

热加工方式对火麻仁风味与品质的影响

赖惠敏, 王世连, 阮征, 李汴生*
(华南理工大学食品科学与工程学院 广州 510640)

摘要 采用常压蒸制、炒制、热风烘烤以及微波 4 种热加工方式处理云南大姚火麻仁。以火麻仁香味为指标,探究 4 种热加工方式在最佳香味处理条件下对其挥发性风味物质、色泽、营养成分及贮藏稳定性的影响。结果表明:4 种热加工方式最优处理条件分别为 100 ℃常压蒸制 8 min、150 ℃炒制 15 min、130 ℃热风烘烤 40 min 以及 600 W 功率微波 4 min。未处理火麻仁中含有较多的 2-3 丁二醇(10.21%)、1-己醇(7.92%)等醇类物质。4 种热加工方式均可使挥发性风味物质的种类和含量增加,其中炒制处理和热风烘烤可明显增加醛类、杂环类物质的含量。不同热加工方式处理后火麻仁的色泽、蛋白质、总糖、灰分、脂肪、总酚、总黄酮含量及不饱和脂肪酸比例存在显著性差异($P<0.05$)。微波处理可保留较高含量的蛋白质、总酚和总黄酮;蒸制处理和热风烘烤后可保留较高比例的不饱和脂肪酸,其中亚麻酸保留率最高,分别为 92.64%和 98.73%。不同热加工方式处理的火麻仁对脂肪氧化酶均有显著的抑制作用($P<0.05$),在短期贮藏过程中均能抑制脂肪的氧化。本研究结果为火麻仁深层次的加工利用提供参考。

关键词 火麻仁; 热加工方式; 挥发性风味物质; 脂肪酸相对含量; 脂肪氧化酶

文章编号 1009-7848(2022)02-0200-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.02.022

火麻(*Cannabis sativa* L.)又叫汉麻、线麻等,是大麻科大麻属的草本植物,自古以来就是食物、纤维、药物的重要来源,具有抗氧化、预防心血管疾病、润肠通便、抗炎、护肝等功效。火麻仁是火麻成熟的种仁,中国人将火麻仁作为食物食用和作为药用已有 3 000 多年历史^[1]。火麻仁含有丰富的不饱和脂肪酸、蛋白质、膳食纤维及矿物质^[2],烹饪后可直接食用,也可加工成火麻仁粉、火麻仁油、火麻仁酱等。2002 年,国家卫生和计划生育委员会将火麻仁列入“既是食品又是药品”的名录,收录在《中国药典》^[3]。

火麻仁含有丰富的营养成分及活性成分,然而,由于火麻仁自带有生青味与涩味,在一定程度上影响其食用品质,因此火麻仁在食用或开发新型食品前,需对其进行熟化热处理,降低火麻仁自带的“异味”。许春芳等^[4]研究发现,热处理可使蛋白质变性并破坏细胞壁的组织结构,从而使分散的细小油滴聚集并释放,氧化后生成氢过氧化物,进一步降解后形成具有特殊风味的醛类、酯类、酮

类及醚类等化合物;高温下的美拉德反应所生成的高碳氢化合物、吡嗪类化合物、呋喃类化合物以及含硫化合物等赋予谷物浓郁的香味^[5]。另外,火麻仁中的脂肪氧化酶(Lipoxygenases, LOX)活力很高,在加工前如不先灭掉酶的活性,高活性的 LOX 会使其脂肪氧化酸败。

热加工处理是保持火麻仁优良食用品质的有效途径。热处理是一个较为复杂的过程,涉及食物中多种物理和化学变化,从而影响食物中营养物质及活性物质的利用^[6]。目前食品热加工的主要方式有蒸、煮、炸、炒、烘烤、微波、红外等方式,不同的加工方式和温度条件,造成火麻仁中的蛋白质、脂肪、总糖、灰分等营养成分含量及其功能活性发生不同的变化。本文选取云南大姚火麻仁为研究对象,采用常见的 4 种食品热加工方式,包括常压蒸制、炒制、热风烘烤及微波,对火麻仁进行热加工处理,探究不同热加工方式对火麻仁挥发性风味物质、色泽、营养活性成分及贮藏稳定性的影响,旨在为火麻仁的深层次的加工利用提供参考。

收稿日期: 2021-02-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0400400);广东省重点领域研发计划项目(2019B020212002)

作者简介: 赖惠敏(1995—),女,硕士生

通信作者: 李汴生 E-mail: febsli@scut.edu.cn

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

火麻仁样品于云南大姚的火麻种植地采收,采收后将火麻仁密封袋封口并置于实验室 4 ℃冰

箱中保存。

槲皮素、没食子酸标准品,上海麦克林生化科技有限公司;2,2-联苯基-1-苦基肼、2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ),北京索莱宝科技有限公司;磷酸氢二钠、四硼酸钠,天津市科密欧化学试剂有限公司;三氯乙酸,国药集团化学试剂有限公司;碘化钾,广州化学试剂厂;福林酚试剂,上海源叶生物科技有限公司;其余试剂均为分析纯级。

1.2 仪器与设备

K9840 型凯氏定氮仪,广州海能仪器有限公司;752N 紫外-可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;CR-400 型全自动色差仪,日本柯尼卡美能达公司;GC6890N-5975MS 气-质谱联用色谱仪,美国安捷伦公司;DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱,上海申贤恒温设备厂。

1.3 试验方法

1.3.1 火麻仁不同热处理方式温度的确定 热加工温度的高、低不仅对火麻仁的感官气味有影响,而且对于蛋白质的提取率以及脂肪氧化有较大影响。温度过低,虽然有利于蛋白质的提取,但生青味可能去除不足,而且所需的时间长,会加大脂肪的氧化程度;温度过高,生青味去除效果好、所需时间减少,但会降低蛋白质的提取率。因此,参考 Jang 等^[7]的试验从火麻仁生青味的去除、香气成分的生成、蛋白质提取率和脂肪的氧化程度的角度综合考虑,通过前期预试验将熟化过程的烘烤温度设定为 130 ℃,炒制温度为 150 ℃,微波功率为 600 W。

蒸制处理步骤如下:将 100 g 火麻仁放在蒸笼中平摊成 0.5 cm 厚的薄层,待水沸腾后,立刻将蒸笼放在蒸锅中,分别常压蒸制 2,4,6,8,10 min。

炒制处理步骤如下:将锅预热至 150 ℃,待温度到达后,立刻将 100 g 火麻仁放在锅中不停翻炒,分别处理 5,10,15,20,25 min。

热风烘烤处理步骤如下:将 100 g 火麻仁放在金属容器中平摊成 0.5 cm 厚的薄层,待烘箱升温至 130 ℃,立刻将金属容器放置烘箱,分别处理 10,20,30,40,50,60 min。

微波处理步骤如下:将 100 g 火麻仁放在陶瓷容器中平摊成 0.5 cm 厚的薄层,在 600 W 条件下分别处理 1,2,3,4,5,6 min。

1.3.2 感官评价 火麻仁的感官评价参考 Gomes 等^[8]的定量描述分析法(QDA),将不同热方式处理的火麻仁样品放入白色瓷盘中,由 10 名感官评价经验丰富的食品专业人员经过培训后组成感官评价小组,在专业的感官评价实验室进行感官评价。依次对火麻仁的生青味、谷物香味、焦糊味以及油脂酸败味 4 个方面进行感官评价,按照给定的标度逐一打分并统计分析。在评分过程中,评估员在评价完一个样品后需要休息 30 s,以免受到其它样品气味的影响。采用层次分析法(AHP)确定各指标的权重比例^[9],火麻仁的感官属性、定义描述以及具体评分标准见表 1。其中,谷物香味为有利因素,强度越高,分数越高;生青味、焦糊味以及油脂酸败味 3 个属性为不利因素,强度越强,分数越低,按照各自权重比例计算最后感官得分。

