

SDE结合GC-MS分析王致和臭豆腐中的特征香气成分

孙洁雯, 杨克玉, 李燕敏, 陈怡颖, 刘玉平, 张玉玉*

(食品营养与人类健康北京高精尖创新中心, 北京市食品风味化学重点实验室,
北京工商大学 食品质量与安全北京实验室, 北京 100048)

摘要: 采用同时蒸馏萃取的方法对王致和臭豆腐的挥发性成分进行提取, 经气相色谱-质谱联用仪分析, 采用计算的保留指数和NIST 11谱库检索, 确定所含挥发性化合物的种类, 并用内标法确定其在王致和臭豆腐中的含量, 根据挥发性成分的香气特征, 结合香气活性值, 确定王致和臭豆腐中的特征性香气成分。经同时蒸馏萃取法结合气相色谱-质谱联用分析鉴定出44种挥发性成分, 包括醇类6种(10.43 μg/g)、酯类17种(6.88 μg/g)、酚类1种(0.26 μg/g)、醛酮类3种(0.15 μg/g)、硫醚类5种(1.01 μg/g)、杂环类6种(2.67 μg/g)、其他化合物6种(2.66 μg/g)。其中含量较高的挥发性成分有正丁醇(7.21 μg/g)、正丙醇(2.33 μg/g)、乙酸乙酯(1.71 μg/g)、丁酸丁酯(1.44 μg/g)、乙酸丁酯(1.13 μg/g)等。而吲哚(0.70 μg/g)、正丁醇(7.21 μg/g)、正丙醇(2.33 μg/g)、二甲基二硫(0.42 μg/g)、二甲基三硫(0.36 μg/g)、二甲基四硫(0.15 μg/g)等挥发性成分对北京王致和臭豆腐特征性香味的贡献较大。

关键词: 臭豆腐; 同时蒸馏萃取; 特征香气成分; 气相色谱-质谱联用; 香气活性值

Analysis of Characteristic Aroma Compounds in Wangzhihe Stinky Tofu by Simultaneous Distillation-Extraction and Gas Chromatography-Mass Spectrometry (SDE-GC-MS)

SUN Jiewen, YANG Keyu, LI Yanmin, CHEN Yiyang, LIU Yuping, ZHANG Yuyu*

(Beijing Innovation Centre of Food Nutrition and Human Health, Beijing Key Laboratory of Flavor Chemistry,
Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The characteristic aroma components of Beijing Wangzhihe stinky tofu were extracted by simultaneous distillation-extraction (SDE), analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and quantified by internal standard method. Based on the calculated retention indices and RI qualitative analysis, 44 compounds were identified. These compounds included 6 alcohols (10.43 μg/g), 17 esters (6.88 μg/g), 1 phenol (0.26 μg/g), 3 carbonyl compounds (0.15 μg/g), 5 sulfur-containing ethers (1.01 μg/g), 6 heterocyclic compounds (2.67 μg/g), and 6 other compounds (2.66 μg/g). The major aroma components were 1-butanol (7.21 μg/g), 1-propanol (2.33 μg/g), ethyl acetate (1.71 μg/g), butyl butyrate (1.44 μg/g), and butyl acetate (1.13 μg/g). Indole, 1-butanol, 1-propanol, dimethyl disulfide, dimethyl trisulfide and dimethyl tetrasulfide made a greater contribution to odor characteristics of Wangzhihe stinky tofu.

Key words: stinky tofu; simultaneous distillation-extraction (SDE); characteristic aroma components; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); odor active values (OAV)

中图分类号: TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)16-0127-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201516023

臭豆腐, 雅号青方, 又名青方腐乳、青腐乳^[1], 它细腻醇厚, 味美诱人, 属发酵型臭豆腐, 是老北京传统特色小吃之一, 其中北京王致和臭豆腐颇为有名。王致和臭豆腐, 始于清朝, 曾作为宫廷御膳, 有着300多年的历史, 广受欢迎。它不同于南方长沙绍兴等地盛行的非发酵型臭豆腐, 而是将豆腐坯子经接种、倒笼、腌渍、兑卤汤、封顶糊口、数月发酵制得^[2]。臭豆腐中含有丰富游离氨基酸, 以及钙、磷、铁、锌等矿物质, 有利于人体

收稿日期: 2015-04-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31401604); “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD04B06)

