

# 不同加热处理对豆腐风味和异黄酮含量的影响研究

李加双<sup>1,2</sup>, 张良<sup>1,2,3</sup>, 王晶<sup>2</sup>, 姜雪晶<sup>2</sup>, 邢利婷<sup>1</sup>, 张春江<sup>1,2,3,\*</sup>

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193; 2. 中国农业科学院农产品加工研究所主食加工技术研究院, 黑龙江 哈尔滨 151900; 3. 合肥中农科泓智营养健康有限公司, 安徽 合肥 238000)

**摘要:** 采用电子鼻和固相萃取 (solid-phase microextraction) 结合气相色谱联用 (gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS) 技术对不同方式 (微波、水煮、汽蒸、油炸、过热蒸汽) 加热的豆腐挥发性风味物质进行定性和定量分析, 并同时比较不同处理方式异黄酮含量。结果表明: 豆腐原料和经过微波、水煮、蒸制、油炸、过热蒸汽加工的豆腐样品挥发性风味物质共鉴定出 61 种, 分别为醛类 10 种、醇类 7 种、烷烃类 19 种、羧酸类 2 种、酮类 6 种、酯类 7 种、酚类 4 种、其他类 6 种。其中蒸制处理的豆腐挥发性风味物质种类最多, 达 30 种, 油炸和蒸制处理组风味物质含量较高, 分别为 75.281、54.206 mg/kg。豆腐在不同的加热处理后腥味和泥土味减退或消失、芳香风味增加。异黄酮含量检测中发现, 染料木素在经热处理过程中含量降低, 其中煮制损失量与其他组有明显差异。经水煮的豆腐几种异黄酮含量均低于其他处理组。

**关键词:** 加热处理; 豆腐; 电子鼻; 挥发性风味; 异黄酮

## Effects of Different Heating Methods on Flavor and Isoflavone Content of Tofu

LI Jia-shuang<sup>1,2</sup>, ZHANG Liang<sup>1,2,3</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>, JIANG Xue-jing<sup>2</sup>,  
XING Li-ting<sup>1</sup>, ZHANG Chun-jiang<sup>1,2,3,\*</sup>

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Comprehensive Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agricultural, Beijing 100193, China; 2. College of Staple Food Processing Technology, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Harbin 151900, Heilongjiang, China; 3. Hefei CAAS Hongzhi Nutrition and Health Co., Ltd., Hefei 238000, Anhui, China)

**Abstract:** Electronic nose and solid phase extraction (SPME) combined with gas chromatography (GC-MS) were used to qualitatively and quantitatively analyze the volatile flavor of tofu heated in different ways (microwave, boiling, steaming, frying and superheating steam), and at the same time to compare the content of isoflavones in different treatments. The results showed that 61 kinds of volatile flavor substances were identified, including 10 types of aldehydes, 7 types of alcohols, 19 kinds of alkanes, 2 kinds of carboxylic acids, 6 kinds of ketones, 7 kinds of esters, 4 kinds of phenols and 6 kinds of other types. Among them, there were 30 kinds of volatile flavor substances in the processed tofu, and the contents of flavor substances in the Fried and steamed processing groups were higher, respectively, 75.281 mg/kg and 54.206 mg/kg. After different heat treatment, the flavor of tofu decreases or disappears, and its aroma increases. In the detection of isoflavone content, the content of genistein was reduced during the heat treatment, and the loss of cooking was significant-

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2016YFD0400402)

作者简介: 李加双 (1988—), 女 (汉), 工程师, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与装备。

\* 通信作者: 张春江 (1976—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向: 中式食品加工与装备。

ly different from other groups. The content of several isoflavones in boiled tofu was lower than that in other treatment groups.

**Key words:** heating treatment; bean curd; electronic nose volatile; flavors; isoflavones

引文格式:

李加双,张良,王晶,等.不同加热处理对豆腐风味和异黄酮含量的影响研究[J].食品研究与开发,2020,41(11):1-9  
LI Jiashuang, ZHANG Liang, WANG Jing, et al. Effects of Different Heating Methods on Flavor and Isoflavone Content of Tofu[J]. Food Research and Development, 2020, 41(11): 1-9

豆腐以营养丰富、风味独特、物美价廉、品种多样、老少皆宜而深受人们的青睐,以制作工艺独特、神奇且科学而举世闻名<sup>[1]</sup>。豆腐作为一种高蛋白制品富含多种营养功效使其在国民日常膳食中起着举足轻重的作用<sup>[2-3]</sup>。因为它提供必需氨基酸,维生素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 和 B<sub>3</sub>、维生素 C、叶酸、钙、铁、钾等营养成分,而且还有可产生植物雌激素的异黄酮,使豆腐具有预防胆固醇和降血糖的功效<sup>[4-5]</sup>。大豆中含有各种功能性非营养性植物化学物质,如异黄酮,植酸盐和皂甙,其中大豆异黄酮是最常见的成分<sup>[6]</sup>。它是一组主要存在大豆中的天然杂环酚,其中大豆苷(daidzin)、染料木苷(genistin)、黄豆黄苷(clycitin)、大豆苷元(daidzein)、黄豆黄素(glycitein)及染料木素(genistein)6种大豆异黄酮单体是大豆中异黄酮的主要组分<sup>[7-8]</sup>。研究发现,大豆异黄酮具有预防甚至治疗骨质疏松症、更年期综合症、前列腺癌等功效<sup>[9]</sup>。大豆为原料加工的豆腐,其中异黄酮含量也很高<sup>[10]</sup>。豆腐的主要食用方式包括作为火锅涮煮、传统蒸制、炖煮,也有短时加热后蘸料食用的。对于豆腐在热加工的风味变化研究及异黄酮含量变化的文献目前还较少,本文对其在电磁炉煮制、蒸制、油炸、微波短时加热处理过程中的挥发性风味和异黄酮含量的变化进行了研究。探索了豆腐在不同加热方式处理条件下豆腐的风味变化规律,并比较了不同加热方式对豆腐异黄酮含量的影响,旨在发现豆腐风味和营养物质变化的规律。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