表 1 火麻仁的感官属性、定义描述以及评分标准

Table 1 Sensory attributes, definitions, and standards of hemp seed

评分标准	感官属性(权重比例)			
	生青味(30%)	谷物香味(30%)	焦糊味(15%)	油脂酸败味(25%)
8~10	无生青味	谷物香味浓郁	无焦糊味	无油脂酸败味
5~7	略带生青味,未烘烤完全	有谷物香味,味道偏淡	略带烧焦味	略带酸败味
0~4	强烈的谷物特有生青味	完全无谷物香味	严重的焦糊味	油脂酸败味严重

1.3.3 挥发性物质的测定 将老化好的萃取头插入装有 3.0 g 火麻仁粉的样品瓶中,70 ℃预热 10 min,萃取 30 min 后用于 GC-MS 分析。GC-MS 检测条件:14P-SMS 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×

0.25 μm), 色谱柱为 HP-SMS, 载气为高纯氦气(99.999%),流速 1.0 mL/min,进样口温度 260 ℃,分流比 100:1,初始温度 40 ℃,保持时间 3 min,升温速度 5 ℃/min,终止温度 260 ℃,保持时间 5

min;质谱电离方式为EI,离子阱温度240℃,质量扫描范围40~350 amu,质谱检测时间0.5~50 min,传输杆温度280℃。

1.3.4 色泽的测定 将经过热加工处理的火麻仁样品打碎后用CR-400全自动色差仪系统分别测定亮度(L^*)、红绿值(a^*)和黄蓝值(b^*)。以白板为标准,每个样品测定8个点,对照样品以及处理样品的总色差按照公式(1)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L-L^*)^2 + (a-a^*)^2 + (b-b^*)^2} \quad (1)$$

式中, L 、 a 、 b ——样品颜色参数; L^* 、 a^* 、 b^* ——白板的颜色参数。

1.3.5 营养成分测定 脂肪含量测定参考GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》的索氏抽提法,蛋白质含量测定参考GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》的凯氏定氮法,灰分含量测定参考GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》的灼烧称重法,总糖含量测定参考GB/T 15672-2009《食用菌中总糖含量的测定》的苯酚-硫酸法。

1.3.6 酚类物质含量测定 总酚含量测定采用福林酚法^[10],含量以每克样品中含有的没食子酸当量(mg GAE/g)表示;总黄酮含量测定采用 NaNO_2 - $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 比色法^[2],含量以每克样品中含有的槲皮素当量(mg QE/g)表示。

1.3.7 脂肪酸含量的测定 脂肪酸含量的测定参考GB 5009.168-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》的方法,采用Agilent GC6890N-5975MS气相质谱联用仪进行测定,通过NIST质谱库进行检索,以高于80%的匹配度定性确定脂肪酸组分,并以峰面积归一化法进行脂肪酸定量。

1.3.8 脂肪氧化程度测定

1.3.8.1 脂肪氧化酶活性测定 参考Li等^[11]方法,在50 mL装有5 g火麻仁粉离心管中加入20 mL磷酸缓冲液(0.1 mol/L,pH 7.5),4℃条件下静置放置40 min,8 000 r/min离心10 min,取上清液作为LOX粗提液。

底物配制方法如下:取0.5 mL吐温试剂置加入10 mL硼酸缓冲液(0.05 mol/L,pH 9.0),摇匀后加入0.5 mL亚油酸,摇晃使其成乳浊液,加入1.3 mL NaOH溶液(1 mol/L)至澄清。最后加入

90 mL硼酸缓冲液(0.05 mol/L,pH 9.0)并用HCl调整pH值至7.0,定容至刻度备用。

反应体系方法如下:向9.5 mL醋酸钠缓冲溶液(0.05 mol/L,pH 5.6)中加入0.3 mL亚油酸底物,快速混匀后加入0.1 mL酶提取液,迅速混合均匀后测定其在补充234 nm处1 min内吸光度的增加量。每15 s记录一次数据,观察光密度值(OD)的变化。1个LOX酶活力单位(U)定义为每分钟每克蛋白质中引起吸光度增加0.01的酶量。

1.3.8.2 过氧化值的测定 过氧化值测定参考GB 5009.227-2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》的滴定法。

1.3.8.3 茴香胺值的测定 茴香胺值的测定参考GB/T 24304-2009《动植物油脂 茴香胺值的测定》。

1.4 数据统计与分析

所有样品均设3个平行试验,试验结果(干重)表示为平均值±标准误差。GC-MS检测未知化合物进行NIST谱库检索,选择正反匹配度大于80%的物质予以确认采用Origin 9.1对数据进行处理与作图,采用SPSS Statistic 24.0对数据进行显著性差异及相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 不同热加工方式条件的选择

不同热加工方式处理的火麻仁感官评价结果如图1所示。由图可知,随着时间的延长,火麻仁的整体感官评分呈现先上升后降低的趋势。未经处理的火麻仁带有浓重的生青味和轻微的油脂酸败味,谷物香味不浓以及无焦糊味,感官评分只有4.75分。在热加工过程中,火麻仁的生青味逐渐降低,谷物香味逐渐增加、焦糊味以及油脂酸败味均增加。从图1a可以看出,蒸制处理6 min开始火麻仁的生青味就明显降低;当蒸制时间为8 min时,谷物香味就不再明显增加。与另外3种处理方式相比,蒸制处理的火麻仁的谷物香味较淡。这主要因为谷物的烤香味主要来源于在热熟化过程中糖、蛋白质、脂肪的热分解,还原糖与氨基酸产生的美拉德反应,以及糖在高温下发生的焦糖化反应产生一些呋喃和糠醛类化合物^[12]。经过蒸制处理的火麻仁未表现出焦糊味,然而由于油脂在蒸

制过程中可在脂肪氧化酶的作用下与水反应发生水解酸败,导致油脂酸败味较明显;蒸制时间为 8 min 时,火麻仁的感官评分最高,为 8.10 分。从图 1b 可知,当炒制 10 min 时,火麻仁的生青味完全消失。火麻仁的谷物香味评分随着炒制时间的延长呈现先增大后降低的趋势,主要因为当炒制时间超过 10 min 时,焦糖化反应和不饱和脂肪酸的氧化使得火麻仁的焦糊味和油脂酸败味开始加重,掩盖了部分谷物香味。当炒制时间为 15 min 时,火麻仁的感官评分最高,为 8.10 分。从图 1c 可知,当热风烘烤时间为 30 min 时火麻仁生青味完全去除,40 min 时感官评分最高,为 8.23 分;热

风烘烤 50 min 时焦糊味开始加重,热风烘烤 40 min 时油脂酸败味开始加重。由图 1d 可以看出,微波 3 min 时,火麻仁生青味完全去除;从 3 min 开始,火麻仁的焦糊味加重;5 min 时,火麻仁油脂酸败味加重。微波处理 4 min 的火麻仁综合评分最高,为 8.05 分。因此,综合考虑热加工处理后火麻仁的生青味、谷物烤香味、焦糊味以及油脂酸败味的得分,选择蒸制、炒制、热风烘烤以及微波的条件分别是:常压(100 ℃)蒸制 8 min、150 ℃炒制 15 min、130 ℃热风烘烤 40 min 以及 600 W 功率微波 4 min。

