

米饭中关键风味化合物的分析

苗菁¹, 苏慧敏², 张敏^{1,3,*}

(1.北京工商大学 食品添加剂与配料北京高校工程研究中心, 北京 100048;

2.北京工商大学 北京食品风味化学重点实验室, 北京 100048;

3.北京工商大学 北京食品营养与人类健康高精尖创新中心, 北京 100048)

摘要:采用固相微萃取与同时蒸馏提取两种方法,应用香气提取物分析结合气味活性值对米饭中的风味物质进行气相色谱-质谱分析,从而确定米饭风味中的关键风味化合物。结果表明,米饭中共鉴定出40种风味化合物,包括醛类13种、醇类7种、酮类3种、酯类4种、酚类4种,及吡啶、噻唑、吡咯、呋喃类等;醛类物质在米饭风味物质中的含量最大;2-乙酰基-1-吡咯啉是米饭中最主要的风味活性化合物。综合两种处理方式发现,2-乙酰基-1-吡咯啉、香草醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、4-乙烯基苯酚、4-乙烯基创木酚、己醛、辛醛、庚醛、戊醛等物质对米饭整体风味轮廓起到关键作用。

关键词:米饭;固相微萃取;同时蒸馏提取;风味化合物;风味

Analysis of the Key Flavor Compounds in Cooked Rice

MIAO Jing¹, SU Huimin², ZHANG Min^{1,3,*}

(1. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Food Additives and Ingredients,

Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Key Laboratory of Flavor Chemistry,

Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 3. Beijing Advanced Innovation Center for

Food Nutrition and Human Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The key flavor compounds of cooked rice were extracted by either solid phase microextraction (SPME) or simultaneous distillation extraction (SDE) and determined by gas chromatography-mass spectrometric (GC-MS) analysis using aroma extract dilution analysis (AEDA) based on odor activity value (OAV). As a result, 40 flavor compounds were identified from cooked rice, including 13 aldehydes, 7 alcohols, 3 ketones, 4 esters, 4 phenols, pyridines, thiazoles, indoles and furans. Aldehydes were the most abundant flavor compounds quantified in cooked rice. 2-Acetyl-1-pyrroline was the most important flavor compound in cooked rice. Taken together, the two extraction techniques revealed that 2-acetyl-1-pyrroline, vanillin, 1-octen-3-ol, nonanal, 4-vinylphenol, 4-vinyl guaiacol, hexanal, octanal, heptanal and pentanal played key roles in the overall flavor profile of cooked rice.

Key words: rice; solid phase microextraction; simultaneous distillation extraction; key flavor compounds; flavor

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201602014

中图分类号: TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2016) 02-0082-05

引文格式:

苗菁, 苏慧敏, 张敏. 米饭中关键风味化合物的分析[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 82-86. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201602014. <http://www.spkx.net.cn>

MIAO Jing, SU Huimin, ZHANG Min. Analysis of the key flavor compounds in cooked rice[J]. Food Science, 2016, 37(2): 82-86. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201602014. <http://www.spkx.net.cn>

自古以来,米饭都是中国人最重要的主食之一。随着生活水平的逐渐提高,人们对于米饭的要求不再停留于果腹之需,而是更加注重米饭的品质,对米饭风味尤为重视。米饭风味是指蒸煮米饭所带来的味觉、嗅觉

等综合感觉,它直接决定米饭的品质,是人们评判米饭最直观的方法^[1]。

近年来,食品风味的研究方兴未艾。关于提取风味化合物成分的方法有很多,包括固相微萃取(solid

收稿日期: 2015-05-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31371830);北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目(IDHT20130506)

作者简介: 苗菁(1991—),女,硕士研究生,研究方向为粮食、油脂与植物蛋白工程。E-mail: 331977710@qq.com

*通信作者: 张敏(1972—),女,教授,博士,研究方向为粮食、油脂与植物蛋白工程。E-mail: xzm7777@sina.com

phase microextraction, SPME)、动态顶空(dynamic headspace, DHS)提取、溶剂辅助风味蒸发、同时蒸馏提取(stimultaneous distillation extraction, SDE)法等。SPME作为一种新型技术,具有操作简单、化合物提取进样一体化、样品消耗少、快速简单、重现性好等特点,已被广泛应用于挥发性物质的测定中。杨江帆等^[2]采用SPME-GC-MS方法检测出茉莉花茶香气的关键性风味化合物。陈海涛等^[3]同样采用SPME-气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)检测出羊肉的挥发性风味成分。SDE通过同时加热样品液相与有机溶剂至沸腾,是将样品的水蒸气蒸馏和溶剂萃取合二为一的提取方法,对于中等至高沸点成分的提取效果较好^[4]。李丽梅等^[5]采用SDE法进行洋葱精油的提取,获得较高的提取率。麦雅彦等^[6]采用SDE-GC-MS对南美白对虾的挥发性成分进行了研究。SDE的操作温度较高,风味化合物可能在操作过程中进一步发生化学反应^[7]。

