

酸浆豆腐冷藏期间的品质变化分析

黄宝玲, 王洁, 廖振林, 王丽, 钟青萍, 方祥

(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘要: 为探究酸浆豆腐在低温贮藏条件下品质及风味成分变化规律, 测定分析了4℃冷藏期间酸浆豆腐的pH值、感官特性、质构特性和主要风味成分含量变化情况。结果表明, 冷藏期间, 酸浆豆腐pH值保持相对稳定, 从第1 d的 6.03 ± 0.09 变为第7 d的 5.73 ± 0.02 , 但感官评分呈逐渐下降趋势; 硬度和咀嚼性在前3 d呈显著增加趋势 ($p < 0.05$), 在第3 d达到峰值, 分别为8.15 N和6.28 N, 随后开始下降。通过顶空气相离子迁移谱技术(HS-GC-IMS)共定性出30种挥发性组分, 其中冷藏初期以酯、醇类化合物为主, 冷藏中期以醛、酮、醇与酸类化合物为主, 冷藏后期以醛类、醇、含硫类化合物为主。随着冷藏期间的延长, 酸浆豆腐中乙酸乙酯与乙酸丙酯等香气组分含量降低, 己醛、1-辛烯-3-醇与二甲基三硫等不良香气组分含量增加。因此, 酸浆豆腐质构和风味成分的变化是导致感官分值下降的主要原因, 结合酸浆豆腐的品质与风味分析, 在4℃条件下, 未添加防腐剂的酸浆豆腐货架期为5 d, 货架期内酸浆豆腐食用安全且保持良好的口感风味。

关键词: 酸浆豆腐; 冷藏; 品质

文章编号: 1673-9078(2020)07-263-270

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.7.1284

Changes in the Quality of Acid Whey Tofu during Refrigerated Storage

HUANG Bao-ling, WANG Jie, LIAO Zhen-lin, WANG Li, ZHONG Qing-ping, FANG Xiang

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To investigate the changes of quality and flavor components of acid whey tofu during refrigerated storage at 4℃, the pH value, sensory characteristics, texture characteristics and main flavor compounds of the acid whey tofu were determined. The results showed that during the refrigerated storage, the pH value of acid whey tofu remained relatively stable (from 6.03 ± 0.09 on the 1st day to 5.73 ± 0.02 on the 7th day), but the sensory score decreased gradually during the refrigerated storage. The hardness and chewability increased significantly in the first three days ($p < 0.05$), reached the peak values (8.15 N and 6.28 N) on the 3rd day, and then began to decline. A total of 30 volatile components were identified by HS-GC-IMS. During the initial period of the refrigerated storage, ester and alcohol compounds were the main compounds, however, aldehydes, ketones, alcohols and acids became the major compounds during the middle period of the storage. During the late period of the storage, aldehydes, alcohols and sulfur-containing compounds became dominant. With the extension of the cold storage, the contents of some aroma components such as ethyl acetate and propyl acetate in acid whey tofu decreased, while the contents of some undesirable aroma components such as hexanal, 1-octene-3-ol and dimethyl trisulfide increased. Therefore, the changes in texture and flavor components of the acid whey tofu were the main causes of the decline in sensory scores. These results along with those obtained from the analyses of the quality and flavor of the acid whey tofu revealed that at 4℃, the shelf life of the acid whey tofu without preservatives was 5 d, and the acid whey tofu within the shelf life is safe to eat and has a good mouthfeel and flavor.

Key word: acid whey tofu; refrigeration; quality

引文格式:

黄宝玲, 王洁, 廖振林, 等. 酸浆豆腐冷藏期间的品质变化分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 263-270

HUANG Bao-ling, WANG Jie, LIAO Zhen-lin, et al. Changes in the quality of acid whey tofu during refrigerated storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(7): 263-270

收稿日期: 2019-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671855, 31771940); 广东省重点领域研发计划项目(2018B020205002); 广东省应用型科技研发专项(2015B020230010)

作者简介: 黄宝玲(1995-), 女, 硕士, 研究方向: 食品科学

通讯作者: 方祥(1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术

酸浆豆腐是湖南、云南和广东等一些客家地区的传统食品,是通过将豆腐压榨过程中产生的黄浆水经自然发酵后成为酸浆,代替卤水或石膏作为凝固剂制作的豆腐。利用酸浆作为豆腐的天然凝固剂,不仅可有效将豆腐副产物变废为宝,提高黄浆水的附加值,而且可以避免引入传统凝固剂中的重金属离子,最终得到质地细腻、豆香味浓郁且含盐量低的酸浆豆腐^[1]。然而,自然发酵法得到的酸浆菌群结构复杂难以控制,导致酸浆豆腐生产过程中稳定性差且存在潜在的安全隐患,难以工业化生产^[2,3]。因此,采用乳酸菌发酵黄浆水可得到绿色安全、产酸量稳定的酸浆,并且通过制定标准化的酸浆豆腐生产工艺,将有利于传统酸浆豆腐食品产业化生产。