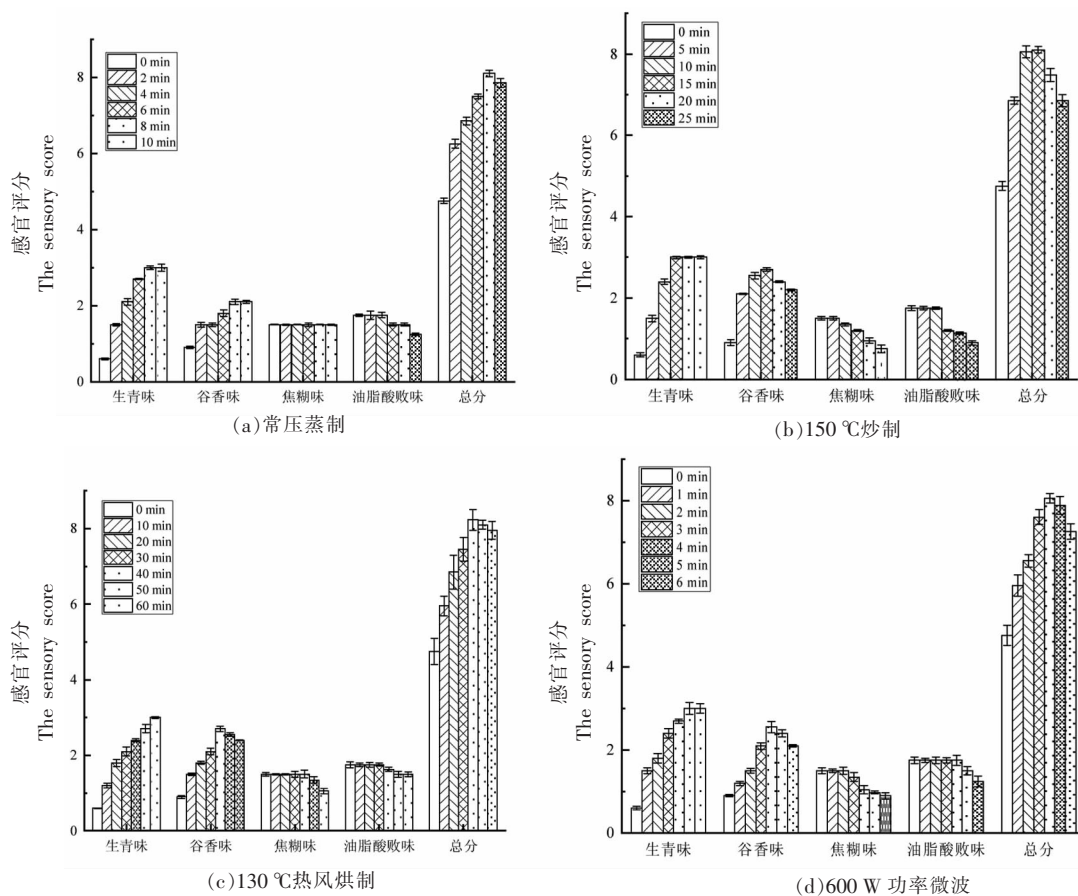


图 1 不同热加工处理方式对火麻仁感官评价的影响

Fig.1 Effects of different thermal processing methods on sensory evaluation of hemp seed

2.2 不同热加工方式对火麻仁挥发性物质的影响

挥发性风味物质主要包括醇类、醛类、酯类、酮类、酚类、含硫含氮类及其它杂环类物质等。由表 2 可知,未经处理的火麻仁共鉴定出 22 种挥发

性物质,主要包含醇类物质 4 种、酯类物质 2 种、酸类物质 2 种、醛类 5 种、酮类 2 种、杂环类 4 种,其中醇类化合物相对含量最高,为 27.94%,其次为酯类、酸类、杂环类和酮类。醇类物质中的 1-己醇、2-3 丁二醇、醛类物质的(*E,E*)-2,4-壬二烯醛

以及呋喃类物质的3-戊基呋喃的含量较高,分别为7.92%、10.21%、1.75%和4.21%,使得未处理的火麻仁具有较浓的生青味与涩味。蒸制后的火麻仁挥发性物质中,共鉴定出31种化合物,高温条件下醇类物质含量显著降低到7.05%,酮类、醛类、杂环类、烯炔类物质含量相对增高,分别为2.75%、11.59%、23.41%、4.22%,其中酮类化合物中1-(6-甲基-2-吡嗪基)-1-醇酮的增加导致了火麻仁脂肪酸败味的增长,这可能与高温、高湿条件可加速不饱和脂肪酸的氧化有关。炒制15 min后的火麻仁共鉴别出39种挥发性物质,其中醛类和杂环类的物质含量分别提升至21.32%和33.5%,醛类中的糠醛物质增加到1.43%,使得火麻仁具有浓郁的谷香味与面包香味。炒制过程的高温工艺会使火麻仁产生Maillard反应中间产物吡嗪类化合物,主要包括2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2,6-二乙基吡嗪等,这些物质使得炒制后的火麻仁具有浓烈的烤香味道,与张垚

等^[13]的研究结果一致,然而醇类物质中的2-呋喃甲醇含量的显著增加,使得火麻仁的焦糊味明显上升。热风烘焙后的火麻仁共鉴别出36种风味物质,其中醇类4.33%、醛类15.59%、酯类8.36%、酸类1.54%、烯炔类4.05%、杂环类30.07%,杂环类挥发性物质相对含量最高,其次为醛类、酯类、醇类、烯炔类和酸类。杂环类化合物能赋予食物浓烈的烤香气味,热风烘焙后的火麻仁中2-乙基-6-甲基-吡嗪和2,5-二甲基吡嗪相对百分比分别为1.65%和9.86%,显著大于未处理火麻仁中的含量,是火麻仁热风烘焙后的重要香气来源。微波熟化后的火麻仁主要共鉴别出33种挥发性物质,其中醇类9.41%、醛类13.64%、酯类6.88%、酸类1.11%、杂环类30.83%,其中杂环类挥发性物质相对含量最高,其次为醛类、醇类、酯类和酸类。综合而言,熟化热加工可增强火麻仁挥发性成分中风味物质的丰富度,其中炒制和热风烘焙处理可明显增强醛类、杂环类化合物的含量,火麻仁谷香味、烤香味与烘焙香味也相应增加。

表2 不同熟化方式对火麻仁样品的固相微萃取GC-MS分析结果

Table 2 GC-MS analysis results of solid phase microextraction of hemp seed samples by different ripening methods

序号	化合物	保留时间/ min	对照/%	蒸制/%	炒制/%	热风烘焙/%	微波/%
醇类							
1	2,3-丁二醇	4.032	10.21	3.21	1.45	0.87	4.76
2	糠醇	7.215	6.38	1.00	0.48	1.43	1.23
3	1-乙醇	11.573	7.92	0.54	-	-	0.39
4	(-)-4-萜品醇	15.376	3.43	0.19	-	-	-
5	2-呋喃甲醇	24.342	-	2.11	4.28	2.03	3.03
醛类							
6	异丁醛	3.324	0.14	2.01	3.19	1.87	1.97
7	三甲基-丁醛	4.186	-	-	1.45	1.12	-
8	二甲基-丁醛	4.234	0.33	2.32	1.95	1.39	2.19
9	己醛	5.453	-	1.36	3.98	4.54	2.34
10	糠醛	6.754	-	1.34	1.43	0.58	1.98
11	3-甲硫基丙醛	9.432	-	-	0.32	0.26	-
12	(E,E)-2,4-壬二烯醛	9.650	1.75	-	2.93	-	0.65
13	苯甲醛	12.124	-	0.24	0.29	-	-
14	5-甲基呋喃醛	13.433	2.79	0.54	0.43	0.29	-
15	苯乙醛	12.987	0.38	2.21	3.62	2.85	2.33
16	壬醛	13.478	-	1.57	1.73	2.37	1.32
17	2-癸烯醛	15.892	-	-	-	-	0.4
18	2-十一烯醛	22.330	-	-	-	0.32	0.46

