

11种煎炸油煎炸薯条挥发性成分的组成

姚凌,徐立荣,蔡志鹏,季鑫,常佳睿,吴港城,王兴国

(江南大学食品学院,江苏无锡214122)

摘要:利用顶空固相微萃取与气质联用相结合的方法测定了11种煎炸油煎炸薯条的挥发性物质组成,并对薯条进行感官评定。结果表明:11种煎炸油煎炸薯条共鉴定出包括醛类、含氧杂环类、含氮杂环类、酮类、醇类、酸类、烃类、含硫化合物和酯类化合物共80种挥发性物质,其中醛类化合物是煎炸薯条中主要的挥发性物质。棕榈油煎炸薯条鉴定出的挥发性物质种类最多,亚麻籽油煎炸薯条的最少,且通过分析11种煎炸油煎炸薯条的醛类物质发现,葵花籽油和棉籽油煎炸薯条中多不饱和醛含量较高,其中(*E,E*)-2,4-癸二烯醛含量最高,是薯条呈现油脂香的主要物质;高油酸菜籽油和高油酸葵花籽油煎炸薯条中单不饱和醛含量较高,其中高油酸葵花籽油煎炸薯条中2-十一烯醛含量最高;亚麻籽油煎炸薯条中(*E,E*)-2,4-庚二烯醛含量最高,呈现出消费者不期望的脂肪味和油腻味。感官评定结果显示,棕榈油煎炸薯条品质最好,猪油煎炸薯条品质最差。

关键词:煎炸油;薯条;挥发性成分;感官评定

中图分类号:TS201.2;O657.63 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)02-0039-09

Volatile compound composition of French fries prepared in 11 kinds of frying oils

YAO Ling, XU Lirong, CAI Zhipeng, JI Xin, CHANG Jiarui, WU Gangcheng, WANG Xingguo

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: The volatile components of French fries prepared in 11 kinds of different frying oils were analyzed by headspace solid phase microextraction combined with GC-MS, and the sensory of French fries was evaluated. The results showed that a total of 80 compounds including aldehydes, oxygenated heterocycles, nitrogenated heterocycles, ketones, alcohols, acids, hydrocarbons, sulphur compounds and esters were identified in 11 types of French fries, with palm oil fries containing the greatest number of volatile substances and linseed oil fries the least, and aldehydes being the predominant volatile substance. Analysis of the aldehydes in 11 types of French fries revealed that French fries prepared in sunflower seed oil and cottonseed oil contained more polyunsaturated aldehydes, among which the content of (*E,E*)-2,4-decadienal was the highest, which was the main substance that presented the oil fragrance. French fries prepared in high oleic acid rapeseed oil and high oleic acid sunflower seed oil contained more monounsaturated aldehydes, and French fries fried in high oleic acid sunflower seed oil had the highest content of 2-undecenal. French fries prepared in flaxseed oil contained the most (*E,*

E)-2,4-heptadienal, and it had a taste of fat and oil, which was disliked by consumers. Through sensory evaluation, the quality of French fries fried in palm oil was the best, while it was the worst fried in lard.

Key words: frying oil; French fries; volatile compound; sensory evaluation

收稿日期:2021-02-04;修回日期:2021-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(31901728);江苏省博士后科研基金项目(2020Z297)

作者简介:姚凌(2000),女,在读本科,专业为食品科学(E-mail)1325196393@qq.com。

通信作者:吴港城,副教授(E-mail)gangcheng.wu@jiangnan.edu.cn。

煎炸是食品工业和餐饮行业中食品脱水和烹制的重要方法之一,在煎炸和随后的冷却过程中,油脂作为热交换介质,吸附在食物表面,进而渗入食物内部,使食物获得良好的风味及质地。在煎炸过程中,煎炸油除了充当热媒外,其对煎炸食品风味的形成及产品品质还起着重要作用^[1]。煎炸油的脂肪酸组成对煎炸食品的风味产生重要的影响。煎炸油中的不饱和脂肪酸,尤其是油酸和亚油酸,在高温煎炸时通过发生氧化降解反应生成醛、酮、酸、醇等挥发性物质,赋予煎炸食品特殊的香味^[2-3]。

薯条是一种以马铃薯(土豆)为原料,切条后经煎炸而成的食品,其因宜人的风味受到全世界消费者的喜爱。风味是人的感官对食品包含的香味和呈味物质的总体感觉,研究风味物质对食品加工、储存等过程至关重要,目前对于马铃薯及其产品中挥发性风味物质的研究主要集中在生的、蒸煮的及(微波)烘烤的马铃薯和马铃薯片^[4-6],对于薯条的挥发性物质研究相对较少。本实验的目的在于通过研究薯条的风味组成,选用合适的煎炸油提高薯条的风味质量。考虑到煎炸油对薯条挥发性物质的影响,实验对选用的11种煎炸油的脂肪酸组成及部分理化指标进行分析,再采用SPME法提取薯条的挥发性成分进行测定。通过感官评价对薯条的颜色、外观、风味、油腻感等8个方面进行评定,分析不同煎炸油煎炸薯条的风味物质组成,为选用合适的煎炸油提供数据基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

高油酸葵花籽油,日清食品有限公司;葵花籽油、大豆油、米糠油、花生油、菜籽油,益海嘉里粮油有限公司;亚麻籽油,北京红井源商贸有限公司;40℃棕榈油、高油酸菜籽油(不添加抗氧化剂),嘉吉投资(中国)有限公司;棉籽油,晨光科技有限公司;猪油,上海东利油脂食品有限公司;新鲜荷兰大土豆,山东农场;1,2,3-三氯丙烷标准品,美国Sigma公司;异辛烷、甲醇、正己烷,均为色谱纯;其他试剂均为分析纯。