香气提取物稀释分析(aroma extract dilution analysis, AEDA),是将GC与感官分析相结合,通过溶剂将提取的风味化合物稀释至嗅闻口无法嗅闻(olfactory, O)到化合物气味为止,并将嗅闻结果结合保留指数指标,从众多化合物中将具有香气的化合物区分出来。AEDA可以判定某几种化合物对于整体香气的作用,但其局限性在于,每种化合物组分的嗅闻时间较短,需要对嗅闻人员进行培训,否则难以确切的评定。

SDE结合AEDA探究食品特征风味化合物已被广泛应用。Cullere等^[8]利用香气提取物风味分析结合顶空吹扫捕集装置确定了松露的特征风味化合物。Tran等^[9]在确定葡萄酒特征风味时,同样使用了AEDA。但鲜有使用此法探究米饭特征风味化合物的报道。将这些有差异性的提取方法结合分析,有助于更加全面、客观地研究米饭特征风味化合物,以及深入研究米饭成味机理。

目前,关于米饭风味化合物的研究有很多。应兴华等^[10]通过SPME-GC-MS法研究表明,2-乙酰基-1-吡咯啉可使米饭呈现甜香气味,而乙酸乙酯、辛酸乙酯等酯类物质可对米饭风味起烘托作用,使米饭香气更加温润、饱满。研究^[11]发现,某些有机杂环化合物如吡嗪、吡啶及呋喃类化合物与米饭甜香味有密切关系。另有研究发现,醛类化合物是米饭香气的主要评价指标,而米饭中吡嗪类及吡啶类化合物含量与米饭品质呈现正相关关系^[12]。这些研究主要集中于风味化合物种类的测定,相较于其他食品,采用SPME与SDE两种提取方法,应用AEDA结合气味活度值(odour activity value, OAV)对米饭中的特征风味物质进行分析的研究未见报道。

本研究应用GC-O-MS技术,结合SPME与SDE两种前处理方法综合鉴定米饭中的关键风味化合物,以期为今后深入了解米饭风味的化学本质,及米饭主食工业化生产提供科学依据和理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大米,市售净含量5 kg的中粮福临门优质大米,室温放置3个月。

系列正构烷烃、乙醚、戊烷、无水硫酸钠、2-甲基-3-庚酮 北京化学试剂公司;氦气 北京氮普分气体工业有限公司。

1.2 仪器与设备

同时蒸馏萃取装置 北京玻璃仪器厂;7890A-7000B GC-MS联用仪(配有电子电离源及NIST 08数据库)、手动SPME装置、30/50 μm DVB/Carboxen/PDMS灰色SPME头及手柄 美国Agilent公司;毛细管柱:DB-Wax(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μm) 美国J&W公司;Sniffer-9000嗅闻检测器 德国Gerstel公司;Sniffer 9000嗅闻仪 瑞士Brechtbuhler公司。

1.3 方法

1.3.1 米饭的制备

参照GB/T 15682—2008《稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》中小量样制备米饭,并做适当改进。称取大米样品置于带盖密闭铝盒中,加入适量蒸馏水淘洗,按水米质量比为1.5:1的比例向铝盒中加入蒸馏水,在25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下浸泡30 min后,上笼蒸煮30 min,然后保温焖制15 min。

1.3.2 米饭风味物质的提取

1.3.2.1 SDE

在同时蒸馏萃取装置的1 000 mL烧瓶中装入50 g样品及200 mL蒸馏水。在25 mL的圆底烧瓶中加入90 mL有机溶剂(乙醚60 mL,正戊烷30 mL)。1 000 mL和250 mL烧瓶分别在150 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温油浴锅和45 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中加热,样品加热至沸腾,同时蒸馏萃取5 h后收集有机溶剂,进行GC-O分析。