卤水豆腐为白玉 100% 卤水北豆腐:市售;3-甲基-2-庚酮标准品:美国 Sigma 公司;甲醇、乙腈色谱级:北京百灵威科技有限公司;无水乙醇、石油醚(60℃~90℃)、冰乙酸(色谱纯):北京伊诺凯有限公司;黄豆苷(98%)、黄豆黄苷(98%)、染料木苷(95%)、大豆苷元 98%、黄豆黄素 98%、染料木素标准品 98%:北京

翰城科技有限公司;0.45 μm 针头微孔过滤器:天津津腾实验设备有限公司。

### 1.2 仪器与设备

GCMS-QP2010Plus 气相色谱质谱联用仪:日本岛津公司;PEN3 电子鼻:德国 AIRSENSE 公司;Agilent 1100 液相色谱仪:美国安捷伦公司;RV3 旋转蒸发仪:艾卡(广州)仪器设备有限公司;C21-SK2101 电磁炉:广州美的公司;G80F20CN2L-B8(RO)微波炉:广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;YZ-3032-T 多功能油炸锅:广东容声电器股份有限公司;TABLE-TOP 350 型过热蒸汽烤箱:日本 Naomoto 公司;SER148 型脂肪测定仪:意大利 VECp 公司;BS2SS 型电子分析天平:北京赛多利斯计量仪器有限公司。

### 1.3 样品处理方法

#### 1.3.1 豆腐加热处理方法

一般油炸等制品中心温度达到 72℃ 以上,才能保证产品的安全性<sup>[11]</sup>。本文选取豆腐尺寸 4 cm×4 cm×1.5 cm,加热中心温度为 90℃ 为加热终点。根据热电偶加热中心温度监控,得出不同加热豆腐中心温度达到 90℃ 时所需时间,如表 1 所示。

表 1 不同方式加热豆腐至 90℃ 所需时间的比较

Table 1 Comparison of the time required to heat tofu to 90℃ in different methods

加热方式	90℃
微波	65.91 s
煮制	5.00 min
蒸制	5.66 min
油炸	3.64 min
过热蒸汽	5.02 min

#### 1.3.1.1 微波处理

微波额定功率 1 300 W,将豆腐样品装盘入微波炉加热。

#### 1.3.1.2 电磁炉煮制

蒸馏水煮沸后(水温>95℃),然后将 3 组豆腐分

别放入煮沸的蒸馏水中,保证原料入锅时水面浸没豆腐,高于原料坯 5 cm。分别煮制,输出功率 2 100 W。

### 1.3.1.3 电磁炉蒸制

蒸锅中水煮沸后(水温>95 ℃),豆腐入蒸锅蒸制,输出功率 2 100 W。

### 1.3.1.4 油炸处理

多功能油炸锅油炸豆腐处理,油炸温度 150 ℃。

### 1.3.1.5 过热蒸汽处理

过热蒸汽蒸制豆腐处理,上、下火,蒸汽温度分别 160 ℃,蒸汽通量最大挡位。

## 1.3.2 检测方法

### 1.3.2.1 挥发性成分分析

#### 1) 电子鼻

将 5 组处理好的样品分别称取 1.0 g,立即装入 15 mL 电子鼻自动进样瓶,盖好瓶塞,采用顶空抽样的方法用电子鼻检测,每个样品重复测定 3 次。检测时间为 60 s,传感器清洗时间为 180 s,取平均温度状态下 48 s~52 s 的测量数据作为分析的点,采用 PEN3 自带的软件系统进行主成分分析法(principal component analysis,PCA)进行数据分析<sup>[12]</sup>。

#### 2) 挥发性风味物质测定

将 1.0 g 样品置于 15 mL 顶空瓶内,采用固相微萃取方法提取挥发性化合物,再通过气相色谱-质谱联用仪对化合物进行分离并分析。

顶空固相微萃取:每个处理组萃取前分别加入 0.5 g 无水氯化钠,同时加入 4 μL 的 2-甲基-3 庚酮(0.336 μg/μL)后,立即用乳胶盖密封顶空瓶口,置于 40 ℃恒温磁力搅拌器上萃取,搅拌速率为 200 r/min,平衡 10 min。插入 65 μm PDMS/DVB 萃取头,萃取吸附 30 min。最后将萃取头拔出并置于 200 ℃的进样口中解吸 2 min。进行气相色谱-质谱联用分析。每个品种 3 次重复,取平均值<sup>[13]</sup>。

气相色谱联用(gas chromatography-mass spectrometer,GC-MS)测定条件:色谱柱型号 DB-WAX(30 m×0.25 mm×0.25 μm);气相色谱法(gas chromatography,GC)条件:程序升温,初温 40 ℃,保温 4 min,以 6 ℃/min 的升温速率升温至 230 ℃,再以 10 ℃/min 的升温速率升至 250 ℃,保温 5 min;载气为高纯氦气(99.999%),流速 1 mL/min,压力 112.0 kPa;进样方式:分流进样,分流比 20:1;MS 条件:接口温度 230 ℃,离子源温度 200 ℃;采用 SCAN 模式进行全扫描,扫描范围为 m/z=45~450;电离方式:EI,70 eV。