煎炸锅(2.5 L),艾格丽公司;固相微萃取装置,50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头,美国色谱科公司;Trace 1300 ISQ 气相色谱质谱联用仪(GC-MS),美国赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 煎炸油脂肪酸组成测定

脂肪酸甲酯的制备:取50.0 mg待测油样于5 mL离心管中,加入1.0 mL正己烷使其溶解均匀;然

后加入0.5 mL 2 mol/L的氢氧化钾-甲醇溶液,并在旋涡振荡仪上振荡30 s;取上清液,转移至另一离心管,加入少量无水硫酸钠,离心后取上清液,过0.22 μm 滤膜,待气相色谱分析。

气相色谱分析条件:进样口温度250℃;分流比100:1;进样量1 μL ;载气为高纯氮气(99.99%);载气流速20 mL/min,恒流模式;检测器温度250℃;升温程序为60℃保持3 min,然后以5℃/min升温至170℃,并保持15 min,最后以2℃/min升温至220℃,并保持10 min。采用峰面积归一化法定量。

1.2.2 煎炸油理化性质的测定

极性组分含量(TPC)根据GB 5009.202—2016制备型快速柱层析法测定;过氧化值根据GB 5009.227—2016测定;碘值根据GB 5009.267—2016测定;酸值根据GB 5009.229—2016测定。

1.2.3 煎炸实验

生土豆洗净,去皮,然后用方形刀具模具切成条(10 mm \times 10 mm \times 50 mm),清洗后再放入沸水中漂烫3 min(土豆条与沸水比例1:8),并用吸水纸吸去其表面过量的水。漂烫后的土豆条在煎炸油中170℃下煎炸3 min,取出,备用。

1.2.4 薯条挥发性物质测定

挥发性成分的提取与分离参考Santos等^[7]的方法,作部分修改。将(1.50 \pm 0.02) g薯条放入20 mL顶空瓶中,加入5 mL 15%的NaCl溶液和50 μL 内标溶液(59 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 1,2,3-三氯丙烷),插入已老化萃取头进行提取。提取条件为提取温度60℃,平衡时间10 min,提取时间30 min。

采用气相色谱质谱联用仪对挥发性成分进行分离鉴定。分析条件:进样口温度250℃,解吸时间5 min;DB-WAX MS色谱柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm),升温程序为初始温度45℃,保持2 min,以3℃/min升至180℃,然后以10℃/min升至240℃,保持5 min;载气为氦气,流速1.0 mL/min;电子轰击离子源(EI),电子能量70 eV,离子源温度230℃,四极杆温度150℃;全扫描模式,质量扫描范围33~45。每个样品平行检测3次,取平均值,通过将挥发性化合物的保留指数(RI)和MS数据与标准品进行比较来确定挥发性化合物,并通过内标法定量。

1.2.5 感官评定

将薯条置于聚四氟乙烯瓶中,盖紧瓶盖,在室温下让评价小组成员进行感官评价。小组由28人组成,均为江南大学风味分析研究方向的学生。分别从颜色、外观、风味、油腻感、酥脆性、粉状质地、硬度、滋味8个方面对薯条进行评分。除此以外,评价

人员还需打出整体喜好性分数。薯条感官评价细则 见表1。

表1 薯条感官评价细则

评分	颜色	外观	风味	油腻感	酥脆性	粉状质地	硬度	滋味	整体喜好性
8~10	整体呈亮黄色且均一	薯条均匀平整,无断条	有浓郁的煎炸薯条香味	外表无过多的油	坚挺,有酥脆且薄的外壳,无起泡	内部有砂粒感且充实	硬度适中	滋味醇厚,口齿留香	完美
5~7	部分或整体颜色较浅或较深	有少量薯条皱缩或起泡	有煎炸薯条香味,无异味	外表油一般	外壳较厚	内部质地轻微分离	硬度一般	滋味较醇厚,无其他异味	一般
0~4	部分或整体颜色过浅或过深	薯条皱缩或起泡现象明显	无香味或有明显的异味	外表一层油	易碎/软或干/硬,有起泡泡,外壳厚	无砂粒感,湿/软,有硬心或空心	过硬或过软	滋味较差,有油脂酸败味或其他异味	比较差

1.2.6 数据分析

所有实验至少重复3次,所得结果以平均值表示。运用IBM SPSS 22.0对数据进行单因素方差(ANOVA)分析。

2 结果与分析

2.1 11种煎炸油的脂肪酸组成与部分理化指标

11种煎炸油的脂肪酸组成及含量、碘值、酸值、

过氧化值和极性组分含量如表2所示。由表2可以看出,棕榈油和猪油中的饱和脂肪酸含量最高,分别为44.67%和48.12%。高油酸菜籽油和高油酸葵花籽油中的油酸含量较高,分别为76.08%和82.77%。亚麻籽油中的亚麻酸含量最高,为49.12%,而在花生油中未检出亚麻酸。葵花籽油和棉籽油中的亚油酸含量较高,分别为65.56%和65.96%。