实验室在前期研究过程中,开发的酸浆豆腐具有良好的感官风味和质构特性,但对其风味成分构成和贮藏期变化知之甚少。本研究以复合乳酸菌发酵黄浆水制作的酸浆豆腐为研究对象,对酸浆豆腐在4℃贮藏期间的pH值、感官评分、质构特性以及主要挥发性风味物质进行测定分析,旨在为酸浆豆腐的保质期和后续防腐保鲜奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器设备

酸浆豆腐,实验室自制。

PB-10pH计,德国赛多利斯;EZ-X质构仪,日本岛津;1H1-00053型气相离子迁移谱联用仪,德国G.A.S公司;内置CTC-PAL多功能气相色谱自动进样器,瑞士CTC Analytics AG公司;FS-SE-54-CB-1型色谱柱(15 m×0.53 mm×1 μm),德国CS-Chromatographie Service GmbH公司。

1.2 方法

1.2.1 酸浆凝固剂及酸浆豆腐的制作工艺

酸浆凝固剂的制作:根据前期试验结果得出黄浆水的最佳发酵工艺条件,在300 mL黄浆水中加入12.6 g蔗糖和17.4 g乳清粉,水浴巴氏杀菌(60℃~80℃)20 min,冷却到40℃~50℃后接种0.03 g由瑞士乳杆菌、植物乳杆菌以及干酪乳杆菌组成的复合乳酸菌发酵剂,45℃静置培养48 h得到酸浆凝固剂(pH值为3.3~3.5)。

酸浆豆腐的制作:参照叶青^[4]酸浆豆腐的制作方法。

1.2.2 酸浆豆腐冷藏期间品质变化分析

1.2.2.1 pH值的测定

取50 g豆腐于研钵中研磨2 min,pH计测量渗液,各作3个平行。

表1 酸浆豆腐的感官评定表

Table 1 Sensory evaluation table of acid whey tofu

评定指标	评定标准	分值
色泽(20分)	乳白色,均一,有光泽。	16~20
	白或者偏黄色,均一。	11~15
	深黄色,无光泽。	1~10
气味(20分)	具有浓郁的豆腐香味。	16~20
	有豆香味,但略有酸味。	11~15
	有豆香味,但有较多酸味。	6~10
	有明显异味。	1~5
组织状态(30分)	质地细腻、有弹性、表面不粘。	26~30
	质地较细腻、软硬适中、表面不粘。	21~25
	质地欠细腻、偏硬、表面略粘。	11~20
	质地差、弹性差、表面粘。	1~10
口感(15分)	细腻爽滑,无酸味。	11~15
	较爽滑,稍有酸味。	6~10
	口感粗糙,酸味过重。	1~5
断面结构(15分)	断面整齐光滑,无孔。	11~15
	断面较整齐,表面较光滑,有少量孔。	6~10
	断面不整齐,表面粗糙,有较多孔洞。	1~5

1.2.2.2 质构变化分析

采用全质构分析,测定参数如下:选择P36探头,测试前、中、后的速度1 mm/s;触发力0.01 N,测试距离10 mm;两次压缩时间间隔0.5 s。约取直径30 mm,高30 mm豆腐于探头中心位置下方测试,作3平行取平均值。

1.2.2.3 感官评定

选取7名感官评定人员,按感官评分表进行感官评价(表1),最终感官得分为舍去最高值与最低值后的均值分数。

1.2.3 酸浆豆腐冷藏期间主要风味成分变化分析

采用HS-GC-IMS技术分析酸浆豆腐在4℃冷藏期间风味物质种类和含量的变化。

顶空进样条件:取2 g豆腐于20 mL顶空瓶,孵化转速500 r/min,孵化温度60℃,孵育15 min,进样500 μL,样针温度65℃;载气为高纯氮气。

气相色谱条件:色谱柱温60℃,分析20 min。起始载气流速2 mL/min,保持2 min。2~20 min线性上升至100 mL/min。

离子迁移谱条件:6.5 V Tritium离子源;正离子化模式;漂移管长度9.8 cm;漂移气流速150 mL/min;漂移管温度45℃;平均次数12;电场强度500 V/cm;网格脉冲宽度100 μs;触发延迟时间100 ms;采样频率150 kHz;重复率30 ms。

1.2.4 数据统计与分析

采用Excel 2013进行数据统计,SPSS 22进行ANOVA单因素方差分析以及Duncan多项极差检验分析。数据折线图采用GraphPad Prism 5.0制作。

数据分析:采用GC-IMS仪器配套的分析软件分析数据。其中,Laboratory Analytical Viewer用于查看分析谱图;GC×IMS Library Search应用软件内置的NIST数据库和IMS数据库可对物质进行定性分析;Reporter插件程序用于直接对比样品之间的谱图差异;Gallery插件程序用于构建挥发性有机物的指纹图谱。

