

基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法测定7种不同品种甘薯全粉挥发性风味物质

张文婷, 孙健, 朱红, 岳瑞雪, 张毅, 马晨, 徐飞, 钮福祥*

(江苏徐淮地区徐州农业科学研究所/江苏徐州甘薯研究中心, 徐州 221131)

摘要: **目的** 比较不同品种甘薯全粉中挥发性风味物质的差异。**方法** 以7个不同品种的甘薯全粉为材料, 采用顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)技术结合气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)检测甘薯全粉中挥发性物质, 以面积归一化法计算各类物质的含量。**结果** 7个样品共检测出114种风味物质, 包括醛类14种、烷烃类15种、烯类5种、醇类27种、酯类12种、酮类11种、酸类10种、苯类12种、酚类5种、杂环类3种, 其中万薯6号全粉含有49种风味物质。不同品种甘薯全粉中风味物质含量最高的是烷烃类(13.16%~39.21%), 平均含量为28.97%, 其次为醇类(13.99%~45.99%), 平均含量为27.95%, 以及酯类(7.27%~23.88%), 平均含量为13.53%。7种甘薯全粉共有的挥发性物质有5种, 分别为十一烷、(+)-柠檬烯、异丁酸异戊酯、邻苯二甲酸二异丁酯和2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮。**结论** 甘薯全粉中烷烃类、醇类和酯类物质含量较高, 不同品种甘薯全粉中挥发性风味物质的种类和含量不同, 万薯6号全粉中含有最丰富的风味物质。

关键词: 甘薯全粉; 顶空固相微萃取; 气相色谱-质谱法; 风味物质

Determination of volatile flavor compounds in 7 different varieties of sweet potato powder by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry

ZHANG Wen-Ting, SUN Jian, ZHU Hong, YUE Rui-Xue, ZHANG Yi, MA Chen,
XU Fei, NIU Fu-Xiang*

(Xuzhou Institute of Agricultural Sciences in Xuhuai District/Jiangsu Xuzhou Sweet Potato Research Center, Xuzhou 221131, China)

ABSTRACT: Objective To compare the differences of volatile flavor compounds in different varieties of sweet potato powder. **Methods** Seven different varieties of sweet potato powder were used as materials, the volatile substances in sweet potato powder were detected by headspace solid phase microextraction (HS-SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The content of various substances was calculated by area

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-10-B22)、江苏省苏北专项(XZ-SZ202161)、国家重点研发计划项目(2019YFD1001300、2019YFD1001302)、徐州市科技项目(KC19243)

Fund: Supported by the China Agriculture Research System of Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Affairs (CARS-10-B22), the Special Project of North Jiangsu Province (XZ-SZ202161), the National Key Research and Development Program of China (2019YFD1001300, 2019YFD1001302), and the Science and Technology Project of Xuzhou City (KC19243)

***通信作者:** 钮福祥, 硕士, 研究员, 主要研究方向为农产品加工。E-mail: niufuxiang@sina.com

***Corresponding author:** NIU Fu-Xiang, Master, Professor, Xuzhou Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Xuhuai District, Xuzhou Xuhai Road High-speed Railway Station North Xuzhou Academy of Agricultural Sciences, Xuzhou 221131, China. E-mail: niufuxiang@sina.com

normalization method. **Results** A total of 114 volatile components were detected in 7 samples, including 14 kinds of aldehydes, 15 kinds of alkanes, 5 kinds of alkenes, 27 kinds of alcohols, 12 kinds of esters, 11 kinds of ketones, 10 kinds of acids, 12 kinds of benzenes, 5 kinds of phenols and 3 kinds of heterocycles. There were 49 kinds of volatile compounds in the powder of Wanshu 6. The highest content of flavor substances in different varieties of sweet potato powder was alkanes (13.16%–39.21%) with average content of 28.97%, followed by alcohols (13.99%–45.99%) with average content of 27.95%, and esters (7.27%–23.88%) with average content of 13.53%. There were 5 kinds of common volatile compounds in 7 kinds of sweet potato powder, namely undecane, (+)-limonene, isoamyl isobutyrate, diisobutyl phthalate and 2,3-dihydro-3,5 dihydroxy-6-methyl-4(H)-pyran-4-ketone. **Conclusion** The content of alkanes, alcohols and esters in the whole sweet potato powder is higher, the types and content of volatile flavor substances in different varieties of sweet potato powder are different, and Wanshu 6 sweet potato powder contains the most abundant flavor substances

KEY WORDS: sweet potato powder; headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; flavor substances

0 引言

甘薯富含淀粉、糖类、维生素、纤维素以及多种生理活性成分,是非常理想的营养保健食品^[1-5]。甘薯全粉是以鲜甘薯为加工原料,经过清洗、去皮、蒸煮、制泥、干燥等工序加工而成的细颗粒状或片状物,深受广大消费者欢迎^[6-7]。

