

干燥方式对香芋片挥发性物质的影响

Effects of different drying methods on volatile substances of taro slices

杨 玉¹ 梁 端¹ 宋 佩¹ 王雪清¹

YANG Yu¹ LIANG Duan¹ SONG Pei¹ WANG Xue-qing¹

董 钟¹ 孙 雪¹ 刘云宏^{1,2,3}

DONG Zhong¹ SUN Xue¹ LIU Yun-hong^{1,2,3}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471000; 2. 食品绿色加工与质量安全控制河南省国际联合实验室, 河南 洛阳 471000; 3. 食品微生物河南省工程技术研究中心, 河南 洛阳 471000)

(1. School of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China; 2. Food Green Processing and Quality and Safety Control of Henan Province International Joint Laboratory, Luoyang, Henan 471000, China; 3. Food Microbiology Engineering and Technology Research Center of Henan Province, Luoyang, Henan 471000, China)

摘要:目的:提高香芋片干燥技术及提取效率。方法:采用水蒸气蒸馏法及气相色谱—质谱联用技术,对比热风干燥(HAD)、直触超声强化热风干燥(CU-HAD)、远红外辐射干燥(FIRD)、直触超声强化远红外辐射干燥(CU-FIRD)和冷冻干燥(FD)香芋片的挥发性成分组成及特征差异,并进行主成分分析。结果:干燥前及不同干燥方式加工后的香芋片共检测出 149 种挥发性成分,其中烷烃类 54 种、酯类 20 种、苯环类 16 种、醇类 12 种、酮类 11 种、烯烃类 11 种、醛类 8 种、酸类 4 种、其他类化合物 13 种。不同干燥方式处理的香芋片挥发性成分以苯环类、酯类为主。以 HAD 处理的香芋片挥发性成分最少,仅有 42 种,FIRD 次之,以 CU-HAD 处理的香芋片虽然挥发性成分较多,但多数为烃类化合物,对香芋风味贡献值较小,以 CU-FIRD 和 FD 处理的香芋片的整体成分较接近,但 CU-FIRD 耗时最短,结合主成分分析得出 CU-FIRD 对香芋片挥发性成分的保留与加工效果最好。结论:将直触超声技术和远红外辐射加热联合应用对香芋风味的保护作用要好于单一超声和单一远红外辐射的效果。

关键词:香芋片;干燥;挥发性物质;气相色谱—质谱法;

主成分分析

Abstract: Objective: This study aimed to explore the effects of different drying methods on the volatile components of taro slices.

Methods: Volatile compound composition and volatile characteristics of five different drying methods of dried taro slices were studied. Taro and the ones dried by five drying methods, i.e. hot-air drying (HAD), contact-ultrasound enhanced hot-air drying (CU-HAD), far-infrared radiation drying (FIRD), contact-ultrasound enhanced far-infrared radiation drying (CU-FIRD) and freeze drying (FD), were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) with water-vapor distillation method. Volatile components were analyzed in conjunction with principal component analysis (PCA). **Results:** A total of 149 volatile compounds were detected in the fresh, pretreated, and dried taro slices, including 54 kinds of alkanes, 20 kinds of esters, 18 kinds of heterocyclic groups, 12 kinds of alcohols, 11 kinds of ketones, 11 kinds of olefins, 8 kinds of aldehydes, 4 kinds of acids and 13 kinds of other compounds. Using the area normalization method, it could be concluded that the volatile components of dried taro slices with different drying methods were mainly heterocyclic compounds and esters. Taro slices treated with HAD had the least volatile components which were only 42 species, followed by the FIRD-treatments, with 46 kinds of volatile components. Although CU-HAD treated taro had more volatile components, most of them were hydrocarbons, which contributed less to the flavor of taro. Cu-FIRD and FD treated taro had similar overall components, but CU-FIRD took the shortest time. Combined with results of PCA, CU-FIRD showed the best retention and processing effect of volatile components in taro. **Conclusion:** The

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:212102110080);河南省自然科学基金项目(编号:202300410131);河南省高校科技创新人才项目(编号:19HASTIT013)

作者简介:杨玉,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:刘云宏(1975—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: beckybin@haust.edu.cn

收稿日期:2022-03-24 **改回日期:**2022-08-03

combination of direct contact ultrasound and far-infrared radiation heating had better protective effect on the flavor of taro than that of single ultrasound and single far-infrared radiation.

Keywords: staro slices; drying; volatile substances; gas chromatography-mass spectrometry; principal component analysis

香芋(*Colocasia esculenta L. Schott*)为天南星科植物芋的块茎,因内部具有槟榔花纹又称为“槟榔芋”,主要分布在非洲、亚洲等地^[1]。香芋中含有丰富的淀粉、蛋白质、维生素和矿物质等,营养价值高^[2-3]。

苏可珍等^[4]研究发现,不同处理时间荔浦芋的特征风味来自氮氧化物、甲基类、硫化物、醛类及醇类。程元珍^[5]研究发现,新鲜芋泥和冷藏芋泥的主要风味物质为醛类,随着冷藏时间的延长,醛类、苯环化合物等相对含量不断增加。成文^[6]分析模拟了香芋的生长模型,研究了香芋中的挥发性物质。甘泳红等^[7]对海芋的挥发性成分进行研究,确认了 28 种化学成分。但有关干燥加工方法对香芋片风味成分的影响尚未见报道。