作者简介: 孙洁雯(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为香料化学及其应用。E-mail: zhangshuzi2009@163.com

*通信作者: 张玉玉(1982—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为香料化学及其应用。E-mail: zhangyy2@163.com

肠道吸收,还具有降血压的生理活性^[3-4];它所含的VB₁₂对老年痴呆症有良好的预防效果^[5]。

近年来,对臭豆腐的研究大多集中在酿造工艺和发酵菌种的筛选上,如黄香华等^[6]对臭豆腐所含的2种主要细菌进行了鉴定并对发酵条件进行了研究;而关于臭豆腐挥发性成分的报道,尤其是对发酵型臭豆腐的特征香气成分的研究较少,影响了臭豆腐产业工艺的改进。郑小芬等^[7]研究了湖南本地的两种非发酵型臭豆腐卤水中的挥发性成分,得出两种臭豆腐中共有的挥发性成分有异戊醇、正己醇、3-辛醇、 α -松油醇、丁酸丙酯、正己酸、苯酚、对异丙基甲苯、2,3,5,6-四甲基吡嗪。

同时蒸馏萃取(simultaneous distillation-extraction, SDE)法提取挥发性成分具有成本低、设备简单、操作方便的特点,具有良好的重复性和较高的萃取量,对微量成分提取效率高,便于定量分析^[8-9]。香气活性值(odour active values, OAV)是香气物质的浓度与其阈值的比值,能够体现该香成分对整体香气的作用。化合物的OAV大于或者等于1,则认为该化合物对其香气有作用,且OAV越大,对整体香气的贡献度就越大^[10]。

本研究采用SDE方法,结合气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用分离鉴定王致和臭豆腐中的挥发性成分,并采用内标法进行定量分析,结合OAV,确定王致和臭豆腐的特征香气成分,旨在为臭豆腐的风味评价及工艺改进提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

臭豆腐(净含量330 g,生产日期为2014年9月26日)北京二商王致和食品有限公司。

无水硫酸钠(分析纯)、邻二氯苯(2 mg/mL,溶剂为正己醇) 国药集团化学试剂有限公司;99.5%乙醚(分析纯) 北京化工厂;C₅~C₃₀正构烷烃混合物(色谱纯) 美国Supelco公司。

1.2 仪器与设备

7890B-5977A气相色谱-质谱联用仪 美国安捷伦公司;SDE装置 肯堡博美(北京)实验器皿有限公司;RE-52 A型旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂。

1.3 方法

1.3.1 内标溶液的配制

取0.5 mL质量浓度为2 mg/mL的邻二氯苯,加入2 mL的容量瓶中,加入乙醚稀释至刻度线,摇匀,得到质量浓度为0.5 mg/mL的邻二氯苯内标溶液。

1.3.2 SDE操作

取整瓶王致和的臭豆腐(330 g),搅拌均匀,放入1 000 mL单口圆底烧瓶中,加入100 mL去离子水和适量

沸石,置于同时蒸馏装置重相端,采用油浴加热,温度控制在(130±1)℃范围内。另取60 mL重蒸乙醚和适量沸石加入到100 mL圆底烧瓶中,置于同时蒸馏装置轻相端,采用水浴加热,温度控制在(40±1)℃范围内,蒸馏萃取2 h。萃取结束后,用无水硫酸钠对萃取液进行干燥,过滤,将滤液旋转蒸发浓缩至约5 mL,再进一步用氮气吹扫至1 mL,加入1 mL内标溶液混匀后,进行GC-MS检测。

1.3.3 GC-MS分析条件

GC条件:HP-5MS型色谱柱(30 m×250 μm, 0.25 μm),进样口温度280℃,载气为He,载气流速为1.0 mL/min;升温程序:起始温度40℃(保持2 min),然后以5℃/min的速度升到150℃,再以15℃/min的速率升到280℃(保持2 min)。分流比为20:1,进样量1 μL。

MS条件:电子离子源,电子能量70 eV,离子源温度230℃,四极杆温度150℃,全扫描模式,扫描质量范围为15~500 u,溶剂延迟1.6 min。

1.3.4 定性定量分析

定性分析:计算机检索NIST 11谱库,并结合计算保留指数共同确定。

保留指数(*I*)计算如式(1)所示^[11]:

$$I = 100 \times \left(n + \frac{t_i - t_n}{t_{n+1} - t_n} \right) \quad (1)$$

式中:*n*为碳数;*t_i*为待测组分的保留时间;*t_n*为具有*n*个碳原子的正构烷烃的保留时间;*t_{n+1}*为具有(*n*+1)个碳原子的正构烷烃的保留时间。