定性分析:样品经 GC-MS 分析后,所得到的质谱图经计算机与美国国家标准与技术研究院(NIST 14

和 NIST 14S)质谱图数据库比对,同时结合相对保留时间,查阅文献等资料分析,对各挥发性香气物质的成分进行定性分析。

定量分析:豆腐挥发性物质的定量采用内标法分析,以 2-甲基-3 庚酮作为内标物进行质量浓度计算。计算公式如下:

$$X_i = f_i C_s A_i / A_s$$

式中: $X_i$  为待测物质含量,μg/kg; $C_s$  为豆腐样品中内标物浓度,μg/kg; $A_s$  为内标物的峰面积; $A_i$  为待测物的峰面积; $f_i$  为待测组分  $i$  对内标物  $s$  的质量次相对校正因子;本研究中假定的各待测组分  $i$  的相对校正因子均为 1。

### 1.3.2.2 异黄酮含量测定

色谱柱:C18 分析柱(250 mm×4.6 mm,5 μm);流动相 A:0.1% 乙酸-水溶液,流动相 B:0.1% 乙酸-乙腈溶液,检测波长:260 nm;流速:1.0 mL/min;柱温:30 ℃;进样量:10 μL。梯度洗脱程序如表 2 所示<sup>[8]</sup>。

表 2 高效液相色谱法大豆异黄酮梯度洗脱表

Table 2 Gradient elution table of determination of soybean isoflavones by high performance liquid chromatography

时间/min	A 0.1% 乙酸水溶液/%	B 0.1% 乙酸乙腈溶液/%
0	90	10
10	80	20
12	70	30
18	60	40
19	0	100
21	0	100
22	90	10
26	90	10

样品处理与测定:取 5 g 豆腐冻干粉末,在 60 ℃~90 ℃石油醚脱脂 3 h,50 ℃条件下烘干,烘干后粉末与 70% 乙醇溶液按 1:10(g/mL)的比例混合,超声处理 40 min,离心处理,离心时间 40 min,转速 7 000 r/min,残渣再次乙醇超声提取,合并两次上清液,浓缩至 50 mL,取 4 mL~5 mL 离心,转速 10 000 r/min,离心时间 20 min,通过 0.45 μm 滤膜,高效液相色谱法(high performance liquid chromatography,HPLC)进样检测。取大豆异黄酮混合标准品溶液,按照上述色谱条件进行测定,连续进样 6 次,每次进样量为 1 μL,记录各大豆异黄酮单体峰面积并计算各单体含量及相对标准偏差。公式:相对标准偏差(relativestandarddeviation,RSD)/%=标准偏差(SD)/计算结果的算术平均值(X)×100

