672	1 487	1 153	1 170	600	942	428	2 667	1 040	478	680	587	349	434
己醛	268	194	168	137	108	125	139	166	165	133	142	120	137	129
二丙基三硫醚	86	167	186	233	178	187	196	209	189	186	190	171	175	180
芳樟醇	51	81	80	99	102	93	99	80	90	85	108	102	84	84
茴香脑	24	49	66	93	105	83	95	65	87	72	90	92	61	76
(R*,R*)-2,3-丁二醇	65	63	54	65	57	58	68	84	72	63	59	45	60	62
丁香酚	39	60	52	74	71	61	70	46	57	53	62	65	43	56
meso-2,3-丁二醇	41	40	35	54	39	37	45	57	49	42	41	37	42	42
1-辛烯-3-醇	17	27	25	36	29	32	32	35	54	50	46	42	41	50
愈创木酚	28	29	26	32	30	28	32	28	28	29	29	28	25	27
2-戊基呋喃	12	16	19	21	24	24	25	25	10	13	19	23	19	16
β -石竹烯	2	7	13	18	17	16	15	15	14	13	14	15	12	13
1,8-桉叶素	2	14	11	17	15	14	16	17	14	11	15	15	10	15
2-乙酰基噻唑	9	10	10	12	10	11	13	10	11	11	11	11	9	12
壬醛	8	21	19	13	10	10	8	12	16	10	12	11	12	15
麦芽酚	12	9	9	12	8	9	10	7	7	9	8	6	6	10
4-乙基愈创木酚	21	15	14	10	6	4	4	3	3	3	3	3	2	2
香兰素	7	7	7	8	8	8	8	9	8	9	8	8	7	7
苯乙醇	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3
丙酮醇	1	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2-乙基-1-己醇	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
糠醇	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
3-甲硫基丙醇	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
糠醛	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
苯甲醛	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2(5H)-呋喃酮	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
香草乙酮	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
α -蒎烯	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2-甲基吡嗪	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2,5-二甲基吡嗪	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2,6-二甲基吡嗪	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
三甲基吡嗪	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
γ -丁内酯	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2-乙酰基噻咯	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2-环戊烯-1-酮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
α -古巴烯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

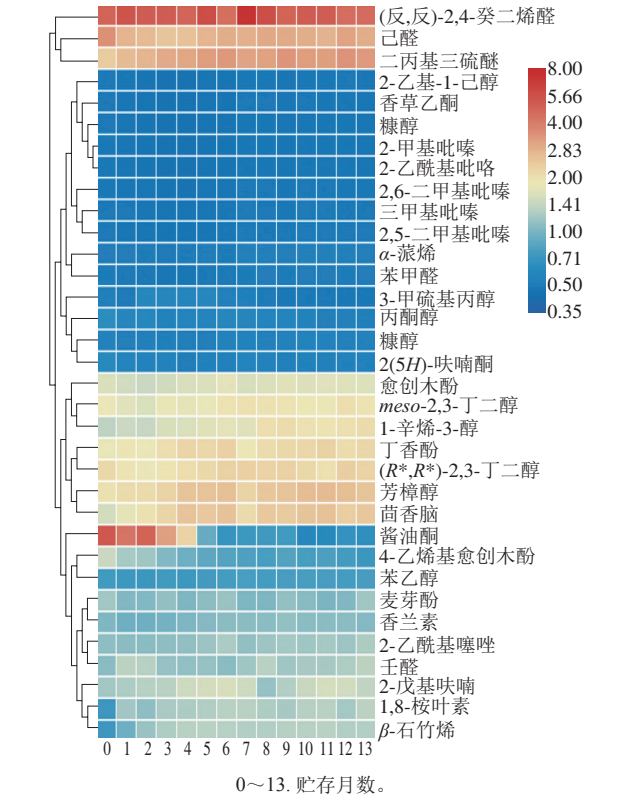


图1 烧麦贮存期间重要香气活性成分OAV变化的层次聚类热图
Fig. 1 Hierarchical cluster heatmap of OAV changes of important odor active compounds in Shaomai during storage