表2 11种煎炸油的脂肪酸组成及含量、碘值、酸值、过氧化值和极性组分含量

煎炸油	脂肪酸含量/%						SFA	MUFA	PUFA	碘值(I)/(g/100g)	酸值(KOH)/(mg/g)	过氧化值/(mmol/kg)	极性组分含量/%
	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	SFA							
棕榈油	40.36	4.31	44.04	11.12	0.17	44.67	44.04	11.29	56.03	0.17	1.36	3.50	
猪油	38.95	9.17	40.09	11.60	0.20	48.12	40.09	11.80	53.60	0.19	2.00	9.50	
菜籽油	4.17	1.90	64.03	20.22	9.68	6.07	64.03	29.90	112.26	0.17	2.88	4.10	
高油酸菜籽油	3.98	2.05	76.08	14.21	3.67	6.03	76.08	17.88	97.68	0.15	0.68	3.50	
高油酸葵花籽油	4.74	2.89	82.77	9.49	0.12	7.63	82.77	9.61	86.78	0.13	3.02	3.80	
葵花籽油	6.79	3.71	23.81	65.56	0.13	10.50	23.81	65.69	128.35	0.14	1.46	4.00	
棉籽油	29.76	2.47	0.41	65.96	0.46	32.23	0.41	66.42	113.61	0.23	9.37	8.00	
大豆油	11.59	4.60	24.06	53.95	5.70	16.19	24.06	59.65	126.14	0.20	0.77	5.00	
花生油	11.35	3.15	49.88	35.62	0.00	14.50	49.88	35.62	98.02	0.84	2.29	4.20	
米糠油	17.44	1.56	40.57	38.59	1.84	19.00	40.57	40.43	108.01	0.16	3.62	8.50	
亚麻籽油	6.03	4.43	20.04	20.38	49.12	10.46	20.04	69.50	174.50	0.54	3.85	1.00	

碘值表示油脂的不饱和度,碘值越大,油脂的不饱和度越高。11种煎炸油的不饱和度顺序为猪油<棕榈油<高油酸葵花籽油<高油酸菜籽油<花生油<米糠油<菜籽油<棉籽油<大豆油<葵花籽油<亚麻籽油。11种煎炸油过氧化值和酸值均满足GB 2716—2018要求。11种煎炸油极性组分含量为1.00%~9.50%,远低于国标限量27%。

2.2 11种煎炸油煎炸薯条的挥发性物质组成

11种煎炸油煎炸薯条中挥发性物质的组成及含量如表3所示。由表3可以看出,高油酸菜籽油煎炸薯条中鉴定出57种挥发性物质,高油酸葵花籽油煎炸薯条中鉴定出57种挥发性物质,棕榈油煎炸

薯条中鉴定出65种挥发性物质,菜籽油煎炸薯条中鉴定出64种挥发性物质,葵花籽油煎炸薯条中鉴定出61种挥发性物质,猪油煎炸薯条中鉴定出63种挥发性物质,米糠油煎炸薯条中鉴定出64种挥发性物质,大豆油煎炸薯条中鉴定出43种挥发性物质,花生油煎炸薯条中鉴定出43种挥发性物质,棉籽油煎炸薯条中鉴定出42种挥发性物质,亚麻籽油煎炸薯条中鉴定出38种挥发性物质。对11种煎炸油煎炸薯条中鉴定的挥发性物质进行比较发现,共同检出的化合物有28种,其中包括醛类化合物17种,酮类化合物1种,含氧杂环类化合物1种,含氮杂环类化合物4种,醇类化合物2种,酸类化合物3种。

表3 11种煎炸油煎炸薯条中挥发性物质组成及含量

μg/100 g

挥发性物质	高油酸 菜籽油	高油酸 葵花籽油	棕榈油	菜籽油	葵花 籽油	猪油	米糠油	大豆油	花生油	棉籽油	亚麻 籽油
醛类化合物											
戊醛	25.03	25.84	3.15	2.96	16.34	2.74	3.26	3.83	3.27	5.91	6.54
己醛	9.12	18.72	10.15	4.97	19.03	9.20	10.15	20.92	24.60	17.94	46.19
庚醛	16.91	24.48	11.40	4.77	11.43	16.12	5.07	5.86	5.05	4.93	5.83
辛醛	25.02	70.84	22.77	5.72	6.11	14.39	5.53	8.89	9.88	7.22	10.17
(Z)-2-庚烯醛	41.88	58.24	21.91	14.07	80.18	26.76	24.62	37.33	12.39	45.74	27.53
壬醛	227.76	336.69	121.36	62.74	61.97	80.99	53.55	38.30	46.83	33.20	34.82
(E)-2-辛烯醛	34.17	30.09	22.88	10.70	52.59	23.62	19.57	28.74	16.54	31.19	15.28
(E,E)-2,4-庚二 烯醛	263.76	24.15	13.30	76.08	10.96	14.72	23.26	66.74	9.94	20.33	509.96
癸醛	2.21	7.74	5.55	2.24	1.33	4.31	2.57	4.04	3.48	7.03	7.29
苯甲醛	-	-	10.62	17.92	18.36	12.54	16.94	20.28	20.81	25.65	12.60
(E)-2-壬烯醛	39.45	61.80	22.47	18.92	29.41	28.43	11.81	22.10	16.35	27.75	10.82
(Z)-2-癸烯醛	7.14	35.33	4.10	3.08	2.44	4.07	1.53	-	-	-	-
(E)-2-癸烯醛	452.67	1 177.63	298.06	215.15	175.72	259.41	109.98	96.21	138.99	71.26	102.13
2,4-壬二烯醛	-	3.79	2.09	0.54	8.18	10.56	2.62	-	-	-	6.21
(E,E)-2,4-壬二 烯醛	14.92	17.37	12.78	6.85	45.90	8.43	14.50	10.38	9.33	14.57	8.52
2-十一烯醛	511.53	1 355.63	344.40	218.45	208.52	230.69	115.49	38.80	66.72	34.28	55.72
(E,Z)-2,4-癸二 烯醛	337.01	246.80	160.96	161.60	1 381.97	127.09	334.80	189.78	118.83	721.87	94.22
(E,E)-2,4-癸二 烯醛	1 479.06	1 145.21	763.99	776.92	5 741.48	537.93	1 477.93	703.38	477.83	2 286.91	320.65
4-氧代壬醛	1.07	6.55	0.78	-	13.02	2.75	-	-	-	-	-
(Z)-4,5-环氧- (E)-2-癸烯醛	10.96	26.58	15.92	10.50	67.45	10.87	16.63	4.95	3.94	10.01	3.53
(E)-4,5-环氧- (E)-2-癸烯醛	22.47	44.15	19.58	9.85	100.43	27.24	15.38	10.23	8.60	21.72	9.61
(E,E)-2,4-十二 烯醛	4.23	4.74	3.38	0.79	3.19	2.18	1.71	-	-	-	-
α-亚乙基-苯乙醛	-	-	3.74	1.93	4.33	2.88	3.28	-	-	-	-
酮类化合物											
3-壬烯-2-酮	7.82	6.61	4.14	4.04	19.24	5.04	6.13	-	-	-	-
1-(1H-吡咯-2- 基)-乙酮	5.74	5.22	2.21	2.06	2.33	4.45	1.03	12.80	7.55	12.99	9.74
7-乙基-4-壬酮	3.76	5.85	2.41	4.25	18.25	1.93	3.48	-	-	-	-
含氧杂环类化合物											
2-戊基呋喃	18.61	14.24	4.35	4.20	70.58	12.95	13.35	17.16	15.25	47.55	9.06
3-戊基呋喃	-	-	1.54	1.70	-	1.04	0.50	9.57	7.07	10.55	6.74
二氢-5-戊基-2 (3H)-呋喃酮	5.50	10.24	-	2.44	2.31	7.66	1.04	-	-	-	-
5-丁二氢-2 (3H)-呋喃酮	9.12	13.02	6.21	4.03	12.59	5.23	3.95	-	-	-	-
含氮杂环类化合物											
乙基-吡嗪	-	-	-	-	-	-	-	3.24	2.72	5.29	-
2-甲基-吡啶	-	-	-	-	-	-	-	15.27	6.62	27.06	13.27
2,5-二甲基吡嗪	6.21	2.38	2.84	3.42	0.93	1.65	5.26	28.73	16.00	43.80	13.68