## 2 结果与分析

### 2.1 电子鼻检测结果

采用主成分分析对不同加热方式豆腐样品进行

电子鼻数据分析结果见图 1。

如图 1 所示,PCA 图中每个点代表一个样品,点间距离代表样品之间差异的大小<sup>[14]</sup>。第一主成分区分

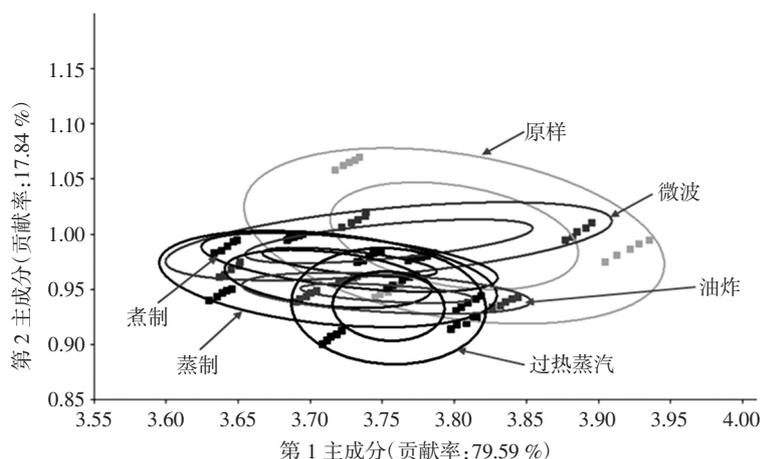


图 1 不同加热方式处理豆腐的 PCA 分析图

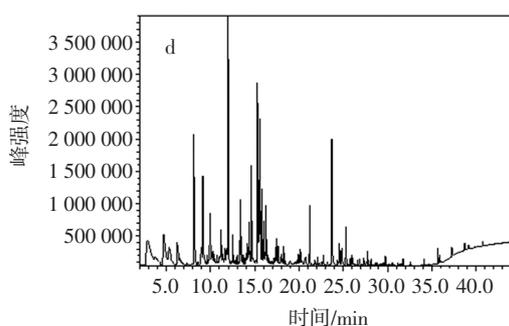
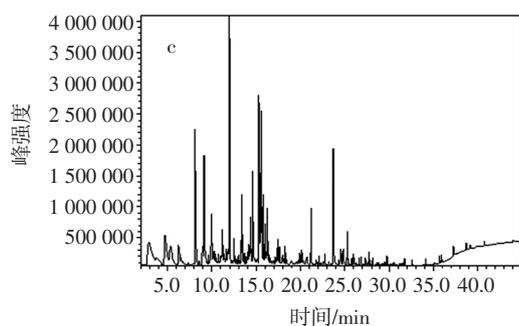
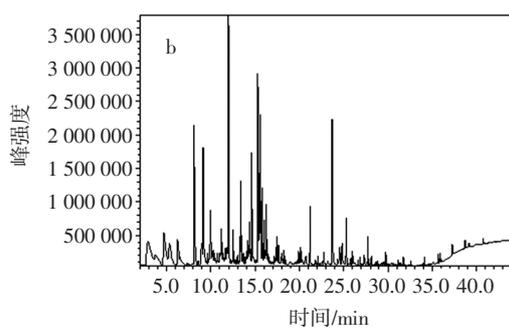
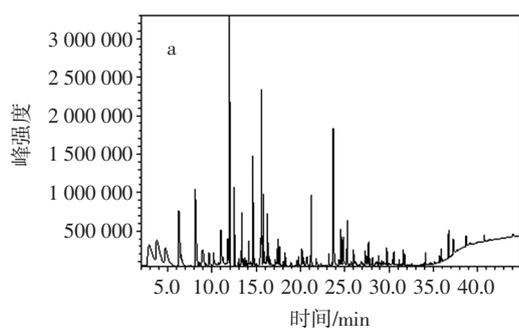
Fig.1 PCA analysis diagram of tofu processed by different heating methods

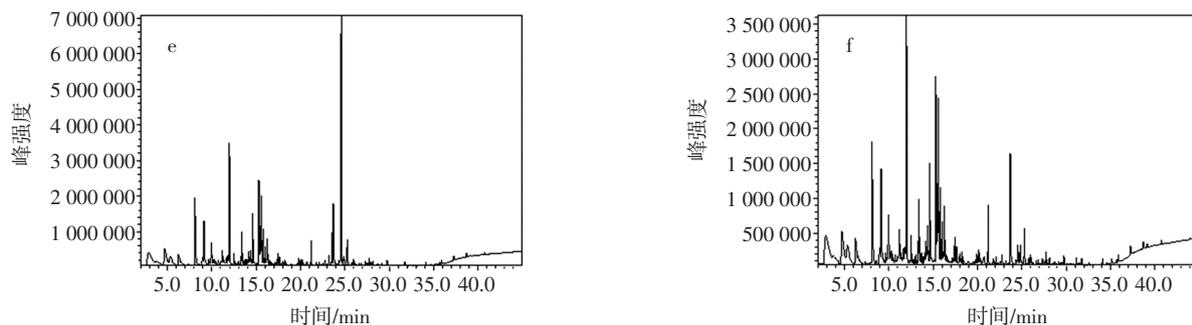
贡献率为 79.59%,第二主成分区分贡献率为 17.84%,2 个主成分区分贡献率和为 97.43%,大于 90%就可以表示两个主成分基本代表了样品的主要信息特征<sup>[15]</sup>。几组不同加热方式处理的样品与原始样品在 PCA 图上的分布都较为分散,但它们之间的重叠区域较大,重叠说明几种加工方式豆腐的挥发性风味较为相似。根据 PCA 分析结果,微波处理与油炸处理样品差异显著。

### 2.2 挥发性风味检测结果

利用固相微萃取技术(solid-phase microextraction, SPME)结合 GC-MS 对豆腐的不同加热方式处理的挥发性风味物质成分进行测定。各种风味物质的种类及相对含量如图 2 和表 3 所示。

