

干燥方式对铁棍山药片挥发性风味成分的影响

庞凌云¹, 詹丽娟¹, 李家寅¹, 潘思轶², 李 瑜^{1*}

¹河南农业大学食品科学技术学院 郑州 450002

²华中农业大学食品科学技术学院 武汉 430070

摘要 采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)和电子鼻,分别测定热风干燥、微波干燥、真空干燥、真空冷冻干燥、联合干燥 5 种干燥方式加工的铁棍山药片的挥发性风味成分,并结合主成分分析,研究干燥过程中山药片风味的变化。结果表明,在 5 种干燥方式制得的山药片中,共检出 95 种挥发性成分,主要包括烃类、醛类、酮类、醇类、酯类、萜类和杂环化合物等。壬醛、癸醛、2,6,10-三甲基十四烷、香叶基丙酮是山药片中的主要风味物质。热风干燥、真空干燥、微波干燥所得山药片的主要挥发性物质有烃类、萜类和醛类;真空冷冻干燥、联合干燥所得山药片的主要挥发性物质有烃类、醛类和酮类。电子鼻检测结果表明,5 种干燥方式制得的山药片风味存在一定差异,其中热风干燥和真空干燥所得山药片的风味在醇、部分芳香族化合物上具有相似性,真空冷冻干燥山药片与其它干燥方式山药片的风味差异主要是含氮化合物、含硫化合物。这与 GC-MS 分析结果一致。根据主成分分析法建立了山药片香气品质评价模型,得出联合干燥方式制得的山药片综合得分最高,香气品质最好,其次为真空冷冻干燥、微波干燥、热风干燥、真空干燥。

关键词 铁棍山药; 干燥方式; 挥发性风味成分; 气相色谱-质谱联用; 电子鼻

文章编号 1009-7848(2024)01-0301-14 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.01.030

山药是薯蓣科(Dioscoreaceae)薯蓣属(*Dioscorea*)植物薯蓣的块根,富含淀粉、蛋白质、矿物质、尿囊素、薯蓣皂苷等各种营养成分和功能成分,具有调理胃肠功能,增强免疫功能,抗氧化,降血糖,降血脂,抗突变,抗肿瘤等药理作用^[1-3]。其中盛产于河南焦作温县、武陟、沁阳等地的怀山药(*Dioscorea opposita* Thunb.)品质极佳。铁棍山药作为怀山药的优良品种,其尿囊素、薯蓣皂苷、薯蓣皂苷配基等含量较高,素有“怀参”之称^[4-5]。新鲜山药的水分含量较高,且采收期相对集中,采收时常常因机械作用而造成损伤,且山药的表皮非常薄,贮运过程中易破损,环境湿度过高时,易出现发芽、霉变、腐败等现象,不耐长期贮藏^[6]。干制是传统的食品加工保藏方法之一,干燥山药片是最常见的山药干制品。山药的风味在干燥加工过程中会受到温度、氧气、酶等的影响而发生一系列的变化,最终影响产品品质。目前测定挥发性风味成分的方法有气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)、气相色谱-离子迁移谱联用技术(GC-IMS)、气相色

谱-嗅闻-质谱联用技术(GC-O-MS)和电子鼻等,常常结合顶空固相微萃取方法(HS-SPME)萃取样品种中的挥发性成分^[7]。国内外学者利用这些测定方法研究了干燥加工过程中产品风味的变化。如马琦等^[8]利用电子鼻和 HS-SPME-GC-MS 技术测定了 4 种干燥方式制得的杏鲍菇香气成分,发现干制品香气成分差异较大。张毅航等^[9]利用 GC-IMS 技术分析比较了热风干燥和真空冷冻干燥对猴头菇不同部位风味物质的影响。Politowicz 等^[10]利用 HS-SPME-GC-MS 技术分析比较了 4 种干燥方式制得的香菇香气成分的差异。Dong 等^[11]利用电子鼻和 HS-SPME-GC-MS 探究了 5 种干燥方式对咖啡豆风味的影响。Farina 等^[12]利用 GC-MS 研究了微波干燥过程中不同品种枇杷风味成分的变化。Song 等^[13]通过 HS-SPME-GC-MS、电子鼻和 HS-SPME-GC-O 技术研究了 5 种干燥方式对枣挥发性风味成分的影响。目前,国内外关于山药在干燥加工过程中风味变化的研究较少。本文选用热风干燥、微波干燥、真空干燥、真空冷冻干燥、联合干燥 5 种干燥方式分别处理,采用 HS-SPME-GC-MS 和电子鼻技术测定所得山药片的挥发性风味成分,并结合主成分分析比较干燥方式对山药片风味的影响以及干燥过程中风味的变化规

收稿日期: 2023-01-20

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(18B550005)

第一作者: 庞凌云,女,博士,副教授

通信作者: 李瑜 E-mail: liyuliyu76@163.com

律,为优化干燥工艺参数,提升产品品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 试验材料 铁棍山药,产自河南省焦作市温县武德镇马冯蔺村,选择粗细均匀、个体完整、无机械性损伤的新鲜铁棍山药作为原材料。

1.1.2 试验仪器 7890A/5975C 型气相色谱-质谱联用仪,美国 Agilent 公司;50/30 μm DVB/CAR/PDMS(2 cm)型萃取头,美国 Supelco 公司;ZNCL-GS 磁力搅拌器,郑州长城科工贸有限公司;PEN 3.0 电子鼻,德国 Airsense 公司;DH6-907385-III 恒温鼓风干燥箱,上海新苗医疗器械制造有限公司;DZ-2BC 真空干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;WD900B Galanz 微波炉,顺德市格兰仕微波炉电器有限公司;LGJ-18S 真空冷冻干燥机,北京松源华兴科技发展有限公司;DZKW-C 恒温水浴锅,ST-04A 粉碎机,上海树立仪器仪表有限公司;DHS20-A 烘干称量法水分测定仪,上海精密科学仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 原料制备 热风干燥:称取山药削皮洗净,切为 5 mm 的薄片,在 85 $^{\circ}\text{C}$ 下漂烫护色 5 min,捞出沥干。干燥温度 60 $^{\circ}\text{C}$,每 30 min 翻盘,烘至水分含量为 6.34%,磨粉备用。

微波干燥:称取山药削皮洗净,切为 6 mm 的薄片,在 85 $^{\circ}\text{C}$ 下漂烫护色 5 min,捞出沥干。微波功率 270 W,单位质量微波功率 13 W/g,每隔 4 min 进行翻盘,烘至水分含量为 7.20%,磨粉备用。

真空干燥:称取山药削皮洗净,切为 3 mm 的薄片,在 85 $^{\circ}\text{C}$ 下漂烫护色 5 min,捞出沥干。干燥温度 65 $^{\circ}\text{C}$,真空度 0.07 MPa,每 30 min 翻盘,烘至水分含量为 12.37%,磨粉备用。

真空冷冻干燥:称取山药削皮洗净,切为 5 mm 的薄片,在 85 $^{\circ}\text{C}$ 下漂烫护色 5 min,捞出沥干。在 -80 $^{\circ}\text{C}$ 下预冻 4 h,第 1 阶段 -30 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 12 h,第 2 阶段 -5 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 8 h,第 3 阶段 15 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 14 h,第 4 阶段 30 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 10 h,烘至水分含量为 2.68%,磨粉备用。