续表 3

挥发性物质	μg/100 g										
	高油酸 菜籽油	高油酸 葵花籽油	棕榈油	菜籽油	葵花 籽油	猪油	米糠油	大豆油	花生油	棉籽油	亚麻 籽油
2,6-二甲基吡嗪	-	-	-	-	-	-	-	13.13	9.78	13.57	-
6-甲基-2-乙基 吡嗪	3.29	3.75	3.69	3.41	2.70	4.41	6.11	7.64	3.71	9.65	2.63
2-乙基-6-甲基 吡嗪	3.13	10.21	5.61	9.83	-	9.04	5.82	-	-	-	-
3-甲基-2-乙基 吡嗪	-	-	-	-	-	-	-	15.75	9.01	20.40	11.00
2,5-二甲基-3- (2-甲基丙基)吡嗪	-	-	4.72	10.59	4.85	13.25	5.10	19.73	13.65	22.65	4.51
2-乙基-3,5-二甲 基吡嗪	-	-	-	-	-	-	-	5.05	-	7.86	-
2,5-二甲基-3- 乙基吡嗪	14.37	19.53	-	-	-	-	-	24.88	16.82	33.64	8.23
2-异戊二烯-6- 甲基吡嗪	-	-	1.55	4.05	-	3.08	2.61	7.61	4.76	11.16	-
2-乙基-5-甲基 吡嗪	3.29	3.75	1.95	3.41	1.88	4.41	3.55	7.25	3.54	10.64	2.87
2-异丁基-3-甲基 吡嗪	-	-	-	-	-	-	-	2.57	3.65	245.99	-
2-丁基-3-甲基 吡嗪	-	-	-	-	-	-	-	5.72	3.36	6.22	-
2,5-二甲基-3- (3-甲基丁基)吡嗪	7.25	14.15	4.34	11.67	7.49	10.57	5.08	6.46	3.53	5.58	-
4-甲基嘧啶	2.46	-	3.15	1.18	-	3.13	2.51	-	-	-	-
含硫化合物											
二甲基三硫	0.73	1.08	1.17	1.03	-	-	1.06	-	-	-	-
烃类化合物											
十四烷	-	-	1.66	-	3.45	1.69	2.35	-	-	-	-
十五烷	-	-	12.65	3.11	2.84	10.08	10.64	-	-	-	-
2-甲基-3-乙基- 1,3-己二烯	13.68	14.96	16.68	6.80	59.92	12.43	11.94	-	-	-	-
8-七烯	15.21	46.41	10.06	5.33	4.59	3.23	13.73	-	-	-	-
3-壬-5-炔,4- 乙基-(E)	19.95	27.76	27.77	13.57	89.38	14.49	23.31	-	-	-	-
1-癸基环己烯	3.55	8.72	3.43	3.94	4.14	2.38	3.71	-	-	-	-
醇类化合物											
1-辛醇	22.36	69.66	16.81	6.62	6.48	12.86	5.39	4.74	5.93	5.83	6.20
正戊醇	6.04	5.79	2.58	0.86	9.21	2.84	2.50	-	-	-	-
1-辛烯-3-醇	5.06	6.88	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4-乙基环己醇	31.99	6.17	2.34	2.25	21.18	3.02	3.00	-	-	-	-
2,4-二甲基环己醇	-	-	2.08	0.71	17.76	2.18	2.38	-	1.32	-	3.50
1-壬醇	10.84	13.41	3.30	3.09	3.86	3.15	2.36	-	-	-	-
1-十一醇	-	-	5.65	14.26	19.24	4.51	41.66	-	-	-	-
4,4,6-三甲基环 己-2-烯-1-醇	20.78	25.24	20.81	9.88	41.61	15.52	11.66	5.71	6.55	13.30	4.72
正十六醇	-	3.18	-	6.41	6.41	9.14	6.22	-	-	-	-
2-(十二烷氧基)乙醇	1.29	-	2.25	17.43	12.86	0.73	21.88	-	-	-	-