1.3.2.2 SPME

将30/50 μm DVB/Carboxen/PDMS灰色萃取头在GC的进样口老化,老化温度250 $^{\circ}\text{C}$,时间10 min。取5 g米饭和10 μL 质量浓度为0.163 2 $\mu\text{L/mL}$ 的2-甲基-3-庚酮置于40 mL顶空瓶中,用封口膜封好,置于50 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中平衡20 min。SPME针顶空吸附40 min后拔出萃取针,在温度为250 $^{\circ}\text{C}$ 的GC-MS进样口中解吸5 min,进行GC-MS分析^[13]。

1.3.3 GC-O-MS分析条件

GC条件:采用DB-WAX毛细管柱,载气为氦气,流速为1.2 mL/min。升温程序为:初温40 $^{\circ}\text{C}$,保持3 min,以1.5 $^{\circ}\text{C/min}$ 升温到65 $^{\circ}\text{C}$,再以2 $^{\circ}\text{C/min}$ 升到120 $^{\circ}\text{C}$,保持1 min,最后以15 $^{\circ}\text{C/min}$ 升到280 $^{\circ}\text{C}$,保持5 min。

MS条件:电子电离源,电子能量70 eV,传输线温

度280℃，离子源温度230℃，四极杆温度150℃，质量扫描范围 m/z 55~500，嗅觉检测器，接口温度200℃，毛细管末端流出物以1:1的分流比分别流入MS和嗅闻检测器^[14]。

1.4 米饭风味物质的分析

1.4.1 定性分析

将系列正构烷烃换算得来的保留指数（retention index, RI）与质谱数据库的RI值进行比较，从而确定米饭风味化合物的种类。

1.4.2 OAV

以2-甲基-3-庚酮作为内标物，通过色谱峰面积计算出香气化合物的含量，进行米饭风味化合物的定量分析。见式（1）、（2）。

$$OAV = \frac{c_i}{\text{阈值}} \quad (1)$$

$$c_i = c_{is} \times A_i / A_{is} \quad (2)$$

式中： c_i 为风味化合物浓度； c_{is} 为内标物的浓度； A_i 为化合物色谱峰面积； A_{is} 为内标物色谱峰面积。阈值通过文献查得通过化合物阈值。

1.4.3 AEDA分析

将提取浓缩后的香气提取物进行系列稀释，经GC-O分析到不能再闻到香气为止，其稀释浓度比值为风味稀释（flavor dilution, FD）因子。FD因子越高，说明该化合物对样品风味贡献越大。本研究采用乙醚及正戊烷按体积比1:3、1:9、1:27等逐步稀释，用每种物质能被嗅闻到的最终稀释倍数 n 表示，即表示稀释到第 n 次仍被嗅闻到。

2 结果与分析

2.1 SDE法鉴定米饭关键风味成分

表1 饭中风味化合物稀释分析
Table 1 Analysis of flavor compounds in cooked rice by AEDA

序号	化合物	气味特征	RI值	n
1	2-乙酰基-1-吡咯啉 2-acetyl-1-pyrroline	爆米花味	1316	7
2	香草醛 vanillin	香草味	2545	5
3	1-辛烯-3-醇 1-octene-3-ol	蘑菇味	1445	5
4	壬醛 nonanal	肥皂味	1381	5
5	4-乙基苯酚 4-ethylphenol	药香味	2185	4
6	己醛 hexanal	青草味	1070	4
7	辛醛 octanal	青草味、柑橘味	1280	4
8	戊醛 pentanal	水果味	975	3
9	庚醛 heptanal	脂肪味	1178	3
10	4-乙基苯酚 4-ethylphenol	烧烤味	2178	2
11	2-戊基呋喃 2-pentyl furan	甘草味	1180	1
12	苯甲醛 benzaldehyde	坚果味、苦味	1521	1

评价员通过GC-O检测到12种风味化合物，通过RI值比以确定其成分，这些化合物列于表1。从表1的最终稀

释倍数 n 可以看出，2-乙酰基-1-吡咯啉最高， n 高达7，即2-乙酰基-1-吡咯啉在将样品稀释到7次后仍能嗅闻其爆米花味，对于米饭的整体香味起着决定性作用。具有香草味的香草醛和具有蘑菇味道的1-辛烯-3-醇在稀释5次之后仍可以通过嗅闻口嗅闻到。其次是稀释4次仍可以嗅闻到的4-乙基苯酚、己醛、辛醛。再次是戊醛与庚醛。而稀释2次后，4-乙基苯酚的烧烤味可以被嗅闻到。2-戊基呋喃与苯甲醛稀释1次后可以嗅闻到甘草味以及坚果味。