2 结果与分析

2.1 酸浆豆腐冷藏期间品质变化分析

2.1.1 pH值与感官评定变化分析

由图1可知,酸浆豆腐在4℃冷藏7 d后,pH值从6.03降低至5.73 ($p>0.05$),保持相对稳定。感官得分呈逐渐降低的趋势,冷藏前酸浆豆腐口感风味良好,外观白色有光泽,呈现浓郁的豆香味,感官得分为90分。第5 d时酸浆豆腐颜色变黄,渗出液开始变浑浊,豆腐香味变淡,且豆腐表面开始变粘,感官得分显著

降低 ($p<0.05$)。到第6 d时,酸浆豆腐表现出明显变色现象,表面粘,且有淡淡的酸臭味,不宜再食用。吴丽樱^[5]研究了三种不同品牌豆腐在4℃下贮藏,发现贮藏6 d后,豆腐中的菌落总数达到4.39~9.34 CFU/g,感官拒绝的时间约为3.5~6.5 d,原料、加工过程或贮藏环境对豆腐的贮藏期影响较大。

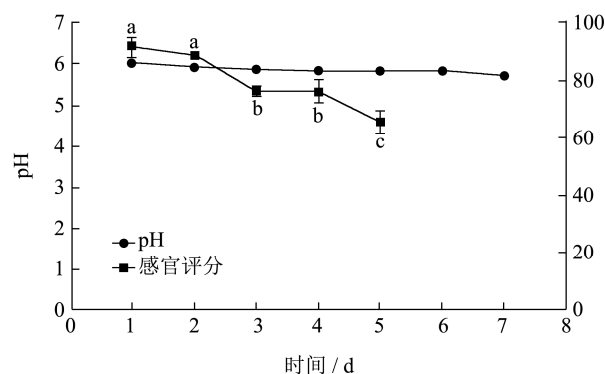
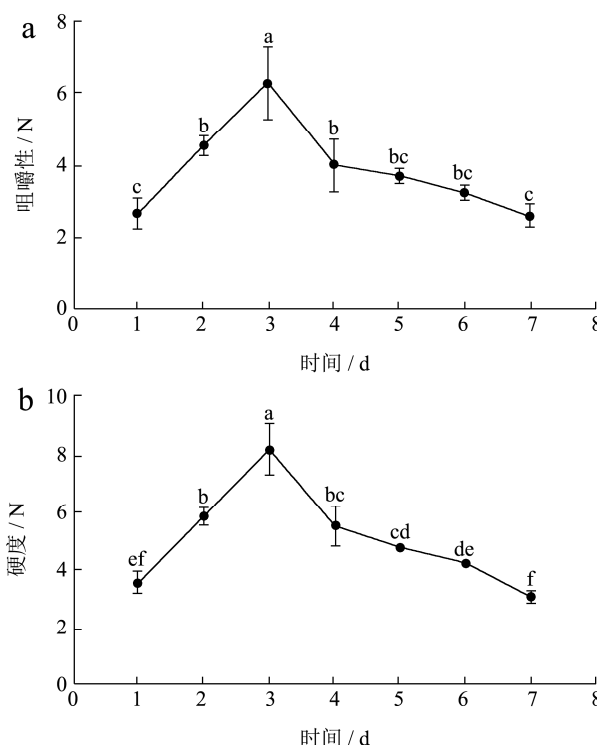


图1 冷藏期间酸浆豆腐的pH值变化与感官评分

Fig.1 pH value and sensory score of acid whey tofu during refrigerated storage

2.1.2 质构特性变化分析

由图2可知,4℃时,不同冷藏时间的酸浆豆腐硬度与咀嚼性特性均存在显著差异 ($p<0.05$),且二者变化趋势相似,在第3 d时达到最大值,分别为8.15 N和6.28 N,随后开始下降,表现出豆腐质地变软。这可能是因为初期冷冻时大豆蛋白发生不可逆的冻结变性,破坏了水-蛋白质结合的状态,转变成蛋白质与蛋白质之间的作用,导致豆腐的硬度与咀嚼性等质构特性增强^[6]。



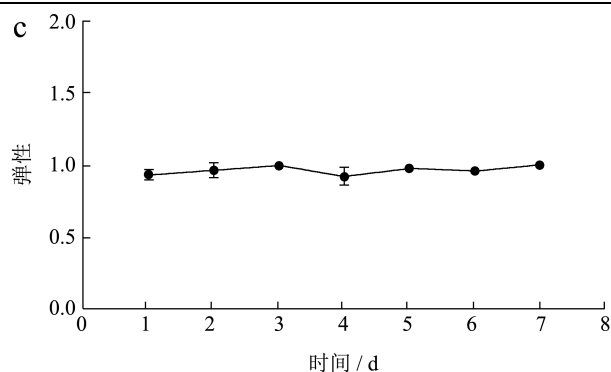


图2 冷藏期间酸浆豆腐的硬度(a)、咀嚼性(b)以及弹性(c)变化图

Fig.2 change of hardness (a), chewability (b) and elasticity (c) of acid whey tofu during refrigerated storage