续表 3

挥发性物质	μg/100 g										
	高油酸 菜籽油	高油酸 葵花籽油	棕榈油	菜籽油	葵花 籽油	猪油	米糠油	大豆油	花生油	棉籽油	亚麻 籽油
(R)-(-)-2-氨基-1-丙醇	27.57	30.57	25.87	20.18	4.40	-	27.01	-	-	-	-
2-壬烯-1-醇	2.73	4.83	0.53	-	-	-	-	-	-	-	-
3,7,11-三甲基-1-十二醇	7.25	23.95	3.17	2.09	-	-	-	-	-	-	-
2-十四烷基乙醇	-	-	1.35	3.91	4.31	2.06	2.28	-	-	-	-
酸类化合物											
己酸	-	-	-	-	6.65	-	-	-	-	-	-
辛酸	-	-	-	-	-	-	-	5.10	2.91	-	5.90
正癸酸	17.87	14.21	11.07	4.52	1.57	2.41	1.61	-	-	-	-
壬酸	109.91	73.04	58.43	27.31	18.78	14.62	17.54	5.84	3.96	20.89	8.04
十四酸	12.99	7.75	7.30	4.70	4.73	2.08	2.71	17.61	13.87	18.48	12.65
十二酸	20.65	18.72	14.55	3.17	3.12	2.35	3.36	-	-	-	-
十五烷酸	-	-	-	-	-	-	-	7.73	7.27	12.33	7.78
正十六烷酸	52.46	47.10	33.24	9.96	7.15	7.81	6.15	65.16	45.93	39.58	57.57
十八碳酸	12.34	14.28	-	-	-	-	-	34.24	28.40	29.37	40.57
环己烷丙酸	-	-	1.50	1.02	4.16	1.48	3.36	-	-	-	-
酯类化合物											
十六酸甲酯	1.86	1.15	3.02	14.32	26.82	0.40	18.16	-	-	-	-
邻苯二甲酸庚-4-基异丁基酯	5.40	4.43	7.71	5.52	5.73	3.68	3.40	-	-	-	-
13-十八碳烯酸甲酯	3.36	2.40	1.46	7.19	12.86	1.04	5.61	-	-	-	-

注：“-”表示未检出。

Dobarganes 等^[8]研究发现,油脂是煎炸食品风味的主要贡献者,醛类化合物、酮类化合物、醇类化合物等挥发性风味物质大多由油脂氢过氧化物的降解产生。11种煎炸油煎炸薯条共同鉴定出的挥发性物质中种类最多的是醛类化合物,其次是含氮杂环类化合物、酸类化合物、醇类化合物,还有一些含量较少的物质包括酮类化合物和含氧杂环类化合物;其中醛类化合物、含氧杂环类化合物和含氮杂环类化合物对煎炸薯条风味有较大贡献。

2.2.1 醛类化合物

11种薯条中鉴定出的醛类物质由饱和醛、单不饱和醛、多不饱和醛(二烯醛)和一些具有取代基的醛类组成,包括:戊醛、己醛、庚醛、辛醛、(Z)-2-庚烯醛、壬醛、(E)-2-辛烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、癸醛、苯甲醛、(E)-2-壬烯醛、(E)-2-癸烯醛、(Z)-2-癸烯醛、2,4-壬二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、2-十一烯醛、(E,Z)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、4-氧代壬醛、(Z)-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛、(E)-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-十二烯醛, α -亚乙基-苯乙醛。

油脂中醛类物质生成的主要途径有两个:一是通过 Strecker 降解,将 Maillard 初期产物氨基酸酮糖和氨基酸醛糖等非挥发性物质降解为还原酮、还原葡萄糖醛酮和糠醛;二是通过油脂自氧化生成过氧化物,然后进一步裂解生成脂肪族醛、酮、醇等物质。

2.2.1.1 饱和醛

己醛主要是亚油酸-13-COOH经 β -均裂裂解产生的分解产物,同时也可能是亚油酸-12-COOH经 β -均裂裂解产生的1-己烯基自由基与羟基自由基结合后的醛-烯醇互变异构的产物^[9],其在煎炸油中呈现青香、叶香或木香味。亚麻籽油煎炸薯条中的己醛含量最高,为46.19 μg/100 g。庚醛不仅可以通过亚油酸的氧化产生,也可以来自于油酸的氧化。因此,富含油酸的高油酸葵花籽油煎炸的薯条中庚醛含量最高,为24.48 μg/100 g;而菜籽油煎炸薯条中的庚醛含量最低,为4.77 μg/100 g。壬醛主要是油酸-9-COOH经 β -均裂裂解产生的1-壬烯基自由基与羟基自由基结合后的醛-烯醇互变异构的产物,同时也是油酸-10-COOH经 β -均裂裂解产生的分解产物,在煎炸油中主要呈现青香。壬醛在高油酸葵花籽油煎炸薯条