目前,针对常规干燥方式加工时间长、产品品质低等缺陷,常采用一些现代技术对干燥过程进行强化,从而达到提高干燥效率及保护产品品质等目的^[8]。直触超声技术和远红外辐射技术均为强化干燥过程的有效方式,已被证实能够加快干燥进程和提高营养保留^[9-10]。超声强化干燥主要体现为利用超声的空化效应、机械效应和湍动效应,可在不进一步加热的条件下实现对物料内部传质的有效促进^[11]。远红外辐射干燥主要是利用其良好的加热效果和能量穿透性,实现对物料传热的有效提升^[12]。但上述两种强化干燥技术对物料挥发性成分能够产生何种影响尚未可知。此外,若将直触超声技术与远红外辐射加热联合应用于干燥过程,其对物料风味的保护效果是否优于单一超声和单一远红外辐射,需进行研究与探讨。

研究拟基于主成分分析法,以新鲜香芋为原料,采用热风干燥(HAD)、直触超声强化热风干燥(CU-HAD)、远红外辐射干燥(FIRD)、直触超声强化远红外辐射干燥(CU-FIRD)和冷冻干燥(FD)5 种不同干燥方式对香芋片进行干燥,其中 HAD 和 FD 作为对照,利用气相色谱—质谱法(GC-MS)对不同干燥方式所得干制香芋片的挥发性成分进行比较分析,探明单一超声强化、单一远红外辐射和超声联合远红外辐射对香芋片风味物质的影响规律,以期对香芋片干燥加工技术研发与应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

优质荔浦香芋:选择整体完整,无霉变虫蛀的新鲜香芋,市售;

柠檬酸、正己烷:分析纯,天津市德恩化学试剂有限

公司;

无水硫酸钠:分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司。

1.2 仪器与设备

气相色谱—三重四级杆串联质谱联仪:TSQ9000 型,美国赛默飞世尔公司;

热风干燥机:101-3ES 型,北京市永光明医疗仪器厂;

远红外辐射干燥设备、直触超声强化装置、超声强化远红外辐射干燥装置:河南科技大学自制;

超低温冰箱:DW-86L486 型,中国海尔集团公司;

真空冷冻干燥机:LGJ-10D 型,北京四环起航科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品预处理 将香芋切成 3 mm 薄片,使用 0.2% 柠檬酸护色 8 min,沸水漂烫 90 s,用吸水纸吸干香芋片表面水分,使用 5 种不同干燥方式将香芋片干燥至干基含水率低于 10% 备用^[13]。

(1) HAD 干燥:热风温度 45 ℃,风速 1.5 m/s。

(2) CU-HAD 干燥:超声功率 36 W,热风温度 45 ℃,风速 1.5 m/s。

(3) FIRD 干燥:远红外辐射板温度 180 ℃,干燥过程中,物料温度由常温逐渐升至 45 ℃。

(4) CU-FIRD 干燥:超声功率 36 W,远红外辐射板温度 180 ℃。

(5) FD 干燥:将预处理后的香芋片于 -20 ℃ 下预冻 24 h,真空冷冻干燥 24 h,其中冷阱温度为 -50 ℃,干燥室内压力为 10 Pa。

1.3.2 气相色谱—质谱分析 准确称取干重 5.00 g 香芋片,剪碎,加入 500 mL 蒸馏水和沸石,加热使其沸腾。蒸馏出的物质用正己烷进行萃取,加入适量无水硫酸钠脱水,过 0.22 μm 滤膜,采取进样瓶自动进样方式。

1.3.3 色谱条件 色谱柱为 DB-5MS 石英毛细柱(30 m×0.25 mm,0.25 μm);升温程序参照文献^[14]。

1.3.4 质谱条件 电子轰击(EI)离子源;电子能量 70 eV;传输线温度 250 ℃;离子源温度 230 ℃;质量扫描范围 m/z 45~500。

1.4 数据处理

所得 GC-MS 检测结果通过计算机标准物质质谱数据库(replib、mainlib)检索处理,选取正反匹配度均 > 500 的成分作为定性结果,并根据挥发性气体成分的峰面积采用面积归一化法得到各个挥发性气体成分的相对含量。使用 SPSS 20.0 进行主成分分析,使用 Origin 2021 软件进行作图及数据分析,通过方差分析进行不同干燥方式所得产品的显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 挥发性成分分析

干燥处理前的香芋片以及 5 种不同干燥方式所得香芋片的总离子流色谱图如图 1 所示,挥发性成分及相对含量见表 1。

由表 1 可知,香芋及其干制品共检出 149 种挥发性成分,预处理后的香芋检出 63 种挥发性成分。香芋富含蛋白质、糖类物质,在干燥过程中会发生一系列反应,如美拉德反应、脂肪酸氧化等^[15]。随着干燥的进行,香芋的挥发性成分会有一些的损失,同时也有新的挥发性成分生成。

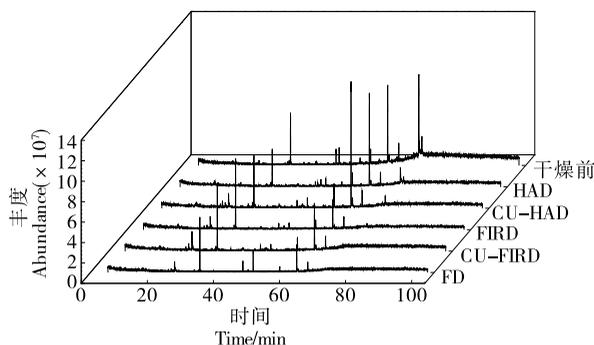


图 1 不同干燥方式所得香芋片的挥发性成分总离子流图
Figure 1 Total ion flow of volatile components of taro slices by different drying methods