豆腐经不同热处理,产生了不同种类和不同质量浓度的挥发性风味物质,图 3 即为不同热处理组的挥发性风味物质的种类对比图,图 4 为挥发性风味成分的含量变化图。





a.豆腐原样;b.微波处理样品;c.煮制处理样品;d.蒸制处理样品;e.油炸处理样品;f.过热蒸汽处理样品。

图2 不同加热处理豆腐样品气相色谱图

Fig.2 Gas chromatographic map of tofu samples under different heating treatments

表3 不同加热方式处理豆腐挥发性风味含量测定结果

Table 3 Results of volatile flavor of tofu treated by different heating methods

化合物	保留时间/ min	绝对含量/(mg/kg)						描述
		原样	微波法	煮制法	蒸制法	油炸法	过热蒸汽	
醛类		13.810	10.254	5.654	8.964	37.871	7.530	
4-羟基-3-甲基丁醛	6.245	8.189	ND	ND	ND	ND	ND	
壬醛	13.357	3.090	5.998	ND	4.718	4.336	4.307	柑橘味、芳香味
苯甲醛	16.158	0.285	1.006	0.985	0.921	0.793	0.910	樱桃或杏仁香气
反式-2-壬醛	16.5	0.448	0.529	0.475	0.481	0.501	ND	苹果香味
十二醛	22.074	ND	0.674	0.710	0.537	ND	0.498	脂肪香气
4-癸氧基苯甲醛	26.825	ND	0.289	ND	0.256	ND	0.174	
2,4-二甲基苯甲醛	24.508	ND	ND	ND	0.878	ND	0.677	杏仁味
2-十三(碳)烯醛	19.757	ND	ND	ND	ND	1.017	ND	
5-甲基水杨醛	12.503	ND	ND	1.668	ND	ND	ND	
(E,E)-2,4-癸二烯醛	24.565	1.797	1.757	1.815	1.173	31.224	0.963	油炸薯条香气
醇类		12.460	5.365	0.348	3.397	2.159	3.296	
5-甲基-1-己醇	14.629	5.816	ND	ND	ND	ND	ND	
1-庚醇	14.756	0.338	ND	ND	ND	ND	ND	芳香味
正辛醇	17.133	0.807	0.413	0.348	0.348	0.776	0.747	芳香味
1,2-十四烷二醇	31.575	0.682	ND	ND	ND	ND	ND	
2-丙基-1-庚醇	10.146	ND	1.312	ND	1.108	ND	0.869	
四氢熏衣草醇	11.626	ND	1.405	ND	ND	ND	ND	
正己醇	12.507	4.817	2.235	ND	1.940	1.383	1.680	青草豆腥味
烷烃类		2.801	20.176	23.582	17.591	14.771	19.490	
十四烷	13.475	0.309	1.706	2.041	1.795	1.280	1.604	
1,4-环氧环己烷	13.665	0.413	ND	ND	ND	ND	ND	
3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	13.85	0.358	ND	ND	ND	0.743	ND	
正十九烷	18.259	0.837	1.978	1.069	ND	ND	ND	
2-甲基金刚烷	25.256	0.885	ND	0.465	ND	ND	ND	
正十七烷	14.385	ND	3.050	ND	3.070	2.038	2.863	
2,6,11-三甲基十二烷	11.375	ND	7.884	6.125	4.787	0.925	3.153	
反-2-庚烯	11	ND	1.303	ND	ND	ND	ND	
4,6-二甲基十二烷	11.165	ND	3.781	ND	ND	2.305	ND	
2-甲基二十四(碳)烷	13.871	ND	0.474	0.515	0.471	ND	0.428	
1-十六烯	9.944	ND	ND	6.674	5.748	5.312	5.170	
2,6,10-三甲基十二烷	10.142	ND	ND	1.201	ND	0.769	1.086	

续表3 不同加热方式处理豆腐挥发性风味含量测定结果

Continue table 3 Results of volatile flavor of tofu treated by different heating methods

化合物	保留时间/ min	绝对含量/(mg/kg)						描述
		原样	微波法	煮制法	蒸制法	油炸法	过热蒸汽	
正二十烷	14.383	ND	ND	3.623	ND	ND	0.001	刺激味
正二十一烷	18.258	ND	ND	1.404	1.278	ND	0.764	
2-甲基金刚烷	25.25	ND	ND	0.465	0.442	ND	0.443	
4-甲基十二烷	11.367	ND	ND	ND	ND	0.385	ND	
3-(E)-3-甲基-1-丁烯基]-1-环己烯	27.951	ND	ND	ND	ND	0.420	ND	
2,3-二甲基戊烷	6.227	ND	ND	ND	ND	ND	3.979	
茴香烯	24.917	ND	ND	ND	ND	0.594	ND	八角香料香气
羧酸类		0.000	0.000	1.899	1.552	0.851	0.916	
十六烷基丙二酸	11.628	ND	ND	1.604	1.552	0.851	0.916	
2-甲基-3-羟基乙酸	25.801	ND	ND	0.295	ND	ND	ND	
酮类		4.945	1.552	0.960	0.829	3.589	0.687	
3-异丙丙四酮	10.167	0.610	ND	ND	ND	ND	ND	
环己酮	11.004	3.695	ND	ND	ND	ND	ND	有泥土气息
苯乙酮	19.925	ND	1.010	0.960	0.829	0.771	0.687	山楂的气味
对戊基环己酮	23.197	0.640	ND	ND	ND	ND	ND	
金刚烷酮	25.250	ND	0.542	ND	ND	ND	ND	
左旋香芹酮	25.261	ND	ND	ND	ND	2.818	ND	留兰香味
酯类		3.058	0.895	0.384	3.367	0.402	0.578	
棕榈酸甲酯	31.146	ND	0.248	ND	ND	ND	0.335	腊样,特殊温和气味
肉豆蔻酸异十三酯	8.976	ND	ND	ND	2.035	ND	ND	微有特殊气味
硬脂酸正丁酯	27.605	1.613	ND	ND	ND	ND	ND	轻微脂肪气味
邻苯二甲酸二异丁酯	35.712	0.292	0.402	0.384	0.753	0.156	ND	略有芳香气味
苯甲酸苄酯	36.733	1.154	ND	ND	ND	ND	ND	极微弱的花香味
邻苯二甲酸二丁酯	37.35	ND	ND	ND	0.268	ND	ND	芳香气味
十二碳醇酯	25.801	ND	0.245	ND	0.311	0.246	0.243	
酚类		0.550	0.835	1.092	0.277	0.588	0.361	
2,6-二叔丁基对甲酚	26.604	ND	0.122	0.401	0.277	ND	ND	
3,4-二甲基苯酚	28.13	ND	0.453	0.348	ND	0.588	0.361	
4-硝基苯酚	30.542	0.550	ND	ND	ND	ND	ND	
3,5-二叔丁基苯酚	32.608	ND	0.260	0.343	ND	ND	ND	
其他		9.830	12.376	14.265	18.229	15.050	2.458	
萘	22.742	ND	0.991	0.953	0.828	0.692	ND	温和芳香气味
3,4,5-三甲基甲苯	14.033	ND	ND	1.068	0.912	ND	ND	
1,2,4,5-四甲苯	14.256	ND	ND	2.316	1.944	1.507	1.689	类似樟脑的气味
N-环戊基-2-(3-甲酰基-吡啶-1-基)-乙酰胺	15.821	ND	ND	ND	4.635	ND	ND	
奥苷菊环	22.739	ND	ND	ND	ND	ND	0.770	
2,3-二甲基硝基苯	23.702	9.830	11.386	9.928	9.911	12.851	ND	

