

气相色谱-离子迁移谱结合化学计量法分析不同炒制时间对郫县豆瓣酱挥发性化合物的影响

陈丽兰, 陈祖明, 袁 灿*
(四川旅游学院, 四川 成都 610100)

摘要: 采用感官评价、气相色谱-离子迁移谱 (gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS) 结合化学计量学的方法, 分析不同炒制时间郫县豆瓣酱挥发性风味物质, 旨在探析炒制过程中郫县豆瓣酱挥发性风味物质的差异和变化。结果表明: 郫县豆瓣酱在炒制4 min后表现出最强的果香; 在炒制5 min后表现出最强的焦香、木香和坚果香; 郫县豆瓣酱的辛香随着炒制时间延长而减弱。不同炒制时间郫县豆瓣酱样品的挥发性物质可通过GC-IMS技术较好地分离, 在不同炒制时间的5个样品中共检测出97种风味化合物, 其中醛类、酮类和酯类物质相对含量较大, 醛类和酯类随着炒制时间的延长而增加, 包括丁醛、异丁烯醛、2-甲基丙醛、戊醛、3-甲基丁醛、异丁酸异丁酯、丁酸乙酯、乙酸甲酯。由正交偏最小二乘判别分析筛选出34种标志性化合物; 由Pearson相关性分析可知, 焦香、木香和坚果香与大部分香气化合物呈显著负相关, 辛香与大部分香气化合物呈显著正相关。

关键词: 郫县豆瓣酱; 炒制时间; 气相色谱-离子迁移谱; 挥发性风味化合物

Effect of Cooking Time on Volatile Compounds of Pixian Bean Paste Determined by Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry Combined with Chemometrics

CHEN Lilan, CHEN Zuming, YUAN Can*
(Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

Abstract: Sensory evaluation, gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) and chemometrics were applied to analyze the change of volatile flavor compounds in Pixian bean paste during cooking. The results indicated that Pixian bean paste showed the strongest fruity aroma after four minutes of stir frying, and strongest woody, nutty and burnt aromas after five minutes. As the stir-frying time increased, the spicy aroma of Pixian bean paste was weakened. The volatile components of Pixian bean paste with different stir-frying times were well separated by GC-IMS and a total of 97 volatile components were detected at five stir-frying times, aldehydes, ketones and esters being the major ones. The relative contents of aldehydes and esters increased as the stir-frying time prolonged, including butanal, isobutanal, 2-methylpropanal, valental, 3-methylbutanal, isobutyl butyrate, ethyl butyrate and methyl acetate. Totally 34 signature volatile components were identified by orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA). Pearson correlation analysis showed that the woody, nutty and burnt aromas were strongly negatively correlated with the concentrations of most aroma compounds. The spicy aroma was strongly positively correlated with the concentrations of most aroma components.

Keywords: Pixian bean paste; stir-frying time; gas chromatography-ion mobility spectrometry; volatile flavor compounds

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221103-025

中图分类号: TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 14-0283-08

引文格式:

陈丽兰, 陈祖明, 袁灿. 气相色谱-离子迁移谱结合化学计量法分析不同炒制时间对郫县豆瓣酱挥发性化合物的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 283-290. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221103-025. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 四川省科技计划项目 (2015NZ0037); 四川省哲学社会科学重点研究基地川菜发展研究中心项目 (CC22Z04); 四川旅游学院项目 (2022SCTUZD10)

第一作者简介: 陈丽兰 (1988—) (ORCID: 0000-0002-4044-4699), 女, 助理研究员, 硕士, 研究方向为食品科学与工程。

E-mail: 845946884@qq.com

*通信作者简介: 袁灿 (1987—) (ORCID: 0000-0002-9355-2896), 男, 讲师, 博士, 研究方向为食品风味化学。

E-mail: coccy2014@163.com

CHEN Lilan, CHEN Zuming, YUAN Can. Effect of cooking time on volatile compounds of Pixian bean paste determined by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics[J]. Food Science, 2023, 44(14): 283-290. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221103-025. <http://www.spkx.net.cn>

郫县豆瓣酱是川菜中常用的调味品, 具有鲜辣醇厚、酱香浓郁、红棕油亮等特点, 被誉为“川菜之魂”^[1]。郫县豆瓣酱在菜品的烹制和复合调味料加工过程中, 多数需要先进行炒制, 炒制出香味后再进入后续加工步骤。然而在炒制过程中, 过长的炒制时间或者过高的炒制温度会引起一些复杂反应的发生, 导致郫县豆瓣酱食用品质下降, 因此炒制条件是影响郫县豆瓣酱食用品质的因素。