真空冷冻干燥联合热风干燥:称取山药削皮洗净,切为 5 mm 的薄片,在 85 $^{\circ}\text{C}$ 下漂烫护色 5

min,捞出沥干。预冻温度 -80 $^{\circ}\text{C}$,时间 4 h;冻干第 1 阶段 -30 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 12 h,第 2 阶段 -5 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 3.5 h;热风干燥温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 4 h;烘至水分含量为 4.93%,磨粉备用。

1.2.2 GC-MS 测定

1.2.2.1 挥发性风味成分的提取 称取 3 g 山药粉密封于棕色顶空瓶中,在 55 $^{\circ}\text{C}$ 水浴平衡 20 min,将萃取头扎入棕色顶空瓶中顶空吸附 60 min,250 $^{\circ}\text{C}$ 解吸 5 min,进行 GC-MS 测定。

1.2.2.2 GC 条件 色谱柱 HP-5MS 毛细管柱(30 m \times 0.25 mm,0.25 μm);载气为氦气;流量 1 mL/min,不分流进样;程序升温:起始温度 40 $^{\circ}\text{C}$,保持 3 min,以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 80 $^{\circ}\text{C}$,保留 1 min,再以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 150 $^{\circ}\text{C}$,保持 1 min,再以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 240 $^{\circ}\text{C}$,保留 5 min。

1.2.2.3 MS 条件 电子电离源;电子能量 70 eV;离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$;接口温度 250 $^{\circ}\text{C}$;四极杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$;质量扫描范围 50~550 u。

1.2.2.4 挥发性风味成分定性、定量测定 根据得到的总离子流色谱图,采用 NIST08.L 谱图库结合正反匹配度(大于 800)对挥发性成分进行定性,同时结合人工解析质谱图进行确定。按面积归一化法进行定量,求得各挥发性风味成分的相对含量并记录其保留时间。

1.2.3 电子鼻的测定 采用 PEN3.0 型电子鼻进行测定,电子鼻由 10 根金属氧化传感器组成,每根传感器对应 1 类或几类敏感性物质,如表 1 所

表 1 PEN3.0 型电子鼻的传感器阵列及其性能描述

Table 1 Sensor array of PEN 3.0 electronic nose and its main properties

传感器编号	传感器名称	性能描述
S1	W1C	芳香族化合物
S2	W5S	含氮化合物
S3	W3C	氨类、芳香族化合物
S4	W6S	氢化物
S5	W5C	烷烃、烯烃、芳香族化合物
S6	W1S	烷类
S7	W1W	含硫化合物
S8	W2S	醇、部分芳香族化合物
S9	W2W	芳香族化合物、有机硫化合物
S10	W3S	烷类、脂肪类

示。称取 15 g 山药粉,用 3 层保鲜膜将其密封于锥形瓶中,60 ℃水浴加热 30 min,插入电子鼻探头吸取顶端空气进行测定,设置清洗时间为 80 s,传感器归零时间为 10 s,样品准备时间为 5 s,分析采样时间为 80 s,气体的进样流量为 400 mL/min。传感器响应值在 70 s 后基本稳定,选择 75 s 处信号响应值进行分析。

1.2.4 数据处理 通过 SPSS 16.0 软件对数据进行主成分分析,采用 Origin 9.1 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 GC-MS 结果分析

2.1.1 不同干燥方式所得山药片的挥发性风味成分总离子流色谱图 不同干燥方式制得的山药片挥发性风味成分总离子流色谱图见图 1。

2.1.2 不同干燥处理的山药片挥发性成分种类及含量 不同干燥方式制得的山药片挥发性成分的 GC-MS 分析结果见表 2。

不同干燥方式制得的山药片风味物质种类及其相对含量见表 3。

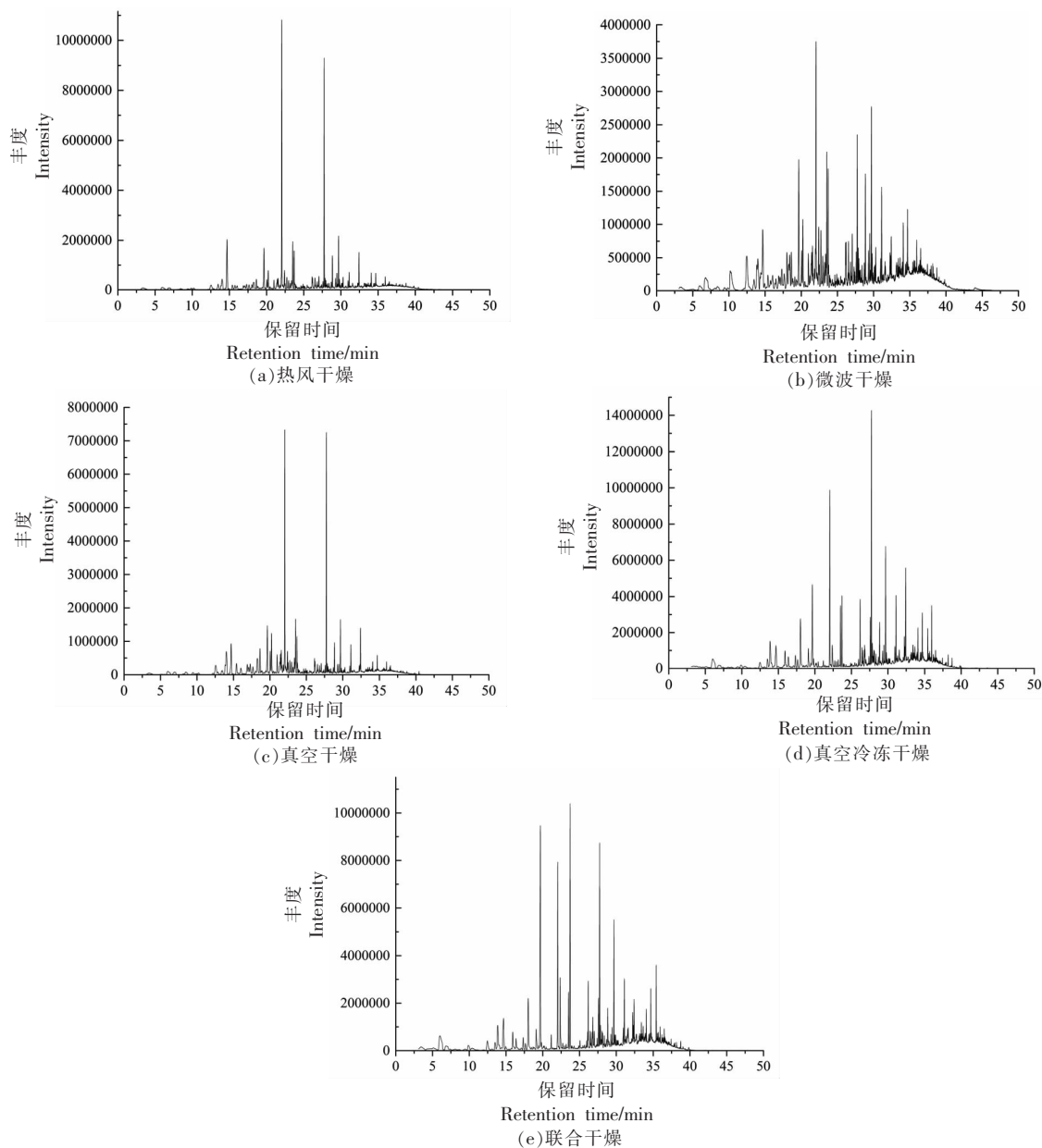


图 1 不同干燥方式制得的山药片挥发性风味成分总离子流色谱图

Fig.1 Total ion chromatogram of volatile compounds of yam slices processed by different drying methods