食物中挥发性物质的种类和含量是评价其风味和品质的重要指标。顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)是测定食品挥发性风味物质分析中的常用方法^[8-11],操作简便、重现性好、灵敏度高、对样品需求量低。近年来,有研究者报道了关于不同品种甘薯及其制品的风味物质的研究。WANG 等^[12]研究了 6 个不同的甘薯品种中香味活性化合物,结果表明美拉德反应和焦糖化反应是多数烤制甘薯品种香气活性物质的主要来源;SUN 等^[13]通过不同加热方式处理甘薯来进一步研究温度对甘薯内部挥发性香味组分的影响,结果表明加热温度和微波预处理使挥发性香味组分呈现巨大的定性、定量分析结果差异;WANG 等^[14]发现甘薯挥发性香味组分中麦芽酚、苯乙醛、香叶酸甲酯的香味稀释因子最大,证实了麦芽酚是甘薯香味的关键挥发物。张文婷等^[15]比较了紫薯粉膳食纤维复合挂面与普通挂面挥发性风味物质,结果表明紫薯粉膳食纤维复合挂面中的风味物质数量比普通挂面多 25 种,其特有的风味物质有 3,7-二甲基-1-辛烯、癸醛、庚醛、2,4-癸二烯醛、2-正戊基咪喃和 5-乙基环戊基-1-烯醛。赵祥颖等^[16]基于气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion migration spectrometry, GC-IMS)分析了甘薯块根不同组分对甘薯特征风味剂香气,结果表明,GC-IMS 技术可快速筛选出 60 余种离子峰强度变化明显的化合物,各样品中香气挥发物在数量上差异大,其含量在组间差异显著。目前,尚未发现关于甘薯全粉的挥发性

风味物质方面的报道,为了弥补这方面的研究空白,本研究以 7 个不同品种的甘薯全粉为材料,利用顶空固相微萃取(HS-SPME)技术结合气相色谱-质谱法(GC-MS)检测并分析甘薯全粉中的挥发性风味物质,确定适宜加工甘薯全粉的品种,为甘薯全粉的生产 and 应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用甘薯全粉品种为万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号、湛紫薯 2 号。甘薯全粉自制。

工艺流程为:甘薯→清洗→去皮→切片→护色→漂洗→蒸制→冷却→制泥→滚筒干燥→粉碎→筛分→全粉成品^[7]。

1.2 仪器和设备

JA3003 电子天平(千分之一,上海天平仪器厂);Trace ISQ 型气相色谱-质谱联用仪(美国 Thermo Electron 公司);手动 SPME 进样器、75 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头(美国 Supelco 公司);TG-Wax MS 石英毛细管柱(美国 Thermo Fisher Scientific 公司);HH-W420 数显恒温水浴锅(金坛市富华仪器有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 顶空固相微萃取操作方法

准确称取 2 g 甘薯全粉样品置于 20 mL 样品瓶中,加盖并用封口膜封住瓶盖。第一次使用 DVB/CAR/PDMS 萃取头时,将其在 250 $^{\circ}\text{C}$ 气相色谱进样口老化 30 min。将老化好的萃取头插入样品瓶,伸出纤维头,65 $^{\circ}\text{C}$ 预热 15 min,水浴 50 min。在进样口解吸 5 min 后,用于 GC-MS 分析。

1.3.2 GC 和 MS 分析条件

气相色谱条件: TG-Wax MS 石英毛细管柱(30 m \times 0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 230 $^{\circ}\text{C}$; 程序升温: 35 $^{\circ}\text{C}$ 保持 4 min, 以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 55 $^{\circ}\text{C}$, 保持 2 min, 再以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 120 $^{\circ}\text{C}$, 再

以 10 °C/min 升至 230 °C, 保持 4 min。载气为氦气, 流速 1 mL/min, 压力 47.7 kPa, 不分流进样, 溶剂延迟 5 min。

质谱条件: 离子化方式为电子电离源 (electron ionization, EI); 离子源温度 230 °C; 电子能量 70 eV; 色谱-质谱接口温度 230 °C; 采集模式为全扫描; 质量扫描范围 33~450 *m/z*; 扫描速率 769 μ /s。

1.4 数据处理

根据 GC-MS 联用仪所得质谱信息, 利用随机的 Xcalibur 工作站 NIST 14 标准质谱库结合人工解谱求得, 统计匹配度均大于 800 的风味物质, 采用峰面积归一化法计算各成分的相对质量分数。

2 结果与分析

甘薯全粉的加工经过高温受热过程, 其中的碳水化合物经过分解, 发生美拉德反应。美拉德反应广泛存在于食品加工过程中, 通常是还原糖与氨基化合物之间的缩合

反应, 该反应会产生醛、酮、杂环等一系列的挥发性风味物质^[17-19]。对各品种甘薯全粉风味物质种类与含量进行比较分析, 从表 1 中可以看出, 从万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号、湛紫薯 2 号这 7 个甘薯全粉样品中检测出的挥发性化合物分别有 49、47、45、31、32、42、21 种, 包括醛类、烷烃类、烯类、醇类、酯类、酮类、酸类、苯类和杂环类。7 个样品一共检测出 114 种风味物质, 其中共有的成分有 5 种, 分别为十一烷、(+)-柠檬烯、异丁酸异戊酯、邻苯二甲酸二异丁酯和 2,3-二氢-3,5 二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮。万薯 6 号、徐薯 44、烟薯 28 全粉中含量最多的挥发性物质都是正十七烷(分别为 10.52%、11.89%、11.77%), 黔薯 6 号全粉含量最多的挥发性物质是 3,7,11-三甲基十二烷醇(11.37%), 徐薯 55-1 全粉含量最多的挥发性物质是二十六碳醇(10.67%), 徐紫薯 8 号全粉含量最多的挥发性物质是 3,4-辛烷-2-酮(10.16%), 湛紫薯 2 号全粉含量最多的挥发性物质是异丁酸异戊酯(18.64%)。