风味是评定食品食用品质的重要内容。近年来, 研究者从郫县豆瓣酱中鉴定出100多种挥发性风味物质, 包括醛类、酮类、酯类、醇类、酸类等^[2-3], 郫县豆瓣酱挥发性风味物质间的相互作用决定了其香气构型。目前, 关于郫县豆瓣酱风味的相关研究集中在不同发酵时间、不同发酵工艺或不同品牌产品的风味比较^[3-5], 对郫县豆瓣酱炒制过程中香气化合物变化规律以及特征香气化合物的相关研究较少。课题组前期已采用气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用对郫县豆瓣酱炒制前后的香气化合物进行了分析, 但对于香气化合物在郫县豆瓣酱炒制过程中的变化规律以及特征香气化合物的相关性仍缺乏系统研究。

气相色谱-离子迁移色谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)是近年来新兴的气相分离检测技术。与GC-MS技术相比, GC-IMS具有操作简单、分离能力强、检测时间短、灵敏度高、保留样品的原有风味等优点^[6-7]。GC-IMS分析技术已广泛应用到各类食品的挥发性风味化合物、品质检测分析等^[8-10], 但该技术应用于郫县豆瓣酱挥发性风味物质的研究较少。

本研究以郫县豆瓣酱为研究对象, 使用感官评价和GC-IMS结合化学计量法方法分析炒制过程中郫县豆瓣酱的主要挥发性风味物质, 分析比较不同炒制时间下郫县豆瓣酱风味物质的变化规律, 并建立挥发性成分指纹图谱, 继而对其进行正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)。本实验方法具有工业应用潜力, 可以检测不同炒制程度郫县豆瓣酱的风味差异, 旨在为炒制过程中郫县豆瓣酱风味变化的研究提供一定的依据, 也为快速、高效分析郫县豆瓣酱挥发性化合物拓宽思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

郫县豆瓣酱由四川省郫县豆瓣股份有限公司提供, 其生产工艺按照GB/T 20560—2006《地理标志产品 郫县

豆瓣》制得; 菜籽油(老家土榨) 中粮福临门股份有限公司。

1.2 仪器与设备

Flavour Spec[®] GC-IMS联用仪 德国G.A.S.公司; YP100002B百分之一天平 上海力辰仪器科技有限公司; J7智能电炒锅 九阳股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 郫县豆瓣酱炒制工艺

取200 g食用油置于铁锅中加热至90 °C后加入100 g郫县豆瓣酱进行炒制, 分别炒制1、2、3、4、5 min。对炒制后的郫县豆瓣酱依次编号, 分别为PX-1、PX-2、PX-3、PX-4和PX-5。以空白瓶为对照样, 标记为KQ。

1.3.2 GC-IMS测定

准确称量2.0 g处理后的郫县豆瓣酱样品, 置于20 mL顶空进样瓶中并加盖密封, 置于孵化炉中, 在50 °C条件下孵化20 min, 进样体积为500 μL。

GC条件: FS-SE-54-CB-1色谱柱(15 m×0.53 mm); 柱温60 °C; 载气为高纯氮气(纯度≥99.999%); 载气流速程序: 初始流速2.0 mL/min, 保持2 min; 在10 min内流速增加到10.0 mL/min; 而后在10~40 min内流速增大到100.0 mL/min。

IMS条件: 漂移气为高纯氮气(纯度≥99.999%); 漂移气流速150 mL/min; IMS探测器温度为45 °C; 漂移管长度为9.8 cm; 管内线性电压为500 V/cm; 漂移管温度为45 °C。

1.3.3 感官评价

采用定量描述分析法进行风味感官评价, 参照卢云浩^[11]和Feng Yunzi^[12]等并调整, 将炒制制得的10 g郫县豆瓣酱置于50 mL PET瓶中, 经过无顺序编号后, 交由感官评定小组(人员10名以上)对每个样品进行感官鉴定。气味强度采用感官评定常用的9点标度法表示, 其中1~9代表从极弱到极强的区间变化; 呈香属性描述词参考卢云浩^[11]和Feng Yunzi^[12]等并调整, 描述词为焦香、辛香、果香、花香、坚果香、木香, 炒制的郫县豆瓣酱的感官描述、定义及评定尺度如表1、2所示。

表1 郫县豆瓣酱的感官描述和定义

描述词	定义
焦香	物质被过度加热或烘烤而产生的气味, 如咖啡
花香	类似花的香气, 例如茉莉花、玫瑰花
果香	熟透水果所具有的典型而浓郁香气, 例如草莓&桑葚:芒果&黄桃=1:1
坚果香	典型坚果的特征香气, 例如杏仁、腰果
木香	典型树木的香气, 如松木
辛香	来源于典型香辛料的辛辣味, 如鲜辣椒

表2 感官评定尺度

Table 2 Scale for sensory evaluation

评分	1	2	3	4	5	6	7	8	9
强度	极弱	很弱	较弱	稍弱	中等	稍强	较强	很强	极强

1.4 数据处理

通过SIMCA 14.1软件进行OPLS-DA, 采用SPSS 20.0软件进行Pearson相关性分析, 利用Origin 2019软件中Apps插件进行聚类分析, 并通过Origin 2019绘图。