表2 不同干制方式制得的山药片挥发性成分的GC-MS分析结果

Table 2 GC-MS results of volatile compounds of yam slices processed by different drying methods

序号	种类	名称	保留时间/min	相对含量/%				
				微波干燥	真空干燥	真空冷冻干燥	热风干燥	联合干燥
1	醛类	己醛	6.014	0.61	1.88	2.90	2.03	3.85
2		庚醛	9.874	-	-	0.64	0.66	0.73
3		苯甲醛	12.515	5.07	-	1.23	-	1.53
4		(E,E)-2,4-庚二烯醛	14.930	0.42	-	-	-	0.33
5		苯乙醛	16.497	0.68	-	-	-	-
6		壬醛	19.653	5.62	6.62	5.80	7.08	11.66
7		(Z)-2-壬烯醛	21.964	1.30	-	-	-	-
8		十二醛	22.383	-	-	1.70	-	3.23
9		癸醛	23.713	3.01	2.75	2.95	3.90	8.78
10		十一醛	27.018	-	-	-	-	0.88
11	烃类	5-乙基-1-壬烯	13.101	-	-	0.22	-	0.16
12		癸烷	14.465	-	-	0.19	0.29	-
13		D-柠檬烯	15.759	0.60	-	0.30	1.12	0.10
14		1-碘代-2-甲基十一烷	17.638	-	-	-	1.21	-
15		2,4-二甲基苯乙烯	21.001	1.36	2.18	-	1.42	-
16		2,4,6-三甲基-癸烷	22.208	-	-	-	0.63	0.20
17		1-十三碳烯	23.196	-	-	-	-	0.24
18		1-十二烯	23.197	-	-	0.47	1.06	-
19		3-三氟乙酰氧基十二烷	23.397	-	0.45	0.20	-	-
20		十二烷	23.516	5.59	6.24	7.21	-	-
21		2-三氟乙酰氧基十三烷	26.531	-	-	0.57	-	0.38
22		4-乙基癸烷	26.797	-	-	-	8.18	4.43
23		(Z)-5-十四碳烯	27.415	0.56	-	-	-	-
24		9-甲基十九烷	27.982	0.69	0.49	1.34	-	-
25		2,6,11,15-四甲基十六烷	28.068	-	-	-	0.84	1.09
26		10-甲基二十碳烷	28.195	0.67	0.51	-	0.76	0.64
27		2-溴-十二烷	28.699	-	-	2.10	-	0.86
28		十五烷	28.714	-	-	-	4.65	7.15
29		2,6,11-三甲基十二烷	28.866	5.53	2.97	10.18	-	-
30		3-亚甲基十三烷	29.286	1.12	0.78	1.12	1.46	0.89
31		1-十六烯	29.450	-	-	1.14	-	-
32		7-十四碳烯	29.464	-	-	-	1.62	-
33		2-三氟乙酰氧基十四碳烷	29.554	2.33	0.69	0.38	1.02	-
34		十四烷	29.684	3.97	5.70	7.26	8.26	5.29
35		1,2-15,16-二聚氧十六烷	29.914	-	-	-	-	0.77
36		3-三氟乙酰氧基戊烷	30.093	-	0.33	-	-	0.28
37		4,11,11-三甲基 1-8-亚甲基-二 环十四醛-4-烯	30.289	-	-	-	1.29	-
38		1-石竹烯	30.292	1.14	-	-	-	-
39		十六烷	34.679	4.31	1.54	2.39	3.11	3.78
40		十一烷基环戊烷	35.694	-	-	0.90	-	0.86
41		2,6,10-三甲基十四烷	36.510	5.95	3.99	11.84	3.33	11.35

(续表2)

序号	种类	名称	保留时间/min	相对含量/%				
				微波干燥	真空干燥	真空冷冻干燥	热风干燥	联合干燥
42		2,3-二甲基十七烷	37.434	-	0.18	0.53	0.30	0.42
43	酯类	戊二酸二甲酯	21.151	-	-	0.53	-	0.61
44		己二酸二甲酯	25.077	-	-	0.27	-	0.48
45		三氯乙酸,十六烷基酯	27.418	-	-	-	0.63	-
46		二氯乙酸,4-四癸酯	30.965	1.01	0.63	-	2.07	-
47		甲氧乙酸,2-四癸酯	33.964	0.57	-	3.55	1.64	2.92
48		十二甲基十三酸异丙酯	38.175	-	0.10	-	-	0.19
49		邻苯二甲酸,丁基异己酯	38.742	-	-	0.25	-	0.23
50		邻苯二甲酸,丁基四癸酯	38.753	0.29	-	-	0.50	0.12
51		邻苯二甲酸异辛酯	38.755	-	0.10	-	-	-
52		邻苯二甲酸丁酯	39.829	-	-	0.14	-	-
53		<i>i</i> -丙基-14-甲基-戊二酸酯	40.425	-	0.15	-	0.11	-
54	酮类	甲基庚烯酮	13.862	1.53	1.55	3.39	0.91	2.69
55		3,5-辛二烯-2-酮	19.108	2.82	-	6.26	1.08	5.63
56		香叶基丙酮	31.114	2.30	1.92	2.96	1.53	2.41
57		氮环己酮	31.215	-	0.65	1.07	-	1.54
58	醇类	1-辛烯-3-醇	13.505	1.04	-	1.14	1.93	0.80
59		异辛醇	15.910	-	-	1.61	-	1.31
60		3,5-辛二烯-2-醇	16.367	0.29	-	1.08	-	0.80
61		2-癸烯-1-醇	17.918	-	-	-	0.30	-
62		π (1-乙烯基戊基)- π 甲基-苯甲醇	18.689	-	-	-	-	0.19
63		2-己基-1-辛醇	24.010	-	0.22	-	-	-
64		2-丁基-1-辛醇	24.008	0.28	-	-	0.24	-
65		反式-2-十一烷-1-醇	26.107	-	-	-	-	0.57
66		1-十六烷醇	30.951	0.55	-	2.25	-	-
67		己基癸醇	31.627	-	-	-	-	3.06
68		2-甲基-1-十六醇	36.402	0.93	-	1.37	-	1.65
69		2-(八甲氧基)-乙醇	37.945	-	-	0.31	-	-
70		1-七氧杂醇	38.381	0.31	-	-	-	-
71	醚类	1-十二醇,甲醚	24.908	-	0.49	-	0.57	-
72	酚类	2,4-双(1,1-二甲基乙基)苯酚	32.716	-	-	-	-	0.56
73	酸类	十二烯基丁二酸酐	35.110	-	0.16	5.30	-	1.75
74	苯类	对二甲苯	9.413	0.88	1.88	-	-	-
75		1,2,4-三甲苯	15.410	3.69	13.11	-	6.92	-
76		茚满	16.030	-	1.53	-	-	-
77		2,3-二氢-4-甲基-1H-茚	21.443	1.33	2.08	-	2.69	-
78		1,2,4,5-四甲苯	21.554	-	-	-	14.01	-
79		1-甲基-3-(1-甲基丙基)-苯	21.557	10.71	25.55	-	-	-
80		萘	22.721	2.12	1.50	0.46	1.80	0.31
81		2,3-二氢-4,7-二甲基-1H-茚	25.128	0.30	-	-	-	-
82		五甲基苯	26.132	5.35	9.12	-	4.63	-
83		苯并环庚烷	26.536	-	0.86	-	-	-
84		β -甲基萘	27.049	2.90	0.80	-	2.95	-
85		1,7-二甲基萘	30.181	0.54	-	-	0.56	-