定量分析:以邻二氯苯为内标,根据内标物的质量浓度、样品中各组分的峰面积与内标峰面积的比值,计算臭豆腐样品中各组分的含量,认定内标的因子为1^[12]。

定量分析计算如式(2)、(3)所示^[13]:

$$\rho_i = \frac{A_i}{A_0} \times \rho_0 \quad (2)$$

$$X = \frac{\rho_i \times V_i \times n_{0i}}{m_s} \quad (3)$$

式(2)、(3)中:*X*为待测物质的含量/(mg/g);*A_i*为待测物质的峰面积;*A₀*为内标物邻二氯苯的峰面积; ρ_i 为待测物质的质量浓度/(mg/mL); ρ_0 为内标溶液的质量浓度/(mg/mL);*V_i*为萃取液的体积/mL;*n_{0i}*为混合液中所含的内标物体积与萃取液体积之比;*m_s*为前处理前样品的质量/g。

2 结果与分析

2.1 萃取时间的选择

为了考察SDE的萃取时间对实验结果的影响, 分别选择1、2、3、4、5 h作为萃取时间, 在相同的GC-MS条件下进行分析, 结果见图1。

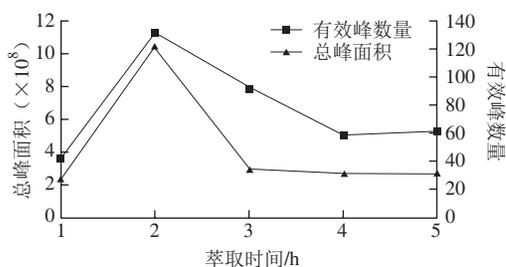


图1 萃取时间对王致和臭豆腐香气萃取效果的影响

Fig.1 Effect of temperature on the extraction efficiency of aroma compounds from Wangzhihe stinky tofu

从图1可以看出, 萃取1 h时, 检测到的总峰面积较小, 表明萃取时间较短, 挥发性成分的萃取不完全; 随着萃取时间的延长, 总峰面积逐渐增大, 当萃取时间在2 h时总峰面积达到最大值; 进一步延长萃取时间, 检测到的总峰面积减小, 这是因为臭豆腐的挥发性成分中所含大多为易挥发、低沸点的成分, 过长的萃取时间易造成挥发性成分的损失。故萃取时间不宜过长, 优化后的较佳萃取时间为2 h。

2.2 挥发性成分分析

采用SDE 2 h, 提取了臭豆腐中的挥发性成分, 其GC-MS分析的总离子流图如图2所示, 鉴定出的成分如表1所示。

从图2和表1可以看出, 采用SDE方法提取王致和臭豆腐中的挥发性成分, 经GC-MS分析, 共检出臭豆腐挥发性成分44种。44种挥发性成分在臭豆腐中的含量为 $24.06 \mu\text{g/g}$, 包括醇类6种 ($10.43 \mu\text{g/g}$)、酯类17种 ($6.88 \mu\text{g/g}$)、酚类1种 ($0.26 \mu\text{g/g}$)、醛酮类3种 ($0.15 \mu\text{g/g}$)、硫醚类5种 ($1.01 \mu\text{g/g}$)、杂环类6种 ($2.67 \mu\text{g/g}$)、其他化合物6种 ($2.66 \mu\text{g/g}$)。其中含量大于 $1 \mu\text{g/g}$ 的有: 正丁醇 ($7.21 \mu\text{g/g}$)、正丙醇 ($2.33 \mu\text{g/g}$)、乙酸乙酯 ($1.71 \mu\text{g/g}$)、丁酸丁酯 ($1.44 \mu\text{g/g}$)、*N,N*-二甲基硫代乙酰胺 ($1.29 \mu\text{g/g}$)、1-甲氧基-3-甲基丁烷 ($1.26 \mu\text{g/g}$)、5,6-二氢-2,4,6-三甲基-4*H*-1,3,5-二噻嗪 ($1.17 \mu\text{g/g}$)、乙酸丁酯 ($1.13 \mu\text{g/g}$)。