2 结果与分析

2.1 不同炒制时间郫县豆瓣酱的感官评价

由图1可知, 炒制后的郫县豆瓣酱的6个香气属性, 分别为焦香、辛香、果香、花香、坚果香、木香。不同炒制时间的郫县豆瓣酱的风味差异性明显。随着炒制时间的延长, 所有样品的焦香、木香和坚果香出现不同程度的增强, 在炒制5 min后表现出最强; 辛香呈降低趋势; 花香呈先减弱后增强趋势, 在炒制3 min后表现出最弱; 果香呈先增强后减弱趋势, 在炒制4 min后表现出最强。

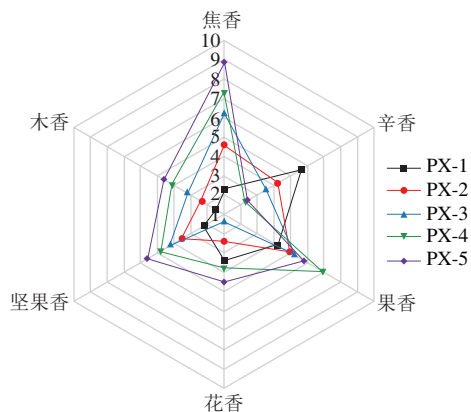
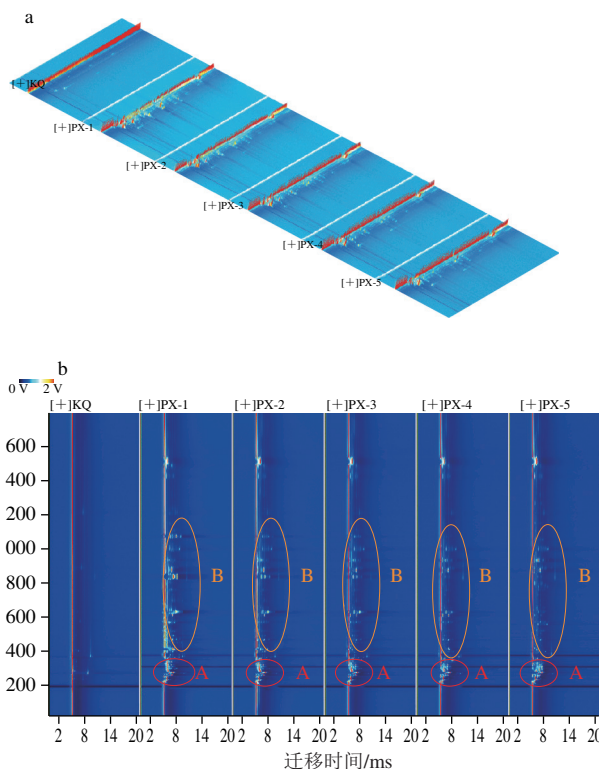


图1 郫县豆瓣酱感官评价雷达图

Fig. 1 Radar map of sensory evaluation of Pixian bean paste samples

2.2 不同炒制时间郫县豆瓣酱的香气化合物GC-IMS分析

如图2a所示, 图中反应离子峰 (reaction ion peak, RIP) 的每一个峰代表一种挥发性物质^[13]。随着炒制时间延长, 郫县豆瓣酱香气化合物浓度有明显变化。为进一步比较不同郫县豆瓣酱样品的差异, 结合二维图进行分析。图2b中, 整个光谱代表总的风味化合物, RIP右侧的点表示从样品中检测到的挥发性有机化合物。颜色表示单个化合物的信号强度。红色表示高强度, 蓝色表示低强度。颜色越暗表示强度越大^[14-15]。背景为蓝色, 有的化合物含有两个或多个斑点, 分别代表性质和浓度的不同的二聚体或三聚体^[16-17]。具体取决于挥发性成分浓度和性质。由图2b可知, 样品的香气化合物主要集中在区域A和B, A区域中部分化合物随着炒制时间的延长颜色加深, B区域中部分化合物随着炒制时间的延长颜色变浅。



图b中A区域为部分化合物颜色加深; B区域为部分化合物颜色变浅。

图2 不同炒制时间郫县豆瓣酱中香气化合物的GC-IMS三维图 (a) 和二维图 (b)

Fig. 2 GC-IMS 3D (a) and 2D (b) topographic spectra of flavor compounds in Pixian bean paste at different stir-frying times

2.3 不同炒制时间郫县豆瓣酱的香气化合物定性分析

采用GC-IMS内置的NIST数据库和IMS数据库, 根据保留指数、保留时间和迁移时间对郫县豆瓣酱炒制过程中挥发性风味物质定性分析。如表3所示, 可鉴定出挥发性成分共97种 (单体或者二聚体), 其中醛类18种、酮类17种、酯类22种、醇类10种、烷烃类5种、烯烃类5种、杂环类10种、醚类2种和其他化合物8种。