表 1 香芋及其干制品的挥发性成分及其相对含量[†]

Table 1 Relative content and the dried products of the volatile composition in taro

类别	化合物名称	干燥前后挥发性成分相对含量/%					
		干燥前	HAD	CU-HAD	FIRD	CU-FIRD	FD
	2-甲基-1-壬烯	0.11	—	—	—	—	—
	5-(1-甲基亚乙基)-1,3-环戊二烯	0.12	0.29	—	0.66	0.91	—
	3,4,5,6-四甲基-2,5-辛二烯	0.18	0.22	0.23	0.64	0.31	0.31
	2,2-二甲基-(Z,Z)-3,5-癸二烯	0.39	—	0.75	—	1.62	—
	9-壬烯	3.08	1.02	—	—	—	—
烯烃类	1,2,4-三甲基-4-(1-甲基乙烯基)-环己烯	—	0.80	0.84	1.37	0.85	0.86
	3-己基-环己烯	—	0.32	—	—	—	—
	1,7,7-三甲基-2-乙烯基双环[2.2.1]庚-2-烯	—	0.28	—	—	—	—
	六氢-, (1 α , 1 β , 4 β , 4 $\alpha\alpha$, 5 $\alpha\alpha$)-2H-1b, 4-乙基开塔勒诺 [1,2-b]蒎烯	—	—	—	0.47	—	—
	5,5,8a-三甲基-3,5,6,7,8,8a-六氢-2H-铬烯	—	—	—	—	0.32	—
2,3,4,5-四甲基-三环[3.2.1.0 ^{2,7}]oct-3-烯	—	—	—	—	0.23	—	
	(Z)-2-庚醛	—	—	0.29	—	—	—
	(E,Z)-2,4-癸二烯醛	—	—	1.79	2.37	3.93	1.75
	2,6,6-三甲基环己-1,4-二烯卡巴醛	—	—	0.30	—	0.40	0.33
醛类	(E,E)-2,4-癸二烯醛	—	—	4.78	8.89	11.52	9.75
	(Z)-7-十六烯醛	—	—	1.07	—	—	—
	(E)-2-庚醛	—	—	—	0.33	0.36	0.33
	庚醛	—	—	—	—	0.20	—
	(E,E)-2,4-七烯醛	—	—	—	—	0.24	—
	7-乙基-9-(3-乙基-3-甲基环氧乙烷基)-3-甲基-甲酯, 2R-[2 α (2E,6E), 3 α]-2,6-壬二酸,	1.18	—	—	—	—	—
	顺-13-二十碳烯酸	1.64	—	—	—	—	—
	正二十醋酸	—	—	2.74	1.31	1.78	—
酸类	2-甲基-2-(乙酰氧基)-1,1a,2,3,4,6,7,10,11,11a-十氢-7,10-二羟基-1,1,1,3,6,9-五甲基-4a,7a-环氧-5H-环戊烷[a]环丙烷[f]环十一烯基酯[1aR-[1aR*, 2R*, 3S*, 4aR*, 6S*, 7S*, 7aS*, 8E, 10R*, 11R*(E), 11aS*]-2-丁烯酸,	—	—	—	—	0.60	—

续表 1

类别	化合物名称	干燥前后挥发性成分相对含量/%					
		干燥前	HAD	CU-HAD	FIRD	CU-FIRD	FD
醇类	叔十六硫醇	1.02	—	0.39	—	0.49	—
	12-甲基- <i>E,E</i> -2,13-十八碳二烯-1-醇	0.14	—	—	—	—	—
	1-七烷三醇	1.19	—	—	—	—	—
	<i>E,E,Z</i> -1,3,12-十九碳三烯-5,14-二醇	0.46	—	—	—	—	—
	2,6,10,15,19,23-六甲基-, (all- <i>E</i>)-(±)-1,6,10,14,18,22-四聚六烯-3-醇,	5.18	—	3.00	—	—	—
	乙酸 1-多烯三十烷醇	—	1.96	—	—	—	—
	2,2,4-三甲基-3-(3,8,12,16-四甲基七烯基-3,7,11,15-四烯基)-环己醇	—	2.82	—	1.96	—	—
	2,6-二甲基-1-壬烯-3-炔-5-醇	—	—	0.18	—	—	—
	2,3,4,4a,5,6,7,8-八氢-1,1,4a,7-四甲基-, 顺式-1 <i>H</i> -苯并环庚烷-7-醇	—	—	—	—	—	0.69
	乙酸 1-二十二碳醇	—	—	—	—	—	3.04
	2-(十八烷氧基)-乙醇	—	—	—	—	—	0.75
	2,4,5,6,7,7a-六氢-4,4,7a-三甲基-, 顺式-2-苯并呋喃甲醇	—	—	0.29	—	—	—
	正壬烷	0.10	—	—	—	0.20	—
	2,6,10-三甲基-十二烷	0.17	0.24	0.57	0.95	0.62	0.33
	1-(1-甲基乙基)-2-(2-甲基-1-亚甲基丙基)-环丙烷	0.18	—	—	—	—	—
	十二烷	0.31	0.45	0.45	—	—	—
	4-甲基十二烷	0.13	—	—	—	—	—
	2-甲基十二烷	0.13	—	—	—	—	—
	4,6-二甲基十二烷	0.19	—	1.68	—	1.02	—
2,7,10-三甲基十二烷	0.71	—	—	—	—	—	
二十五烷	0.14	—	—	0.69	—	—	
5,14-二丁基十八烷	0.11	—	0.20	—	—	—	
2,3-二甲基十二烷	0.12	—	—	—	—	—	
十四烷	0.28	0.39	0.33	0.49	0.45	—	
正二十一烷	0.10	4.47	1.94	3.30	2.90	—	
烷烃类	2,6,10-三甲基十三烷	0.57	0.69	0.37	—	—	—
	正十九烷	4.13	1.34	0.49	1.12	0.44	0.18
	7-己基-二十烷	0.17	—	—	—	0.52	—
	正十五烷	0.47	0.92	0.57	0.98	—	—
	2-甲基十六烷	0.19	—	—	—	—	—
	正十七烷	0.87	0.50	0.87	0.70	1.15	0.44
	5,8-二乙基-十二烷	0.30	—	—	—	—	0.71
	正二十四烷	0.31	0.67	1.87	0.45	0.55	1.67
	正二十七烷	3.23	3.13	2.19	2.48	—	0.49
	1(22),7(16)-二环氧-三环[20.8.0.0(7,16)]三十烷	1.36	—	—	—	1.07	1.27
	17-戊三康定	0.36	—	0.52	0.39	—	—
	癸烷	—	0.19	—	0.24	—	—
	2,3,4-三甲基-癸烷	—	—	—	—	0.44	—
	正十八烷	—	—	0.36	—	—	—