表 1 不同品种甘薯全粉中挥发性化合物及相对含量(%)
Table 1 Volatile compounds and relative contents in different varieties of sweet potato powder (%)

编号	保留时间/min	化合物中文名称	相对含量						
			万薯 6 号	徐薯 44	黔薯 6 号	徐薯 55-1	烟薯 28	徐紫薯 8 号	湛紫薯 2 号
醛类									
1	2.38	异戊醛	—	—	1.24	1.40	0.94	—	—
2	3.74	正己醛	—	2.47	0.65	0.72	—	2.77	—
3	5.87	正辛醛	—	—	—	—	—	2.93	—
4	7.13	壬醛	6.55	—	—	—	8.22	6.19	8.60
5	8.64	癸醛	2.31	—	—	—	—	—	—
6	9.21	(Z)-14-甲基-8-十六碳烯-1-缩醛	1.63	—	0.45	—	—	—	—
7	10.27	(Z)-7-十六碳烯醛	—	—	1.25	—	—	—	—
8	10.93	苯乙醛	4.30	—	—	—	—	5.87	—
9	12.12	(E,E)-2,4-壬二烯醛	—	—	—	—	—	0.52	—
10	13.1	(Z)-7-十六碳烯醛	1.58	0.48	—	—	—	—	—
11	14.18	反式-2,4-癸二烯醛	—	—	—	—	—	0.9	—
12	16.5	甲基肉桂醛	—	—	0.19	—	—	—	—
13	18.44	对甲氧基苯甲醛	0.16	—	—	—	—	0.34	—
14	26.95	5-羟甲基糠醛	—	—	—	0.31	—	—	—
总计			16.53	2.95	3.78	2.43	9.16	19.52	8.60
烷烃类									
15	4.12	十一烷	6.14	4.64	8.43	5.09	10.86	7.67	13.08
16	6.32	2,6,11-三甲基十二烷	5.81	—	—	4.89	7.51	—	—
17	6.85	正十六烷	—	—	—	2.89	—	—	4.55
18	6.87	正十九烷	3.21	2.19	3.10	—	3.59	—	—

表 1(续)

编号	保留时间	化合物中文名称	相对含量						
			万薯 6 号	徐薯 44	黔薯 6 号	徐薯 55-1	烟薯 28	徐紫薯 8 号	湛紫薯 2 号
19	7.5	十四烷	—	—	—	—	—	1.16	—
20	7.53	正十七烷	10.52	11.89	8.93	7.86	11.77	—	15.41
21	7.61	6-甲基十八烷	—	—	—	—	—	2.08	—
22	8.09	2,6,10-三甲基十二烷	1.81	1.77	6.22	—	—	—	—
23	8.34	5,5-二丁基壬烷	2.48	—	2.81	—	—	—	—
24	8.89	十一环戊烷	—	—	7.00	—	—	—	—
25	9.38	氯代十八烷	—	—	1.60	—	—	—	—
26	10.69	正二十四烷	3.9	2.86	—	—	—	—	—
27	11.12	6-甲基十八烷	—	1.26	—	—	—	2.25	—
28	11.83	苯环戊烷	—	2.67	1.12	—	—	—	—
29	29.86	二十二烷	1.75	—	—	—	—	—	—
总计			35.62	27.28	39.21	20.73	33.73	13.16	33.04
烯类									
30	4.97	(+)-柠檬烯	5.2	3.31	9.41	5.06	5.01	2.99	4.87
31	6.66	1-七烯	—	0.95	1.95	—	—	—	—
32	8.69	雪松烯	—	—	2.21	—	—	—	—
33	13.31	杜松烯	—	—	0.85	—	—	0.52	—
34	15.11	苯并环庚三烯	—	0.25	0.79	—	—	—	—
			5.2	4.51	15.21	5.06	5.01	3.51	4.87
醇类									
35	5.18	异戊醇	—	0.57	—	—	—	—	—
36	5.93	2-丁基辛醇	2.15	2.20	—	—	—	—	5.86
37	6.3	2-己基-1-癸醇	—	6.27	10.39	—	—	3.7	7
38	7.11	1-二十醇	—	5.34	—	4.45	—	—	—
39	7.89	2-己基-1-癸醇	—	—	—	3.30	6.26	—	—
40	7.91	3,7,11-三甲基十二烷醇	5.55	8.07	11.37	—	1.93	—	3.53
41	8.2	2-(基)-葵醇	—	—	—	—	—	—	5.37
42	8.52	二十七烷醇	—	0.56	—	—	—	0.76	—
43	8.63	1-二十二醇	—	2.88	—	2.22	—	1.16	—
44	8.86	二十六碳醇	—	10.02	—	10.67	—	—	—
45	8.87	1-十六烷醇	—	—	—	—	11.02	—	—
46	8.91	反-2-十二烯-1-醇	9.51	—	—	—	—	—	—
47	9.18	4,5-二甲基-2-庚-3-醇	—	—	—	—	—	2.03	—
48	9.35	3,7,11-三甲基十二烷醇	—	1.69	—	—	—	—	—
49	9.41	2,3-丁二醇	—	—	—	—	—	3.04	—
50	9.89	2-辛基十二醇	—	1.41	1.31	—	—	—	—