注:ND表示未检出。

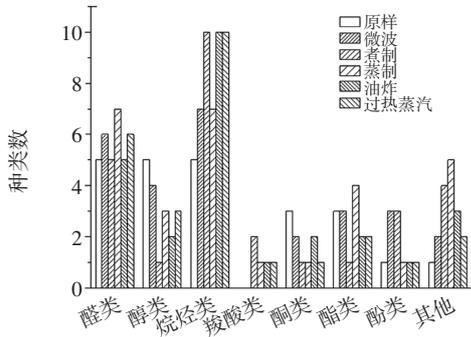


图3 豆腐经不同热处理挥发性风味成分的种类变化

Fig.3 Variation of volatile flavor components in tofu after different heat treatments

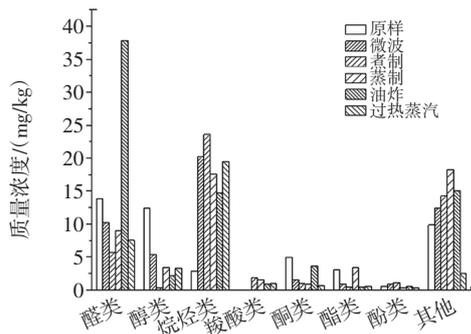


图4 豆腐经不同热处理挥发性风味成分的含量变化

Fig.4 Changes in the content of volatile flavor components of tofu after different heat treatments

由表3,图3可知,豆腐原料和经过微波、水煮、蒸制、油炸、过热蒸汽加工的豆腐样品挥发性风味物质共鉴定出61种,分别为醛类(10种)、醇类(7种)、烷烃类(19种)、羧酸类(2种)、酮类(6种)、酯类(7种)、酚类(4种)、其他类(6种)。不同加热方式处理的豆腐样品挥发性风味物质的种类和含量均明显不同。结合表3,图4可知,原样、微波、煮制、蒸制、油炸、过热蒸汽处

理的样品中分别检测出23、27、27、30、26和26种挥发性物质,含量分别是47.454、51.453、48.184、54.206、75.281、35.310 mg/kg。热加工处理后,豆腐的风味发生了明显变化,醛类、醇类、酮类、烷烃类以及其他类构成豆腐的风味成分;加热能降低腥味醇类物质含量,增加香气醛类、酮类和其他类的含量,使加热的豆腐具有芳香味、轻微的肉香味。苯甲醛、反式-2,4-癸二烯醛、正辛醇是原样豆腐、微波、水煮、蒸制、油炸、过热蒸汽热加工处理均存在的风味化合物。醛类物质主要是豆腐中的脂肪氧化酶催化分解亚油酸和亚麻酸产生的,一般具有脂肪香气<sup>[16-17]</sup>。壬醛呈现柑橘味、芳香气味,是豆乳中最主要的非豆腥成分<sup>[18]</sup>,在豆腐中也同样存在。在不同的加热处理中,壬醛的含量显著增加除在煮制中未检测到,微波处理豆腐的壬醛含量最高,且与其他处理组有明显差异。

豆腐在未经处理前,有明显的豆腥味、土味,在经过不同的热处理方式加工后,这种不愉快的味道明显降低或消失,KOHAYASHI A研究豆类制品腥味挥发性成分主要集中在醇类、醛类化合物中,但是不同的工艺挥发性成分均有差异<sup>[19-20]</sup>。本研究得出结论加热过程导致产生豆腥味的正己醇含量的减少和产生泥土气味的环己酮化合物的消失有关。加热过程中,产生芳香物质的醇类、醛类、酮类的增加,赋予加热后豆腐香味,壬醛和苯甲醛是具有芳香味、樱桃或杏仁香气的化合物。油炸处理样品的醛类化合物含量较高,这是由于在热处理过程中形成了(E,E)-2,4-癸二烯醛,其具有油炸薯条的香气。