通过进行稀释分析，2-乙酰基-1-吡咯啉、香草醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、4-乙基苯酚、己醛、辛醛、戊醛及庚醛9种化合物因其最高稀释倍数 n 不小于3，即稀释至27倍后仍可嗅闻到，故此9种被选定为米饭的关键风味化合物。AEDA法可以通过香气稀释因子评判每种风味化合物对整体风味的贡献度，但针对每种风味化合物在风味物质中的含量分析仍需使用光谱分析来获得。

2.2 SPME法鉴定米饭关键风味成分

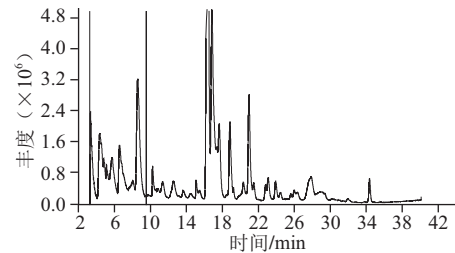


图1 米饭的风味谱图
Fig.1 Mass spectrum of cooked rice

米饭的风味谱图如图1所示。从米饭中共鉴定出40种风味化合物，见表2。米饭风味成分中包括醛类13种、醇类7种、酮类3种、酯类4种、酚类4种，及吡啶、噻唑、呋喃、咪唑等化合物。Champagne等^[15]研究发现，米饭风味主要以醛类、醇类、酮类及呋喃类物质为主。Zeng等^[16]的研究证实，在其鉴定出的45种米饭风味化合物中，醛类所占比重最大，其次是醇类及酮类物质。

本研究的结果分析证实，醛类物质在米饭风味物质中的含量最大，总含量高达887.27 mg/kg，阈值普遍较低，且气味特征均以水果香、甜香为主。其中，香草醛、苯甲醛及4-羟基-3-甲氧基苯甲醛含量均超过100 mg/kg，但因其阈值过大，故OAV并不高。而己醛、辛醛等物质因其阈值均小于1，故OAV大，对米饭整体香气贡献反而大于苯甲醛等含量高的物质。醛类中，己醛、壬醛、辛醛等物质的OAV明显高于其他物质，对整体香气贡献较大，而反-2-辛烯醛、糠醛、苯甲醛、4-羟基-3-甲氧基苯甲醛的OAV较小，对整体香气成分贡献不大。

醇类物质中，只有具有蘑菇味的1-辛烯-3-醇阈值较小，OAV达到31.08；其余6种检测到的醇类物质，由于阈值过大，OAV均小于1，因此醇类物质中只有1-辛烯-3-醇对米饭整体香气有贡献。

酯类物质包括乙酸甲酯、乙酸乙酯、乙酸己酯及 γ -癸内酯4种,其OAV均小于5,故而对整体香气没有明显的贡献,只起到烘托铺垫的作用。酚类物质中,4-乙基苯酚的含量并不高,但因其阈值仅为0.3,故OAV较高,达到26.97。同样的情况发生在阈值仅为0.1的2-乙酰基-1-吡咯啉这种化合物上,该化合物OAV高达192.70,故而具有爆米花味的2-乙酰基-1-吡咯啉成为米饭中最主要的气味活性化合物。曾有研究^[17]表明,2-乙酰基-1-吡咯啉是香米特有的特征风味物质,本研究使用的原料应该是具有香米基因的稻谷品种。有关稻米品种对米饭风味物质的影响,有待进一步深入研究。