(续表2)

序号	化合物	保留时间/ min	对照/%	蒸制/%	炒制/%	热风烘焙/%	微波/%
酮类							
19	3-戊烯-2-酮	3.719	-	-	-	-	0.27
20	2-庚酮	8.159	-	0.73	0.87	0.54	-
21	4-甲氧基-1-戊酮	14.731	0.12	0.41	0.43	1.21	0.72
22	1-(6-甲基-2-吡嗪基)-1-醇酮	14.850	-	1.07	0.54	0.37	0.96
23	S-马鞭烯酮	17.143	1.41	0.54	-	-	-
酯类							
24	(19S)-17-油酸-19-(乙酰氧基)-2,16-二脱氢-20-羟基甲酯	5.430	5.32	3.56	-	3.22	1.43
25	4-羟基丁酸乙酰酯	8.940	2.21	3.42	6.02	4.67	4.58
26	甲酸己酯	12.940	-	-	1.13	-	0.87
27	丁内酯	19.670	-	-	0.69	0.47	-
酸类							
28	醋酸	17.320	3.21	1.29	0.51	0.97	1.11
29	乙酸	25.920	1.32	-	0.41	0.57	-
酚类							
31	4-乙基-2-甲氧基苯酚	20.430	-	0.53	-	-	0.45
杂环类化合物							
32	2-甲基吡嗪	5.891	-	1.61	4.22	2.48	2.76
33	2,5-二甲基吡嗪	8.772	0.43	5.32	12.04	9.86	10.02
34	2-戊基呋喃	11.239	-	-	0.71	0.8	-
35	2-乙基-6-甲基-吡嗪	11.435	-	1.09	1.54	1.65	1.13
36	三甲基吡嗪	11.56	0.55	8.67	5.94	9.32	8.47
37	2-乙基-5-甲基吡嗪	13.129	-	0.43	1.88	0.99	1.21
38	3-乙烷基-2,4-二甲基吡嗪	13.741	2.13	5.07	1.47	1.57	3.65
39	2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪	13.958	-	-	1.08	-	-
40	1-甲基-1-吡咯	14.501	0.61	-	-	-	-
41	5-甲基-6,7-二氢-5H-环戊并吡嗪	15.380	-	-	0.33	-	-
42	3,5-二乙基-2-甲基-吡嗪	16.818	-	1.22	2.54	2.43	1.95
43	2,6-二乙基吡嗪	17.309	-	-	0.97	0.43	0.76
44	2-乙酰基-3-甲基吡嗪	20.429	-	-	0.78	0.54	0.88
烯烃类							
45	3-柏烯	8.321	0.46	0.85	1.7	1.83	0.98
46	α -蒎烯	5.231	1.08	3.37	6.14	2.22	1.10
47	双戊烯	5.329	-	-	1.27	-	-
48	柠檬烯	7.654	-	-	1.24	-	-
烷类							
49	邻异乙基甲苯	10.190	-	-	0.63	0.61	-
50	十四烷	16.432	-	-	-	0.36	-
51	环十六烷	25.124	-	-	-	0.16	-
呋喃类							
52	3-戊基呋喃	12.484	4.21	0.52	-	-	0.12

注：“-”表示未检出。

2.3 主成分分析

由图2可以看出4种不同热处理方式根据不同距离被分布在3个不同区域,其中PC1为54.55%、PC2为27.99%,2个主成分方差累计贡献率为82.54%,可一定程度地代表样品信息。炒制和热风烘烤处理在第1主成分的正半轴,PCA分析图上距离越近代表风味物质的相似度越高,主要与醛类物质、杂环类物质和酯类物质有关,赋予了火麻仁烤香味、谷香味和面包香味。蒸制和微波处理主要分布在第2主成分的负半轴区域,说明这2种处理方式的火麻仁香味成分一致,存在较高相似性。对照组火麻仁单独分布在第1主成分的负半轴,其香味物质主要由醇类、酸类和呋喃类物质有关,其中1-己醇和2-戊基呋喃使得未处理火麻仁有浓郁的生青味,鲜香味和涩味。

2.4 不同热加工方式对火麻仁色泽的影响

对照样品和经过4种不同热加工方式处理的火麻仁的色泽测定结果如表3所示。与对照组相比(23.57),蒸制处理火麻仁的 L^* 值增大(29.77),而炒制、热风烘烤以及微波处理的火麻仁的 L^* 值均减小,分别为18.14,20.32,19.98,蒸制处理可以增加火麻仁的亮度,而另外3种方式均使火麻仁亮度降低,其中炒制处理对火麻仁亮度的降低最为明显。由表3可以看出,蒸制处理的火麻仁的 a^* 值较未处理火麻仁变小,表明蒸制使火麻仁的偏红物质缺失或者白度增加;其余3种方式处理的火麻仁的 a^* 值均增加,表明火麻仁的红色变深。热处理对火麻仁的 b^* 值影响显著($P<0.05$),炒制、热

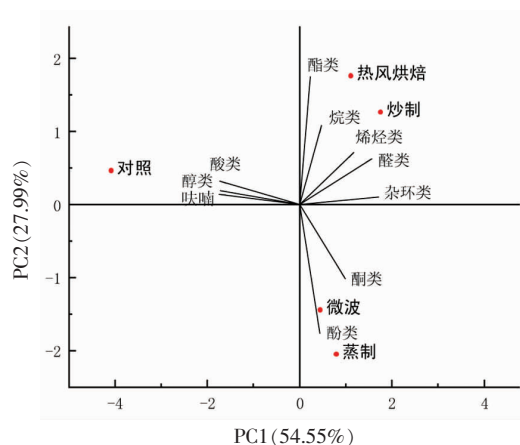


图2 主成分载荷图

Fig.2 Principal component load diagram

风烘烤以及微波处理的火麻仁的 b^* 值显著升高,由初始-0.36分别增加至3.04,1.55和1.68,表明其黄色变深,蒸制处理的火麻仁的 b^* 值无显著变化($P>0.05$)。进一步统计分析火麻仁的总色差指标(ΔE),4种热加工方式处理的火麻仁的 ΔE 在3.18~6.17之间。Sliva等^[14]研究表明, ΔE 值越小,颜色相对于参考值的偏差越小, ΔE 在0.5~1.5之间表示差异较小, ΔE 在6.0~12.0之间表示差异明显, ΔE 大于12表示差异非常大。根据该评分标准,蒸制处理的火麻仁颜色相比对照组差异非常明显,炒制、热风烘烤以及微波处理的火麻仁颜色相比于对照组有一定差异。经过热加工处理造成火麻仁的色泽变化,一方面因为在高温下发生美拉德反应和焦糖化反应;另一方面可能与多酚类以及黄酮类等呈色物质含量变化有关^[15]。

表3 不同热加工方式对火麻仁色泽的影响

Table 3 Effects of different thermal processing methods on the color of hemp seed