中含量最高(336.69 $\mu\text{g}/100\text{g}$),在菜籽油与葵花籽油、棉籽油与亚麻籽油煎炸薯条中差异不大。

2.2.1.2 单不饱和醛

单不饱和醛以十碳及以下的反式醛为主。如(*E*)-2-辛烯醛、(*E*)-2-壬烯醛具有油脂香, (*E*)-2-癸烯醛具有青香、油脂香。其中:(*E*)-2-辛烯醛在葵花籽油煎炸薯条中含量最多,为52.59 $\mu\text{g}/100\text{g}$;而(*E*)-2-壬烯醛和(*E*)-2-癸烯醛在高油酸葵花籽油煎炸薯条中含量最多,分别为61.80 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 和1177.63 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。顺式单不饱和醛主要是(*Z*)-2-庚烯醛、(*Z*)-2-癸烯醛和2-十一烯醛。2-十一烯醛主要由油酸-8-COOH经 β -均裂裂解产生^[9],具有青草香味。在三油酸甘油酯的加热产物中,2-十一烯醛是含量最多的醛类物质。因为含有较高含量的油酸,所以高油酸菜籽油煎炸薯条和高油酸葵花籽油煎炸薯条中2-十一烯醛的含量明显高于其他几种煎炸油煎炸薯条,含量分别为511.53 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 和1355.63 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。

2.2.1.3 多不饱和醛

(*E,E*)-2,4-庚二烯醛含量在11种煎炸油煎炸薯条中差别较大,其在煎炸油中主要呈现油腻味、脂肪味,来源主要是亚麻酸,所以富含亚麻酸的亚麻籽油煎炸薯条中的(*E,E*)-2,4-庚二烯醛含量最高,为509.96 $\mu\text{g}/100\text{g}$,花生油煎炸薯条中其含量最低,为9.94 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。(*E,E*)-2,4-壬二烯醛主要是亚油酸裂解反应的产物^[10],呈强烈的花果香和油脂香,其在葵花籽油煎炸薯条中的含量最高,为45.90 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。(*E,E*)-2,4-癸二烯醛是煎炸薯条中重要的风味活性化合物,呈现油脂香,主要来自于亚油酸的氧化反应,其中亚油酸含量较高的葵花籽油煎炸薯条中(*E,E*)-2,4-癸二烯醛的含量较其他几种薯条高,为5741.48 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。同时, (*E,E*)-2,4-癸二烯醛的顺反异构体(*E,Z*)-2,4-癸二烯醛在葵花籽油煎炸薯条中的含量也最高,为1381.97 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。

2.2.1.4 取代基醛

苯甲醛具有扁桃仁味和烧焦味,它的出现往往伴随着2,4-癸二烯醛的出现,并且在2,4-癸二烯醛的氧化分解产物中也检测出苯甲醛的存在,另外在模拟的煎炸条件下^[11],三油酸甘油酯所产生的挥发性成分中苯甲醛的含量比三油酸甘油酯、玉米油和氢化棉籽油所产生的苯甲醛的含量高,所以苯甲醛也是亚油酸的氧化分解物。在高油酸菜籽油和高油酸葵花籽油煎炸薯条中未检测到苯甲醛。4-

氧代壬醛被认为是食物长时间煎炸后所生成的具有潜在毒性和致病性的物质,实验仅在5种煎炸油煎炸薯条中检测到4-氧代壬醛,其中葵花籽油煎炸薯条中的含量最高,为13.02 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。

2.2.2 含氮杂环类化合物

11种煎炸油煎炸薯条中鉴定出的含氮杂环类化合物主要是吡嗪,包括乙基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪、6-甲基-2-乙基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、3-甲基-2-乙基吡嗪、2,5-二甲基-3-(2-甲基丙基)吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、2,5-二甲基-3-乙基吡嗪、2-异戊二烯-6-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2-异丁基-3-甲基吡嗪、2-丁基-3-甲基吡嗪、2,5-二甲基-3-(3-甲基丁基)吡嗪。

吡嗪类物质被认为是以氨基酸和游离糖为风味前体物质通过Maillard反应产生的,这类化合物具有黑面包香气,是所有焙烤食品、烤面包或类似的加热食品中的重要风味化合物,形成的最直接途径是 α -羰基化合物与氨基酸的氨基缩合,发生Strecker降解反应^[12]。11种煎炸油煎炸薯条中均检出2,5-二甲基吡嗪、6-甲基-2-乙基吡嗪和2-乙基-5-甲基吡嗪,且都在棉籽油煎炸薯条中含量最高。

除吡嗪外,吡啶类含氮化合物也在11种煎炸油煎炸薯条中被检出。吡啶的香气通常受其种类和浓度的影响,低浓度通常有非常愉悦的香气,如青草香;浓度高时,香气常会变得粗糙和刺鼻,如2-乙酰基吡啶有烟草香^[13]。

2.2.3 含氧杂环类化合物

11种煎炸油煎炸薯条中检出的含氧杂环类化合物主要是呋喃和呋喃酮,其中2-戊基呋喃为共同检出的化合物。葵花籽油煎炸薯条的2-戊基呋喃含量最高,为70.58 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 。2-戊基呋喃的来源是脂质的氧化降解,经常出现在油脂加热过程中,是油脂呈味的主要挥发性物质之一,具有果香、青香、豆香、泥土及类似蔬菜的香味。2-戊基呋喃的主要生成机理是亚油酸-9-COOH经 β -均裂裂解产生的1,3-壬二烯基自由基再发生氢过氧化反应,生成1,3-壬二烯-1-COOH,失去羟基自由基后,发生烯醇环化反应,形成2-氧杂-3-戊基环戊烯,再失去1个氢自由基,从而形成稳定的2-戊基呋喃。呋喃酮来源于Maillard反应中糖的环化、烯醇化反应,其具有焦糖甜香,对面包、牛肉的香气有较大贡献^[14]。实验检出的2种呋喃酮均在高油酸葵花籽油煎炸薯条中含量最高。