注: 小写字母不同, 表示各组间差异显著 ($p < 0.05$)。

赵贵丽等^[7,8]研究表明, 在4℃贮藏温度下, 乳酸菌和芽孢杆菌等腐败微生物会随着贮藏时间延长逐渐增加, 产生蛋白酶导致豆腐中蛋白分解, 可能是豆腐质构被破坏, 咀嚼性和硬度降低的主要原因。在4℃冷藏下, 酸浆豆腐的弹性在冷藏1~7 d无显著变化 ($p > 0.05$), 维持良好的弹性。郑玉玺^[9]的研究发现, 内酯豆腐在4℃贮存条件下硬度也呈现先增大后减小趋势, 与酸浆豆腐不同的是, 内酯豆腐的咀嚼性与弹性均呈逐渐降低趋势。这说明无论是酸浆豆腐还是内酯豆腐, 由于其营养丰富, 贮藏过程中都会受到腐败微生物的污染, 导致质构特性发生变化。

2.2 主要风味成分变化分析

酸浆豆腐在冷藏第1~2 d时, 感官评分无显著差异, 酸浆豆腐仍保持良好的风味。本研究采用HS-GC-IMS测试酸浆豆腐冷藏第3~7 d的风味变化情况, 分析导致酸浆豆腐风味变化的物质基础。

2.2.1 不同冷藏时间酸浆豆腐的 HS-GC-IMS 分析

GC-IMS谱图可直观看出不同冷藏时间酸浆豆腐挥发性组分的差异, 主要表现在离子峰的位置、数量与强度上。酸浆豆腐中挥发性组分的种类与浓度随着冷藏时间的延长发生变化, 如图3B绿色圆圈的同一位置上, 第7 d出现新的斑点, 说明酸浆豆腐在第7 d有新的挥发性组分产生。这可能是因为酸浆豆腐中脂肪的自动氧化反应不会因为低温停止, 而是缓慢持续地进行链式反应, 自由基之间相互碰撞, 产生的氢过氧化物裂解成酸、酮、醛类等小分子挥发性有机物^[10]。同时, 蛋白质在微生物的作用下亦会发生氧化反应, 产生挥发性有机物, 改变原有风味。因此可通过挥发性组分的种类及其浓度变化来判断酸浆豆腐风味变化程

度。

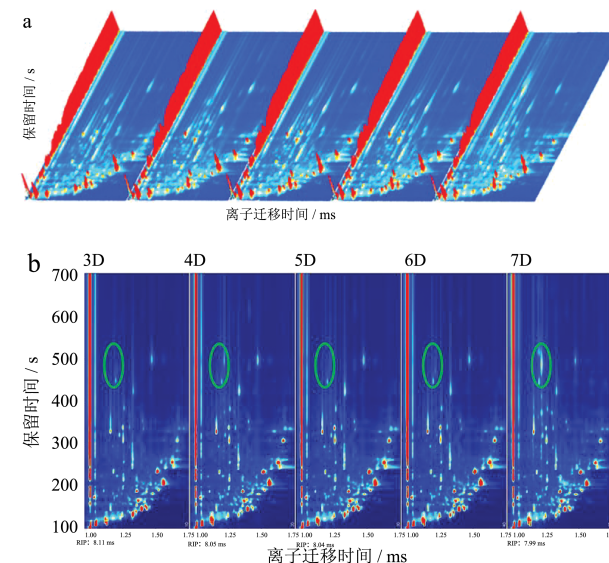


图3 冷藏期间酸浆豆腐挥发性组分的三维谱图(a)和HS-GC-IMS谱图(b)比较

Fig.3 Comparison of 3D HS-GC-IMS spectra of acid whey tofu during refrigerated storage

注: 图3a是LAV分析软件制作的三维谱图, 纵坐标是气相色谱的保留时间, 横坐标是离子迁移时间, 第三维坐标表示各挥发性组分在离子迁移谱中的离子峰强度。图3b是各挥发性组分GC-IMS谱图的附视图。红色竖线是反应离子峰(RIP峰), RIP两侧的斑点表示各挥发性组分, 斑点颜色越深, 组分浓度越大。

2.2.2 酸浆豆腐风味物质定性

不同冷藏时间酸浆豆腐中的挥发性组分可通过HS-GC-IMS技术得到很好的分离。根据GalleryPlot插件选取具有明显变化规律的挥发性组分子峰(图4)。

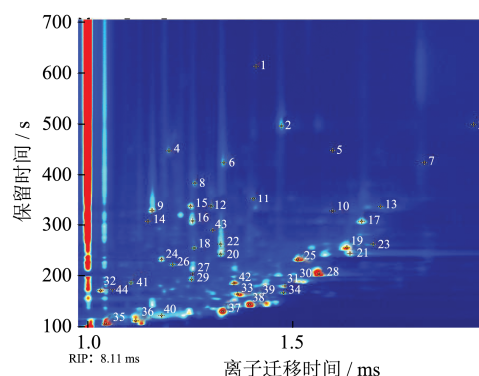


图4 酸浆豆腐挥发性组分GC-IMS谱图

Fig.4 GC-IMS spectrum of acid whey tofu

以正酮 C4~C9 为外标参考计算各组分的保留指数, 基于各组分的保留时间与离子迁移时间进行定性分析。从挥发性化合物组分的种类来看, 共定性出30种挥发性物质(表2), 醛类化合物种类(10