色差值	对照组	蒸制	炒制	热风烘烤	微波
L^*	23.57 ± 1.74 ^b	29.77 ± 0.44 ^a	18.14 ± 1.05 ^c	20.32 ± 0.72 ^c	19.98 ± 0.37 ^d
a^*	1.65 ± 0.11 ^c	1.33 ± 0.03 ^d	1.85 ± 0.12 ^a	1.73 ± 0.09 ^b	1.79 ± 0.02 ^b
b^*	-0.36 ± 0.04 ^d	-0.38 ± 0.04 ^d	3.04 ± 0.01 ^a	1.55 ± 0.13 ^c	1.68 ± 0.07 ^b
ΔE	-	6.17 ± 0.56 ^a	5.12 ± 1.12 ^d	3.18 ± 0.89 ^e	3.50 ± 0.39 ^e

注:字母不同表示同行之间有显著性差异($P<0.05$),相同表示无显著性差异($P>0.05$)。

2.5 不同热加工方式对火麻仁基本营养成分的影响

对照样品和4种不同热加工方式处理的火麻仁样品的营养成分含量测定结果如表4所示。与

对照组相比,经过热加工处理的火麻仁蛋白质含量均有一定程度降低,其中蒸制处理蛋白质损失最多,与申瑞玲等^[16]、Goncalves等^[17]研究结果一致。施显赫^[18]研究发现,经过煮制处理的板栗的水

溶性蛋白损失高达 67%，说明蒸制处理的火麻仁蛋白质含量降低可能是由火麻仁中的水溶性蛋白的减少造成的。另外 3 种处理的火麻仁蛋白质含量小幅度降低，可能是长时间在高温下，蛋白质中的氨基酸和还原糖发生美拉德反应以及斯特克勒 (Strecker) 降解发生所致。微波处理的火麻仁脂肪含量增加了 2.54%，Li 等^[19]研究熟化板栗的脂肪含量变化发现了相似的结果，这可能是微波处理后复合脂肪游离出来所致；经过其它 3 种方式处理的火麻仁脂肪含量均于不同程度的降低，其中炒制对火麻仁脂肪含量影响最大，减少了 3.70%，蒸制对火麻仁脂肪含量影响最小，减少了 2.21%。脂肪含量降低一方面可能是在高温下，部分脂肪发生水解；另一方面因为火麻仁本身脂肪含量丰富，在热处理过程中的机械损失可造成一定脂肪含量的损失。经过热加工处理后，火麻仁的总糖含量呈降低趋势，微波处理的火麻仁总糖含量降低幅度最大，由初始的 4.98% 降低至 4.13%，其次是炒制处理，下降至 4.18%，蒸制处理的总糖含量影响最

小，降低了 0.43%。主要因为火麻仁中的还原糖在高温下可以和氨基酸发生美拉德反应，生成香气物质，从而导致含量降低。与对照组相比，经过 4 种不同热加工方式处理的火麻仁的灰分含量均降低，其中蒸制处理的火麻仁灰分含量减少最多，由初始的 3.37% 下降至 3.14%，另外 3 种方式对灰分的影响不大 ($P>0.05$)。从表 4 中可以看出，经过炒制处理的火麻仁的总酚和总黄酮含量分别降低了 0.23 mg GAE/g 和 0.38 mg QE/g，经过蒸制、热风烘烤以及微波 3 种方式处理的火麻仁的总酚和总黄酮含量变化不明显 ($P>0.05$)。董吉林等^[20]和 Goncalves 等^[17]研究发现，青稞和板栗经过蒸制、烤制、微波以及挤压膨化等熟化方式处理其总酚含量均有所提高，与本文研究结果有相似之处。这可能是因为在加热过程中结合态的酚类物质受热得到释放，从而导致总酚含量有小幅度升高^[21]，而炒制处理的火麻仁的总酚和总黄酮含量降低，可能是炒制温度过高，导致一些酚类物质发生热分解。

表 4 不同热加工方式对火麻仁营养成分的影响 (干重)

Table 4 Effects of different thermal processing methods on nutritonal compentens of hemp seed(DW)

营养成分	对照组	蒸制	炒制	热风烘烤	微波
蛋白质/%	19.18 ± 0.44 ^a	18.79 ± 0.21 ^d	18.95 ± 0.05 ^c	19.00 ± 0.64 ^b	19.09 ± 0.38 ^a
脂肪/%	50.75 ± 0.13 ^a	49.63 ± 0.77 ^a	48.87 ± 0.15 ^d	48.99 ± 0.32 ^b	52.04 ± 0.62 ^c
总糖/%	4.98 ± 0.02 ^a	4.55 ± 0.11 ^b	4.18 ± 0.09 ^d	4.47 ± 0.05 ^c	4.13 ± 0.02 ^d
灰分/%	3.37 ± 0.01 ^a	3.14 ± 0.08 ^b	3.31 ± 0.05 ^a	3.29 ± 0.04 ^a	3.24 ± 0.12 ^a
总酚/mg GAE·g ⁻¹	2.57 ± 0.03 ^a	2.64 ± 0.05 ^a	2.34 ± 0.13 ^b	2.59 ± 0.15 ^a	2.66 ± 0.04 ^a
总黄酮/mg QE·g ⁻¹	2.92 ± 0.12 ^a	2.98 ± 0.08 ^a	2.54 ± 0.02 ^b	3.06 ± 0.14 ^a	2.97 ± 0.03 ^a

注：字母不同表示同列之间有显著性差异 ($P<0.05$)，相同表示无显著性差异 ($P>0.05$)。

2.6 不同热加工方式对火麻仁脂肪酸组成及相对含量的影响

脂肪酸是组成脂类的关键成分，是生物活性物质的前提，可为人体代谢活动提供能量，是人体组织结构的组成部分，脂肪酸又可根据饱和度分为饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸，前者由分子内部碳碳单键构成，后者分子结构中含有碳碳双键及不饱和键^[22]。不同熟化方式处理的火麻仁的脂肪酸组成及其含量如表 5 所示。由表 5 可以看出，未经过熟化处理的火麻仁共测出 11 种主要脂肪酸，其中饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸分别占 10.11%

和 89.89%。棕榈酸 (C16:0)、硬脂酸 (C18:0) 是火麻仁中主要的饱和脂肪酸，其含量分别为 6.59% 和 3.28%，还含有少量的花生酸 (C20:0) 和肉豆蔻酸 (C14:0)；油酸 (C18:1) 是火麻仁中主要的单不饱和脂肪酸，占总脂肪酸含量的 10.21%；亚油酸 (C18:2) 和亚麻酸 (C18:3) 是火麻仁中主要的多不饱和脂肪酸，占总脂肪酸含量的 57.37% 和 20.53%，与廖丽萍等^[23]以及 Teh 等^[24]的研究结果一致。在热加工过程中，不饱和脂肪酸中不饱和键被氧化成饱和键，所以油酸、亚油酸、亚麻酸以及顺-11-二十碳烯酸随着加热时间的延长呈下降趋势，与对照

表5 不同热加工方式对火麻仁中脂肪酸含量的影响(%)

Table 5 Effects of different thermal processing methods on fatty acid content of the hemp seed (%)