2.2.4 酮类化合物

酮类化合物也是油脂在高温下的主要产物,对加热油脂或煎炸食物的香气具有一定的影响。但是,大多数实验结果认为酮类挥发性物质的出现会对人体健康产生负面影响。11种煎炸油煎炸薯条中共同检出的酮类挥发性物质仅有1种,为1-(1H-吡咯-2-基)-乙酮,其在棉籽油煎炸薯条中含量最多(12.99 $\mu\text{g}/100\text{g}$)。

2.2.5 其他

除上述几类物质外,共同检出的挥发性物质还有酸类化合物和醇类化合物。研究表明,醇类和酸类化合物在煎炸薯条中的相对含量随时间的变化不明显,大多在某一含量水平上波动,不能够作为煎炸薯条风味的主要贡献物^[15]。另外,11种煎炸油煎炸薯条中还检出少量的烃类、含硫化合物和酯类化

合物。

2.3 11种煎炸油煎炸薯条的感官评价

11种煎炸油煎炸薯条的感官评分如表4所示。

从表4可以看出,除猪油煎炸薯条的颜色和外观稍差,其他煎炸油煎炸薯条的颜色和外观属性差异不显著,棕榈油煎炸薯条风味最佳,有煎炸薯条香味,而猪油煎炸薯条风味最差,香味不明显。大豆油、猪油和米糠油煎炸薯条有明显的油腻感。高油酸菜籽油煎炸薯条的酥脆性最佳,猪油煎炸薯条的酥脆性最差。猪油煎炸薯条的粉状质地最差,高油酸菜籽油煎炸薯条的粉状质地最佳。另外,高油酸菜籽油煎炸薯条在硬度和滋味方面也优于其他几种煎炸油煎炸薯条。总体来说,猪油煎炸薯条整体喜好性最差,次于亚麻籽油煎炸薯条,而棕榈油煎炸薯条的整体喜好性最佳。

表4 11种煎炸油煎炸薯条的感官评分

项目	棕榈油	大豆油	棉籽油	花生油	菜籽油	葵花籽油	米糠油	高油酸菜籽油	高油酸葵花籽油	猪油	亚麻籽油
颜色	6.77	5.58	5.85	6.77	6.88	5.08	5.73	7.15	5.04	4.15	4.54
外观	7.62	7.28	6.88	7.42	7.23	6.15	7.08	7.23	5.81	5.38	6.38
风味	7.38	6.42	6.12	6.31	6.15	5.50	6.42	6.35	6.42	4.04	5.88
油腻感	6.08	4.88	5.27	5.42	6.27	5.15	4.92	6.19	5.62	4.92	5.88
酥脆性	5.31	5.12	5.52	5.58	5.58	5.48	5.73	6.27	5.27	4.62	5.23
粉状质地	6.15	5.62	5.84	5.96	5.62	5.73	6.27	6.50	6.23	4.53	5.62
硬度	5.88	6.19	6.04	5.58	5.08	5.35	6.35	6.50	5.73	4.27	5.42
滋味	6.54	5.65	5.88	6.19	5.19	5.50	6.36	6.69	5.96	2.77	4.35
整体喜好性	6.24	5.48	5.60	5.80	4.92	5.20	6.00	6.16	5.92	2.48	4.60

3 结论

对11种煎炸油煎炸薯条的挥发性化合物的组成进行研究。结果表明,11种煎炸油煎炸薯条的挥发性成分包括醛类、酮类、含氧杂环类、含氮杂环类、烃类、醇类、酸类、含硫化合物和酯类化合物,其中醛类化合物是煎炸薯条中主要的挥发性化合物。棕榈油煎炸薯条中挥发性物质种类最多,亚麻籽油煎炸薯条中的最少。葵花籽油和棉籽油煎炸薯条中多不饱和醛含量较高,其中(E,E)-2,4-癸二烯醛含量最高,被认为是煎炸薯条中重要的风味活性化合物,呈现油脂香;高油酸菜籽油和高油酸葵花籽油煎炸薯条中单不饱和醛含量较高,其中高油酸葵花籽油中2-十一烯醛含量最高;亚麻籽油煎炸薯条中的(E,E)-2,4-庚二烯醛含量最高,会呈现出消费者不期望的脂肪味和油腻味。感官评定结果显示,棕榈油煎炸薯条感官评分最高,而猪油和亚麻籽油煎炸薯条感官评分最低。

参考文献:

[1] CHOE E, MIN D B. Chemistry of deep-fat frying oils

[J]. J Food Sci, 2007, 72(5): R77-R86.

[2] ZHANG Q, WAN C, WANG C, et al. Evaluation of the non-aldehyde volatile compounds formed during deep-fat frying process[J]. Food Chem, 2018, 243: 151-161.

[3] 聂雪梅,刘仲明,张水华,等. 电子鼻及其在食品领域的应用[J]. 传感器技术, 2004, 23(10): 1-3.

[4] ORUNA-CONCHA M J, BAKKER J, AMES J M. Comparison of the volatile components of two cultivars of potato cooked by boiling, conventional baking and microwave baking[J]. J Sci Food Agric, 2002, 82(9): 1080-1087.