种)最多,其次为醇类(7种)与酮类(5种),另外还有3种酸类、3种酯类、2种呋喃类以及1种含硫类化合物。而贺云^[1]采用植物乳杆菌和副干酪乳杆菌发酵酸浆制作的酸浆豆腐发现21种风味物质,其中酯类

化合物(5种),其次为酮类(4种)与醇类(3种)。可见本研究的酸浆豆腐风味物质种类更丰富,说明调节菌种和发酵工艺可以获得不同风味的酸浆豆腐。

表2 酸浆豆腐中部分特征峰对应的化合物

Table 2 Compound names corresponding to some characteristic peaks of Acid whey tofu

编号	化合物类型	化合物名称	保留时间/s	迁移时间/ms	保留指数
1	酸类	辛酸	612.411	1.4123	1189.2
26		2-甲基丁酸	221.02	1.2083	838.1
41、42		丙酸	185.266	1.1068	760.1
12、13	酮类	3-辛酮	335.807	1.303	997.5
18、19		2-庚酮	253.691	1.2612	897.7
33		2-戊酮	163.06	1.3671	702.9
36		丙酮	110.804	1.1187	494.1
44		3-羟基-2-丁酮	172.263	1.0616	728.2
2、3	醛类	壬醛	495.557	1.4739	1111.8
6、7		反-2-辛烯醛	422.884	1.3336	1063.4
8		苯乙醛	382.905	1.2632	1035.2
11		辛醛	351.141	1.4053	1010.5
14		苯甲醛	306.233	1.1476	968.3
16、17		反-2-庚烯醛	306.781	1.2579	968.9
22、23		庚醛	261.359	1.3255	909.9
27、28		己醛	202.344	1.2588	798.7
38		异戊醛	142.595	1.3963	631.3
39	酯类	戊醛	158.572	1.4199	689.4
4、5		苯甲酸甲酯	446.434	1.1994	1079.3
34		乙酸丙酯	165.27	1.4794	709.3
37	醇类	乙酸乙酯	129.064	1.3315	573.4
9、10		1-辛烯-3-醇	327.044	1.1583	989.4
20、21		正己醇	241.69	1.3255	877.2
24、25		反-2-己烯醇	231.355	1.1813	858.3
29、30		1-戊醇	191.318	1.2549	774.1
31		2-甲基丁醇	178.717	1.483	744.4
35		乙醇	104.12	1.0451	465.2
40	呋喃类	异丙醇	120.412	1.1819	535.9
15		2-正戊基呋喃	335.807	1.2526	997.5
32	含硫类	2,5-二甲基呋喃	169.941	1.0327	722.1
43		二甲基三硫	288.512	1.3061	947.7

注: 编号3、5、7、10、13、17、19、21、23、25、28、30、42为二聚体, 文中编号表述方式: (编号#)。

2.2.3 不同冷藏时间酸浆豆腐挥发性组分变化分析

PCA 分析可通过可视化的二维散点图反映样本的原始特征, 并且以第一主成分区分为主。由图 5 可知, 不同冷藏时间酸浆豆腐风味在第一主成分方向上表现出分离趋势。从椭圆的距离来看, 第 3 d 与第 4 d

距离较远, 表示第 3 d 与第 4 d 之间香气特征差异较大, 酸浆豆腐的挥发性组分在种类、含量上发生较大变化。而第 5 d 与第 6 d 的距离较近, 表示二者之间香气特征可能较为相似。随着冷藏时间的延长, 第 7 d 与第 3 d 在第一主成分上的距离缩短, 二者在第二主成分方向有差异, 这与冷藏期间酸浆豆腐大部分风味物质先增

加后减少的趋势有关。总的来说,不同冷藏时间使酸浆豆腐的香气成分表现出差异。

图6可直观看出,酸浆豆腐在相同冷藏时间的挥发性组分浓度差异小,组内相似度高,而不同冷藏时间的挥发性组分浓度差异大,组间相似度低。不同的挥发性组分有明显不同的风味特征。冷藏初期,酸浆豆腐在第3 d的挥发性组分以酯、醇类化合物为主,如乙酸乙酯(37[#])和异丙醇(40[#])等,此时酯类化合物浓度高,酸浆豆腐维持良好的风味,具有浓郁的豆香味;酸浆豆腐贮藏过程中发生脂肪和蛋白质自动氧化反应,导致冷藏中期酯类化合物含量降低,酮、醛类等化合物含量升高^[12],酸浆豆腐豆香味变淡,表现出来在第4~5 d的挥发性组分以酮、醛、醇与酸类化合物为主,如庚醛(22[#])、反-2-己烯醇(24[#])、2-庚酮(18[#])与2-甲基丁酸(26[#])等。冷藏后期,脂肪和蛋白质发生自动氧化反应的同时,酸浆豆腐在污