烧麦中的重要香气活性成分主要来源于使用的原料(火腿、酱油、红烧肉调料、香辛料)、油脂的氧化降解、美拉德反应等。

芳樟醇、香草乙酮、1,8-桉叶素、茴香脑、 α -蒎烯、 α -古巴烯、 β -石竹烯、丁香酚和二丙基三硫醚主要来自烧麦中所用的香辛料,它们在烧麦中的含量与香辛料的使用有关,由于所用的是香辛料粉,在烧麦中分布不均,使得它们在烧麦中的含量有所不同。

3-甲硫基丙醇、糠醛、丙酮醇、2(5H)-呋喃酮、酱油酮、4-乙基愈创木酚、(R*,R*)-2,3-丁二醇、meso-2,3-丁二醇、 γ -丁内酯和愈创木酚主要来源于烧麦中的原料(如酱油、红烧肉调料中的酱油粉、酵母抽提物等),其中3-甲硫基丙醇、糠醛、丙酮醇、2(5H)-呋喃酮、酱油酮、4-乙基愈创木酚含量在烧麦的贮存过程中整体呈降低趋势,可能与这些成分中都含有活泼基团(甲硫基、羟基、醛基、酮基),易变化有关;而 γ -丁内酯、愈创木酚以及(R*,R*)-2,3-丁二醇和meso-2,3-丁二醇的总含量变化不明显。贮存过程中,酱油酮和4-乙基愈创木酚的OAV变化较大,其他成分的OAV变化很小。

己醛、(反,反)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、2-戊基呋喃可由脂肪酸降解产生,在烧麦贮存过程中己醛和(反,反)-2,4-癸二烯醛的含量有所降低,而1-辛烯-3-

醇、壬醛和2-戊基呋喃的含量有所增加。含油脂高的食品,贮存过程中己醛含量会升高,引起异味;而烧麦在贮存过程中己醛的含量有所降低,这是因为己醛容易被氧化,另一个原因可能是烧麦所用香辛料中的一些抗氧化成分能够抑制形成己醛的反应。

鉴定出的2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2-乙酰基噻唑和2-乙酰基吡咯6种含氮化合物含量在烧麦贮存过程中整体呈增加趋势,它们的形成与美拉德反应有关,但是由于其阈值较高,含量的增加并没有引起OAV的变化,只有2-乙酰基噻唑的OAV保持大于1,其他成分的OAV都小于1。

烧麦的贮存过程中,2-乙基-1-己醇和苯甲醛的含量增加,麦芽酚、糠醇、香兰素、苯乙醇和2-环戊烯-1-酮的含量呈现波动状态,它们都是原料中香气成分,同时在烧麦贮存过程中也可能通过其他反应形成,使得其含量发生变化。这些成分中,2-乙基-1-己醇、苯甲醛和糠醇含量变化并没引起OAV的变化,其OAV小于1。

烧麦基质复杂,影响其风味的因素较多,其关键香气成分主要来源于所用原料。总体来看,除酱油酮、己醛和4-乙烯基愈创木酚外,烧麦中多数重要香气活性成分含量在1~13个月的贮存过程中变化较小。酱油酮、己醛和4-乙烯基愈创木酚的OAV分别从918、268、21降到1、129、2,其含量的降低是导致烧麦香气强度减弱的主要原因;这些成分含量降低的原因需要进一步研究。

3 结 论

利用溶剂萃取-溶剂辅助风味成分蒸发的方法提取了烧麦中的挥发性成分,使用GC-MS和GC-O对烧麦提取物进行分析,鉴定出50种具有香气活性的物质,即醇类11种、醛类7种、酮类9种、醚类4种、烯炔类5种、吡嗪类4种、酚类3种、酸类2种和其他类化合物5种。通过AEDA测定了香气活性成分的FD因子,其范围是1~6 561;采用内标曲线的方法,对37个FD因子不低于81的香气活性成分进行定量分析,结合定量结果和阈值计算其OAV,其中21个OAV不低于1的成分被确定为烧麦的关键香气成分。对不同贮存时间下烧麦中的重要香气活性成分进行定量分析和计算OAV,发现在1~13个月的贮存期内,关键香气成分的数量稳定;除酱油酮、己醛和4-乙烯基愈创木酚外,烧麦中多数重要香气活性成分的含量变化较小。

参考文献:

- [1] 王猛,赵瑞斌,石同瑶.烧麦源流与技术传承:以内蒙古呼和浩特为例[J].农业考古,2019(1): 187-191.
- [2] 杨红玲.金参烧麦营养价值及加工工艺[J].肉类工业,2001(2): 29. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2001.02.012.