表3 郫县豆瓣酱香气物质鉴定结果

Table 3 Identification of aroma substances in Pixian bean paste samples

种类	编号	香气物质	分子式	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms	风味描述
	XQ-1	4-甲基苯甲醛	C ₉ H ₈ O	1629.9	1513.04	1.165 38	果香
	XQ-2	柠檬醛	C ₁₀ H ₁₆ O	1642.4	1536.324	1.054 9	柠檬香味
	XQ-3	(E)-2-庚烯醛	C ₇ H ₁₂ O	1354.1	998.746	1.253 83	青香、果香
	XQ-4	(E)-2-戊烯醛	C ₅ H ₈ O	1140.1	599.569	1.358 57	果香
	XQ-5	2-甲基-2-戊烯醛	C ₆ H ₁₀ O	1150.2	618.456	1.496 66	果香
	XQ-6	(E)-2-壬醛	C ₉ H ₁₆ O	1147.1	612.661	1.415 54	青香、果香
	XQ-7	5-甲基糠醛	C ₆ H ₈ O ₂	994.5	330.106	1.132 91	辛香、甜香、焦糖香
	XQ-8	5-甲基糠醛	C ₆ H ₈ O ₂	971	309.885	1.135 63	辛香、甜香、焦糖香
	XQ-9	异戊醛	C ₅ H ₁₀ O	964.2	304.002	1.195 33	苹果香气
	XQ-10	异戊醛	C ₅ H ₁₀ O	910.7	257.876	1.402 43	苹果香气
	XQ-11	正丁醛	C ₄ H ₈ O	900	248.67	1.112 21	

10.10%~15.80%和5.00%~7.10%之间,并且随着炒制时间的延长呈先降低后增加趋势。酮类物质主要来源于脂质氧化,属于不稳定的中间体,一般被还原成相应的醇,可以呈现花香味,主要的化合物有2,3-丁二酮和丙酮,其中2,3-丁二酮可提供奶油的香气^[20]。杂环类化合物在郫县豆瓣酱风味中起到主导作用,主要来源于美拉德反应^[21],主要化合物有吡啶、甲基吡嗪、2,5-二甲基呋喃、2,4,5-三甲基噻唑、2-乙基-5-甲基吡嗪和2-乙酰基吡咯等,其中2-乙酰基吡咯可提供土豆的香气,2,4,5-三甲基噻唑可提供坚果风味^[10]。另外,烷烃、烯烃、醚类和其他类化合物的相对含量分别为2.74%~4.13%、2.76%~4.84%、0.43%~2.88%和2.17%~4.71%,样品间无明显变化趋势。在烯烃中, γ -松油烯、 β -蒎烯、水芹烯和蒎烯均属于萜类化合物,可提供样品木香和柠檬香^[22]。烷烃在样品风味中阈值较大,对风味贡献较小。

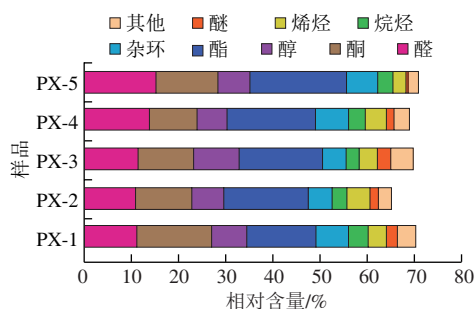
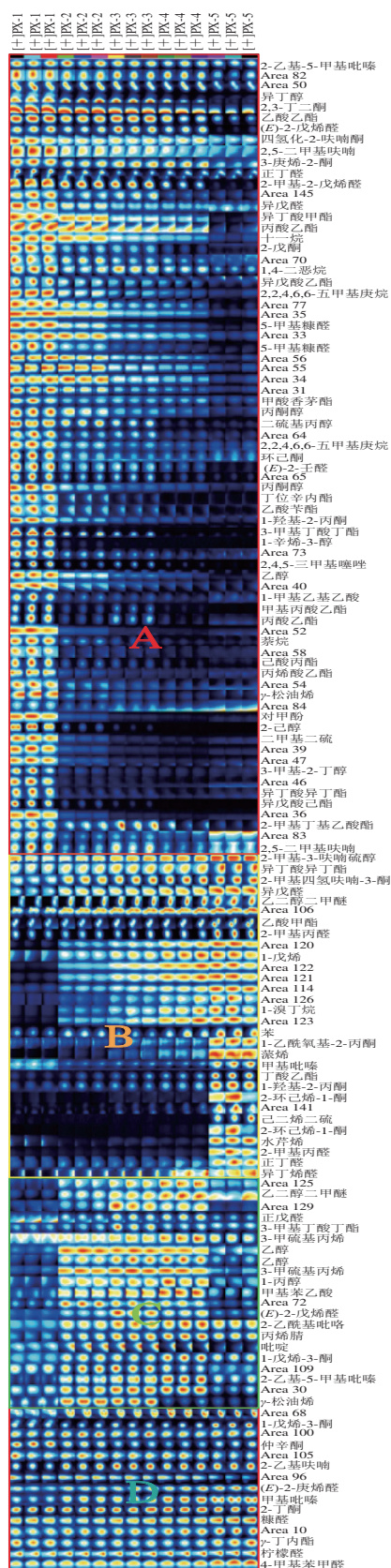