(续表 2)

序号	种类	名称	保留时间/min	相对含量/%				
				微波干燥	真空干燥	真空冷冻干燥	热风干燥	联合干燥
86	杂环化合物	2-甲基嘧啶	6.740	2.13	-	-	-	-
87		2,5-二甲基吡嗪	10.297	3.43	-	-	-	-
88		2-戊基呋喃	14.053	-	-	0.59	-	0.48
89		2-乙基-3-甲基吡嗪	14.464	1.82	-	-	-	-
90		3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	18.390	1.85	-	-	-	-
91	其它	甲氧基苯基脒	10.195	-	-	-	0.68	-
92		O-癸基羟胺	17.077	-	-	0.33	-	0.23
93		1-十八烷磺酰氯	25.678	-	0.31	-	-	-
94		叔十六硫醇	37.070	-	-	3.54	-	2.39
95		i-丙基十四烷酸盐	38.173	0.46	-	-	-	-

注: - 未检出。

表 3 不同干燥方式制得的山药片挥发性风味成分分类比较

Table 3 Comparison of volatile compounds of yam slices processed by different drying methods

类别	热风干燥		真空干燥		微波干燥		真空冷冻干燥		联合干燥	
	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%
醛类	4	13.67	3	11.25	7	16.71	6	15.22	8	31.00
烃类	18	40.55	13	26.06	13	33.82	18	48.34	18	38.60
酯类	5	4.95	4	0.98	3	1.87	5	4.74	6	4.54
醚类	1	0.57	1	0.49	-	-	-	-	-	-
酮类	3	3.52	3	4.12	3	6.65	4	13.68	4	12.27
醇类	3	2.47	1	0.22	6	3.40	6	7.76	7	8.38
酸类	-	-	1	0.16	-	-	1	5.30	1	1.75
苯类	7	33.56	9	56.42	9	27.86	1	0.46	1	0.31
杂环化合物	-	-	-	-	4	9.23	1	0.59	1	0.48
其它	1	0.68	1	0.31	1	0.46	2	3.87	2	2.62
总和	42	100	36	100	46	100	44	100	48	100

注: - 未检出。

经 GC-MS 测定 5 种山药片干制品中共检测出 95 种风味物质,其中热风干燥、微波干燥、真空干燥、真空冷冻干燥、联合干燥所得山药片分别检测出 42,46,36,44,48 种风味物质。由表 3 可知,热风干燥山药片中主要挥发性物质有烃类 18 种(40.55%),苯类 7 种(33.56%),醛类 4 种(13.67%),酯类 5 种(4.95%);微波干燥山药片中主要挥发性物质有烃类 13 种(33.82%),苯类 9 种(27.86%),醛类 7 种(16.71%),杂环化合物 4 种(9.23%);真空干燥山药片中主要挥发性物质有苯类 9 种(56.42%),烃类 13 种(26.06%),醛类 3 种(11.25%),

酮类 3 种(4.12%);真空冷冻干燥山药片中主要挥发性物质有烃类 18 种(48.34%),醛类 6 种(15.22%),酮类 4 种(13.68%),醇类 6 种(7.76%);联合干燥山药片中主要挥发性物质有烃类 18 种(38.60%),醛类 8 种(31.00%),酮类 4 种(12.27%),醇类 7 种(8.38%)。

综合表 2 和表 3 数据分析得出,热风干燥、真空干燥、微波干燥所得山药片中主要风味物质是烃类、苯类和醛类,真空冷冻干燥、联合干燥的主要风味物质是烃类、醛类和酮类。此外微波干燥山药片中还含有吡嗪类化合物,赋予山药片独特的

风味。查阅各物质的风味阈值,结合相对含量,认为壬醛、癸醛、2,6,10-三甲基十四烷、香叶基丙酮是山药片中的主要风味物质。热风干燥山药片中主要的风味物质有壬醛、4-乙基-癸烷、十四烷、1,2,4-三甲苯、1,2,4,5-四甲苯等,真空干燥山药片中主要的风味物质有壬醛、十二烷、十四烷、1,2,4-三甲苯、1-甲基-3-(1-甲基丙基)-苯、五甲基苯等,微波干燥山药片中主要的风味物质有苯甲醛、壬醛、十二烷、2,6,11-三甲基十二烷、五甲基苯、1-甲基-3-(1-甲基丙基)-苯、2,6,10-三甲基十四烷等,真空冷冻干燥山药片中主要的风味物质有壬醛、十二烷、2,6,11-三甲基十二烷、十四烷、2,6,10-三甲基十四烷、3,5-辛二烯-2-酮等,联合干燥山药片中主要的风味物质有壬醛、癸醛、十五烷、十四烷、2,6,10-三甲基十四烷、3,5-辛二烯-2-酮等。

2.1.3 不同干燥处理的山药片共有的香气成分

由表2可以看出,不同干燥处理的山药片共有的香气成分有10种,其中醛类3种,分别是己醛、壬醛、癸醛;烃类有4种,分别是3-亚甲基十三烷、十四烷、十六烷、2,6,10-三甲基十四烷;酮类有2种,分别是甲基庚烯酮和香叶基丙酮;苯类有1种,即萘。

2.1.4 不同干燥处理的山药片特有的香气成分

通过不同干燥方式处理后的山药片有各自特有的香气成分,由表2可知,热风干燥特有香气有7种,包括有1,2,4,5-四甲苯(14.01%)、7-十四碳烯(1.62%)、1-碘代-2-甲基十一烷(1.21%)、4,11,11-三甲基-1-8-亚甲基-二环十四烷-4-烯(1.29%)等。微波干燥特有香气有11种,包括有2,5-二甲基吡嗪(3.43%)、2-甲基嘧啶(2.13%)、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪(1.85%)、2-乙基-6-甲基吡嗪(1.82%)、(Z)-2-壬烯醛(1.30%)、1-石竹烯(1.14%)等。真空干燥特有香气有4种,包括有苯并环庚烷(0.86%)、邻苯二甲酸异辛酯(0.10%)等。真空冷冻干燥特有香气有3种,包括有1-十六烯(1.14%)、2-(八甲氧基)-乙醇(0.31%)、邻苯二甲酸丁酯(0.14%)。联合干燥特有香气有7种,包括有己基癸醇(3.06%)、十一醛(0.88%)、1,2-15,16-二聚氧十六烷(0.77%)、反式-2-十一烷-1-醇(0.57%)等。