续表 1

类别	化合物名称	干燥前后挥发性成分相对含量/%					
		干燥前	HAD	CU-HAD	FIRD	CU-FIRD	FD
	5-丁基-5-乙基十五烷	—	0.34	—	—	—	—
	9-己基-庚烷	—	—	—	—	—	1.26
	十三烷	—	0.45	—	—	—	—
	2-甲基四烷	—	0.37	—	—	—	—
	2,6,10,14-四甲基-十五烷	—	0.32	—	—	—	—
	十一烷	—	—	0.19	—	—	—
	2,3,6,7-四甲基-辛烷	—	—	0.25	—	—	—
	4,8-二甲基-十一烷,4,8-二甲基-	—	—	0.27	—	—	—
	4-乙基-十一烷	—	—	0.56	—	—	—
	10-甲基-二十烷	—	—	0.19	—	—	—
	4-甲基-十四烷	—	—	0.15	—	—	—
	2-甲基-十七烷	—	—	0.40	—	—	—
	2,6,10,15-四甲基-七烷	—	—	0.67	—	—	1.16
烷烃类	四十四烷	—	—	0.54	—	0.46	—
	螺环[5.6]十二烷	—	—	—	0.35	—	0.34
	2,6,10-三甲基-十四烷	—	—	—	0.48	0.24	—
	正二十六烷	—	—	—	0.51	—	—
	3-乙基-5-(2-乙基丁基)-十八烷	—	—	—	0.47	—	0.15
	2,6,11,15-四甲基-十六烷	—	—	—	—	0.93	0.78
	5,5,7,7-四乙基十一烷	—	—	—	—	0.56	—
	正二十烷	—	—	—	—	0.65	0.36
	2,5,9-三甲基-癸烷	—	—	—	—	—	0.24
	5-乙基癸烷	—	—	—	—	—	0.56
	1,1-氧双-癸烷	—	—	—	—	—	0.55
	正十六烷	—	—	—	—	—	0.53
	3-甲基-5-丙基-壬烷	0.23	—	—	—	—	—
	(2-乙基-1-甲基丁内酯)-环己烷	—	—	—	0.69	—	—
	十氢-1,6-二甲基-萘	0.13	—	—	0.27	0.25	—
	丁基羟基甲苯	8.96	9.75	11.27	26.57	22.52	21.59
	2,2-亚甲基双[6-(1,1-二甲基乙基)-4-甲基-苯酚	17.56	32.76	31.62	14.20	19.48	14.23
	对二甲苯	—	0.73	—	—	—	—
	十氢-2,3-二甲基-萘	—	—	1.15	—	0.85	—
	6,7-二甲基-1,2,3,5,8,8a-六氢萘	—	—	—	0.26	—	—
	十氢-2,6-二甲基-萘	—	1.68	—	—	—	—
	十氢-2,2-二甲基-萘	—	0.81	—	—	—	—
苯环类	2,4-二叔丁基苯酚	—	0.42	0.60	—	—	0.72
	邻二甲苯	—	—	0.30	—	—	—
	2,6,6-三甲基环己-1-烯基甲烷磺酰基)苯	—	—	—	0.39	—	0.19
	2,5-双(1,1-二甲基乙基)-苯酚	—	—	—	0.49	0.61	—
	十氢-1,2-二甲基-萘	—	—	—	—	0.39	—
	2-壬酮 2,4-二硝基苯肼	—	—	—	—	—	0.27
	3,5,8,8a-四氢-6-甲基-1H-2-苯并吡喃	0.13	—	—	—	—	—
	2-戊基呋喃	—	—	—	0.61	—	—