表1(续)

编号	保留时间	化合物中文名称	相对含量						
			万薯6号	徐薯44	黔薯6号	徐薯55-1	烟薯28	徐紫薯8号	湛紫薯2号
51	10.17	2-甲基十六醇	3.35	1.70	—	5.96	6.54	1.51	—
52	11.31	二十三烷醇	—	0.61	—	—	—	—	—
53	12.37	2-亚甲基-5 α -胆甾烷-3 β -醇	1.77	1.06	2.32	—	—	—	—
54	12.61	1-二十醇	—	0.99	—	—	—	—	—
55	13.5	3,4-二甲基环己醇	—	—	—	—	—	0.80	—
56	13.53	6-甲基-2-(4-甲基环己-3-烯-1-基)庚-1,5-二烯-4-醇	0.54	1.47	—	7.67	2.59	—	—
57	13.8	2-亚甲基-5 α -胆甾烷-3 β -醇	—	—	1.30	—	—	—	—
58	15.88	苯乙醇	—	—	—	—	—	0.69	—
59	18.69	2,4,7,9-四甲基-5-癸炔-4,7-二醇	—	1.15	—	0.55	0.62	0.30	—
60	20.3	(-)-异雪松醇	—	—	—	—	—	—	0.47
61	25.26	3,6,9-三氧-1,11-十二醇	0.12	—	—	—	—	—	—
总计			22.99	45.99	26.69	34.82	28.96	13.99	22.23
酯类									
62	5.55	异丁酸异戊酯	3.55	2.95	4.20	9.41	2.43	4.38	18.64
63	5.91	异戊酸异戊酯	—	—	—	2.44	2.09	—	—
64	15.24	3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯	0.58	0.66	0.62	0.55	0.51	—	—
65	15.47	2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯	0.42	0.47	0.54	0.44	0.45	—	—
66	17.9	5,8,11-庚二酸甲酯	—	—	0.19	—	—	—	—
67	18.29	丁酸酐	0.18	—	—	—	—	—	—
68	23.42	邻苯二甲酸二甲酯	0.59	0.31	—	—	0.20	—	0.39
69	23.86	3-甲基-2-乙基己基苯甲酸酯	—	—	—	—	0.26	—	—
70	24.43	二氢猕猴桃内酯	0.96	3.97	—	8.14	3.98	4.61	0.46
71	27.91	邻苯二甲酸二异丁酯	1.37	1.38	0.80	2.26	1.68	1.79	2.37
72	28.02	癸酸癸酯	—	—	0.63	—	—	—	—
73	30.46	邻苯二甲酸二丁酯	0.48	0.82	0.29	0.64	0.61	—	—
总计			8.13	10.56	7.27	23.88	12.21	10.78	21.86
酮类									
74	8.83	3,4-辛烷-2-酮	—	—	—	—	—	10.16	—
75	9.68	3,5-辛烷-2-酮	—	—	—	—	—	1.19	—
76	11.82	5-甲基-3-亚甲基二氢呋喃-2(3H)-酮	—	—	—	—	—	0.47	—
77	11.85	5,6-二氢-2H-吡喃-2-酮	1.36	—	—	—	—	—	—
78	12.86	1-七烷三酮	—	0.85	0.61	—	—	—	—
79	13.64	2-十三酮	0.98	0.83	0.50	—	—	—	—
80	15.05	香叶基丙酮	1.10	—	0.32	0.39	0.22	—	—

表 1(续)