2.1.5 不同干燥处理对山药片香气成分的影响

2.1.5.1 醛类 醛类物质在山药片中含量较高,气味阈值较低,对总体风味形成的贡献较大。短链的醛类物质来自脂肪的氧化和降解,具有脂香气味^[14]。由表3可以看出,联合干燥山药片中的醛类物质种类较多且相对含量高达31.00%,真空干燥的种类较少且相对含量最低,仅为11.25%。5种干燥方式制得的山药片中均含有己醛、壬醛、癸醛。由表2可知,山药片经联合干燥后壬醛、癸醛和己醛相对含量最高,分别为11.66%、8.78%、3.85%,壬醛具有柑橘、玫瑰等香味,己醛具有青草香味,癸醛具有橘香、花香、甜香和蜡香^[15],可赋予山药片清香的风味。微波干燥山药片中苯甲醛相对含量最高,为5.07%,其具有特殊杏仁香味,可以赋予微波干燥的山药片脂香味。高琦等^[16]在干燥山药片中也检测到己醛、壬醛和苯甲醛等醛类物质。

2.1.5.2 烃类 在山药片中检测到的烃类物质种类最多,其风味阈值较高,对山药整体风味贡献不大,而含量较高,有些是生成杂环化合物的重要中间体^[17],有助于提升山药片的整体风味。真空冷冻干燥山药片中烃类物质相对含量最高,其中十二烷、十四烷、2,6,11-三甲基十二烷和2,6,10-三甲基十四烷相对含量分别高达7.21%、7.26%、10.18%、11.84%。真空干燥后烃类物质相对含量最低。烯炔类物质风味比较独特,如热风干燥山药片中含有1.12%的D-柠檬烯,可赋予山药片橙子香气和柠檬香气^[18]。Gramshaw和Osinowo^[19]在煮熟山药中也检测到含量为1.1%的柠檬烯。

2.1.5.3 酯类 酯类物质能够赋予食品一种醚香和甜的水果香气,常温下短链的酯类挥发性较强,风味阈值又较低,因此对风味贡献较大。热风干燥、真空冷冻干燥和联合干燥山药片中酯类物质相对含量较高且比较接近,其中真空冷冻干燥和联合干燥山药片中甲氧乙酸、2-四癸酯含量分别高达3.55%和2.92%,热风干燥山药片中二氯乙酸、4-四癸酯含量高达2.07%,可赋予山药片一定的水果香味。而真空干燥和微波干燥酯类含量相对较低。

2.1.5.4 酮类 短链酮类具有焦香香气和脂香,长链酮类则具有花香香气。酮类化合物主要通过

脂质氧化加热生成。5种干燥方式所得山药片中均含有甲基庚烯酮和香叶基丙酮,香叶基丙酮具有果香、青香、木香、蜡香^[20],甲基庚烯酮则具有青香、柑橘香气。真空冷冻干燥和联合干燥山药片中酮类物质相对含量较高,热风干燥最低。真空冷冻干燥山药片中3,5-辛二烯-2-酮相对含量高达6.26%,可赋予山药片脂肪味、蘑菇味。

2.1.5.5 醇类 醇类物质风味阈值高于醛酮类,直链饱和醇的香味对山药风味贡献较小,然而随着碳链增长和浓度增加,香味逐渐增加,可产生脂肪香、清香和木香等风味;不饱和醇风味阈值较低,对整体风味贡献大^[21]。联合干燥和真空冷冻干燥山药片中,醇类物质相对含量较高。热风干燥山药片中,1-辛烯-3-醇相对含量高达1.93%,其风味阈值较低,呈现出蘑菇气味。Chen等^[22]在鲜山药中也检测出含量高达15%的1-辛烯-3-醇。其在干燥加工中易挥发而造成含量下降。1-十六烷醇又称棕榈醇,略有香味,常用于制作香料、化妆品等,在真空冷冻干燥山药片中相对含量高达2.25%。己基癸醇略有香味,常用于化妆品中,在联合干燥山药片中相对含量高达3.06%。

2.1.5.6 其它类物质 挥发性低级脂肪酸一般具有腥臭味,所以少量酸类物质的形成会降低山药的香气质量。微波干燥和热风干燥山药片产生的风味物质中不含酸类物质,真空干燥和真空冷冻干燥山药片中酸类物质的相对含量分别为0.16%和5.30%,而联合干燥的相对含量仅为1.75%,因此与真空冷冻干燥相比,联合干燥可有效减少酸类物质的生成。此外,在真空冷冻干燥山药片中,还检测到相对含量为3.54%的叔十六硫醇。

杂环化合物风味阈值较低,对山药整体风味贡献较大。微波干燥山药片中杂环化合物相对含量高达9.23%,其中检测到3种吡嗪类化合物,3-乙基-2,5-二甲基吡嗪具有坚果香和可可味,2,5-二甲基吡嗪具有烤坚果味,从而整体上赋予山药片烤坚果和烘焙香味。Lasekan和Teoh^[23]在烤山药中也发现了2-甲基吡嗪、2-乙基吡嗪和2-乙基-3,5-二甲基吡嗪等3种吡嗪类化合物。通常Strecker降解反应过程中二羰基化合物与氨基酸反应生成的 α -氨基羰基化合物是生成吡嗪的前体物质^[24]。微波干燥过程由于局部温度较高而发

生美拉德反应,生成了较多的吡嗪类化合物而使山药片风味独特。由于干燥温度较低,真空冷冻干燥过程中难以产生吡嗪类化合物,然而在干燥过程中产生了少量的2-戊基呋喃,其具有果香、青香、豆香。Guo等^[25]在鲜山药中也检测出了2-戊基呋喃。

2.1.6 山药片香气品质评价模型的建立

2.1.6.1 主成分分析结果 对GC-MS结果进行了主成分分析,各主成分的特征值和贡献率见表4。

由表4可以看出,第一主成分和第二主成分的贡献率分别为66.014%和17.789%,2个主成分的累计贡献率为83.803%,说明2个主成分包括了5种干燥方式所得山药片挥发性风味物质的大部分信息。第一主成分的贡献率远远大于第二主成分的贡献率,表明不同干燥方式所得山药片的风味差异主要由第一主成分决定。

旋转后成分载荷矩阵结果见表5。

由表5可知,醇类、酮类对第一主成分的贡献率最大,酯类和烃类对第二主成分的贡献率最大。而醚类和苯类与第一主成分呈负相关关系,杂环化合物和苯类与第二主成分呈负相关关系。

表4 各主成分的特征值和贡献率

Table 4 Eigenvalues, contribution of principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	6.601	66.014	66.014
2	1.779	17.789	83.803