- [3] 伟龙食品有限公司.一种食品加工用烧卖制作装置:202010721576.2[P].2022-01-04.
- [4] FUKUDA T, TAKEDA T, YOSHIDA S. Comparison of volatiles in cooked rice with various amylose contents[J]. Food Science and Technology Research, 2014, 20(6): 1251-1259. DOI:10.3136/fstr.20.1251.
- [5] 徐睿,胡冰,麻荣荣,等.焙烤糯米粉的关键风味物质分析[J].食品与发酵工业,2019,45(14): 203-208. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.019583.
- [6] 王藤,施娅楠,李祥,等.SPME-GC-MS结合ROAV分析腌制时间对大河乌猪火腿挥发性风味物质的影响[J].食品工业科技,2021,42(18): 317-324. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021010250.
- [7] JIANG S, XIA D, WANG X M, et al. Analysis of aroma-active compounds in four Chinese dry-cured hams based on GC-O combined with AEDA and frequency detection methods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 153(1): 112497. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112497.
- [8] WANG X J, GUO M Y, SONG H L, et al. Characterization of key odor-active compounds in commercial high-salt liquid-state soy sauce by switchable GC/GC×GC-olfactometry-MS and sensory evaluation[J]. Food Chemistry, 2021, 342(9): 128224. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128224.
- [9] ZHAO G Z, DING L L, HADIATULLAH H, et al. Characterization of the typical fragrant compounds in traditional Chinese-type soy sauce[J]. Food Chemistry, 2020, 312(11): 126054. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.126054.
- [10] WANG X J, GUO M Y, SONG H L, et al. Characterization of key aroma compounds in traditional Chinese soy sauce through the molecular sensory science technique[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 128(12): 109413. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109413.
- [11] DIEZ-SIMON C, EICHELSHEIM C, MUMM R, et al. Chemical and sensory characteristics of soy sauce: a review[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(42): 11612-11630. DOI:10.1021/acs.jafc.0c04274.
- [12] ZHOU T, FENG Y Z, THOMAS-DANGUIN T, et al. Enhancement of saltiness perception by odorants selected from Chinese soy sauce: a gas chromatography/olfactometry-associated taste study[J]. Food Chemistry, 2021, 335(2): 127664. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127664.
- [13] LEE J G, KIM D W, SHIN Y, et al. Comparative study of the bioactive compounds, flavours and minerals present in black pepper before and after removing the outer skin[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125(8): 109356. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109356.
- [14] 王珏,秦晓威,孙也乔,等.3种不同萃取方法对黑胡椒中香气物质的气质联用分析对比研究[J].热带作物学报,2022(5): 1055-1063.
- [15] 王花俊,齐海英,张峻松.黑胡椒精油挥发性成分分析[J].中国调味品,2017,42(12): 138-140; 146. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2017.12.031.
- [16] 吴桂苹,李昌应,谷凤林,等.不同杀菌方式对黑胡椒风味品质的影响[J].热带作物学报,2021,42(2): 527-534. DOI:10.3969/j.issn.1000-2561.2021.02.031.
- [17] JAGELLA T, GROSCH W. Flavour and off-flavour compounds of black and white pepper (*Piper nigrum* L.) I. Evaluation of potent odorants of black pepper by dilution and concentration techniques[J]. European Food Research and Technology, 1999, 209(1): 16-21. DOI:10.1007/s002170050449.
- [18] 任二芳,牛德宝,王运儒,等.姜黄淮山米饼的储存期加速试验研究[J].食品研究与开发,2016,37(3): 196-200. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2016.03.049.