续表 1

类别	化合物名称	干燥前后挥发性成分相对含量/%					
		干燥前	HAD	CU-HAD	FIRD	CU-FIRD	FD
	环戊酮,3-甲基-2-(2-戊烯基)	0.11	—	—	—	—	—
	二氢茉莉酮	0.55	—	—	—	—	1.39
	2,6-二叔丁基-4-羟基-4-甲基环己-2,5-二烯-1-酮	0.33	0.77	0.91	0.79	0.69	0.85
	7,9-二叔丁基-1-奥克斯匹罗(4,5)癸-6,9-二烯-2,8-二酮	0.37	0.44	0.58	0.87	0.74	0.71
	2-异丙基-5,5-二甲基环己-2-烯酮	0.12	—	—	1.56	—	0.41
	2,3-辛二酮	—	—	0.13	0.25	0.26	—
酮类	6Z-2,5,5,10-四甲基十一烯-2,6,9-三烯-8-酮	—	—	0.12	—	—	0.26
	2,5-二甲基-2-(1-甲基乙烯基)-环己酮	—	—	0.26	—	—	—
	1,2,3,3a,4,5,6,6a,7,12-十氢-3-异丙基-6-亚甲基-环戊烷[d]萸-8,11-二酮	—	—	0.23	—	—	—
	1-(5,6,7,8-四氢咪喃-2,8,8-三甲基-4H-环庚[b]咪喃-5-基)-乙酮	—	—	—	—	—	0.85
	四氢-6-辛基-2H-吡喃-2-酮	—	—	0.22	—	—	—
	N-苄基氨基甲酸叔丁酯	0.18	2.46	0.92	—	—	0.33
	亚硫酸戊十三酯	0.14	—	—	—	—	—
	五氟辛酸十八烷酯	0.14	—	—	—	0.52	—
	癸二酸十八酯	0.14	—	—	—	—	—
	邻苯二甲酸正丁酯	0.30	—	—	—	—	—
	1,2-苯二甲酸丁基环己基酯	0.48	—	—	—	—	—
	碳酸二十烷基乙烯酯	0.52	0.21	0.20	—	0.61	—
	Z-(13,14-环氧)十四醇-11-烯-1-醇醋酸酯	0.10	—	—	—	—	—
	乙酸正十八酯	3.28	4.73	6.83	4.22	5.06	—
酯类	邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯	3.98	5.08	5.58	5.94	5.58	6.21
	油酸 3-(十八烷氧基)丙酯	0.94	—	—	—	—	—
	3,6-十八碳二炔酸甲酯	—	—	—	—	—	1.46
	邻苯二甲酸二丁酯	—	3.00	2.20	2.38	2.48	10.19
	1,2-苯二甲酸双(2-甲基丙基)酯	—	1.46	1.58	2.30	1.79	4.54
	十五氟丙酸壬酯	—	—	0.28	—	—	—
	环丙烷羧酸 1-羟基-(2,6-二叔丁基-4-甲基苯基)酯	—	—	—	—	0.92	—
	癸基十一烷基碳酸酯	—	—	—	—	—	0.35
	邻苯二甲酸丁酯	—	—	—	—	—	0.34
	十一碳-10-炔诺酸七烷基酯	—	—	—	—	—	1.26
	达西卡宾-1-甲醇,醋酸盐(酯)	—	—	—	—	—	0.33
	4,4,6-三甲基-1,3,2-二氧磷胆碱-2-氧化物	0.62	0.54	0.46	—	0.48	0.46
	氯代十八烷	0.17	—	—	1.03	—	—
	二叔十二烷基二硫化物	1.05	0.93	0.53	1.40	0.51	0.37
	二乙烯基醚	0.12	—	—	—	—	—
	1,54 二溴-四五烷	2.80	1.30	—	—	—	0.25
	芥酸酰胺	27.23	8.08	—	—	—	—
其他化合物	1-氯-十六烷	—	—	0.32	—	—	—
	2-叔丁氧羰基氨基-N2-苄氧羰基-乙酰胺	—	—	—	0.25	—	—
	1-三氯乙烯	—	—	—	0.77	—	—
	1-碘多利安康烷	—	—	—	0.53	—	—
	邻正丁基羟胺	—	2.67	1.43	2.63	0.30	3.24
	1,3-二甲基二氮丙啶	—	—	—	—	—	0.21
	1H-1,2,3,4-四唑-5-基甲胺	—	—	—	—	—	0.16

† — 表示未检出。

由图2可知,干燥后的样品中均检测出较多的苯环类及酯类化合物。随着样品中水分的减少,烃类化合物发生变化,空间结构改变,生成多种烷烃类物质^[16],与张思颖等^[17]的研究结果相似,但其对香芋风味贡献较小^[18]。酸类物质主要来自脂肪氧化及醛的还原,其香气阈值较高^[19]。

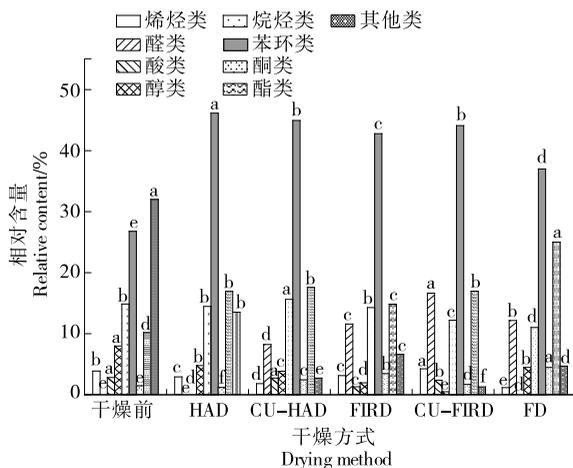


图2 香芋及其干制品不同类别挥发性成分的相对含量
Figure 2 Relative content from volatile components of different categories of taro and the dried products