表5 旋转后成分载荷矩阵

Table 5 Rotated loading matrix of components

种类	主成分1	主成分2
醛类	0.699	0.106
烃类	0.429	0.783
酯类	0.245	0.836
醚类	-0.987	0.045
酮类	0.835	0.488
醇类	0.835	0.534
酸类	0.508	0.705
苯类	-0.831	-0.534
杂环化合物	0.416	-0.765
其它	0.630	0.738

2.1.6.2 评价模型的建立 表 5 载荷矩阵中的各主成分载荷向量并不是各主成分对应的模型系数,各主成分系数的计算方法为载荷向量除以对应特征值的算术平方根^[26]。经计算后建立了 2 个主成分的函数表达式,其中 F_1 和 F_2 分别表示第一和第二主成分。

$$F_1 = 0.272X_1 + 0.167X_2 + 0.095X_3 - 0.384X_4 + 0.325X_5 + 0.325X_6 + 0.198X_7 - 0.323X_8 + 0.162X_9 + 0.245X_{10}$$

$$F_2 = 0.079X_1 + 0.587X_2 + 0.627X_3 + 0.033X_4 + 0.366X_5 + 0.400X_6 + 0.529X_7 - 0.400X_8 - 0.574X_9 + 0.553X_{10}$$

各主成分的得分是对应的因子得分乘以对应特征值的算术平方根^[27],再以各主成分的贡献率对其得分进行加权,最终建立山药片香气品质评价的模型为 $F = 0.7888F_1 + 0.2123F_2$ 。根据公式计算得到的各干燥方式制得山药片的香气综合得分见表 6。

表 6 山药片香气品质的综合得分

Table 6 Comprehensive score of aroma quality of yam slices

干燥方式	得分			排序
	F_1	F_2	F	
真空冷冻干燥	1.531342	1.525683	1.531786	2
联合干燥	2.412666	0.346823	1.976738	1
热风干燥	-2.807146	0.747527	-2.055604	4
微波干燥	1.635172	-1.891791	0.888254	3
真空干燥	-2.772035	-0.728242	-2.341173	5

由表 6 可以看出,第一主成分中,联合干燥制得的山药片得分最高,其次为微波干燥制得的山药片;第二主成分中,真空冷冻干燥制得的山药片得分最高,其次为热风干燥制得的山药片。联合干燥方式制得的山药片综合得分最高,其次为真空冷冻干燥、微波干燥、热风干燥、真空干燥。因此联合干燥制得的山药片香气品质最好,真空冷冻干燥、微波干燥、热风干燥、真空干燥次之,采用联合干燥加工山药片可更好地保持山药片的香气品质。

2.2 电子鼻结果分析

5 种干燥方式所得山药片的电子鼻雷达图见图 2。

由图 2 可以看出,山药片 W1W(含硫化合物)和 W5S(含氮化合物)的响应值最高,且不同干燥方式所得样品间差异比较大,说明这两种传感器检测出的样品挥发性成分相差较大,W1W 传感器的响应值中微波干燥样品最高,为 3.3400,联合干燥样品最低,为 2.2199;W5S 传感器的响应值中真空冷冻干燥样品最高,为 1.9851,热风干燥样品最低,为 1.3898。其次为 W1S(烷类)和 W2S(醇、部分芳香型化合物),响应值分别为 1.1177~1.3511

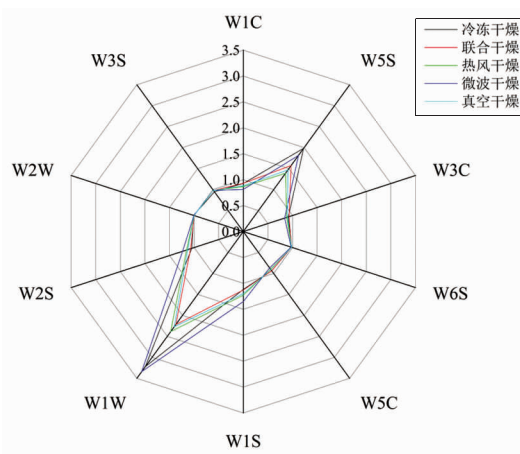


图 2 5 种干燥方式所得山药片的电子鼻雷达图

Fig.2 Radar diagram of electronic nose for yam slices processed by five drying methods

和 1.0464~1.2344。其它 6 种传感器的响应值差别不大,且不同干燥方式所得样品间几乎重叠,说明这 6 种传感器检测出的样品挥发性成分基本相同。相对来说,10 种传感器检测出热风干燥、真空干燥和联合干燥样品的响应值差别不大,说明这 3 种干燥方式所得山药样品的挥发性成分相似。

5 种干燥方式所得山药片的挥发性风味主成分分析结果见图 3。

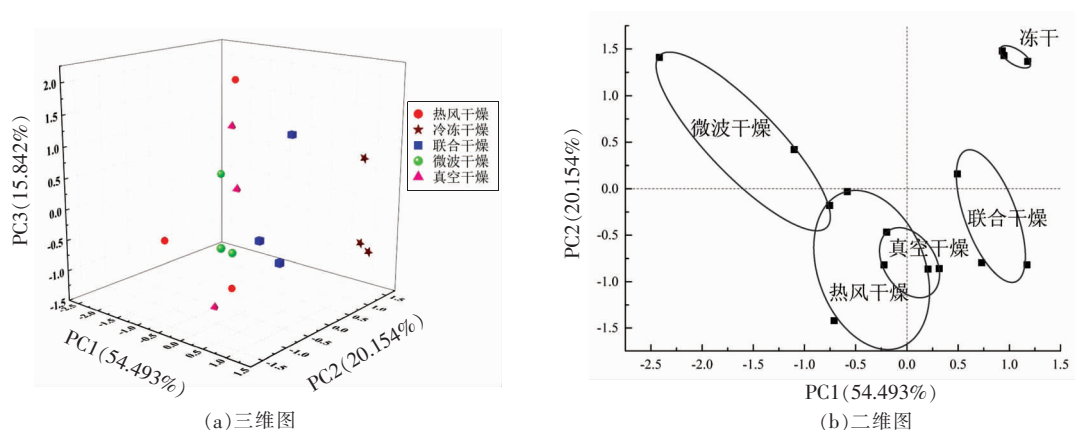


图3 5种干燥方式所得山药片主要挥发性成分的主成分分析

Fig.3 PCA of main volatile components of yam slices processed by five drying methods

由图3可以看出3个主成分的贡献率分别为54.493%,20.154%,15.842%,累计贡献率为90.489%,说明3个主成分包括了5种干燥方式所得山药片挥发性风味物质的大部分信息。第一主成分的贡献率远大于其它2个主成分的贡献率,表明不同干燥方式的山药片的风味差异主要由第一主成分决定。5种干燥方式处理后的山药片风味分布在不同的位置,尽管存在部分重合,但也表现出一定的分离趋势,说明不同干燥方式处理后的山药风味存在一定的差异。从第一主成分角度看,真空冷