- [19] 傅静, 徐学兵, 毕艳兰, 等. 风味花生粉常温储藏期间挥发性成分的变化与感官特性的关系探究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 321-328. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.12.049.
- [20] LIU B S, XU S Q, DONG Z Z, et al. Characterization of key odorants in scallion pancake and investigation on their changes during storage[J]. Molecules, 2021, 26(24): 7647. DOI:10.3390/molecules26247647.
- [21] VANDENDOOL H, KRATZ P D. A generalization of the retention index system including linear temperature programmed gas-liquid partition chromatography[J]. Journal of Chromatography, 1963, 11(4): 463-471. DOI:10.1016/s0021-9673(01)80947-x.
- [22] CZERNY M, CHRISTLBAUER M, CHRISTLBAUER M, et al. Re-investigation on odour thresholds of key food aroma compounds and development of an aroma language based on odour qualities of defined aqueous odorant solutions[J]. European Food Research and Technology, 2008, 228(2): 265-273. DOI:10.1007/s00217-008-0931-x.
- [23] VAN GEMERT L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Amsterdam: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.
- [24] SHI Y N, LI X, HUANG A X. A metabolomics-based approach investigates volatile flavor formation and characteristic compounds of the Dahe black pig dry-cured ham[J]. Meat Science, 2019, 158(12): 107904. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.107904.
- [25] GAO X L, LIU E M, ZHANG J K, et al. Accelerating aroma formation of raw soy sauce using low intensity sonication[J]. Food Chemistry, 2020, 329(28): 127118. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127118.
- [26] BUSKO M, JELEN H, GORAL T, et al. Volatile metabolites in various cereal grains[J]. Food Additives and Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2010, 27(11): 1574-1581. DOI:10.1080/19440049.2010.506600.
- [27] SEGURA-BORRERO M P, RIOS-REINA R, GALAN-SOLDEVILLA H, et al. Influence of the ripening chamber's geographical location on dry-cured Iberian ham's key odorants[J]. Food Research International, 2022, 153(3): 110977. DOI:10.1016/j.foodres.2022.110977.
- [28] KING E S, CHAPMAN D M, LUO K, et al. Defining the sensory profiles of raw almond (*Prunus dulcis*) varieties and the contribution of key chemical compounds and physical properties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(11): 3229-3241. DOI:10.1021/acs.jafc.8b05845.
- [29] CZERNY M, SCHIEBERLE P. Important aroma compounds in freshly ground wholemeal and white wheat flour-identification and quantitative changes during sourdough fermentation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(23): 6835-6840. DOI:10.1021/jf020638p.
- [30] HOLSE M, PETERSEN M A, MARUATONA G N, et al. Headspace volatile composition and oxidative storage stability of pressed marama bean (*Tylosema esculentum*) oil[J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1749-1758. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.11.052.
- [31] LEE J, BOUSQUIERES J, DESCHARLES N, et al. Potential of model cakes to study reaction kinetics through the dynamic online extraction of volatile markers and TD-GC-MS analysis[J]. Food Research International, 2020, 132(6): 109087. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109087.
- [32] CECCHI L, IERI F, VIGNOLINI P, et al. Characterization of volatile and flavonoid composition of different cuts of dried onion (*Allium cepa* L.) by HS-SPME-GC-MS, HS-SPME-GC×GC-TOF and HPLC-DAD[J]. Molecules, 2020, 25(2): 408. DOI:10.3390/molecules25020408.
- [33] WANG X Y, MA Y J, GUO Y, et al. Reinvestigation of 2-acetylthiazole formation pathways in the Maillard reaction[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128761. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128761.
- [34] ARNOLDI A, NEGRONI M, D'AGOSTINA A. Effect of antioxidants on the formation of volatiles from the Maillard reaction[J]. Developments in Food Science, 1998, 40: 529-534. DOI:10.1016/S0167-4501(98)80074-5.
- [35] VOIGT M, GLOMB M A. Reactivity of 1-deoxy-D-erythro-hexo-2,3-diulose: a key intermediate in the Maillard chemistry of hexoses[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(11): 4765-4770. DOI:10.1021/jf900459x.
- [36] PRIPIS-NICOLAU L, DE REVEL G, BERTRAND A, et al. Formation of flavor components by the reaction of amino acid and carbonyl compounds in mild conditions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(9): 3761-3766. DOI:10.1021/jf991024w.
- [37] CHIU E M, KUO M C, BRUECHERT L J, et al. Substitution of pyrazines by aldehydes in model systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1990, 38(1): 58-61. DOI:10.1021/jf00091a012.