苯环类包括苯环类、呋喃类、吡喃类化合物,苯及其同系物是常见的食品挥发性物质^[20],呋喃类、吡喃类主要来源于美拉德反应和焦糖化反应^[21]。CU-HAD、FIRD、CU-FIRD 3种干燥方式的苯环类物质相对含量无显著性差异,但HAD和FD的干燥结果差异显著,与龙杰等^[22]的结果相似。随着干燥的进行,香芋内物质长时间受热生成苯环类物质,以丁基羟基甲苯和2,2'-亚甲基双[6-(1,1-二甲基乙基)-4-甲基-苯酚]为主。HAD香芋片的干燥时间最长,物料受热时间最长,其苯环类化合物相对含量最高(为46.15%)。FD香芋片中苯环类化合物相对含量最少(为37%),可能是FD较低的干燥温度和干燥压力不利于苯环类物质生成,与Keskin等^[23]的结果类似。CU-FIRD的苯环类化合物含量与单一使用CU和FIRD差别不大,说明将超声强化和远红外辐射加热联合应用,两者的作用会部分抵消,未对苯环类化合物产生协同增强作用。

沸点较低的酯类化合物在干燥过程中容易挥发损失^[24]。方差分析表明不同干燥方式所得酯类化合物差异显著($P < 0.05$)。FD温度最低,酯类化合物挥发损失最少,相对含量最多(为25.01%),张艳荣等^[18]也发现FD能很好保护酯类成分。FIRD由于施加了远红外辐射进行加热,导致干燥温度较高,酯类化合物挥发损失最多,相对含量最少(为14.84%)。超声主要是利用空化效应

和机械效应对物料内部水分传递进行强化,其热效应并不明显,因此CU-HAD与HAD过程的干燥温度基本相同,但CU-HAD在干燥过程中可以通过增强香芋片内部传质以减少干燥时间,主要体现在乙酸正十八酯和邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯相对含量要高于HAD,导致CU-HAD所得酯类化合物相对含量(为17.59%)高于HAD的(为16.94%)。与HAD相比,CU-FIRD的乙酸正十八酯、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯等主要酯类成分总量比较接近。干燥过程中,CU-FIRD将强化内部水分传递的超声与改善物料受热状态的远红外辐射联合应用,能够同步强化香芋片的传热传质进程,虽然干燥温度较高不利于酯类化合物的保留,但其干燥时间最短又有利于减少酯类化合物的损失,该负面作用和正面作用相互抵消,导致其所得酯类化合物相对含量(为16.96%)与HAD差别不大。

醛类化合物多由脂肪酸氧化裂解发生美拉德反应而产生^[25]。方差分析表明不同干燥方式所得醛类化合物差异显著($P < 0.05$)。干燥过程中,CU-FIRD能在超声强化和远红外辐射加热的联合作用下实现最好的质热传递和最高的干燥效率,可以更好地促使原料中的脂肪酸氧化裂解,同时,超声波的高频振动和远红外辐射的电磁波能量均能促进物料内部脂肪酸氧化分解,因此CU-FIRD所得香芋片的醛类风味物质相对含量最高(为16.65%)。其次是FD所得香芋片,其醛类风味物质相对含量为12.16%。HAD中未检出醛类化合物,但经施加超声的CU-HAD干燥后,检出醛类化合物相对含量为8.23%,可能是超声的机械效应和空化效应能够促使部分脂肪酸氧化裂解产生更多的醛类化合物。FIRD所得香芋片的醛类化合物相对含量为11.59%,可能是远红外辐射加热的辐射效应和热效应能够促进脂肪酸的氧化裂解。

醇类化合物是食品中常见的风味成分。方差分析表明不同干燥方式所得醇类化合物差异显著($P < 0.05$)。干燥加工后,香芋片中醇类物质相对含量有所降低,可能是由于醇类化合物受热易分解所致^[26],这些醇类物质在干燥过程中易氧化生成醛、酮类物质^[27],与Liu等^[28]的结果一致。FD可以得到最高的醇类物质相对含量,由于FD的干燥温度较低,且在真空条件下进行,大多数醇类化合物难以氧化,因此醇类化合物分解较少,保留率较高。HAD也具有较高的醇类物质相对含量,但施加超声后的CU-HAD所得醇类物质相对含量(为3.86%)有所降低,超声在干燥过程中不会导致物料温度显著升高^[29],但其空化效应和湍动效应能够增加物料内部水分振动、流动和波动,从而在促进水分扩散的同时也加快了易挥发性醇类物质的损失。FIRD所得醇类物质相对含量(为1.96%)更低,是由于远红外辐射加热改善了物料的受热状态,有利于水分的蒸发和干燥的进行,但同时也会加快醇类化合物的受热分解或汽化损失。CU-FIRD所得醇类物质相对含量为0.49%,是由

于在超声和远红外辐射的双重强化干燥作用下, CU-FIRD 虽对促进脱水进程有积极作用, 但其对醇类化合物的保留产生了负面作用。

2.2 主成分分析

由表 2 可知, 对不同干燥方式香芋片的挥发性成分进行主成分分析, 提取出 3 个主成分, 各主成分的贡献率分别为 36.352%, 35.822%, 13.251%, 累计贡献率为 85.424%。由表 3 可知, FD 得分较高, 说明 FD 的低温、低氧、低压干燥环境能够较好地保护香芋片内风味成分, 但该干燥环境也难以生成新的风味物质, 导致 FD 得分并不是最高。HAD 香芋片的得分最低, 为 0.33, CU-HAD 得分比 HAD 高 1.95, 说明施加超声生成新的挥发性成分, 进而提高其风味。FIRD 得分比 HAD 高 1.45, 说明远红外辐射对挥发性成分的保留与产生有积极作用。CU-FIRD 香芋片得分为 2.56, 为 5 种干燥方式中最高, 说明 CU-FIRD 同时采用超声强化传质和远红外辐射改善传热, 不但可以加速香芋片的干燥脱水, 还对香芋片的挥发性成分产生了明显的积极影响。