脂肪酸	对照组	蒸制	炒制	热风烘烤	微波
C14:0	0.12 ± 0.02 ^a	0.09 ± 0.03 ^{ab}	0.07 ± 0.00 ^b	0.11 ± 0.02 ^a	0.10 ± 0.01 ^{ab}
C16:0	6.59 ± 0.88 ^d	8.82 ± 0.87 ^{bc}	10.84 ± 0.90 ^a	7.93 ± 0.62 ^c	8.92 ± 0.57 ^b
C16:1	0.28 ± 0.01 ^{cd}	0.42 ± 0.02 ^{ab}	0.45 ± 0.02 ^a	0.32 ± 0.00 ^c	0.37 ± 0.03 ^b
C18:0	3.28 ± 0.11 ^c	6.57 ± 0.18 ^c	9.14 ± 0.17 ^a	5.42 ± 0.01 ^d	7.68 ± 0.38 ^b
C18:1	10.21 ± 0.34 ^a	8.95 ± 0.39 ^c	8.29 ± 0.27 ^d	9.35 ± 0.83 ^b	9.26 ± 0.43 ^{bc}
C18:2	57.37 ± 1.91 ^a	54.62 ± 2.82 ^c	52.64 ± 1.14 ^c	55.07 ± 5.05 ^b	53.73 ± 3.02 ^d
C18:3	20.53 ± 0.44 ^a	19.02 ± 1.03 ^c	16.98 ± 0.13 ^c	20.27 ± 0.90 ^{ab}	18.53 ± 0.46 ^d
C18:4	0.12 ± 0.02 ^a	0.09 ± 0.01 ^{bc}	0.08 ± 0.00 ^{bc}	0.10 ± 0.01 ^b	0.07 ± 0.00 ^c
C20:0	1.06 ± 0.02 ^{cd}	1.14 ± 0.11 ^c	1.24 ± 0.01 ^a	1.20 ± 0.03 ^{ab}	1.11 ± 0.03 ^c
C20:1	0.34 ± 0.00 ^a	0.20 ± 0.00 ^{bc}	0.22 ± 0.03 ^b	0.17 ± 0.01 ^d	0.19 ± 0.01 ^c
C22:0	0.10 ± 0.00 ^a	0.08 ± 0.01 ^c	0.05 ± 0.00 ^c	0.06 ± 0.02 ^b	0.07 ± 0.01 ^c
SFA	10.11 ± 0.78 ^c	15.74 ± 1.02 ^c	20.44 ± 0.88 ^a	13.73 ± 1.28 ^d	16.82 ± 0.94 ^b
USFA	89.89 ± 5.01 ^a	84.26 ± 5.13 ^c	79.56 ± 3.70 ^d	86.27 ± 4.97 ^b	83.01 ± 2.14 ^{cd}

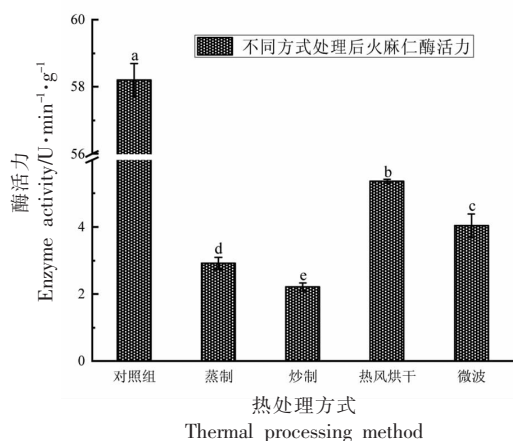
注:字母不同表示同行有显著性差异($P < 0.05$),相同表示无显著性差异($P > 0.05$);SFA表示饱和脂肪酸;USFA表示不饱和脂肪酸。

组具有显著性差异($P < 0.05$)。其中,经过炒制的火麻仁不饱和脂肪酸减少最多(10.33%),其次是微波火麻仁(6.88%),热风烘烤火麻仁减少最小(3.62%),可能是由于炒制时温度最高且不停翻炒增加了火麻仁的机械损伤加剧了不饱和脂肪酸的氧化。由表5可以看出,顺-11-二十碳烯酸含量下降最明显,4种热加工处理后下降了35.29%~50.00%,其次是亚麻酸含量,蒸制、炒制、热风烘烤以及微波的火麻仁分别降低了7.36%,17.29%,1.26%和9.74%。从脂肪酸含量上来看,多不饱和脂肪酸减少最多,主要因为多不饱和脂肪酸分子中与两个双键相连的亚甲基(-CH₂-)上的氢原子比较活泼,双键减弱了与之连接的碳原子与氢原子之间的C-H键,使得氢更易被抽离,导致多不饱和脂肪酸比单不饱和脂肪酸更易氧化^[25]。经过热加工处理,火麻仁中的棕榈酸、硬脂酸以及花生酸呈上升趋势,硬脂酸含量增加最多,蒸制、炒制、热风烘烤以及微波的火麻仁分别是未处理火麻仁含量的2.00、2.79、1.65和2.34倍;棕榈酸和花生酸分别增加了20.33%~64.49%和4.72%~16.98%,二者均在炒制过程中增加的最多,与对照组呈现显著性差异($P < 0.05$)。

2.7 不同热加工方式对火麻仁脂肪氧化的影响

2.7.1 脂肪氧化酶(LOX)活性 LOX是一类含有

非血红素铁、不含硫的过氧化物酶^[26],能够催化不饱和脂肪酸(亚油酸和亚麻酸)的加氧反应,形成具有共轭双键脂肪酸氢过氧化物,产物经裂解酶分解生成酮、醛等物质,产生不良风味,破坏火麻仁中所含的人体必需脂肪酸^[27-28],降低食品的风味和营养价值。不同热加工方式处理的火麻仁的LOX活性如图3所示。由图3可以看出,经过热加工处理,火麻仁的LOX活性均有不同程度降低,这主要由于天然LOX的热稳定性较差,在高温环



注:字母不同表示有显著性差异($P < 0.05$)

图3 不同热加工方式对火麻仁脂肪氧化酶活性的影响

Fig.3 Effects of different thermal processing methods on LOX activity of hemp seed

境下易失去活性。与对照组相比,蒸制、炒制、热风烘烤以及微波处理的火麻仁 LOX 活性由初始的 58.21 U/(min·g) 分别降低至 2.92, 2.21, 5.36, 4.04 U/(min·g), 其中炒制处理的火麻仁 LOX 失活最严重,其活性降低至原来的 3.8%,其次是蒸制和微波处理,其活性分别降低至原来的 5.02% 和 6.94%; 相比较热风烘烤处理的火麻仁 LOX 活性最高,其活性是初始值的 9.21%。以上数据表明,热处理可以有效降低 LOX 活性。

2.7.2 过氧化值 过氧化值作为衡量脂肪氧化的重要指标,反映的是脂肪在氧化初期形成的氢过氧化物的含量,不同热加工方式处理的火麻仁的过氧化值如图 4 所示。由图 4 可以看出,不同热加工处理对火麻仁过氧化值有所提高。对照组未经处理的火麻仁第 0 天时过氧化值为 2.55 mmol/kg, 经过蒸制、炒制、热风烘烤以及微波处理后第 0 天的过氧化值依次增加至 3.08, 3.39, 3.31 mmol/kg 和 3.24 mmol/kg。然而热加工对储藏期间火麻仁的过氧化值有明显抑制的效果,由图 4 可以看出,未处理的火麻仁在第 33 天时过氧化值含量显著增长 ($P < 0.05$), 第 0~36 天过氧化值上升了 25.05%, 蒸制、炒制、热风烘烤和微波处理的火麻仁的过氧化值分别上升了 11.85%, 6.25%, 11.61%, 11.51%, 显著低于对照组过氧化值的上升率 ($P < 0.05$), 与余诚玮等^[29]的研究结果一致。其中,炒制处理后的火麻仁对过氧化值抑制效果明显,可能与热加工处理后脂肪氧化酶活性最小有关。