染微生物代谢作用下生成不良气味物质^[13],酸浆豆腐在第6~7 d的挥发性组分以醛、醇与含硫类化合物为主,如苯甲醛(14[#])与二甲基三硫(43[#])等,使酸浆豆腐产生异味。

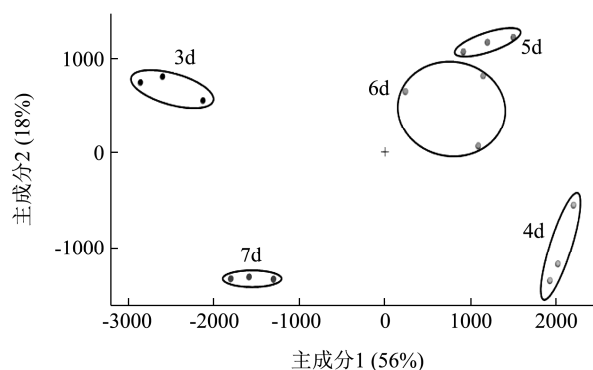


图5 不同冷藏时间酸浆豆腐的PCA分析

Fig.5 PCA of Acid whey tofu at different storage times

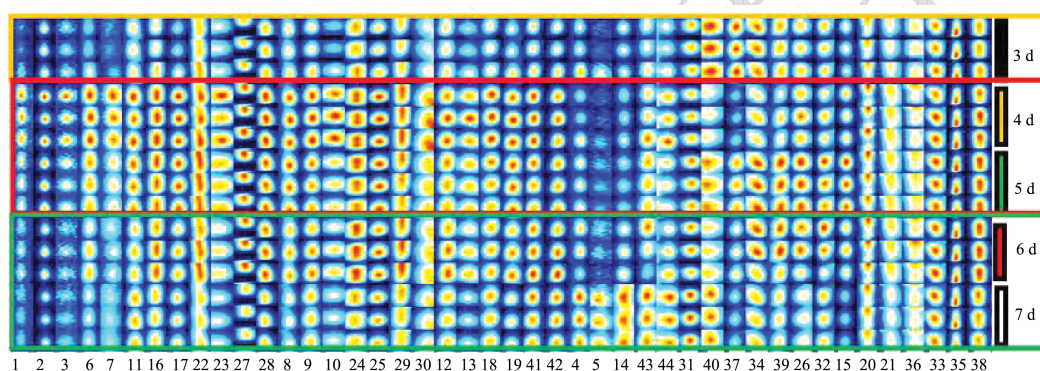


图6 不同冷藏时间的酸浆豆腐风味物质的特征峰总览图

Fig.6 Overview of characteristic peaks of Acid whey tofu during refrigerated storage

注:挥发性组分编号参见表2。

酯类化合物是以氨基酸、糖和脂质为生物合成前体,通过酯化反应生成的芳香类物质^[14],使豆腐呈现出果味、芳香味与淡香味^[15],是酸浆豆腐主要的风味物质。贮藏期间共检出酯类物质有3种,分别为乙酸乙酯(37[#])、乙酸丙酯(34[#])和苯甲酸甲酯(4[#]、5[#])其中前两种物质含量较为丰富,冷藏期间这两种组分均呈逐渐减少趋势。冷藏第5 d时,乙酸乙酯和乙酸丙酯含量具有短暂增加的现象,可能是由于此段时间酯化反应活动较强所致,但随着冷藏时间的延长,酯类化合物被水解生成的酸和醇类物质,酯类化合物含量进一步降低,导致酸浆豆腐豆香味变淡,感官得分下降。

醇类化合物是酸浆豆腐冷藏期间对风味具有重要贡献,主要来源于乳糖代谢、氨基酸代谢、甲基酮还原等途径^[16]。酸浆豆腐贮藏期间共检出醇类物质有6种,其中乙醇(35[#])和异丙醇(40[#])是酸浆豆腐的主要风味物质,异丙醇在初期含量较高,贮藏期间含

量逐渐降低,可能与参与酯化反应有关,但后期含量略有升高,可能是由于后期酯类物质水解导致;乙醇在贮藏期间含量变化较小。1-辛烯-3-醇(9[#])导致豆腐出现蘑菇、油腻等令人不愉快的气味。冷藏初期,1-辛烯-3-醇含量较低,对酸浆豆腐风味影响较小,随着冷藏时间的延长,1-辛烯-3-醇含量呈现先增大后减少的趋势。

醛类化合物是由脂肪酸氧化或氨基酸代谢产生的中间产物。酸浆豆腐贮藏期间共检出10种醛类物质。庚醛(22[#])是酸浆豆腐的主要风味物质,具有迷人的脂肪香味^[17]。庚醛在冷藏期间含量逐渐增加,随后降低。其含量变化与反-2-辛烯醛(6[#]、7[#])、己醛(27[#]、28[#])相似。反-2-辛烯醛与乙醛是豆腐产生青草味、豆腥味等不良气味的物质^[18,19]。二者在冷藏初期含量较少,随着冷藏时间延长含量逐渐增加,但后期含量再次减少,这可能是由于醛类化合物多为不稳定的中间体化合物,化学性质活泼,在冷藏后期容易被进一