表 2 香芋片主成分分析的提取平方载荷

Table 2 Extracted square loads for principal component analysis of taro slices

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.272	36.352	36.352
2	3.224	35.822	72.174
3	1.193	13.251	85.424

表 3 不同干燥方式香芋片主成分分析得分表

Table 3 Scores of principal component analysis of taro slices by different drying methods

干燥方式	成分 1	成分 2	成分 3	得分
HAD	0.21	-0.70	3.79	0.33
CU-HAD	1.25	-0.03	13.87	2.28
FIRD	1.07	0.54	9.02	1.78
CU-FIRD	2.03	0.30	12.96	2.56
FD	-0.62	2.87	12.31	2.43

3 结论

采用气相色谱—质谱联用技术对不同干燥方式处理的香芋片的挥发性成分进行分析, 共检出 149 种挥发性成分, 其中新鲜香芋 42 种、预处理后的香芋 63 种、热风干燥香芋片 42 种、直触超声强化热风干燥香芋片 59 种、远红外辐射干燥香芋片 46 种、直触超声强化远红外辐射干燥香芋片 50 种、冷冻干燥香芋片 52 种。5 种干燥方式下的挥发性物质存在差异, 均有一定数量的特有挥发性成分。不同方式干燥后的香芋片在烷烃类、烯烃类和苯环类化合物的相对含量均增加。热风干燥香芋片的苯环类

化合物相对含量最高, 但醛类、酸类、酮类物质含量最少, 且挥发性成分种类最少; 直触超声强化热风干燥的烷烃类物质种类多, 含量高, 但对香芋的风味贡献较小。远红外辐射干燥香芋片的醛类、酸类、醇类、苯环类、酮类化合物相对含量均较少; 直触超声强化远红外辐射干燥香芋片的醛类、酸类、苯环类、酯类化合物相对含量均较多; 冷冻干燥香芋片的酯类化合物相对含量最多, 但苯环类化合物相对含量最少。主成分分析结果表明, 将直触超声技术和远红外辐射加热联合应用于干燥强化, 对香芋风味的保护作用要好于单一超声和单一远红外辐射的效果。后续可对不同超声功率及远红外辐射功率下的香芋片特征挥发性成分产生机制及功能评价进行深入研究。

参考文献

[1] 向华, 吴曼, 胡志山, 等. 世界芋头生产布局与贸易格局分析[J]. 世界农业, 2018(10): 144-150.
XIANG H, WU M, HU Z S, et al. Analysis of world taro production layout and trade pattern[J]. World Agriculture, 2018(10): 144-150.

[2] 韩笑, 张东旭, 王磊, 等. 芋头的营养成分及加工利用研究进展[J]. 中国果菜, 2018, 38(3): 9-13.
HAN X, ZHANG D X, WANG L, et al. Research progress on nutrient composition and process utilization of taro[J]. China Fruit and Vegetable, 2018, 38(3): 9-13.

[3] 郭巨先, 尹艳, 唐康, 等. 芋种质资源研究进展与展望[J]. 广东农业科学, 2021, 48(9): 81-90.
GUO J X, YIN Y, TANG K, et al. Research progress and prospect of taro germplasm resources [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2021, 48(9): 81-90.

[4] 苏可珍, 黎小椿, 聂辉, 等. 不同蒸制条件下荔浦芋的风味评价[J]. 食品工业, 2020, 41(10): 185-189.
SU K Z, LI X C, NIE H, et al. Flavor evaluation of Lipu taro under different steaming conditions [J]. Food Industry, 2020, 41(10): 185-189.

[5] 程元珍. 红芽芋品质分析及其芋泥的加工研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012: 38-51.
CHENG Y Z. Quality analysis of red bud taro and its processing of taro puree[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012: 38-51.

[6] 成文. 槟榔芋生长模拟与挥发性物质分析研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014: 12-35.
CHENG W. Growth simulation and volatile substance analysis of taro[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014: 12-35.

[7] 甘泳红, 刘光华. 海芋挥发性化学成分研究[J]. 广东农业科学, 2012, 39(24): 38-39.
GAN Y H, LIU G H. Study on volatile chemical composition of seaweed[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(24): 38-39.

[8] 张译文, 张燕梁, 万霖, 等. 3 种干燥方法对荞麦干燥特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 197-200.
ZHANG Y W, ZHANG Y L, WAN L, et al. Effects of three drying methods on drying characteristics and quality of buckwheat[J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 197-200.