表1 王致和臭豆腐中挥发性成分的GC-MS分析结果

Table 1 GC-MS analysis of volatile compounds in Wangzhihe stinky tofu

类别	序号	保留时间/min	化合物名称	CAS号	含量/ $(\mu\text{g/g})$	保留指数	文献保留指数	鉴定方法
醇类	1	1.74	正丙醇	71-23-8	2.33	<603	532 ^[4]	MS, RI
	2	1.96	2-丁醇	78-92-2	0.70	603	—	MS
	3	2.58	正丁醇	71-36-3	7.21	667	668 ^[5]	MS, RI
	4	6.63	3-甲基-2-己醇	2313-65-7	0.06	865	—	MS
	5	10.06	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	0.04	977	982 ^[6]	MS, RI
	6	11.50	桉叶油醇	470-82-6	0.09	1022	1023 ^[7]	MS, RI
合计					10.43			
酯类	1	2.02	乙酸乙酯	141-78-6	1.71	611	605 ^[5]	MS, RI
	2	2.45	乙酸异丙酯	108-21-4	0.09	656	—	MS
	3	2.91	硫代乙酸甲酯	1534-08-3	0.42	695	—	MS
	4	3.13	乙酸丙酯	109-60-4	0.30	711	712 ^[5]	MS, RI
	5	3.26	丁酸甲酯	623-42-7	0.05	719	724 ^[5]	MS, RI
	6	3.93	乙酸仲丁酯	105-46-4	0.03	755	—	MS
	7	4.85	丁酸乙酯	105-54-4	0.86	796	818 ^[4]	MS, RI
	8	5.18	乙酸丁酯	123-86-4	1.13	810	812 ^[5]	MS, RI
	9	6.85	乙酸戊酯	628-63-7	0.06	873	—	MS
	10	7.15	硫代丁酸甲酯	2432-51-1	0.04	882	—	MS
	11	7.47	丁酸丙酯	105-66-8	0.26	892	896 ^[5]	MS, RI
	12	7.78	丙酸丁酯	590-01-2	0.09	902	910 ^[5]	MS, RI
	13	10.45	丁酸丁酯	109-21-7	1.44	989	994 ^[5]	MS, RI
	14	11.00	乙酸己酯	7789-99-3	0.10	1005	—	MS
	15	12.31	丁酸戊酯	540-18-1	0.03	1049	—	MS
	16	16.38	丁酸己酯	2639-63-6	0.07	1184	1194 ^[8]	MS, RI
	17	32.97	油酸丁酯	142-77-8	0.20	2445	—	MS
合计					6.88			
酚类	1	10.74	苯酚	108-95-2	0.26	997	995 ^[9]	MS, RI
合计					0.26			
醛酮类	1	2.37	3-甲基丁醛	590-86-3	0.04	648	—	MS
	2	6.39	2-甲基-4-戊烯醛	5187-71-3	0.01	857	—	MS
	3	10.16	3-辛酮	106-68-3	0.10	980	—	MS
合计					0.15			
硫醚类	1	3.65	二甲基二硫	624-92-0	0.42	740	740 ^[4]	MS, RI
	2	9.59	二甲基三硫	3658-80-8	0.36	963	956 ^[4]	MS, RI
	3	14.63	3,5-二甲基-1,2,4-三硫环戊烷	23654-92-4	0.04	1124	—	MS
	4	15.76	1,1-双(甲硫基)乙烷	7379-30-8	0.04	1163	—	MS
	5	17.10	二甲基四硫	5756-24-1	0.15	1207	1215 ^[4]	MS, RI
合计					1.01			
杂环类	1	4.18	3-甲基噻吩	616-44-4	0.02	768	—	MS
	2	7.30	2,3-二氢咪唑	1191-99-7	0.43	887	—	MS
	3	10.31	2-戊基咪唑	3777-69-3	0.27	985	994 ^[20]	MS, RI
	4	15.46	2-戊基噻吩	4861-58-9	0.08	1153	—	MS
	5	16.72	5,6-二氢-2,4,6-三甲基-4 <i>H</i> -1,3,5-二噻嗪	1000360-36-4	1.17	1194	—	MS
	6	19.53	咪唑	120-72-9	0.70	1291	1290 ^[21]	MS, RI
合计					2.67			
其他类	1	2.25	1,2-二氧基乙烷	38348-26-4	0.01	636	—	MS
	2	3.40	1,1-二氧基乙烷	105-57-7	0.06	727	—	MS
	3	4.57	1-辛烯	111-66-0	0.02	785	—	MS
	4	9.41	1-甲氧基-3-甲基丁烷	626-91-5	1.26	958	—	MS
	5	13.45	<i>N,N</i> -二甲基硫代乙酰胺	631-67-4	1.29	1085	—	MS
	6	28.34	壬基环丙烷	74663-85-7	0.02	1766	—	MS
合计					2.66			
总计					24.06			