步还原成相应的醇类、酸类等物质,最终降低醛类物质含量。

酮类化合物主要来源于酸浆豆腐加工过程中的美拉德反应或氨基酸分解^[20]。酸浆豆腐贮藏期共检出5种酮类物质,2-戊酮(33[#])是豆腐中主要的风味物质,被认为是发酵乳制品中奶油香气的重要贡献成分^[21],在贮藏期其含量变化不大。其它4种酮类物质在贮藏初期含量均较低,但随着贮藏时间延长,3-辛酮(12[#]、13[#])、2-庚酮(18[#])和3-羟基-2-丁酮(44[#])含量逐渐增加,贮藏5 d后这些酮类化合物含量又再次降低。其中2-庚酮是冷藏期间含量较为丰富的酮类化合物,被认为是蓝纹奶酪的典型气味物质,具有霉腐味。

酸类化合物主要来源于脂肪水解、蛋白质降解和乳糖发酵^[22],这类化合物本身既是风味化合物,又可作为其他风味物质(如酯类、醛类)的前体物质,因而对酸浆豆腐的风味具有重要贡献。冷藏期间检测到酸浆豆腐中的酸类化合物共有3种,分别为丙酸(41[#])、辛酸(1[#])和2-甲基丁酸(26[#])。冷藏前期3种酸类物质含量较低,贮藏4 d后3种酸类物质明显增高,此后丙酸含量保持稳定,但辛酸含量再次逐渐降低,而2-甲基丁酸含量在第5 d达到最高,此后开始逐步降低。酸类物质的积累一方面可能是由于贮藏期腐败微生物代谢产酸,另一部分则可能是由于酯类物质水解产生,前期酯化反应过程中,酸类物质可作为底物导致豆腐中酯类物质含量升高,有利于酸浆豆腐的品质形成,但贮藏后期当酸浆豆腐中酸含量超过一定阈值时,则会产生一种类似于酸败、肥皂味,导致酸浆豆腐的感官品质下降。

含硫类化合物主要以氨基酸为前体的酶促反应转化而来^[23]。冷藏期间仅检测到二甲基三硫(43[#]),它是臭豆腐典型的风味成分,常具有奶臭味、大蒜味和硫磺味^[24]。冷藏初期,二甲基三硫含量较低,但贮藏5 d后,含量明显升高,同时酸浆豆腐开始出现淡淡的异味,感官分值显著下降。到冷藏第7 d时,高含量的二甲基三硫使酸浆豆腐具有明显的酸臭味,酸浆豆腐开始腐败变质。

3 结论

本研究制作的酸浆豆腐质地软硬适中,香气组分(如乙酸乙酯)含量高,豆香味浓郁,其挥发性风味物质主要以酯、醇类化合物为主。该产品在未添加防腐剂且在4℃冷藏可保存5 d,保藏后期的挥发性组分以酮、醛、醇与酸类化合物为主,风味口感稍有下降。后期研究需要通过控制来自原料以及环境的污染微生物,减少微生物污染,延长酸浆豆腐的货架期。

参考文献

- [1] Xu Y, Ye Q, Zhang H, et al. Naturally fermented acid slurry of soy whey: high-throughput sequencing-based characterization of microbial flora and mechanism of tofu coagulation [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10
- [2] 乔支红,闫佳,陈虹,等.酸浆标准化生产工艺的研究[J].食品工业科技,2015,36(12):162-169
QIAO Zhi-hong, YAN Jia, CHEN Hong, et al. Research on the standard technology of acid whey [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(12): 162-169
- [3] Fei Y, Li L, Chen L, et al. High-throughput sequencing and culture-based approaches to analyze microbial diversity associated with chemical changes in naturally fermented tofu whey, a traditional Chinese tofu-coagulant [J]. *Food Microbiology*, 2018, 76: 69-77
- [4] 叶青.乳酸菌酸浆豆腐工艺优化及凝固机理初探[D].锦州:锦州医科大学,2018
YE Qing. Optimization of the process bean curd solidified by *Lactobacillus* fermenting acid slurry and preliminary mechanism of the solidification [D]. Jinzhou: Jinzhou Medical University, 2018
- [5] 吴丽樱.豆腐主要腐败菌的研究及其来源分析[D].无锡:江南大学,2017
WU Li-ying. Study on the main spoilage bacteria and their source analysis in tofu [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017
- [6] 马燕.冻融工艺对豆腐品质的影响研究[D].郑州:河南工业大学,2015
MA Yan. Study on effects of freezing and thawing on quality of tofu [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015
- [7] 李笑梅,涂婧,王嘉琪,等.1株酸浆豆腐中产蛋白酶菌种的分离与鉴定[J].食品工业科技,2018,39(5):101-105
LI Xiao-mei, TU Jing, WANG Jia-qí, et al. Isolation and identification of a protease-producing strain from alkekengi tofu [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(5): 101-105
- [8] 赵贵丽,罗爱平,黄名正,等.乳酸乳球菌豆腐生物凝固剂性能评价研究[J].食品工业,2017,10:146-149
ZHAO Gui-li, LUO Ai-ping, HUANG Ming-zheng, et al. Research on the performance evaluation of biological coagulant fermented by *Lactococcus lactis* [J]. *The Food Industry*, 2017, 10: 146-149
- [9] 郑玉玺.盒装豆腐腐败菌多样性及品质变化研究[D].广州:华南理工大学,2018