2.7.3 茴香胺值 茴香胺值是反映脂肪在氧化过程产生的次级氧化产物含量变化的重要指标,由于脂肪在氧化初期生成的氢过氧化物本身性质不稳定,在高温过程中会进一步分解为醇、醛、酮等次级氧化产物^[30]。不同热处理方式对火麻仁茴香胺值的影响如图 5 所示。对照组火麻仁的茴香胺值为 0.798, 经过不同热处理后火麻仁的茴香胺值均有显著的提高 ($P < 0.05$), 其中炒制处理第 0 天时茴香胺值最大为 1.732, 可能是由于炒制过程中用工具反复翻炒造成了火麻仁机械损伤和增加了与空气的接触面积有关;其次是蒸制、微波和热风烘烤处理后的火麻仁, 第 0 天时茴香胺值分别为 1.554, 1.512 和 1.453。由图 5 可知, 在短期储藏 36 d 的过程中, 对照组在第 0 到第 9 天与第 21

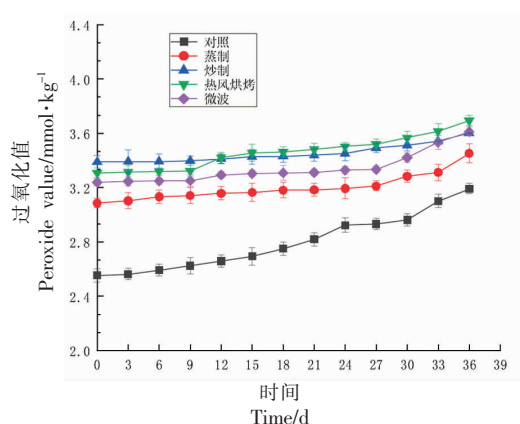


图 4 不同热加工方式对火麻仁贮藏期间过氧化值的影响

Fig.4 Effects of different thermal processing methods on peroxide value of hemp seed

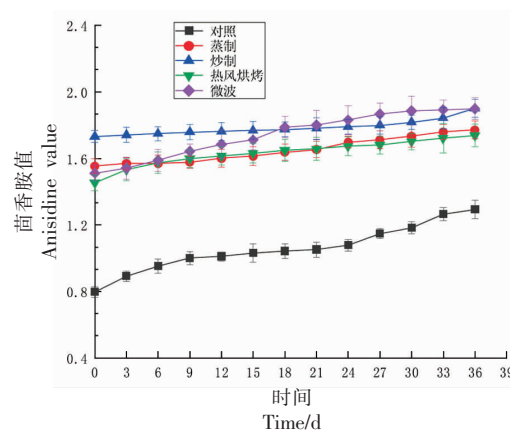


图 5 不同热加工方式对火麻仁茴香胺值的影响

Fig.5 Effects of different thermal processing methods on anisidine value of hemp seed

天到第 36 天的时间里茴香胺值呈显著增长趋势, 增长率分别为 25.44% 和 23.01%; 蒸制、炒制、热风烘烤和微波处理的火麻仁在第 0 天到第 9 天过程中茴香胺值增长率分别为 1.54%, 1.50%, 10.04% 和 8.66%, 第 21 天到第 36 天茴香胺值增长率分别为 7.13%, 6.73%, 8.01% 和 9.80%, 与对照组相比可得出热加工处理均可抑制贮藏过程中早期和晚期的氧化酸败, 其中炒制处理的抑制效果最为明显。

3 结论

在热加工过程中, 4 种加工方式均使火麻仁的生青味逐渐降低, 谷物香味、焦糊味以及油脂酸

败味均逐渐升高。综合考虑热处理后火麻仁的生青味、谷物烤香味、焦糊味以及油脂酸败味的得分,选择蒸制、炒制、热风烘烤以及微波的条件分别是:常压(100℃)蒸制8 min、150℃炒制15 min、130℃热风烘烤40 min以及600 W功率微波4 min。由GC-MS分析结果可知,未经处理的火麻仁挥发性风味物质主要以醇类为主,为27.94%,其次为酯类、酸类、杂环类和酮类,不同加热方式均可使挥发性物质的种类和含量增加,其中炒制处理和热风烘烤可明显增加醛类中的苯乙醛和己醛、杂环类物质中的2-甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2,6-二乙基吡嗪等,使得火麻仁具有浓郁的谷香味与烤香味;其中处理在第1主成分的正半轴,由PCA分析图可知炒制和热风烘烤后的火麻仁具有相似的风味物质,主要与醛类物质、杂环类物质和酯类物质有关,赋予了火麻仁烤香味、谷香味和面包香味。蒸制和微波后火麻仁香味成分一致,存在较高相似性。此外,热加工处理对火麻仁的色泽有不同程度的影响,蒸制处理的火麻仁变化最大, ΔE 大于6,炒制、热风烘烤和微波处理的火麻仁 ΔE 均小于6。

不同热加工方式处理的火麻仁的蛋白质、总糖和灰分含量均呈减少趋势;除了微波处理的火麻仁的脂肪含量增加,蒸制、炒制和热风烘烤的火麻仁均减少;炒制处理的火麻仁的总酚和总黄酮含量降低,另外3种方式处理的火麻仁的含量无显著性变化。火麻仁经过不同热加工方式处理后,其不饱和脂肪酸比例均有不同程度的降低,其中炒制处理后火麻仁花生酸(C16:0)和硬脂酸(C18:0)含量显著上升($P<0.05$),分别是未处理组的1.65和2.79倍;热风烘烤对火麻仁的脂肪酸比例影响最小,不饱和脂肪酸保留率最高,为95.97%。此外,热加工处理可以有效降低火麻仁中的脂肪氧化酶(LOX)活性,其中炒制处理的火麻仁的LOX活性下降最大,热风烘烤的活性下降最小。经过不同热加工处理后,火麻仁过氧化值、茴香胺值都有不同程度的增加,在36 d的贮藏期内均能抑制过氧化值和茴香胺值的增长率,保证了火麻仁在贮藏期间的优良品质。

参 考 文 献

- [1] ZHOU Y F, WANG S S, LOU H X, et al. Chemical constituents of hemp (*Cannabis sativa* L.) seed with potential anti-neuroinflammatory activity[J]. *Phytochemistry Letters*, 2018, 23(2): 57-61.
- [2] SIMOPOULOS A P, LEAF A, JR N S. Workshop statement on the essentiality of and recommended dietary intakes for omega-6 and omega-3 fatty acids [J]. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, 2000, 63(3): 119-121.
- [3] 魏月媛, 李理. 火麻仁的功效及食用安全性研究进展[J]. *食品工业*, 2015, 36(7): 256-260.
WEI Y Y, LI L. Advance on functional ingredients and safety of hemp seed food[J]. *The Food Industry*, 2015, 36(7): 256-260.
- [4] 许春芳, 肖俊勇, 郑明明, 等. 火麻籽油中酚类化合物的检测及抗氧化活性研究[J]. *中国油料作物学报*, 2018, 40(4): 585-591.
XU C F, XIAO J Y, ZHENG M M, et al. Determination of phenolic compounds in hemp seed oil and their antioxidant activities[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(4): 585-591.
- [5] VAZQUEZ-ARAJO L, VERDU A, NAVARRO P, et al. Changes in volatile compounds and sensory quality during toasting of Spanish almonds[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, 44(11): 2225-2233.
- [6] HOU F, SHI X H, LI Q, et al. Nutritional quality of chinese chestnut and effect of cooking on its bioactive compounds and antioxidant activity[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2016, 40(6): 1383-1390.
- [7] JANG H L, PARK S Y, NAM J S. The effects of heat treatment on the nutritional composition and antioxidant properties of hempseed (*Cannabis sativa* L.) [J]. *Journal of the Korean Society of Food ence and Nutrition*, 2018, 47(9): 885-894.
- [8] GOMES C L, PFLANZER S B, CRUZ A G, et al. Sensory descriptive profiling and consumer preferences of beef strip loin steaks[J]. *Food Research International*, 2014, 59(1): 76-84.
- [9] SINGH K P, MISHRA A, MISHRA H N. Fuzzy analysis of sensory attributes of bread prepared from millet-based composite flours[J]. *LWT-Food Science*