注: —未查到; MS,质谱鉴定; RI,保留指数鉴定。

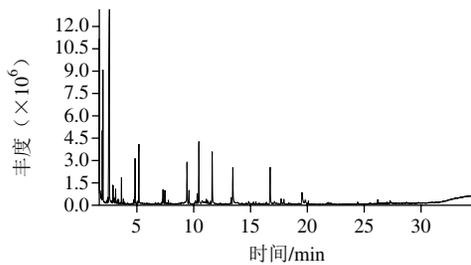


图2 王致和臭豆腐中挥发性成分总离子流图

Fig.2 Total ion current chromatogram of volatile compounds from Wangzhihe stinky tofu

表2 王致和臭豆腐中的主要挥发性成分的OAV

Table 2 OAV of major volatile compounds in Wangzhihe stinky tofu

化合物名称	质量浓度 ^a / (10 ³ μg/L)	阈值 ^b / (μg/L)	OAV ^c
正丙醇	7.70	9 000	85.57
2-丁醇	2.31		
正丁醇	23.79	500	4 758.95
3-甲基-2-己醇	0.19		
1-辛烯-3-醇	0.12	1	1.20×10 ⁴
桉叶油醇	0.30	12	2 502.47
乙酸乙酯	5.63	500	1 125.15
乙酸异丙酯	0.30		
硫代乙酸甲酯	1.38		
乙酸丙酯	0.98		
丁酸甲酯	0.16	60	259.04
乙酸仲丁酯	0.10		
丁酸乙酯	2.84	13.6	2.09×10 ⁴
乙酸丁酯	3.72	66	5 634.76
乙酸戊酯	0.19	43	453.03
硫代丁酸甲酯	0.12		
丁酸丙酯	0.87	124	702.78
丙酸丁酯	0.29	25	1 149.71
丁酸丁酯	4.76	100	4 764.01
乙酸己酯	0.32	5	6 495.61
丁酸戊酯	0.09	59	144.36
丁酸己酯	0.22	250	86.01
油酸丁酯	0.64		
苯酚	0.85	5 900	14.38
3-甲基丁醛	0.15		
2-甲基-4-戊烯醛	0.04		
3-辛酮	0.34	28	1 208.87
二甲基二硫	1.38	12	1.15×10 ⁴
二甲基三硫	1.19	0.01	1.19×10 ⁷
3,5-二甲基-1,2,4-三硫环戊烷	0.14	10	1 361.22
1,1-双(甲硫基)乙烷	0.14		
二甲基四硫	0.48		
3-甲基噻吩	0.07		
2,3-二氢呋喃	1.43		
2-戊基呋喃	0.87	6	1.45×10 ⁴
2-戊基噻吩	0.26		
5,6-二氢-2,4,6-三甲基-4H-1,3,5-二噻嗪	3.85		
吡嗪	2.32	140	1 658.43
1,2-二乙氧基乙烷	0.03		
1,1-二乙氧基乙烷	0.20		
1-辛烯	0.06		
1-甲氧基-3-甲基丁烷	4.16		
N,N-二甲基硫代乙酰胺	4.25		
壬基环丙烷	0.06		