冻干燥、联合干燥样品处于正向端,热风干燥、真空干燥、微波干燥样品处于负向端;从第二主成分角度看,真空冷冻干燥、微波干燥样品处于正向端,真空干燥、热风干燥、联合干燥样品处于负向端。综上所述,真空冷冻干燥与其它干燥方式的山药片距离较远,说明真空冷冻干燥处理的山药片样品在风味上与其它干燥方式的山药片有较大差异;热风干燥、真空干燥样品有部分重叠,说明这两种干燥方式所得样品风味具有一定的相似性。

旋转后成分载荷矩阵结果见表7。

表7 旋转后成分载荷矩阵

Table 7 Rotated loading matrix of components

种类	主成分1	主成分2	主成分3
芳香族化合物	0.986	-0.097	0.003
醇、部分芳香族化合物	-0.983	0.041	0.120
烷类	-0.982	0.146	0.085
氨类、芳香族化合物	0.965	-0.231	0.002
烷烃、烯烃、芳香族化合物	0.964	-0.049	-0.008
含氮化合物	-0.007	0.944	-0.110
含硫化合物	-0.433	0.874	-0.106
芳香族化合物、有机硫化合物	-0.021	0.680	0.550
氢化物	0.126	0.022	0.881
烷类、脂肪类	-0.458	-0.197	0.708

由表7可知,芳香族化合物、氨类和烷烃对第一主成分的贡献率最大,含氮化合物和含硫化合物对第二主成分的贡献率最大,氢化物、烷类和脂肪类对第三主成分的贡献率最大。从第一主成分

来看,真空冷冻干燥山药片与其它干燥方式山药片的风味差异主要是芳香族化合物、氨类、烷烃;从第二主成分来看,真空冷冻干燥山药片与其它干燥方式山药片的风味差异主要是含氮化合物、

含硫化合物。

通过电子鼻分析可以看出,真空冷冻干燥山药片与其它干燥方式山药片的风味差异主要是含氮化合物、含硫化合物;热风干燥和真空干燥山药片的风味在醇、部分芳香族化合物上有相似性。这与GC-MS所检测的结果一致。

3 讨论

采用GC-MS测定分析得出山药片中的主要风味物质为壬醛、癸醛、2,6,10-三甲基十四烷、香叶基丙酮等。而Chen等^[22]测定分析了11种鲜山药的风味物质,认为醇类(如1-辛烯-3-醇)和醚类(如茴香脑)是共有的香气成分;Lasekan和Teoh^[23]认为烤山药中的主要香气成分是2-乙酰呋喃、2-乙酰吡咯、2-甲基吡嗪等;Gao等^[28]认为真空冷冻干燥、热风干燥、真空干燥和变温压差膨化干燥4种干燥方式所得山药片的主要香气成分为腈类和醛类。各研究结果差异较大,分析认为一方面是由于山药品种不同,各品种间风味有一定的差异;另一方面是由于采用了不同的干燥方式,加工过程中温度、环境氧气含量等的差异影响了产品的最终风味。

山药中含有丰富的淀粉、蛋白质、脂肪、糖类物质,这些物质在干燥加工中,特别是高温条件下,极易发生氧化分解等反应,最终形成山药特有的风味。5种干燥方式制得的山药片的挥发性风味物质主要包括醛类、烃类、酮类、醇类、酯类、苯类和杂环化合物等,干燥方式对山药片风味影响较大,其主要风味物质及相对含量均差异较大。分析原因可能是由于干燥加工处理中脂肪不同程度的氧化降解造成的。由于热风干燥的干燥时间长,脂肪氧化分解程度高。真空干燥中脂肪仍存在不同程度的氧化降解,然而由于环境氧气浓度低,氧化程度较弱。微波干燥虽然处理时间短,但温度较高,在一定程度上加速了不饱和脂肪酸链键断裂,加速了脂肪氧化,生成较多的烃类、醛类等风味物质^[29]。真空冷冻干燥能最大程度保留山药原有风味,然而主要风味物质酮类的生成途径尚不明确。不同干燥方式对山药片特征风味物质的影响及形成机理仍有待深入研究。

4 结论

1) 经GC-MS鉴定和分析了5种干燥方法制得的山药片的风味成分,共检测出95种物质,主要包括烃类、醛类、酮类、醇类、酯类、苯类和杂环化合物等。壬醛、癸醛、2,6,10-三甲基十四烷、香叶基丙酮是山药片中的主要风味物质。热风干燥、真空干燥、微波干燥所得山药片中主要挥发性物质有烃类、苯类和醛类;真空冷冻干燥、联合干燥所得山药片主要挥发性物质有烃类、醛类和酮类。根据主成分分析法建立了山药片香气品质评价模型,得出联合干燥方式制得的山药片的综合得分最高,香气品质最好,其次为真空冷冻干燥、微波干燥、热风干燥、真空干燥。

2) 电子鼻检测结果表明,5种干燥方式制得的山药片风味存在一定的差异,其中热风干燥和真空干燥所得山药片的风味在醇、部分芳香族化合物上具有相似性,真空冷冻干燥山药片与其它干燥方式山药片的风味差异主要是含氮化合物、含硫化合物。这与GC-MS的分析结果一致。5种干燥方式制得的山药片整体风味具有较大差异。

参 考 文 献

- [1] 陈梦雨,刘伟,俞桂新,等. 山药化学成分与药理活性研究进展[J]. 中医学报, 2020, 48(2): 62-66.
CHEN M Y, LIU W, CHOU G X, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of *Dioscorea opposita* Thunb. [J]. Acta Chinese Medicine and Pharmacology, 2020, 48(2): 62-66.
- [2] ROSIDA H, ESTIASIH T, SRIWAHYUNI E. Hypoglycemic effect of modified water yam flour (*Dioscorea Alata*) on diabetic wistar rats (*Rattus norvegicus*) [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2016, 4(1): 20-25.
- [3] WANG Y, LIU Y X, ZHANG Y Q, et al. Effects of the polysaccharides extracted from Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) on cancer-related fatigue in mice [J]. Food & Function, 2021, 21(12): 10602-10614.
- [4] 赵喜亭,赵月丽,王苗,等. 铁棍山药 POD 特性及褐变抑制研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40