2.3 异黄酮检测结果

黄豆苷、黄豆黄苷、染料木苷、大豆苷元、黄豆黄素和染料木素6种大豆异黄酮单体的标准品色谱图及出峰时间见图5。

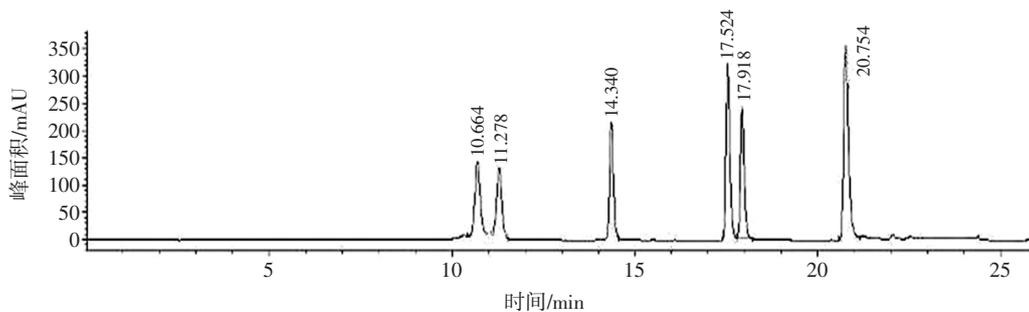


图5 6种异黄酮混合标准曲线色谱图

Fig.5 Six isoflavones mixed standard curve chromatogram

异黄酮含量的标准曲线的线性方程、保留时间及回归方程如表4所示。用文中方法检测的6种大豆异黄酮线性方程的决定系数 $R^2 > 0.9975$ ,呈较好的线性

关系。  
6种异黄酮含量测定结果见表5。  
大豆异黄酮是普遍存在大豆中的功能性物质,作

表 4 6 种异黄酮单体线性关系

Table 4 Linear relationship of six soybean isoflavones monomer

组分	保留时间/min	回归方程	R <sup>2</sup>
黄豆苷	10.684	$y=25.812x+35.879$	0.999 9
黄豆黄苷	11.278	$y=11.477x+84.998$	0.999 0
染料木苷	14.340	$y=28.665x+27.419$	0.999 9
大豆苷元	17.524	$y=37.428x+145.99$	0.999 2
黄豆黄素	17.918	$y=7.0185x+140.70$	0.997 5
染料木素	20.754	$y=52.115x+232.81$	0.999 0

表 5 6 种异黄酮含量测定结果

Table 5 Determination of six isoflavone content

项目	原样	μg/g				
		微波	煮制	蒸制	油炸	过热蒸汽
黄豆苷	483.20±8.65 <sup>a</sup>	447.99±4.30 <sup>a</sup>	444.14±5.64 <sup>a</sup>	465.44±1.36 <sup>a</sup>	479.84±6.79 <sup>a</sup>	453.51±5.62 <sup>a</sup>
黄豆黄苷	33.40±3.98 <sup>a</sup>	17.49±2.74 <sup>a</sup>	10.72±1.84 <sup>a</sup>	22.08±2.18 <sup>a</sup>	11.54±1.42 <sup>a</sup>	16.23±2.57 <sup>a</sup>
染料木苷	601.83±32.29 <sup>ab</sup>	579.84±28.06 <sup>b</sup>	579.82±40.59 <sup>b</sup>	645.43±24.39 <sup>a</sup>	646.81±11.26 <sup>a</sup>	613.23±16.94 <sup>ab</sup>
大豆苷元	65.23±2.56 <sup>a</sup>	57.13±3.23 <sup>a</sup>	61.85±5.06 <sup>a</sup>	43.82±1.47 <sup>a</sup>	49.74±5.24 <sup>a</sup>	40.70±8.92 <sup>a</sup>
黄豆黄素	ND	ND	ND	ND	ND	ND
染料木素	34.62±3.87 <sup>a</sup>	9.44±1.50 <sup>ab</sup>	4.85±2.30 <sup>b</sup>	15.18±0.42 <sup>ab</sup>	12.03±2.24 <sup>ab</sup>	12.8±4.90 <sup>ab</sup>
总含量	1 218.28	1 111.89	1 101.38	1 191.95	1 199.96	1 136.47

注:同行数据肩头字母不同表示具有显著差异( $p<0.05$ );同行未标字母或字母相同则表示差异不显著( $p>0.05$ ),ND表示未检出。

为大豆制品的豆腐也有一定的分布,但其含量和种类会因为不同的工艺或热处理会发生变化。表 5 显示豆腐经过不同热处理后大豆异黄酮含量变化。热处理引起异黄酮化学结构的变化,主要表现为丙二酰葡萄糖苷脱羧为乙酰葡萄糖苷,或丙二酰葡萄糖苷与乙酰葡萄糖苷水解为葡萄糖苷。通过糖苷键的断裂,共轭形式也可以转化为醌形式<sup>[21]</sup>。以豆腐原料为对照比较 5 种不同热处理方式豆腐对大豆异黄酮含量,染料木苷含量在煮制、微波作用下含量降低,蒸制、油炸和过热蒸汽处理含量增加,减少和增加组间对比存在显著差异。苷元的增加可能是由于异黄酮化合物间的转换导致。染料木素,在经热处理过程中含量降低,其中煮制损失量与其他组有明显差异。有研究大豆至豆腐的过程中,异黄酮含量的变化,研究发现大豆在沸水中的研磨可能导致异黄酮在加工过程中的重大损失<sup>[7]</sup>。本文中,经水煮的豆腐几种异黄酮含量均低于其他处理组,但黄豆苷、黄豆黄苷、大豆苷元含量与原样相比,并没有显著性差异。异黄酮总含量,油炸处理组含量与对照组最接近,其次是蒸制处理,这可能是由于油炸的色拉油中也含有异黄酮物质,导致其含量较高。

### 3 结论

综合 PCA、挥发性风味物质检测和大豆异黄酮含

量检测,得出结论不同的加热方式对豆腐的风味和营养物质含量均有一定的影响,PCA 分析结果显示,微波处理与油炸处理样品差异显著;加热降低了豆腐中腥味物质含量,增加香气类物质含量,使加热的豆腐具有芳香味、轻微的肉香味;营养物质分析,经水煮处理的豆腐几种异黄酮含量均低于其他处理组,但黄豆苷、黄豆黄苷、大豆苷元含量与原样相比,并没有显著性差异。本文考察了不同热处理方式对豆腐的挥发性风味和营养物质的影响,而目前针对豆腐传统菜肴的研究较少,后续的研究中可以从豆腐的成味机理、与其他食材的复配、贮藏期品质变化等方面,系统研究豆腐菜肴在热加工过程中的品质变化规律。