注: a. 质量浓度根据式(2)计算得出; b. 水中的气味阈值; c. OAV = 气味物质浓度/气味阈值。

发酵过程中,豆腐中的碳水化合物在多种微生物作用下转变为醇类化合物^[2]。从鉴定出的成分含量来看,王致和臭豆腐中鉴定出的醇类化合物含量最多。其中含量较高的正丁醇(7.21 μg/g)、正丙醇(2.33 μg/g)具有醇香香气以及特有的成熟果香风味,赋予臭豆腐醇厚香气^[22]。结合其他发酵型臭豆腐以及非发酵型臭豆腐的文献报道^[1-2,7],发酵型与非发酵型臭豆腐中均含有正丁醇和正丙醇,且含量均很高,可以看出正丙醇和正丁醇是臭豆腐的特征性香气成分。且如表2所示,正丙醇和正丁醇的OAV均大于1,且正丁醇OAV远大于正丙醇,表明正丁醇对王致和臭豆腐的整体香气贡献比正丙醇大。此外,检测出的1-辛烯-3-醇(0.04 μg/g)具有薰衣草及甘草气息,桉树醇(0.09 μg/g)具有类似樟脑的气息,两者含量虽小,但两者的OAV远大于1,表明1-辛烯-3-醇和桉树醇对王致和臭豆腐的整体香气有所影响。

酯类化合物含量位居第二,且酯类化合物数量最多。酯类化合物赋予了臭豆腐果香、酒香、蜜香香气特征;其中乙酸乙酯(1.71 μg/g)具有果香、酒香香气;乙酸丁酯(1.13 μg/g)具有类似菠萝香气;丁酸乙酯(0.86 μg/g)具有菠萝、玫瑰香气;丁酸戊酯(0.03 μg/g)具有强而轻灵的甜果香气^[23]。且酯类化合物的OAV均大于1,对王致和臭豆腐有香气贡献。与相关的发酵型臭豆腐的文献^[1-2]报道相比,本研究所采用的SDE-GC-MS鉴定出的醇类和酯类种类多于文献报道中用SPME-GC-MS鉴定出的醇类和酯类的种类,主要是因为SDE法萃取温度比SPME法萃取温度高,更有利于提取臭豆腐的挥发性成分,丁酸己酯和油酸丁酯这些沸点高的物质也在本研究的SDE法中较高的萃取温度条件下被提取鉴定出来。

杂环类化合物含量也较高,且香气特征强、阈值低,对臭豆腐香气的影响也极为重要,其中吡嗪(0.70 μg/g)具有动物粪便味,提供了臭豆腐的臭味特征;结合表2,吡嗪的OAV远大于1,证明吡嗪为王致和臭豆腐主要特征性香气成分;结合相关臭豆腐文献报道^[1-2,7],可见发酵型臭豆腐的挥发性成分均含有吡嗪,而非发酵型臭豆腐中不含吡嗪,可能是提取方法的不同或臭豆腐配料及生产工艺的不同导致,有待进一步实验证明。呋喃类化合物(2,3-二氢基呋喃0.43 μg/g、2-戊基呋喃0.27 μg/g)具有水果香气;噻吩类化合物(3-甲基噻吩0.02 μg/g、2-戊基噻吩0.08 μg/g)具有焦香、坚果香,均对王致和臭豆腐的香气有所贡献。

此外,硫醚类化合物含量为1.01 μg/g,是由臭豆腐中含硫氨基酸进一步降解而得。其中的二甲基二硫(0.42 μg/g)、二甲基三硫(0.36 μg/g)等含硫化合物阈值低,具有洋葱、萝卜气息,且OAV均较大,对臭豆腐特征香气起较大贡献。鉴定出的醛酮类化合物可以使臭

豆腐整体香气透发; 纯的苯酚具有酚香气息, 且OAV大于1, 增强臭豆腐的整体香气, 具有防腐杀菌作用。而其他化合物中烃类化合物由于阈值较高, 对臭豆腐香气贡献不大。

3 结论

采用SDE法提取, 经GC-MS分析, 从臭豆腐中共分离鉴定出44种挥发性成分, 在臭豆腐中的含量为24.06 $\mu\text{g/g}$; 其中醇类化合物含量较高为10.43 $\mu\text{g/g}$ (6种), 酯类化合物6.88 $\mu\text{g/g}$ (17种), 其他依次为杂环类2.67 $\mu\text{g/g}$ (6种)、硫醚类1.01 $\mu\text{g/g}$ (5种)、醛酮类0.15 $\mu\text{g/g}$ (3种)、酚类0.26 $\mu\text{g/g}$ (1种)、其他化合物2.66 $\mu\text{g/g}$ (6种)。