- and Technology, 2012, 48(2): 276–282.
- [10] DEFERNE J L, PATE D W. Hemp seed oil: A source of valuable essential fatty acids[J]. Journal of the International Hemp Association, 1996, 3(1): 1–7.
- [11] LI Z, GAO Y, LIN C, et al. Suppression of LOX activity enhanced seed vigour and longevity of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seeds during storage[J]. Conservation Physiology, 2018, 6(1): 47–56.
- [12] BENZIE I F, STRAIN J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay[J]. Analytical Biochemistry, 1996, 239(1): 70–76.
- [13] 张垚, 张文刚, 党斌, 等. 炒制时间及炒制方式对青稞挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 271–277.
- ZHANG Y, ZHANG W G, DANG B, et al. Effects of stir-frying time and method on volatile flavor compounds in highland barley[J]. Food Science, 2020, 41(14): 271–277.
- [14] SILVA F M, SILVA C L M. Colour changes in thermally processed cupuacu (*Theobroma grandiflorum*) puree: Critical times and kinetics modelling[J]. International Journal of Food Science & Technology, 1999, 34(1): 87–94.
- [15] 周星杰, 余少璟, 陈凯, 等. 挤压糊化处理对苦荞粉理化性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 101–106.
- ZHOU X J, YU S J, CHEN K, et al. Effect of gelatinization by extrusion on physicochemical properties of tartary buckwheat flour[J]. Food Science, 2018, 39(11): 101–106.
- [16] 申瑞玲, 王珍, 董吉林. 不同热处理对燕麦全谷营养品质及消化性的影响[J]. 食品工业, 2016, 37(7): 188–191.
- SHEN R L, WANG Z, DONG J L. Effects of heat treatment on nutritional quality of wholegrain oat[J]. The Food Industry, 2016, 37(7): 188–191.
- [17] GONCALVES B, BORGES O, COSTA H S, et al. Metabolite composition of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) upon cooking: Proximate analysis, fibre, organic acids and phenolics[J]. Food Chemistry, 2018, 122(1): 154–160.
- [18] 施显赫. 板栗加工过程中营养成分的变化及香气成分的形成机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- SHI X H. The nutritional variation and volatile formation of Chinese chestnut during thermal processing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [19] LI Q, SHI X H, ZHAO Q J, et al. Effect of cooking methods on nutritional quality and volatile compounds of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Blume)[J]. Food Chemistry, 2016, 201(15): 80–86.
- [20] 董吉林, 董桂梅, 景新俊, 等. 膨化萌动青稞粉油茶制备及其品质评价[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(24): 153–158.
- DONG J L, DONG J M, JING X J, et al. Preparation and quality evaluation of puffed and germinated green barley fried flour[J]. Food Research and Development, 2019, 40(24): 153–158.
- [21] ZHU F. Effect of processing on quality attributes of chestnut[J]. Food & Bioprocess Technology, 2016, 9(9): 1429–1443.
- [22] BLAAK E E, CANFORA E E, THEIS S, et al. Short chain fatty acids in human gut and metabolic health[J]. Beneficial Microbes, 2020, 11(5): 411–455.
- [23] 廖丽萍, 肖爱平, 冷鹏, 等. 火麻仁冷榨油脂脂肪酸的 GC-MS 分析[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(12): 42–44.
- LIAO L P, XIAO A P, LENG J, et al. GC-MS analysis of fatty acids of hemp seed oil got by cold pressing method[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(12): 42–44.
- [24] TEH S S, BIRCH J. Physicochemical and quality characteristics of cold-pressed hemp, flax and canola seed oils[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2013, 30(1): 26–31.
- [25] 李金林, 万亮, 陈春艳, 等. ω -3 LCPUFAs 模拟热加工鱼肉脂肪氧化形成风味物质的研究[J]. 中国食品学报, 2020, 20(6): 95–105.
- LI J L, WANG L, CHEN C Y, et al. Studies on formation of flavor compounds in fish meat during heat process based on oxidation models of ω -3 lcpufas[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(6): 95–105.
- [26] BRASH A R. Lipoxygenases: Occurrence, functions, catalysis, and acquisition of substrate[J]. Journal of Biological Chemistry, 1999, 274(34): 23679–23682.
- [27] SESSA D J, RACKIS J J. Lipid-derived flavors of legume protein products[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1977, 54(10): 468–473.

- [28] MOREIRA M A, TAVARES S R, RAMOS V, et al. Hexanal production and TBA number are reduced in soybean seeds lacking lipoxygenase isozymes 2 and 3[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 1993, 41(1): 103–106.
- [29] 余诚玮, 胡蓉, 付泽建, 等. 微波处理对米糠油品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(1): 141–146.
- YU C W, HU R, FU Z J, et al. Effect of microwave treatment on the quality of rice bran oil[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(1): 141–146.
- [30] 张雨, 章丹丹, 陈婧婧, 等. 猪脂肪控制氧化条件优化研究[J]. *肉类工业*, 2019(7): 43–46.
- ZHANG Y, ZHANG D D, CHEN J J, et al. Study on optimization of condition for controlling oxidation of pig fat[J]. *Meat Industry*, 2019(7): 43–46.

Effects of Thermal Processing on the Flavor and Quality of Hemp Seed

Lai Huimin, Wang Shilian, Ruan Zheng, Li Biansheng*

(College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract Four thermal processing methods (normal pressure steaming, stir-frying, hot-air baking and microwave) were used to process Yunnan Dayao hemp seed. Taking the aroma of hemp seed as an indicator, explored the effects of four thermal processing methods on the composition of volatile flavor compounds, color, nutrients, and storage stability under the optimal aroma processing conditions. The results showed that the optimal processing conditions for the four thermal processing methods were respectively 8 minutes' atmospheric steaming at 100 °C, 15 minutes' frying at 150 °C, 40 minutes' hot air baking at 130 °C and 4 minutes' power microwave of 600 W. Untreated hemp seeds contained more alcohols such as 2–3 butanediol (10.21%) and 1–hexanol (7.92%). Four thermal processing methods could increase the types and content of volatile flavor substances, among which stir-frying treatment and hot-air baking could significantly increase the content of aldehydes and heterocyclic substances. There were significant differences in color, protein, total sugar, ash, fat, total phenol, total flavonoid content and unsaturated fatty acid ratio of hemp seed with different thermal processing methods being tried ($P < 0.05$), and after applying the microwave treatment proteins there was a higher level of content remaining such as total phenols and total flavonoids. Steaming and hot-air baking could help retain a higher proportion of unsaturated fatty acids, of which the retention rate of linolenic acid was the highest, 92.64% and 98.73%, respectively. Fire treated with different heat processing hemp seed had a significant inhibitory effect on lipoxygenase ($P < 0.05$), and could inhibit fat oxidation during short-term storage. The above-mentioned research on physical and chemical properties would make a good reference for the deep processing and utilization of hemp seed.

Keywords hemp seed; thermal processing method; volatile flavor substances; relative fatty acid content; lipoxygenase