编号	保留时间	化合物中文名称	相对含量						
			万薯 6 号	徐薯 44	黔薯 6 号	徐薯 55-1	烟薯 28	徐紫薯 8 号	湛紫薯 2 号
81	16.73	β -紫罗酮	—	—	—	3.58	3.80	—	—
82	17.76	4-[2,2,6-三甲基-7-氧杂二环[4.1.0]庚-1-基]-3-丁烯-2-酮	—	—	—	1.70	1.87	—	—
83	21.57	3-甲氧基苯乙酮	0.15	—	—	—	—	—	—
84	22.62	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	0.44	0.25	0.49	2.54	0.66	3.12	0.56
总计			4.03	1.93	1.92	8.21	6.55	14.94	0.56
酸类									
85	11.21	2-甲基己酸	—	—	—	—	—	1.06	—
86	12.53	正戊酸	—	—	—	—	—	0.84	—
87	14.55	17-十八炔酸	—	—	0.42	—	—	—	—
88	14.59	己酸	—	—	—	—	—	8.93	—
89	14.7	正戊酸	0.87	1.17	—	—	—	—	—
90	16.79	异辛酸	0.44	0.39	0.41	—	—	—	1.16
91	18.98	辛酸	—	—	—	—	—	0.69	—
92	19.35	9-十六烯酸	—	0.37	—	—	—	1.04	—
93	21.19	壬酸	0.41	—	—	1.01	—	2.53	0.55
94	29.82	(反,反)-9,12-十八碳二烯酸	—	—	—	—	—	3.24	—
总计			1.72	1.93	0.83	1.01	—	18.33	1.71
苯类									
95	10.88	1-(苄氧基)-2,4-二氟苯	—	2.46	—	—	—	—	—
96	12.85	萘	—	—	—	—	—	0.51	—
97	14.51	1-甲氧基-4-(1-丙烯基)苯	—	—	—	—	—	2.24	2.32
98	14.53	4-烯丙基苯甲醚	—	—	—	0.40	—	—	—
99	15.1	1-甲基萘	—	—	—	—	0.69	1.34	—
100	15.81	2-甲基萘	—	—	—	—	0.72	0.22	—
101	17.39	1,7-二甲基萘	0.29	0.21	0.27	—	—	—	—
102	17.71	5-甲氧基-1,1,3-三烯-1-基苯	—	—	0.31	—	—	—	—
103	18.1	2,3-二甲基萘	0.16	—	0.15	—	—	—	—
104	19.74	N-(3-羟基苯基)乙酰胺	0.67	—	0.60	1.77	0.68	—	—
105	20.31	三甲基萘	0.31	0.25	—	—	—	—	—
106	20.44	乙二醇苯醚	0.36	0.13	0.15	—	—	—	—
总计			1.79	3.05	1.48	2.17	2.09	4.31	2.32
酚类									
107	16.22	2,6-二叔丁基对甲酚	1.21	—	1.09	0.58	0.80	—	1.91
108	17.05	麦芽酚	0.24	—	0.61	—	—	—	—

表 1(续)

编号	保留时间	化合物中文名称	相对含量						
			万薯 6 号	徐薯 44	黔薯 6 号	徐薯 55-1	烟薯 28	徐紫薯 8 号	湛紫薯 2 号
109	17.89	苯酚	0.65	0.20	—	—	—	—	—
110	21.54	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	—	—	—	—	—	—	0.84
111	32.97	2,6-二叔丁基对苯二酚	1.47	1.60	1.67	1.10	1.34	—	2.04
总计			3.57	1.80	3.37	1.68	2.14	—	4.79
杂环类									
112	16.93	1,2-苯并异噻唑	0.30	—	0.19	—	—	0.99	—
113	17.03	2-乙酰基吡咯	—	—	—	—	—	0.44	—
114	23.09	萘并[2,1-b]呋喃	0.11	—	—	—	0.16	—	—
总计			0.41	—	0.19	—	0.16	1.43	—

注: —表示未检出。

2.1 醛类物质分析

醛类物质是美拉德反应的主要产物之一,含有 5~9 个碳原子的醛类物质通常具有油脂香气和清香气^[20-23]。壬醛具有玫瑰香味、柑橘味、脂肪味,正辛醛具有清香橙香,十一醛具有蜡香、柠檬香,正己醛具有清草味、蔬菜芳香^[24-26]。7 种甘薯全粉中,共 14 种醛类风味物质被检出,万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号全粉分别有 6 种、2 种、5 种、3 种、2 种、7 种和 1 种。万薯 6 号中壬醛、苯乙醛和癸醛相对含量较高,徐薯 44 中正己醛相对含量较高,烟薯 28、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号中壬醛相对含量均较高。

2.2 烷烃和烯烃类物质分析

烷烃类物质阈值较高,一般香气较弱,赋予的香味较少,对于全粉的风味贡献相对较小^[27-28]。共 15 种烷烃类风味物质被检出,万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号全粉分别有 8 种、7 种、8 种、4 种、4 种、4 种和 3 种。万薯 6 号中正十七烷、十一烷和 2,6,11-三甲基十二烷含量较高;徐薯 44 中正十七烷和十一烷含量较高;黔薯 6 号中正十七烷、十一烷和十一环戊烷含量较高;徐薯 55-1 中正十七烷、十一烷和 2,6,11-三甲基十二烷含量较高;烟薯 28 中正十七烷、十一烷、2,6,11-三甲基十二烷含量较高;徐紫薯 8 号中十一烷含量最高;湛紫薯 2 号中正十七烷和十一烷含量较高。

烯烃类物质一般阈值较低,多呈现花香和果香^[29]。共 5 种烯类风味物质被检出,万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号全粉分别有 1 种、3 种、5 种、1 种、1 种、2 种和 1 种。所有的样品中 (+)-柠檬烯含量最高,且万薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28 和湛紫薯 2 号中只检测出来 (+)-柠檬烯这一种烯类。