根据鉴定出的挥发性成分香气特征, 结合OAV分析, 得出王致和臭豆腐特征性香气成分有吡啶、正丁醇、正丙醇、二甲基二硫、二甲基三硫、二甲基四硫等, 其中臭豆腐特有的臭味香气主要来自于吡啶及含硫化物, 而其他的香气成分还赋予了臭豆腐果香、酒香和蜜香。

参考文献:

- [1] 刘玉平, 苗志伟, 黄明泉, 等. 臭豆腐中挥发性香成分提取与分析[J]. 食品科学, 2011, 32(24): 228-231.
- [2] 刘玉平, 陈海涛, 孙宝国, 等. 固相微萃取与GC-MS法分析发酵型臭豆腐中挥发性成分[J]. 食品工业科技, 2009, 30(12): 403-405.
- [3] MEGUMI K, KUMI T, SHINKICHI T, et al. Angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides isolated from tofuyo fermented soybean food[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2003, 67(6): 1278-1283.
- [4] 鲁绯, 孙君社, 韩北忠, 等. 青方腐乳酿造过程内部微细结构的扫描电镜观察[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2004, 36(5): 40-43.
- [5] 郭华, 廖兴华, 周建平, 等. 臭豆腐菌种分离鉴定与酿造工艺研究[J]. 食品科学, 2004, 25(4): 109-115.
- [6] 黄香华, 蒋立文, 易灿. 臭豆腐菌种鉴定、发酵及气味成分分析[J]. 农产品加工, 2009(4): 76-78.
- [7] 郑小芬, 苏悟, 蒋立文. 两种臭豆腐卤水中挥发性成分的比较[J]. 中国酿造, 2013, 32(10): 122-125.
- [8] 曾晓房, 白卫东, 陈海光, 等. 同时蒸馏萃取/气-质联用分析广式腊肠的挥发性成分[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(7): 139-143.
- [9] 郭凯, 芮汉明. 食品中挥发性风味成分的分选、分析技术和评价方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(4): 110-115.
- [10] 何聪聪, 苏柯冉, 刘梦雅, 等. 基于AEDA和OAV值确定西瓜汁香气活性化合物的比较[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 279-285.
- [11] 谢建春. 现代香味分析技术及应用[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 17-18.
- [12] XIE Jianchun, SUN Baoguo, ZHENG Fuping, et al. Volatile flavor constituents in roasted pork of Mini-pig[J]. Food Chemistry, 2008, 109(3): 506-514.
- [13] 宋光林, 杨昌彪, 肖飞, 等. 内标-气相色谱法分析白酒中的正丙醇含量[J]. 贵州科学, 2012, 30(6): 70-72.
- [14] BONAITI C, IRLINGER F, SPINLER H E, et al. An iterative sensory procedure to select odor-active associations in complex consortia of microorganisms: application to the construction of a cheese model[J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(5): 1671-1684.
- [15] PINO J A, MESA J, MUNOZY, et al. Volatile components from mango (*Mangifera indica* L.) cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(6): 2213-2223.
- [16] PEREZ R A, NAVARRO T, de LORENZO C. HS-SPME analysis of the volatile compounds from spices as a source of flavour in 'Campo Real' table olive preparations[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2007, 22(4): 265-273.
- [17] KUNDAKOVIC T, FOKIALAKIS N, KOVACEVIC N, et al. Essential oil composition of *Achillea lingulata* and *A. umbellata*[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2007, 22(3): 184-187.
- [18] SAROGLU V, DORIZAS N, KYPRIOTAKIS Z, et al. Analysis of the essential oil composition of eight *Anthemis* species from Greece[J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1104(1/2): 313-322.
- [19] ANSORENA D, GIMENO O, ASTIASARAN I, et al. Analysis of volatile compounds by GC-MS of a dry fermented sausage: chorizo de Pamplona[J]. Food Research International, 2001, 34: 67-75.
- [20] ZENG Yingxu, ZHAO Chenxi, LIANG Yizeng, et al. Comparative analysis of volatile components from *Clematis* species growing in China[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 595(1/2): 328-339.
- [21] SENATORE F, ARNOLD N A, PIOZZI F, et al. Chemical composition of the essential oil of *Salvia microstegia* Boiss. et Balansa growing wild in Lebanon[J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1108(2): 276-278.
- [22] 朱瑞鸿, 薛群成, 李忠臣, 等. 合成食用香料手册[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1993: 25.
- [23] 张承曾, 汪清如. 日用调香术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1993: 276-294.