- ZHENG Yu-xi. Study on spoilage bacteria diversity and quality changes in boxed tofu [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018
- [10] 王辉,田寒友,李文采,等.基于顶空气相色谱-离子迁移谱技术的冷冻猪肉贮藏时间快速判别方法[J].食品科学,2019,40(2):269-274
- WANG Hui, TIAN Han-you, LI Wen-cai, et al. Fast discrimination of frozen pork stored for different periods using headspace-gas chromatography-ion mobility spectroscopy (HS-GC-IMS) [J]. Food Science, 2019, 40(2): 269-274
- [11] 贺云.豆腐酸浆中乳酸菌的分离鉴定及其在酸浆豆腐中的应用[D].无锡:江南大学,2018
- HE Yun. The isolation and identification of lactic acid bacteria from naturally fermented tofu whey and the application of the strains in the acidic whey tofu [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018
- [12] Adams A, Kimpe N D, Van Boekel M A J S. Modification of casein by the lipid oxidation product malondialdehyde [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(5): 1713-1719
- [13] 韩翠萍,葛子榜,刘庆冠,等.豆腐中主要腐败菌的分离鉴定及与品质的相关性分析[J].中国食品学报,2019,19(7):283-291
- HAN Cui-ping, GE Zi-bang, LIU Qing-guan, et al. Isolation and identification of main spoilage bacteria in tofu and its correlation with quality [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(7): 283-291
- [14] Mohamed E H M A, Feng-Jie Z, Fei-Fei W, et al. Advances in fruit aroma volatile research [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2013,18(7): 8200-8229
- [15] Lee S, Ahn B. Comparison of volatile components in fermented soybean pastes using simultaneous distillation and extraction (SDE) with sensory characterization [J]. Food Chemistry, 2009, 29(9): 600-609
- [16] Xuejing F, Gefei L, Yali Q, et al. Characterization of volatile compounds by spme-gc-ms during the ripening of kedong sufu, a typical chinese traditional bacteria-fermented soybean product [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(9)
- [17] Seonmi L, Heera C, Kwang-Geun L. Volatile compounds as markers of tofu (soybean curd) freshness during storage [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(3): 772-779
- [18] Lv Y, Song H, Li X, et al. Influence of blanching and grinding process with hot water on beany and non-beany flavor in soymilk [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1): S20-S25
- [19] Ferreira V, Lopez R, Cacho J F. Quantitative determination of the odorants of young red wines from different grape varieties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(11): 1659-1667
- [20] Ames J M, Macleod G. Volatile components of an unflavored textured soy protein [J]. Journal of Food Science, 1984, 49: 1552-1557
- [21] Diezhandino I, Fernández D, González L, et al. Microbiological, physico-chemical and proteolytic changes in a Spanish blue cheese during ripening (Valdeón cheese) [J]. Food Chemistry, 2015, 168: 134-141
- [22] Gokbulut I, Karabulut I. SPME-GC-MS detection of volatile compounds in apricot varieties [J]. Food Chemistry, 2012, 132(2): 1098-1102
- [23] C M B K M, J A N, J T, et al. Isolation, characterisation and identification of *lactic acid bacteria* from bushera: a Ugandan traditional fermented beverage [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 80(3): 201-210
- [24] 李里.臭豆腐风味产生菌的分离、鉴定及风味产生机理初探[D].武汉:华中农业大学,2010
- LI Li. Isolation and identification of flavor producing strains of stinky tofu and research on its flavor formation mechanism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010
-
- (上接第 337 页)
- [21] 武丽辉.澳大利亚限制敌敌畏的使用[J].农药科学与管理, 2009,30(1):47
- WU Li-hui. Restricting the use of dichlorvos in Australia [J]. Pesticide Science and Management, 2009, 30(1): 47
- [22] 李敏.新西兰限制敌敌畏的使用[J].农药科学与管理,2016, 37(1):15
- LI Min. Restricting the use of dichlorvos in New Zealand [J]. Pesticide Science and Management, 2016, 37(1): 15
- [23] 戴德江,林荣华,沈瑶,等.加强三唑磷风险管控的对策措施及建议[J].农药市场信息,2018,1:29-32
- DAI De-jiang, LIN Rong-hua, SHEN Yao, et al. Countermeasures and suggestions for strengthening risk control of triazophos [J]. Pesticide Market Information, 2018, 1: 29-32