2.3 醇类物质分析

醇类化合物结构上分为脂肪族醇类、芳香族醇和萜烯族醇类等,一般具有植物的芳香气味,通常阈值较高^[30],随着碳链长度的增加香气随之增加^[31],它们的形成与醇还原酶作用相关^[32]。直链高级醇(含有六个碳原子以上的直链醇)为甘薯全粉提供特殊香气,比如全粉中含有的 1-二十醇、2-(基)-葵醇、二十七烷醇、1-二十二醇、二十六碳醇等,在香气中起协调作用^[33]。共 27 种醇类风味物质被检出,万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号全粉分别有 7 种、16 种、5 种、7 种、6 种、9 种和 5 种。徐薯 44 和徐薯 55-1 全粉醇类物质相对含量较高,分别为 45.99% 和 34.82%。万薯 6 号中反-2-十二烯-1-醇、3,7,11-三甲基十二烷醇和 2-甲基十六醇含量较高;徐薯 44 中二十六碳醇、3,7,11-三甲基十二烷醇和 2-己基-1-癸醇含量较高;黔薯 6 号中 3,7,11-三甲基十二烷醇和 2-己基-1-癸醇含量较高;徐薯 55-1 中二十六碳醇、6-甲基-2-(4-甲基环己-3-烯-1-基)庚-1,5-二烯-4-醇、2-甲基十六醇和 1-二十醇含量较高;烟薯 28 中 1-十六烷醇、2-甲基十六醇、2-己基-1-癸醇和 6-甲基-2-(4-甲基环己-3-烯-1-基)庚-1,5-二烯-4-醇含量较高;徐紫薯 8 号中 2-己基-1-癸醇和 2,3-丁二醇含量较高;湛紫薯 2 号中 2-己基-1-癸醇、2-丁基辛醇和 2-(基)-葵醇含量较高。

2.4 酯类物质分析

通常酯类由低级饱和脂肪酸与醇类发生酯化反应而成,是甘薯的一种重要的芳香成分,含有多种水果香味^[34]。共 12 种酯类风味物质被检出,万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号全粉分别有 8 种、7 种、7 种、7 种、9 种、3 种和 4 种。万薯 6 号中异丁酸异戊酯相对含量较高;徐薯 44、徐薯 55-1、烟薯 28 和徐紫薯 8 号中二氢猕猴桃内酯和异丁酸异戊酯相对含量较高;黔薯 6 号中异丁酸异戊酯相对含量较

高; 湛紫薯 2 号中异丁酸异戊酯相对含量较高。

2.5 酮类物质分析

酮类物质阈值较高, 一般呈现水果香、花香等特殊香气^[35]。共 11 种酮类风味物质被检出, 万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号全粉分别有 5 种、3 种、4 种、4 种、4 种和 1 种。徐紫薯 8 号中含有的酮类物质相对含量较高, 其余甘薯品种全粉中酮类风味物质相对含量较少, 其范围在 0.56%~8.21%。

2.6 其他类物质分析

共 10 种酸类风味物质被检出, 万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号全粉分别有 3 种、3 种、2 种、1 种、7 种和 2 种, 烟薯 28 中没有检测到酸类成分。其中徐紫薯 8 号全粉中酸类成分较高, 其余 6 个甘薯品种全粉中酸类风味物质含量均较少。

共 12 种苯类风味物质被检出, 万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号全粉分别有 5 种、4 种、5 种、2 种、3 种、4 种和 1 种, 7 个甘薯品种全粉中苯类风味物质含量均较少, 其范围在 1.48%~4.31%之间, 其中苯类相对含量最高的是徐紫薯 8 号。

共 5 种酚类风味物质被检出, 万薯 6 号、徐薯 44、黔薯 6 号、徐薯 55-1、烟薯 28、徐紫薯 8 号和湛紫薯 2 号全粉分别有 4 种、2 种、3 种、2 种、2 种、0 种和 3 种, 7 个甘薯品种全粉中酚类风味物质含量均较少, 其范围在 0~4.79%之间, 其相对含量最高的是湛紫薯 2 号。

杂环类的呋喃衍生物是构成天然食品香气特征的重要组成部分之一, 具有豆香、果香、泥土等类似蔬菜的香气^[36]。共 3 种杂环类风味物质被检出, 徐薯 44、徐薯 55-1 和湛紫薯 2 号这 3 个品种全粉中没有检测到杂环类物质, 黔薯 6 号和烟薯 28 均检测到 1 种杂环类物质, 万薯 6 号和徐紫薯 8 号检测到两种杂环类物质。7 个甘薯品种全粉中杂环类风味物质相对含量均较少, 其范围在 0~1.43%之间。

3 结 论

甘薯全粉制作过程中发生一系列复杂反应, 主要是美拉德反应与焦糖化反应, 赋予其香甜、焦香等独特的气味^[37]。本研究采用固相微萃取-气相色谱结合质谱联用技术对 7 个不同品种甘薯全粉中的挥发性风味成分进行了检测, 共鉴定出挥发性物质 114 种。包括醛类 14 种, 烷烃类 29 种, 烯类 5 种, 醇类 27 种, 酯类 12 种, 酮类 11 种, 酸类 10 种, 苯类 12 种, 酚类 5 种, 杂环类 3 种, 其中万薯 6 号全粉挥发性风味物质种类最多(49 种)。挥发性风味物质的构成和含量是决定其香味的关键, 其中有真正起赋味作用化合物占主导作用, 也有对香味起修饰作用的物质, 而不是由某种单一化合物决定的。本研究未对甘薯全粉风味物质做定量分析, 在今后研究中, 对此可作深入分析。