表2 米饭中鉴定出的风味化合物分析列表
Table 2 Volatile flavor compounds identified in cooked rice

物质名称	RI值	气味特征	含量/(mg/kg)	阈值/(mg/kg)	OAV
戊醛	975	木香, 水果香	81.32±9.96	20	4.07
己醛	1070	青草味	2.88±0.01	0.02	144
庚醛	1178	水果香	28.73±4.47	3	9.58
辛醛	1280	青草、柑橘味	15.63±1.06	0.7	22.33
壬醛	1381	柑橘、肥皂味	95.84±8.34	1	95.84
反-2-己烯醛	1229	绿叶香	20.13±0.82	17	1.18
反-2-庚烯醛	1329	草本味	25.71±3.38	13	1.98
反-2-辛烯醛	1425	青草、脂肪味	6.21±0.05	13	<1
糠醛	1378	苦杏仁味	1.26±0.01	20	<1
4-羟基-3-甲氧基苯甲醛	—	苦味	103.4±9.83	181	<1
苯甲醛	1521	坚果味、苦味	192.71±7.97	350	<1
3-甲基丁醛	—	麦芽味	19.76±4.23	5.4	3.66
香草醛	2565	香草味	306.95±7.55	58	5.29
乙醇	947	酒精味	24.90±2.97	100 000	<1
1-辛烯-3-醇	1445	蘑菇味、土味	31.08±8.04	1	31.08
1-戊醇	1308	水果味	0.98±0.01	4 000	<1
2-甲基-1-丁醇	1795	花香味	9.55±1.03	300	<1
己醇	1300	果香味	17.83±0.54	2 500	<1
1-庚醇	1339	甜香、坚果味	3.65±0.58	3	<1
2-乙基己醇	1483	特殊气味	4.58±0.37	270 000	<1
6-甲基-5-庚烯-2-酮	1338	香蕉味	37.96±1.99	50	<1
2,3-丁二酮	1055	清香味	10.25±1.20	32	<1
3-巯基-2-丁酮	1273	熟大米味	4.96±0.47	15	<1
乙酸甲酯	929	清香、甜香味	50.03±4.68	100	<1
乙酸乙酯	900	水果香味	21.47±2.35	5	4.30
乙酸己酯	1179	梨香、苹果味	7.36±0.45	2	3.68
γ -癸内酯	2048	桃子味	38.97±2.56	11	3.54
4-乙基苯酚	2178	坚果味	8.09±0.85	0.3	26.97
4-乙基苯酚	2185	药香味	19.13±2.39	10	1.91
4-甲基-2-甲氧基苯酚	1204	甜味	0.45±0.01	1 485	<1
2-甲氧基苯酚	1183	烟熏味	2.04±0.39	17	<1
2-乙酰噻唑	—	烧烤味	0.64±0.02	—	—
2-乙酰基-1-吡咯啉	1326	爆米花味	19.27±2.97	0.1	192.70
甲基吡啶	2430	臭味	9.83±0.88	140	<1
甲氧基苯基胍	—	水果味	—	—	—
2-甲基吡啶	1982	烧烤味	1.08±0.01	—	—
2-戊基吡啶	1180	果香味	30.04±4.05	6	5.01
2-甲基吡啶	2109	特殊气味	0.53±0.01	—	—
乙酸	1460	酸味	25.06±3.66	22 000	<1
苯	1722	刺激性气味	0.05	—	—

注:—未查到或未检出。

由表2中OAV的结果判定,2-乙酰基-1-吡咯啉、己醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、4-乙基苯酚、辛醛、庚醛、香草醛是在鉴定出的40种米饭风味物质中OAV较高的8种化合物。

2.3 米饭关键风味成分的确定

采用SPME结合GC-MS获得8种具有较高OAV的米饭风味化合物为2-乙酰基-1-吡咯啉、己醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、4-乙基苯酚、辛醛、庚醛、香草醛。采用SDE结合AEDA,获得 n 不小于3的9种风味化合物为2-乙酰基-1-吡咯啉、香草醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、4-乙基苯酚、己醛、辛醛、戊醛及庚醛。与上述分析结果比较,OAV结果显示戊醛、4-乙基苯酚的含量明显高于其他物质,而4-乙基苯酚对风味的贡献并不大。因此,将两种方法相结合分析,米饭中10种关键风味化合物如图2所示。

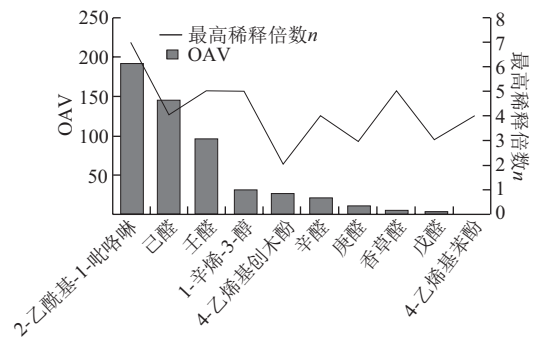


图2 AEDA分析结合OAV综合鉴定米饭特征风味图

Fig.2 Identification of flavor characteristics of cooked rice by AEDA combined with OAV