[5] 龚兴旺,郭华春. 马铃薯风味的研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(9): 264-268.

[6] 李凯峰,周远平,王琼,等. 3种烹调方式下马铃薯风味化合物组分构成的品种间差异比较[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 159-166.

[7] SANTOS C S P, MOLINA-GARCIA L, CUNHA C S, et al. Fried potatoes: impact of prolonged frying in monounsaturated oils[J]. Food Chem, 2018, 243(15): 192-201.

(下转第57页)

- addition of waxes on the crystallization behavior of anhydrous milk fat[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, 85(12): 1097–1104.
- [13] HWANG H S, KIM S, SINGH M, et al. Organogel formation of soybean oil with waxes[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2012, 89(4): 639–647.
- [14] JANA S, MARTINI S. Physical characterization of crystalline networks formed by binary blends of waxes in soybean oil[J]. *Food Res Int*, 2016, 89: 245–253.
- [15] HWANG H S, GILLMAN J D, WINKLER – MOSER J K, et al. Properties of oleogels formed with high – stearic soybean oils and sunflower wax[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2018, 95(5): 557–569.
- [16] DOAN C D, TO C M, DE VRIEZE M, et al. Chemical profiling of the major components in natural waxes to elucidate their role in liquid oil structuring[J]. *Food Chem*, 2017, 214:717–725.
- [17] 王伟宁, 王莹, 于洋, 等. 甘蔗蜡制备稻米油基油凝胶及其相关性质[J]. *食品科学*, 2021, 42(2): 17–22.
- [18] 董艳鹤. 漆蜡的物化特征及精制加工工艺研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2011.
- [19] CHOPIN – DOROTEO M, MORALES – RUEDA J A, DIBILDOX – ALVARADO E, et al. The effect of shearing in the thermo – mechanical properties of candelilla wax and candelilla wax – tripalmitin organogels[J]. *Food Biophys*, 2011, 6(3): 359–376.
- [20] LIU C, ZHENG Z, SHI Y, et al. Development of low – oil emulsion gel by solidifying oil droplets: roles of internal beeswax concentration[J/OL]. *Food Chem*, 2021, 345:128811[2021–04–01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128811>.
- [21] MENG Z, QI K Y, GUO Y, et al. Physical properties, microstructure, intermolecular forces, and oxidation stability of soybean oil oleogels structured by different cellulose ethers[J/OL]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2018, 120(6): 1700287[2021–04–01]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700287>.
- [22] MENG Z, LIU Y F, JIN Q Z, et al. Characterization of graininess formed in all beef tallow – based shortening[J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(21): 11463–11470.
- [23] DOAN C D, VAN DE WALLE D, DEWETTINCK K, et al. Evaluating the oil – gelling properties of natural waxes in rice bran oil rheological, thermal, and microstructural study[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2015, 92(6):801–811.
- [24] KANAGARATNAM S, HOQUE M E, SAHRI M M, et al. Investigating the effect of deforming temperature on the oil – binding capacity of palm oil based shortening[J]. *J Food Eng*, 2013, 118(1): 90–99.
- [25] PATEL A R, BABAAHMADI M, LESAFFER A, et al. Rheological profiling of organogels prepared at critical gelling concentrations of natural waxes in a triacylglycerol solvent[J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(19): 4862–4869.
- [26] MARTINS A J, CERQUEIRA M A, FASOLIN L H, et al. Beeswax organogels: influence of gelator concentration and oil type in the gelation process[J]. *Food Res Int*, 2016, 84:170–179.
- [27] CHAI X H, MENG Z, CAO P R, et al. Influence of indigenous minor components on fat crystal network of fully hydrogenated palm kernel oil and fully hydrogenated coconut oil[J]. *Food Chem*, 2018, 255:49–57.
- [28] BLAKE A I, MARANGONI A G. Plant wax crystals display platelet – like morphology[J]. *Food Struct*, 2015, 3:30–34.
- [29] CAMPBELL S D, GOFF H D, ROUSSEAU D. Comparison of crystallization properties of a palm stearin/canola oil blend and lard in bulk and emulsified form[J]. *Food Res Int*, 2002, 35(10): 935–944.
- [30] LUPI F R, GRECO V, BALDINO N, et al. The effects of intermolecular interactions on the physical properties of organogels in edible oils[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2016, 483:154–164.
- [8] DOBARGANES C, MÁRQUEZ – RUIZ G, VELASCO J. Interactions between fat and food during deep – frying[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2000, 102(8/9): 521–528.
- [9] HUI Y H. 贝雷:油脂化学与工艺学:一卷[M]. 徐生庚, 裘爱泳, 译. 北京:中国轻工业出版社, 2001.
- [10] NEFF W E, WARNER K, BYRDWELL W C. Odor significance of undesirable degradation compounds in heated triolein and trilinolein[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2000, 77(12):1303–1314.
- [11] MATTHEWS R F, SCANLAN R A, LIBBEY L M. Autoxidation products of 2,4 – decadienal[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1971, 48(11):745–747.
- [12] 谢笔钧. 食品化学[M]. 2版. 北京:科学出版社, 2004.
- [13] 王永倩. 油条风味分析评价及其形成机理初步研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
- [14] 赵梦瑶. 五种油煎炸油条风味物质组成研究[D]. 北京:北京工商大学, 2018.
- [15] XU L R, JI X, WU G C, et al. Influence of oil types and prolonged frying time on the volatile compounds and sensory properties of French fries[J/OL]. *J Oleo Sci*, 2021, 70(7): ess20360[2021–02–04]. <https://doi.org/10.5650/jos.ess20360>.

(上接第46页)