参考文献

- [1] 许森, 王永梅, 赵亚特, 等. 甘薯薯块生长过程中可溶性糖与淀粉质量分数的变化及其相关性分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(10): 31-36.
- [2] 周郑坤, 郑元林. 甘薯营养价值与保健功能的再认识[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(4): 16-19, 87.
- [3] SUN HN, MU TH, XI LS, *et al.* Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves as nutritional and functional foods [J]. Food Chem, 2014, 156: 380-389.
- [4] 国鸽, 张靖杰, 李鹏高. 甘薯中主要生物活性成分研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(2): 533-538.
- [5] 唐朝臣, 黄立飞, 王章英. 国内外甘薯研究态势述评[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(7): 51-68.
- [6] 米谷, 薛文通, 陈明海. 甘薯全粉加工过程中防止细胞破壁工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(9): 101-104.
- [7] MI G, XUE WT, CHEN MH. Study on the technology of preventing cell wall breaking in the processing of sweet potato whole powder [J]. Sci Technol Food Ind, 2008, 29(9): 101-104.
- [8] LI JW, ZHANG LF, LIU YF. Optimization of extraction of natwal pigment from purple sweet potato by response surface methodology and its stability [J]. J Chem, 2013, 2013: 1-5.
- [9] 张丽君, 王丹, 王育娇, 等. 基于气相色谱-质谱联用技术的代谢组学在农产品产地溯源中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2197-2203.
- [10] ZHAGN LJ, WANG D, WANG YJ, *et al.* Application of metabolomics based on gas chromatography-mass spectrometry technology in the origin traceability of agricultural products [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(6): 2197-2203.
- [11] 董亮, 耿宇凤, 刘泮泽, 等. 梨孢镰刀菌对麦芽挥发性风味物质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 261-267.
- [12] DONG L, GENG YF, LIU LZ, *et al.* Effects of *Fusarium oxysporum* on volatile flavor compounds in malt [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2020, 20(1): 261-267.
- [13] 张文刚, 张垚, 杨希娟, 等. 不同品种青稞炒制后挥发性风味物质 GC-MS 分析[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 192-201.
- [14] ZHANG WG, ZHANG Y, YANG XJ, *et al.* GC-MS analysis of volatile flavor substances in different varieties of roasted hullless barley [J]. Food Sci, 2019, 40(8): 192-201.
- [15] WANG Y, KAYS SJ. Analytically directed aroma selection in breeding food crops [J]. J Am Soc Hortic Sci, 2003, 128(5): 711-720.
- [16] SUN JB, SEVERSON RE, SCHLOTZHAUER WS, *et al.* Identifying critical volatiles in the aroma of baked 'Jewel' sweetpotatoes [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] [J]. J Am Soc Hortic Sci, 1995, 120(3): 468-474.
- [17] WANG Y, KAYS SJ. Contribution of volatile compounds to the characteristic aroma of baked 'Jewel' sweetpotatoes [J]. J Am Soc Hortic Sci, 2000, 125(5): 638-643.
- [18] 张文婷, 钮福祥, 孙健, 等. 紫薯粉膳食纤维复合挂面与普通挂面挥发