- (1): 107-111.
- ZHAO X T, ZHAO Y L, WANG M, et al. Study on characteristics of peroxidase in *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun and its browning inhibition[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(1): 107-111.
- [5] SHAN N, WANG P T, ZHU Q L, et al. Comprehensive characterization of yam tuber nutrition and medicinal quality of *Dioscorea opposita* and *D. alata* from different geographic groups in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(11): 2839-2848.
- [6] 任炜, 段续. 冻干怀山药贮藏条件研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(2): 187-190.
- REN W, DUAN X. Study on the critical preservation conditions for freeze dried Chinese yam[J]. Food Research And Development, 2016, 37(2): 187-190.
- [7] 汤泽波, 冯涛, 庄海宁. 大宗水果风味物质的研究进展[J]. 中国果菜, 2020, 40(6): 2-9, 22.
- TANG Z B, FENG T, ZHUANG H N. Research progress of flavor compounds in bulk fruits[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(6): 2-9, 22.
- [8] 马琦, 伯继芳, 冯莉, 等. GC-MS结合电子鼻分析干燥方式对杏鲍菇挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 276-282.
- MA Q, BO J F, FENG L, et al. Effect of drying method on volatile components of *Pleurotus eryngii* analyzed by combined use of GC-MS and electronic nose[J]. Food Science, 2019, 40(14): 276-282.
- [9] 张毅航, 方东路, 仲磊, 等. 热风干燥和真空冷冻干燥对猴头菇不同部位风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 58-67.
- ZHANG Y H, FANG D L, ZHONG L, et al. Effects of hot air-drying and vacuum freeze-drying on flavor components in different parts of *Hericium erinaceus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 58-67.
- [10] POLITOWICZ J, LECH K, LIPAN L, et al. Volatile composition and sensory profile of shiitake mushrooms as affected by drying method[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2018, 98(4): 1511-1521.
- [11] DONG W J, HU R S, LONG Y Z, et al. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 723-731.
- [12] FARINA V, CINQUANTA L, VELLA F, et al. Evolution of carotenoids, sensory profiles and volatile compounds in microwave-dried fruits of three different loquat cultivars (*Eriobotrya japonica* Lindl.)[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2020, 75(2): 200-207.
- [13] SONG J X, CHEN Q Q, BI J F, et al. GC-MS coupled with MOS e-nose and flash GC e-nose for volatile characterization of Chinese jujubes as affected by different drying methods[J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127201.
- [14] 王恺, 慕妮, 李亮, 等. 不同发酵剂对发酵香肠挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(14): 177-181, 196.
- WANG K, MU N, LI L, et al. Analysis of aroma components in fermented sausage with different starter cultures[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(14): 177-181, 196.
- [15] 刘璇, 赖必辉, 毕金峰, 等. 不同干燥方式芒果脆片香气成分分析[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 179-184.
- LIU X, LAI B H, BI J F, et al. Analysis of aroma components in mango chips prepared by different drying methods[J]. Food Science, 2013, 34(22): 179-184.
- [16] 高琦, 张建超, 陈佳男, 等. 基于主成分分析法综合评价4种干燥方式对山药脆片香气品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 175-181.
- GAO Q, ZHANG J C, CHEN J N, et al. Comprehensive evaluation of the effect of four drying methods on the aroma quality of Chinese yam chips based on principal component analysis[J]. Food Science, 2018, 39(20): 175-181.
- [17] 孙莹, 苗榕芯, 江连洲. 电子鼻结合气相色谱-质谱联用技术分析贮存条件对马铃薯面包挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 222-228.
- SUN Y, MIAO R X, JIANG L Z. Analysis of volatile components of potato bread under different storage conditions by electronic nose combined with HS-SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2019, 40(2): 222-228.
- [18] 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 25-30.
- TANG Q S, LIU X M, CHI J W, et al. Effects of

- different drying methods on quality and volatile components of *Pleurotus eryngii* [J]. Food Science, 2016, 37(4): 25–30.
- [19] GRAMSHAW J W, OSINOWO F A O. Volatile components of cooked tubers of the water yam (*Dioscorea alata*)[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 1982, 33(1): 71–80.
- [20] 陈瑞娟, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对胡萝卜粉香气成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(9): 70–76.
- CHEN R J, BI J F, CHEN Q Q, et al. Effect on aroma components in carrot powder prepared by different drying methods[J]. Food and Fermentation Industry, 2013, 39(9): 70–76.
- [21] 刘红. 热反应型风味基料的研制及与市售相关产品的风味比较[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2010.
- LIU H. Study on techniques of flavoring based on Maillard reaction and comparison of flavor with related products [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2010.
- [22] CHEN J N, GAO Q, LIU C J, et al. Comparison of volatile components in 11 Chinese yam (*Dioscorea* spp.) varieties[J]. Food Bioscience, 2020, 34: 100531.
- [23] LASEKAN O, TEOH L S. Contribution of aroma compounds to the antioxidant properties of roasted white yam (*Dioscorea rotundata*)[J]. BMC Chemistry, 2019, 13(1): 133.
- [24] YU A N, ZHANG A D. The effect of pH on the formation of aroma compounds produced by heating a model system containing *L*-ascorbic acid with *L*-threonine/*L*-serine[J]. Food Chemistry, 2010, 119: 214–219.
- [25] GUO S, ZHAO X Y, MA Y, et al. Fingerprints and changes analysis of volatile compounds in fresh-cut yam during yellowing process by using HS-GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130939.
- [26] 雷春妮, 张雅珩, 李经纬, 等. 基于主成分分析构建初榨橄榄油香气质量评价模型[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(12): 65–70, 77.
- LEI C N, ZHANG Y H, LI J W, et al. Modeling for aroma quality evaluation of virgin olive oil based on principal component analysis[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(12): 65–70, 77.
- [27] 马会芳, 刘义军, 涂行浩, 等. 基于主成分分析法构建牛油果油香气质量评价模型[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(5): 600–607.
- MA H F, LIU Y J, XU X H, et al. Evaluation model for the aroma quality of avocado oil from different extraction methods based on principal component analysis[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 49(5): 600–607.
- [28] GAO Q, CHEN J N, ZHANG J C, et al. Comparison of explosion puffing drying with other methods on the physicochemical properties and volatiles of yam (*Dioscorea opposita* thunb.) chips through multivariate analysis[J]. Drying Technology, 2022, 40(7): 1405–1420.
- [29] 李慧勤, 彭见林, 赵国华. 不同干燥方式的豆渣香气成分的顶空固相微萃取-气相色谱-质谱分析[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 167–172.
- LI H Q, PENG J L, ZHAO G H. Effect of different drying methods on aromatic composition of okara as determined by headspace SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2012, 33(22): 167–172.

Effects of Drying Methods on the Volatile Components of *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun Slices

Pang Lingyun¹, Zhan Lijuan¹, Li Jiayin¹, Pan Siyi², Li Yu^{1*}

¹College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002

²College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070

Abstract Headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and electronic nose were used to determine the volatile components of yam slices processed by hot-air drying (HAD), microwave drying (MD), vacuum drying (VD), vacuum freeze-drying (VFD) and combined drying. The effects of drying processing on the flavor of yam slices were studied by principal component analysis. The results showed that a

total of 95 kinds of volatile substances were detected in these five dried products. And hydrocarbons, aldehydes, ketones, alcohols, esters, benzene and heterocyclic compounds were the main components. Nonanal, decanal, 2,6,10-trimethyl-tetradecane and geranyl acetone were the main volatile substances in yam slices. The main volatile substances in yam slices processed by HAD, VD and MD were hydrocarbons, benzene and aldehydes, while the main volatile substances of VFD or VFD-HAD dried yam slices were hydrocarbons, aldehydes and ketones. The electronic nose detection showed that the aroma of yam slices was affected by drying methods. The aroma of yam slices processed by HAD and VD were similar in alcohol and some aromatic compounds. The aroma differences of yam slices between VFD and other drying methods were mainly nitrogen oxides and sulfur compounds. These were consistent with GC-MS analysis. On the basis of principal component analysis, the evaluation model of aroma quality was established. Considering the comprehensive score and aroma quality of yam slices, combined drying were the best drying method, followed by VFD, MD, HAD and VD.

Keywords *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun; drying method; volatile component; HS-SPME-GC-MS; electronic nose