图3 郫县豆瓣酱香气物质相对含量

Fig. 3 Relative contents of aroma substances in Pixian bean paste samples

2.4 不同炒制时间郫县豆瓣酱的香气化合物指纹图谱

如图4所示,每个化合物的信号越亮,信号强度越强,而信号越暗,信号强度越弱^[23-25]。A区的香气化合物浓度在炒制1 min时最高,随着炒制时间的延长其浓度降低,特别是醛类、醇类、酮类、酯类物质和杂环类物质,如(E)-2-戊烯醛、2-甲基-2-戊烯醛、(E)-2-壬醛、5-甲基糠醛、异戊醛、1-辛烯-3-醇、2-己醇、3-甲基-2-丁醇、异丁醇、3-庚烯-2-酮、2-戊酮、异戊酸己酯、甲酸香茅酯、乙酸苜酯、异戊酸乙酯、异丁酸甲酯、丙酸乙酯、乙酸乙酯、2-乙基-5-甲基吡嗪、2,4,5-三甲基噻唑和对甲基苯酚。B区香气化合物的浓度随着炒制时间的延长而增加,特别是醛类、酮类、酯类、萜类物质,如2-甲基丙醛、异戊醛、3-甲基丁醛、2-丁酮、异丁酸异丁酯、丁酸乙酯、乙酸甲酯、蒎烯、水芹烯、己二烯二硫、甲基吡嗪和2,5-二甲基呋喃。C区香气化合物的浓度随着炒制时间的延长呈先增加后减小趋势,在炒制时间为4 min时最大,特别是 γ -松油烯、吡啶、乙醇、2-乙基-5-甲基吡嗪、2-乙酰基吡咯、(E)-2-戊烯醛和甲基苯乙酸。D区香气化合物的浓度随着炒制时间的延长而无明显变化,特别是对甲基苯甲醛、(E)-2-庚烯醛、糠醛、柠檬醛、仲辛酮、2-丁酮、 γ -丁内酯和甲基吡嗪。



红色信号越深,指示该物质含量相对越高。两个相同化合物分别是单体和二聚体。

图4 郫县豆瓣酱香气成分指纹谱图

Fig. 4 Fingerprint of aroma substances in Pixian bean paste

2.5 郫县豆瓣酱的聚类分析

为进一步分析不同炒制时间郫县豆瓣酱香气化合物的差异性,对GC-IMS鉴别出的香气化合物进行聚类分析。如图5所示,当欧式距离为13.8时,不同炒制时间的郫县豆瓣酱可分为3个聚类。第1类为炒制时间为1 min的郫县豆瓣酱,第2类为炒制时间为2~4 min的郫县豆瓣酱,第3类为炒制时间为5 min的郫县豆瓣酱。

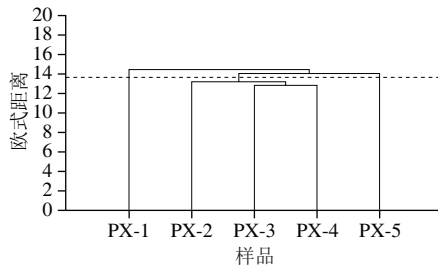


图5 郫县豆瓣酱聚类分析

Fig. 5 Clustering analysis of Pixian bean paste samples

2.6 不同炒制时间郫县豆瓣酱的香气化合物OPLS-DA

OPLS-DA是一种有监督的判别分析统计方法,能够对数据进行降维,实现复杂实验数据可视化及判别分析与预测^[26-27]。为进一步探究不同炒制时间郫县豆瓣酱香气化合物,以鉴别出的97种香气化合物为因变量,以不同炒制时间的样品为自变量,进行OPLS-DA。如图3a所示,采用 $R_x^2(\text{cum})$ 和 $R_y^2(\text{cum})$ 分别表示在X轴和Y轴上对变量的解释能力, $Q^2(\text{cum})$ 表示模型的预测能力^[10]。其中 $R_x^2(\text{cum})=0.849$, $R_y^2(\text{cum})=0.995$, $R_x^2(\text{cum})-R_y^2(\text{cum})<0.3$,表明该模型较为可靠,同