2-乙酰基-1-吡咯啉的最高稀释倍数 n 与OAV均为所有化合物中最高的,表明其爆米花味对于米饭风味成分具有最为显著的作用。对于选定的关键化合物来说, n 的大小与OAV的大小基本呈正相关关系(相关系数为0.67, $P<0.05$)。然而,己醛的OAV仅次于2-乙酰基-1-吡咯啉,高达144,但其最高稀释倍数 n 却低于壬醛、1-辛烯-3-醇等物质。4-乙基苯酚的OAV与1-辛烯-3-醇、辛醛相近,其最高稀释倍数 n 也远低于二者。香草醛的最高稀释倍数高达5,但其OAV却远低于具有相同最高稀释倍数的1-辛烯-3-醇和壬醛,甚至低于 n 仅为3的戊醛与庚醛。

产生这些差异的原因,可能与两种前处理方法对于样品的处理条件差异较大有关^[18]。OAV的测定是采用SPME的取样方法,米饭样品没有发生太多化学作用^[19]。SPME方法鉴定出的醛类、醇类、酮类等物质主要是脂肪酸降解和氧化的产物^[20]。如具有浓香气的香草醛,即为脂肪的 β -氧化产生,而辛醛、己醛等为油酸的降解产物^[21]。采用AEDA进行分析时,选用SDE的取样方法,样品由于长时间高温蒸煮必然会使米饭中的风味物质发生各类化学变化,使得嗅闻结果产生变化,进而导致了上述差异^[22]。

Champagne等^[15]研究表明, SDE法的加热会使样品得到更多的长链烃、醇、醛、酸等化合物。另有研究^[23-24]表明, 蛋白质与风味物质的结合主要通过范德华力、氢键、二硫键等静电相互作用, 高温作用可能使得这些作用力减弱或消失从而导致风味物质的变化; SDE法因其耗时繁琐, 重现性较差, 容易导致分析过程的失误及某些化合物分析的损失^[25]。

本实验采用SPME与SDE两种方法结合分析鉴定米饭中关键风味化合物。通过SPME检测到40种风味化合物, 经过OAV与最高稀释倍数 n 结合分析发现, 2-乙酰基-1-吡咯啉、香草醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、4-乙烯基苯酚、4-乙烯基创木酚、己醛、辛醛、戊醛及庚醛10种物质被综合鉴定为关键风味化合物。其中, 2-乙酰基-1-吡咯啉的爆米香味是米饭风味中最主要的特征风味, 而在所有类别物质中, 醛类物质对整体风味的贡献度最高。相比对样品进行高温蒸煮的SDE、SPME并未对样品进行过多损耗, 可保存样品的完整性。SDE处理会使得米饭样品风味物质呈现更多的长链化合物, 其机理仍有待后续研究。

3 结论

采用SPME结合GC-MS, 应用文献获得的化合物阈值, 获得8种具有较高OAV的米饭风味化合物为2-乙酰基-1-吡咯啉、己醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、4-乙烯基创木酚、辛醛、庚醛、香草醛。采用SDE结合AEDA进行分析, 获得最高稀释倍数 n 不小于3的9种风味化合物: 为2-乙酰基-1-吡咯啉、香草醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、4-乙烯基苯酚、己醛、辛醛、戊醛及庚醛。最终确定, 两种方法综合检测到的10种风味化合物为米饭的特征风味化合物。

参考文献:

- [1] 陈光耀. 不浸泡蒸煮方便米饭的工艺及食用品质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [2] 杨江帆, 杨广, 梁小虾, 等. 茉莉花茶香气的SPME/GC-MS检测方法[J]. 热带作物学报, 2009(11): 1698-1705. DOI:10.3969/j.issn.1000-2561.2009.11.029.
- [3] 陈海涛, 张宁, 徐晓兰, 等. SPME和SDE-GC-MS分析贾永信腊羊肉挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2013, 34(14): 187-191. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201314038.
- [4] 钱敏, 刘坚真, 白卫东, 等. 气质联用仪在食品工业中的应用[J]. 中国调味品, 2009, 34(9): 101-104. DOI:10.1111/j.1750-3841.2008.00952.x.
- [5] 李丽梅, 李景明, 孙亚青, 等. 不同因素对同时蒸馏-萃取法(SDE)提取洋葱精油的影响[J]. 食品科学, 2006, 27(2): 212-215.
- [6] 麦雅彦, 杨锡洪, 连鑫, 等. SDE/GC-MS测定南美白对虾的挥发性香气成分[J]. 现代食品科技, 2014, 30(1): 206-210. DOI:10.1111/j.1750-3841.2010.01577.x.
- [7] 李咏玲. SDE在分析热反应猪肉风味化合物中的应用[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2006, 26(2): 186-188. DOI:10.1016/j.aca.2010.07.024.
- [8] CULLERÉ L, FERREIRA V, CHEVRET B, et al. Characterisation of aroma active compounds in black truffles (*Tuber melanosporum*) and summer truffles (*Tuber aestivum*) by gas chromatography-olfactometry[J]. Food Chemistry, 2010, 122(1): 300-306. DOI:10.1021/jf0623992.
- [9] TRAN T, WILKES E, JOHNSON D. Microbiological stability of wine packaging in Australia and New Zealand[J]. Wine and Viticulture Journal, 2012, 27(2): 78-86. DOI:10.4265/bio.16.79.
- [10] 应兴华, 徐霞, 欧阳由男, 等. 固相微萃取-气相色谱/质谱联用快速鉴定香稻香味特征化合物2-乙酰基吡咯啉[J]. 分析科学学报, 2011, 27(1): 69-71. DOI:10.1111/j.1745-459X.2011.00368.x.
- [11] ZENG Z, ZHANG H, CHEN J Y, et al. Flavor volatiles of rice during cooking analyzed by modified headspace SPME/GC-MS[J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(2): 140-145. DOI:10.1094/CCHEM-84-5-0423.
- [12] 徐侃. 冷冻米饭生产工艺及其品质特性的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2011.
- [13] 严留俊, 张艳芳, 陶文沂, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法快速测定酱油中的挥发性风味成分[J]. 色谱, 2008, 26(3): 285-291. DOI:10.1021/jf7037373.
- [14] 马晓佩, 王立, 涂清荣, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱-嗅觉检测器联用分析米饮料中香气成分[J]. 食品工业科技, 2008, 29(8): 143-147. DOI:10.1094/CCHEM-84-6-0614.
- [15] CHAMPAGNE E T, BETT-GARBER K L, THOMSON J L, et al. Impact of presoaking on flavor of cooked rice[J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(5): 706-710. DOI:10.1094/CCHEM-85-5-0706.
- [16] ZENG Z, ZHANG H, CHEN J Y, et al. Direct extraction of volatiles of rice during cooking using solid-phase microextraction[J]. Cereal Chemistry, 2007, 84(5): 423-427. DOI:10.1094/CCHEM-85-2-0140.
- [17] 应兴华, 徐霞, 陈铭学, 等. 气相色谱-质谱技术分析香稻特征化合物2-乙酰基吡咯啉[J]. 色谱, 2010, 28(8): 782-785.
- [18] 王进, 崔宇, 王志勇, 等. 两种前处理方法分析竹醋液挥发性成分的比较[J]. 食品科学, 2011, 32(18): 198-201.
- [19] 刘美艳, 张子沛, 赵国华. 酶法方便米饭香气成分的SPME/GC-MS分析[J]. 食品科学, 2013, 34(6): 234-237.
- [20] 刘维涓. β -胡萝卜素氧化降解产物的GC-MS研究及形成机理探讨[J]. 林产化学与工业, 2008(6): 20-24. DOI:10.3321/j.issn:0253-2417.2008.06.005.
- [21] 张浩, 田红玉, 孙宝国, 等. 脂肪酸对Maillard模型体系含硫挥发性产物的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(11): 33-36.
- [22] 吴容, 陶宁萍, 刘源, 等. GC-O-AEDA法在食品风味分析中的应用[J]. 食品与机械, 2011, 27(4): 163-168. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.03.115.
- [23] FERREIRA V, ARDANUY M, LÓPEZ R, et al. Relationship between flavor dilution values and odor unit values in hydroalcoholic solutions: role of volatility and a practical rule for its estimation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(10): 4341-4346. DOI:10.1094/CCHEM-85-4-0445.
- [24] 孙为正. 广式腊肠加工过程中脂类水解、蛋白质降解及风味成分变化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [25] 郭方遒, 尤健, 钟科军, 等. 固相微萃取和同时蒸馏萃取法提取香精中风味成分[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(5): 828-832.