- 性风味物质的比较[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(3): 32-35.
- ZHANG WT, NIU FX, SUN J, *et al.* Comparison of volatile flavor compounds between purple sweet potato flour and common noodle with dietary fiber [J]. *J Jiangsu Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 38(3): 32-35.
- [16] 赵祥瑞, 刘丽萍, 张家祥, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱联用技术分析甘薯块根不同组分对甘薯特征风味剂香气的贡献[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(12): 236-243.
- ZHAO XY, LIU LP, ZHANG JX, *et al.* Contribution of different components of sweet potato to the characteristic aroma of flavoring using GC-IMS [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(12): 236-243.
- [17] 杨金初, 郝辉, 马宇平, 等. 甘薯浸膏的开发及其香气成分分析[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(5): 10-18.
- YANG JC, HAO H, MA YP, *et al.* Development of sweet potato extract and analysis of its aroma components [J]. *Acta Tabacaria Sin*, 2016, 22(5): 10-18.
- [18] 陈立彪, 朱凤妹, 李军. 干燥温度对黑参加工过程中主要美拉德反应指标成分变化的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(6): 120-125.
- CHEN LB, ZHU FS, LI J. Effect of drying temperature on changes of Maillard reaction main index components in processing of black ginseng [J]. *Storage Process*, 2020, 20(6): 120-125.
- [19] 毕日秀, 芦晶, 张书文, 等. 市售褐色酸奶在不同贮藏条件下美拉德反应副产物变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 116-124.
- BI RX, LU J, ZHANG SW, *et al.* Changes of Maillard reaction by-products in brown yogurt under different storage conditions [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(1): 116-124.
- [20] 吕艳春. 豆乳风味平衡体系变化规律的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2010.
- LV YC. Study on the changes of flavor balance system of soybean milk [D]. Beijing: China Agricultural University, 2010.
- [21] 燕雯, 张正茂, 刘拉平. 顶空固相微萃取-气质联用分析小麦馒头制作过程中的挥发性成分变化[J]. 食品科学, 2012, 33(12): 254-258.
- YAN W, ZHANG ZM, LIU LP. Headspace solid phase microextraction. Analysis of volatile components in wheat steamed bread by GC-MS [J]. *Food Sci*, 2012, 33(12): 254-258.
- [22] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370-374.
- LIU DY, ZHOU GH, XU XL. A new method for determining key flavor compounds in food: “ROAV” method [J]. *Food Sci*, 2008, 29(7): 370-374.
- [23] 于文龙, 郝楠, 吴凯晋, 等. HS-SPME-GC-MS-O 联用分析不同加工工艺亚麻籽油特征香气成分[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 266-272.
- YU WL, HAO N, WU KJ, *et al.* Analysis of characteristic aroma components of flaxseed oils obtained by different processing techniques by HS-SPME-GC-MS-O [J]. *Food Sci*, 2019, 40(18): 266-272.
- [24] 程玉娇, 李贵节, 欧阳祝, 等. 基于 GC-MS/PFPD 和 PCA 分析不同品种柚汁的挥发性风味组分[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-11. [2021-11-29]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028670>
- CHENG YJ, LI GJ, OUYANG Z, *et al.* Analysis of aroma compounds in different varieties of pomelo juice based on GC-MS/PFPD and PCA [J/OL]. *Food Ferment Ind*: 1-11. [2021-11-29]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028670>
- [25] 卢静茹, 林向阳, 张如, 等. HS-SPME-GC-MS 联用分析美国巴旦木香气成分[J]. 食品科学, 2015, 36(2): 120-125.
- LU JR, LIN XY, ZHANG R, *et al.* Analysis of volatile aroma components in American almonds by SPME-GC-MS [J]. *Food Sci*, 2015, 36(2): 120-125.
- [26] 秦改花. 梨果实挥发性芳香物质组成及其形成特性分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- QIN GH. Analysis of volatile aromatic compounds in pear fruit [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [27] 田维芬, 周君, 明庭红, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 的不同品牌橄榄油挥发性风味物质研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 285-292.
- TIAN WF, ZHOU J, MING TH, *et al.* Study on volatile flavor compounds of different brands of olive oil based on electronic nose and GC-MS [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(7): 285-292.
- [28] 余力, 贺雅非, 王兆明, 等. 不同解冻方式对伊拉兔肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 95-101.
- YU L, HE ZF, WANG ZM, *et al.* Effects of different thawing methods on volatile flavor compounds in Iraqi rabbit meat [J]. *Food Sci*, 2015, 36(22): 95-101.
- [29] 刘艳敏, 吴拥军, 王亚娟, 等. 贵州油辣椒挥发性风味物质分析[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 221-227.
- LIU YM, WU YJ, WANG YJ, *et al.* Volatile flavor components analysis of fried pepper sauce in Guizhou Province [J]. *Food Sci*, 2013, 34(20): 221-227.
- [30] CHEN N, YANG HM, SUN Y, *et al.* Purification and identification of peptides from walnut (*Juglans regia* L.) protein hydrolysates [J]. *Peptides*, 2012, 38(2): 344-349.
- [31] MARUSIC N, VIDACEK S, JANCIC T, *et al.* Determination of volatile compounds and quality parameters of traditional Istrian dry-cured ham [J]. *Meat Sci*, 2014, 96(4): 1409-1416.
- [32] 陈建良, 芮汉明, 陈号川. 不同鸡种的鸡肉挥发性风味特性的比较研究[J]. 现代食品科技, 2009, 25(10): 1129-1134.
- CHEN JL, RUI HM, CHEN HC. Comparative study on volatile flavor characteristics of chicken from different chicken breeds [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2009, 25(10): 1129-1134.
- [33] 刘晨, 孙庆申, 吴桐, 等. 3 种不同发酵剂馒头风味物质比较分析[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 150-153.
- LIU C, SUN QS, WU T, *et al.* Comparative analysis of flavor compounds in steamed bread with three different fermenters [J]. *Food Sci*, 2015, 36(10): 150-153.
- [34] FAN H, ZHENG X, AI Z, *et al.* Analysis of volatile aroma components from Mantou fermented by different starters [J]. *J Food Process Preserv*, 2018, 42(6): e13627.1-e13627.8.
- [35] 周芳. 酱肉加工工艺及挥发性风味物质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- ZHOU F. Study on processing technology and volatile flavor compounds of soy sauce meat [D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [36] KRIST S, UNTERWEGER H, BANDION F, *et al.* Volatile compound analysis of SPME headspace and extract samples from roasted Italian chestnuts (*Castanea sativa* Mill.) using GC-MS [J]. *Eur Food Res Technol*, 2004, 219(5): 470-473.
- [37] 郑美玲, 张文洁, 朱远洋, 等. 甘薯烤制过程中美拉德反应主要成分及香味成分含量的动态变化[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(6): 85-92.
- ZHENG ML, ZHANG WJ, ZHU YY, *et al.* Dynamic changes of main components and aroma constituents involving Maillard reaction of sweet potatoes during baking process [J]. *Storage Process*, 2021, 21(6): 85-92.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介



张文婷, 助理研究员, 主要研究方向为食品化学。

E-mail: 1041117105@qq.com



钮福祥, 硕士, 研究员, 主要研究方向为农产品加工。

E-mail: niufuxiang@sina.com