### 参考文献:

- [1] 白晓州. 豆腐文化与豆腐品牌建设研究[D]. 新乡:河南科技学院, 2017
- [2] 张平安, 赵秋艳, 宋莲军, 等. 大豆浸泡工艺条件对豆腐品质的影响[J]. 食品工业科技, 2010, 31(7): 275-277
- [3] 李小雅. 加工工艺条件对北方豆腐品质及风味物质的影响研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2017
- [4] 姜洪华. 大豆的营养价值及保健功能[J]. 农业技术与装备, 2010(9): 75
- [5] Rossi F, Felis G E, Martinelli A, et al. Microbiological characteristics of fresh tofu produced in small industrial scale and identifica-

- tion of specific spoiling microorganisms (SSO)[J]. LWT, 2016, 70: 280-285
- [6] Ishii Y, Tanizawa H. Effects of soyasaponins on lipid peroxidation through the secretion of thyroid hormones[J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2006, 29(8): 1759-1763
- [7] Jackson C, Dini J, Lavandier C, et al. Effects of processing on the content and composition of isoflavones during manufacturing of soy beverage and tofu[J]. Process Biochemistry, 2002, 37(10): 1117-1123
- [8] 刘文静, 阙俊鹏, 类彦波, 等. 高效液相色谱法测定大豆中六种异黄酮含量方法的改进[J]. 中国食品添加剂, 2017(9): 216-221
- [9] 王清泉, 高媛, 姜妍, 等. 大豆种子成分与人类健康(二)——大豆配糖体与人类健康[J]. 大豆科技, 2018(1): 23-30
- [10] Young-Gi Ryu, Bomi Won, Hae-Ryung Park, et al. Effects of the  $\beta$ -glycosidase reaction on bio-conversion of isoflavones and quality during tofu processing[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(5): 843-849
- [11] 张福, 杨艳敏, 曹新桥, 等. 蛋香肉丸制作工艺[J]. 肉类工业, 2018(5): 1-3, 8
- [12] 潘俊娟, 段玉伟, 蒋玉兰, 等. 福鼎白茶风味的电子鼻和电子舌评价[J]. 食品工业科技, 2017, 38(12): 25-30, 43
- [13] Shi X D, Li J Y, Wang S M, et al. Flavor characteristic analysis of soymilk prepared by different soybean cultivars and establishment of evaluation method of soybean cultivars suitable for soymilk processing[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 422-429
- [14] Xiao C B, Lu Y S, Zhang L N. Preparation and physical properties of konjac glucomannan-polyacrylamide blend films[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 81(4): 882-888
- [15] 陈婷, 蒋明忠, 彭文, 等. 基于电子鼻技术对云南普洱熟茶的香气品质判别[J]. 西南农业学报, 2017, 30(2): 339-344
- [16] Boué S M, Shih B Y, Carter-Wientjes C H, et al. Identification of volatile compounds in soybean at various developmental stages using solid phase microextraction[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(17): 4873-4876
- [17] Reindl B, Stan H J. Determination of volatile aldehydes in meat as 2, 4-dinitrophenylhydrazones using reversed-phase high-performance liquid chromatography[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1982, 30(5): 849-854
- [18] 施小迪, 左锋, 郭顺堂. 微压煮浆对豆乳风味特性的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 343-349
- [19] Kobayashi A, Tsuda Y, Hirata N, et al. Aroma constituents of soybean [*Glycine max* (L.) merril]milk lacking lipoxygenase isoenzymes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(9): 2449-2452
- [20] YUAN S, CHANG S K C. Off-flavor compounds in soymilk as affected by soybean variety and processing methods[J]. J Agr Food Chem, 2007, 55 (2) :426-431
- [21] Rostagno M A, Villares A, Guillamón E, García-Lafuente A, Martínez J A. Sample preparation for the analysis of isoflavones from soybeans and soy foods[J]. Journal of Chromatography A, 2008, 1216(1): 2-29

收稿日期: 2019-05-30

## 欢迎订阅 2020 年《食品研究与开发》

《食品研究与开发》是由天津市食品研究所有限公司和天津市食品工业生产力促进中心主办, 国内外公开发行的食品专业科技期刊, 1980 年创刊, 半月刊, 采用国际流行开本大 16 开。其专业突出, 内容丰富, 印刷精美, 是一本既有基础理论研究, 又包括实用技术的刊物。本刊已被“万方数据库”、“中文科技期刊数据库”、“乌利希期刊指南”、美国《化学文摘》、英国国际农业与生物科学研究中心 (CABI)、英国《食品科技文摘》(FSTA) 等知名媒体收录, 并被列入“中文核心期刊”、“中国科技核心期刊”、RCCSE 中国核心学术期刊 (A)。主要栏目有: 基础研究、应用技术、检测分析、生物工程、专题论述、食品机械等。

本刊国内统一刊号 CN 12-1231/TS; 国际刊号 ISSN 1005-6521; 邮发代号: 6-197。全国各地邮局及本编辑部均可订阅。从本编辑部订阅全年刊物享八折优惠。2020 年定价: 30 元/册, 全年 720 元。

本编辑部常年办理邮购, 订阅办法如下:

(1) 邮局汇款。地址: 天津市静海县静海经济开发区南区科技路 9 号; 收款人: 《食品研究与开发》编辑部; 邮政编码: 301600。

(2) 银行汇款。开户银行: 工商银行静海支行, 行号: 102110000863。

账号: 0302095119300204171; 单位: 天津市食品研究所有限公司。

《食品研究与开发》编辑部

www.tjfrad.com.cn

E-mail: tjfood@vip.163.com

电话(传真): 022-59525671