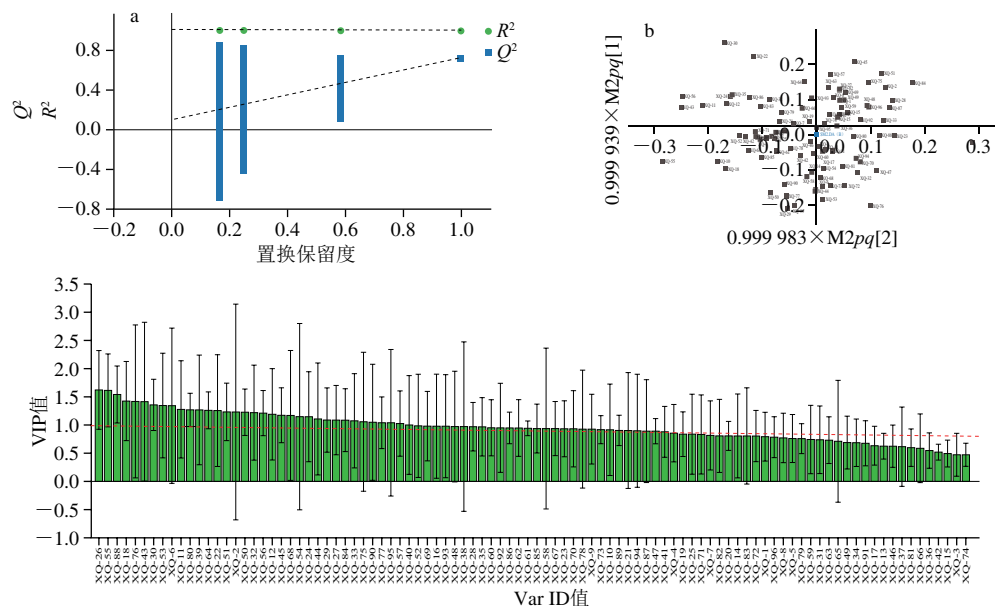
时, $Q^2(\text{cum})=0.548>0.5$,表明该模型具有一定的预测能力。

OPLS-DA因子载荷图表示香气化合物与不同炒制时间的郫县豆瓣酱样品相关性,即X值和Y值越靠近,其相关性越高^[28]。由图6b可知,(E)-2-庚烯醛、5-甲基糠醛、正丁醛、2-甲基四氢呋喃-3-酮、 γ -丁内酯、乙酸苄酯、异丁酸甲酯、3-甲基-2-丁醇、2,4,5-三甲基噻唑和己二烯二硫与所有样品相关性较高,表明该类化合物为炒制郫县豆瓣酱的特征性风味物质。

变量投影重要性(variable importance for the projection, VIP)可用于筛选出对郫县豆瓣酱呈味香气轮廓有重要影响的关键标记物^[28-29]。由图6c可知,34种香气化合物的VIP>1, VIP值越大,差异越显著。34种香气化合物主要有醛类5种、酮类8种、酯类11种、烷烃1种、烯炔类3种、醇类1种、杂环化合物2种、醚类1种和其他2种,如柠檬醛、(E)-2-壬醛、正丁醛、2-甲基丙醛、仲辛酮、2-庚烯-2-酮、2-戊酮、2-丁酮、3-甲基丁酸丁酯、丙烯酸乙酯、异丁酸异丁酯、乙酸乙酯、乙酸甲酯、乙酸异丙酯、丁酸乙酯、正丙醇、蒎烯、水芹烯、甲基吡嗪、2,4,5-三甲基噻唑、2-乙基-5-甲基吡嗪等。

2.7 郫县豆瓣酱感官评价和香气化合物的相关性分析

为研究感官评价属性与香气化合物之间的关系,采用Pearson相关系数对不同炒制时间郫县豆瓣酱的感官属性与VIP>1的香气化合物进行相关性分析^[30]。如图7所示,焦香、木香和坚果香与大部分香气化合物呈显著负相关,而与仲辛酮、乙酸丙酯、丙烯酸乙酯、异戊酸乙酯、乙酸乙酯、2,4,5-三甲基噻唑、2-乙基-5-甲基吡