- [9] YANG T, ZHANG J L, JIANG S R, et al. Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 235: 79-88.
- [10] LEE D, LEE J H, CHO B H, et al. Far infrared drying characteristics of the microwave-steamed sweet potato[J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2019, 44(2): 187-193.
- [11] LIU Y H, ZENG Y, WANG Q Q, et al. Drying characteristics, microstructure, glass transition temperature, and quality of ultrasound-strengthened hot air drying on pear slices[J]. *Food Process Pres*, 2019, 43(3): e13899.
- [12] ZHAO Y Y, BI J F, YI J Y, et al. Comparison of dynamic water distribution and microstructure formation of shiitake mushrooms during hot air and far infrared radiation drying by low-field nuclear magnetic resonance and scanning electron microscopy[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 99(6): 2 826-2 834.
- [13] 杨玉, 肖婷, 刘云宏, 等. 不同干燥方法对香芋片品质特性的影响[J/OL]. *食品与发酵工业*. (2021-12-12) [2022-02-16]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028982>.
YANG Y, XIAO T, LIU Y H, et al. Effects of different drying methods on quality characteristics of taro slices[J/OL]. *Food and Fermentation Industry*. (2021-12-12) [2022-02-16]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028982>.
- [14] WONG K C, CHONG F N, CHEE S G. Volatile constituents of Taro (*Colocasia esculenta* L. Schott)[J]. *Journal of Essential Oil Research*, 1998, 10(1): 93-95.
- [15] 詹歌, 孙艳辉, 严佳慧, 等. 干燥方式对滁菊抗氧化、抑菌活性和挥发性风味物质的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(11): 193-199.
ZGAN G, SUN Y H, YAN J H, et al. Effects of drying method on antioxidant, bacteriostatic activity and volatile flavor substances of Chrysanthemum[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(11): 193-199.
- [16] MISHARINA T A, MUHUTDINOVA S M, ZHARIKOVA G G, et al. Formation of flavor of dry champignons (*Agaricus bisporus* L.)[J]. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2010, 46(1): 108-113.
- [17] 张思颖, 罗凤莲, 邓森, 等. 干燥及冷冻处理对襄荷花苞挥发性成分的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(2): 159-166.
ZGANG S J, LUO F L, DENG M, et al. Effects of drying and freezing treatment on volatile components of Xiang lotus bud[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(2): 159-166.
- [18] 张艳荣, 吕呈蔚, 刘通, 等. 不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分分析[J]. *食品科学*, 2016, 37(10): 116-121.
ZHANG Y R, LU C W, LIU T, et al. Analysis of volatile flavor components of agaricus mushroom by different drying methods[J]. *Food Science*, 2016, 37(10): 116-121.
- [19] URAIWAN T, THOMAS C Y. Analysis of volatile flavor components in steamed Rangia Clam by dynamic headspace sampling and simultaneous distillation and extraction[J]. *Journal of Food Science*, 1991, 56(2): 327-331.
- [20] 顾艳阳, 牛丽影, 李大娟, 等. 制汁和灭菌方法对藕汁挥发性成分及香气的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(7): 117-125.
GU Y Y, NIU L Y, LI D J, et al. Effects of juice making and sterilization methods on volatile composition and aroma of lotus juice[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(7): 117-125.
- [21] 赵颖颖, 李三影, 闫路辉, 等. 不同复热方式对糖醋排骨品质的影响[J]. *中国调味品*, 2021, 46(7): 52-59.
ZHAO Y Y, LI S Y, YAN L H, et al. Effects of different reheating methods on the quality of sweet and sour pork ribs[J]. *Chinese Condiments*, 2021, 46(7): 52-59.
- [22] 龙杰, 吴昕焯, 毕金峰, 等. HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻探究渗透脱水联合干燥方式对桃脆片挥发性风味物质的影响[J/OL]. *食品工业科技*. (2022-03-30) [2022-04-19]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110341>.
LONG J, WU X Y, BI J F, et al. Effects of HS-SPME-GC-MS combined with electronic nose on volatile flavor substances of peach chips[J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*. (2022-03-30) [2022-04-19]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110341>.
- [23] KESKIN M, GUCLU G, SEKERLI Y E, et al. Comparative assessment of volatile and phenolic profiles of fresh black carrot (*Daucus carota* L.) and powders prepared by three drying methods[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 287: 110256.
- [24] 耿想, 姚曦, 陈晨, 等. 不同干燥方式对冬笋挥发性成分的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(4): 152-157.
GENG X, YAO X, CHEN C, et al. Effects of different drying methods on volatile components of winter shoots[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(4): 152-157.
- [25] 陈瑞娟, 毕金峰, 周禹含, 等. 干燥方式对胡萝卜超微粉中挥发性风味物质的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(1): 250-256.
CHEN R J, BI J F, ZHOU Y H, et al. Effects of drying method on volatile flavor substances in carrot ultrafine powder[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2015, 15(1): 250-256.
- [26] FEI P, YING S, GAO X Y, et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying[J]. *Food Chemistry*, 2014, 165: 547-554.
- [27] 刘盼盼, 任广跃, 段续, 等. 基于变异系数法对不同干燥方式白萝卜品质及风味的评价[J/OL]. *食品与发酵工业*. (2021-10-19) [2021-12-16]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029017>.
LIU P P, REN G Y, DUAN X, et al. Evaluation of quality and flavor of white radish based on coefficient of variation method[J/OL]. *Food and Fermentation Industry*. (2021-10-19) [2021-12-16]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029017>.
- [28] LIU Y J, QIAN Y Y, SHU B, et al. Effects of four drying methods on *Ganoderma lucidum* volatile organic compounds analyzed via headspace solid-phase microextraction and comprehensive two-dimensional chromatography-time-of-flight mass spectrometry [J]. *Microchemical Journal*, 2021, 166: 106258.
- [29] 罗登林, 苏孟开, 杨日福, 等. 超声在食品干燥领域中的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(5): 188-196.
LUO D L, SU M K, YANG R F, et al. Research progress of ultrasound in the field of food drying[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Society*, 2020, 35(5): 188-196.