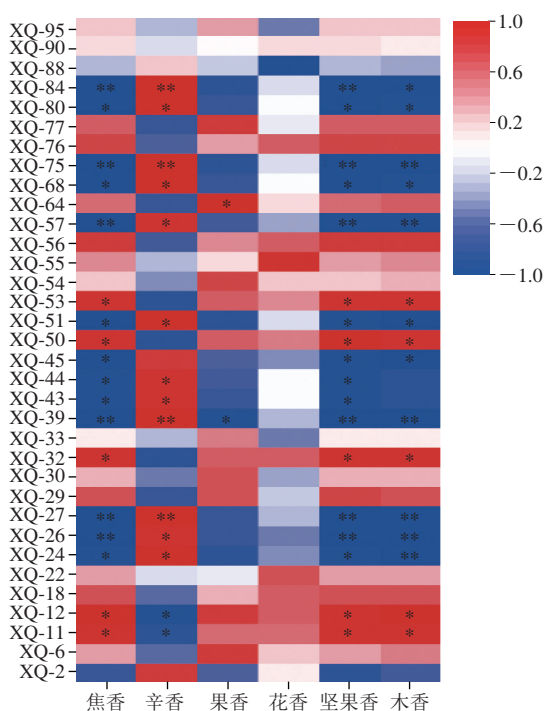


a. 置换检验结果; b. 因子载荷图; c. VIP; 图b、c中XQ是香气化合物, XQ后缀数字是香气化合物编号。图7同。

图6 不同炒制时间郫县豆瓣酱香气化合物的OPLS-DA

Fig. 6 OPLS-DA analysis of aroma substances in Pixian bean paste at different stir-frying time

嗪呈显著负相关 ($P < 0.05$), 且与3-庚烯-2-酮、2-戊酮、3-甲基丁酸丁酯、二硫基丙醇和蒎烯呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 而与正丁醛、2-甲基丙醛、过氧化乙酰丙酮、异丁酸异丁酯、乙酸甲酯呈显著正相关 ($P < 0.05$)。辛香与大部分香气化合物呈显著正相关, 与仲辛酮、3-庚烯-2-酮、乙酸丙酯、丙烯酸乙酯、乙酸乙酯、二硫基丙醇和2,4,5-三甲基噻唑呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与2-戊酮、3-甲基丁酸丁酯、二硫基丙醇、蒎烯和2-乙基-5-甲基吡嗪呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与正丁醛和2-甲基丙醛显著负相关 ($P < 0.05$)。果香与正丙醇呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与3-甲基丁酸丁酯呈显著负相关 ($P < 0.05$)。



红色和蓝色分别表示正和负相关; * 显著相关 ($P < 0.05$); ** 极显著相关 ($P < 0.01$)。

图7 感官评价和特征香气Pearson相关性

Fig. 7 Pearson correlation heatmap of sensory evaluation and characteristic aroma components

3 结论

采用描述性感官评价和GC-IMS对不同炒制时间郫县豆瓣酱的香气化合物进行分析。结果表明: 郫县豆瓣酱在炒制4 min后表现出最强的果香, 在炒制5 min后表现出最强的焦香、木香和坚果香, 郫县豆瓣酱的辛香随着炒制时间延长而减弱。由聚类分析可知, 郫县豆瓣酱可分为3个聚类, 其中炒制时间为1 min的郫县豆瓣酱为第1类, 炒制时间为2~4 min的郫县豆瓣酱为第2类, 炒制时间为5 min的郫县豆瓣酱为第3类。在郫县豆瓣中共

检测出97种香气化合物, 其中醛类18种、酮类17种、酯类22种、醇类10种、烷烃类5种、烯炔类5种、杂环类10种、醚类2种和其他化合物8种。由OPLS-DA筛选出34种标志性化合物, 主要有柠檬醛、(E)-2-壬醛、正丁醛、2-甲基丙醛、仲辛酮、2-庚烯-2-酮、2-戊酮、2-丁酮、3-甲基丁酸丁酯、丙烯酸乙酯、异丁酸异丁酯、乙酸乙酯、乙酸甲酯、乙酸异丙酯、丁酸乙酯、正丙醇、蒎烯、水芹烯、甲基吡嗪、2,4,5-三甲基噻唑、2-乙基-5-甲基吡嗪等。由Pearson相关性可知, 焦香、木香和坚果香与大部分香气化合物呈显著负相关, 辛香与大部分香气化合物呈显著正相关。本研究为郫县豆瓣酱的关键风味物质研究提供理论依据以及为相关研究提供方法借鉴。

参考文献:

- [1] 黄著, 彭熙敏, 刘超兰, 等. 郫县豆瓣挥发性香气成分剖析及其在陈酿过程中的变化研究[J]. 中国调味品, 2009, 34(3): 106-111.
- [2] 李治华, 王自鹏, 胡静, 等. 传统与商业郫县豆瓣酱挥发性成分的比较分析[J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 268-273. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.04.041.
- [3] 张玉玉, 孙宝国, 冯军, 等. 不同发酵时间的郫县豆瓣酱挥发性成分分析[J]. 食品科学, 2010, 31(4): 166-170. DOI:10.7506/spkx1002-6300-201004037.
- [4] 贾洪峰, 何江红, 袁新宇, 等. 电子鼻在不同豆瓣产品识别中的应用[J]. 食品科学, 2011, 32(12): 175-182. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201112039.
- [5] 刘平, 王雪, 梅向琴, 等. 郫县豆瓣智能后发酵工艺优化及品质分析[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 166-176. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190906-086.
- [6] 陈丽兰, 杨心怡, 乔明锋, 等. 基于GC-IMS、GC-MS和OAV法分析花椒粉颗粒度对花椒油挥发性香气成分的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 301-310. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022050344.
- [7] ZHANG X X, DAI Z, FAN X J, et al. A study on volatiles metabolites screening by HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS for discrimination and characterization of white and yellowed rice[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(2): 496-504. DOI:10.1002/cche. 10264.
- [8] CHEN Y, LI P, LIAO L Y, et al. Characteristic fingerprints and volatile flavor compound variations in Liuyang Douchi during fermentation via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130055. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130055.
- [9] CHEN Y P, CAI D D, LI W Q, et al. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) and ultrafast gas chromatography electronic-nose (uf-GC E-nose) to distinguish four Chinese freshwater fishes at both raw and cooked status[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 46(6): 13840. DOI:10.1111/jfbc.13840.
- [10] 倪瑞洁, 詹萍, 田洪磊. 基于GC-IMS结合多元统计方法分析炸制时间对花椒调味油挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 279-286. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210429-417.
- [11] 卢云浩, 何强. 郫县豆瓣特征挥发性物质演变及其香型特性研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(4): 326-334. DOI:10.16429/j.1009-7848.2021.04.039.
- [12] FENG Y Z, CAI Y, SUG W, et al. Evaluation of aroma differences between high-salt liquid-state fermentation and low-salt solid-state fermentation soya sauces from China[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 126-134. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.07.072.

- [13] LI M Q, YANG R W, ZHANG H, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* Singer[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 32-39. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.03.124.
- [14] MICHAEL F, SEBASTIAN W, JANOS V, et al. Evolution of volatile flavor compounds during roasting of nut seeds by thermogravimetry coupled to fast-cycling optical heating gas chromatography-mass spectrometry with electron and photoionization[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10: 49-62. DOI:10.1007/s12161-016-0549-8.
- [15] FAN X J, JIAO X, LIU J H, et al. Characterizing the volatile compounds of different sorghum cultivars by both GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2020, 140(4): 109-975. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109975.
- [16] LI X F, ZHU J C, LI C, et al. Evolution of volatile compounds and spoilage bacteria in smoked bacon during refrigeration using an E-nose and GC-MS combined with partial least squares regression[J]. Molecules, 2018, 23(12): 3286. DOI:10.3390/molecules23123286.
- [17] 金文刚, 别玲玲, 裴金金, 等. 基于GC-IMS技术分析炖煮过程中大鲢头汤挥发性风味物质[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 307-313. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021030328.
- [18] 林洪斌, 毕小朋, 方佳兴, 等. 郫县豆瓣挥发性物质变化规律及特征香气物质形成机理[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 259-266. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190104-050.
- [19] 王雪梅, 孙文佳, 李亚隆, 等. 不同产地鲜辣椒发酵郫县豆瓣的品质分析[J]. 食品科学, 2020, 41(10): 213-221. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190610-102.
- [20] 陈丽兰, 陈祖明, 袁灿. 郫县豆瓣炒制后挥发性风味物质的分析[J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 177-180. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2020.04.037.
- [21] 罗静, 赵红宇, 徐炜楨, 等. 郫县豆瓣后发酵过程中挥发性呈香物质测定及主成分分析[J]. 食品科学, 2018, 39(18): 209-216. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201818033.
- [22] 谭馨怡, 卢云浩, 任尧, 等. 不同陈酿时间下郫县豆瓣挥发性风味化合物及标志性风味成分解析[J]. 中国调味品, 2021, 46(10): 43-46. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2021.10.008.
- [23] 金文刚, 刘俊霞, 赵萍, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱分析洋县不同色泽糙米蒸煮后挥发性风味物质差异[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 258-264. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210927-324.
- [24] 尹含靓, 肖何, 邓高文, 等. 基于GC-IMS技术分析不同香辛料水煮液的风味物质组成差异[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 278-284. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020110117.
- [25] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126-158. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.126158.
- [26] 赵天娇, 王鹏, 徐幸莲. 消费者喜好度与市售冷鲜鸡品质关系的偏最小二乘回归分析[J]. 南京农业大学学报, 2020, 43(5): 950-958. DOI:1000-2030(2020)05-0950-09.
- [27] 冯瑶, 樊一鸣, 任洪利, 等. 炒制时间对不同复配比例黑皮鸡枞菌平菇复合酱风味的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 275-282. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220513-165.
- [28] 张蕾蕾, 吴剑荣, 张洪涛, 等. 基于GC-MS结合化学计量学方法鉴定四川郫县豆瓣酱[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 268-276. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029667.
- [29] LIU D, QI Y, ZHAO N, et al. Multivariate analysis reveals effect of glutathione-enriched inactive dry yeast on amino acids and volatile components of kiwi wine[J]. Food Chemistry, 2020, 329: 127086. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127086.
- [30] 雷文平, 周辉, 周杏荣, 等. SPME-GC-MS结合组学技术分析发酵椰奶特征风味与风味物质相关性[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 42-47. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2019.02.009.