热处理对亚麻籽粕关键品质及营养组分的影响

王晓彤[1,2]，杨 波[*1]，杨 光[1]，周盛敏[2]

（1. 上海理工大学 医疗器械与食品学院，上海 200093；2. 丰益(上海)生物技术研发中心有限公司，上海 200137）

摘要：为了探究热处理对亚麻籽粕品质的影响，作者采用不同温度对亚麻籽进行预焙炒并压榨得到亚麻籽粕，利用液相色谱和气相色谱仪等对其营养成分、热特性及挥发性成分进行分析。结果表明，热处理温度在 150 ℃以内仅引起亚麻籽粕中游离氨基酸和木酚素的小幅度减小，同时促进亚麻籽粕中可溶性膳食纤维、总酚、总黄酮质量分数及醛类、酮类化合物种类增多。热处理温度达 180 ℃会引起亚麻籽粕中酮类及杂环类等低阈值物质增多，同时也会造成总游离氨基酸、木酚素、总酚和总黄酮等有益成分的显著降低，降低了亚麻籽粕的营养价值。

关键词：热处理；亚麻籽粕；营养成分；生物活性成分；挥发性成分

中图分类号：TS 218　**文章编号：**1673-1689(2023)07-0095-09　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.07.011

Effects of Heat Treatment on Key Quality and Nutritional Components of Flaxseed Meal

WANG Xiaotong[1,2]，*YANG Bo*[*1]，*YANG Guang*[1]，*ZHOU Shengmin*[2]

(1. School of Medical Instrument and Food engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Wilmar (Shanghai) Biotechnology Research and Development Center Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: To explore the effect of heat treatment on the quality of flaxseed meal, flaxseed meal was obtained by pre-roasting and pressing flaxseed at different temperatures. The nutritional composition, thermal characteristics and volatile components of flaxseed meal were analyzed by liquid chromatography and gas chromatography. The results showed that heat treatment below 150 ℃ caused only a slight decrease in the contents of free amino acids and lignan in flaxseed meal, and promoted the contents of dietary soluble fiber, total phenol, total flavonoids and the types of aldehydes and ketone compounds in flaxseed meal. At 180 ℃, the low threshold substances such as ketones and heterocyclic substances increase, and the beneficial components such as total free amino acids, lignan, total phenols and total flavonoids decrease significantly, which reduces the nutritional value of flaxseed meal.

Keywords: heat treatment, flaxseed meal, nutrient composition, bioactive ingredients, volatile components

收稿日期：2021-08-28

基金项目：上海市人才发展资金资助项目(2018126)；上海市青年科技启明星计划资助项目(19QB1400200)。

* **通信作者：**杨 波(1968—)，女，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事食品生物技术及功能性食品开发研究。

E-mail：yangbo6899@126.com

亚麻为一年生草本植物,原产于中亚和地中海地区,目前有 50 多个国家种植[1]。2012—2017 年中国亚麻籽产量年均 38~40 万吨[2]。亚麻籽中含有质量分数 34%~47%的脂肪、20%~35%的膳食纤维[3]、10%~31%的蛋白质[4]。亚麻籽中木酚素(SDG)是极性化合物,大多存在于亚麻籽壳或其饼粕中[5],亚麻中 SDG 含量远高于芝麻和豆类[6],具有降低胆固醇、抗氧化、抗癌和调节激素平衡等功能。此外亚麻籽中还含有多酚、黄酮等生物活性物质[7]。亚麻籽粕是亚麻籽经过加工后完全或部分脱脂的副产物,蛋白质及一些活性物质大多留在亚麻籽粕中,因此含有众多有益成分的亚麻籽粕值得被高值化利用。但是我国亚麻籽主要用于制油,产生的大量亚麻籽粕多用作饲料、肥料或者丢弃,未得到很好的开发利用,造成资源浪费。

热处理是芝麻、花生和豆类等油料作物加工的重要步骤,可导致物理结构、化学结构和风味变化。经过预热处理可改善油脂及其饼粕的风味,有利于蛋白质变性及多酚类物质的增加[8-9]。温贺等分析冷榨与热榨紫苏粕营养成分时发现,热榨紫苏粕比冷榨紫苏粕蛋白质及灰分高,粗脂肪、氨基酸含量比冷榨紫苏粕低[10]。Babiker 等研究焙烤对大麻籽抗氧化性能和多酚影响时发现,加热温度在 160 ℃内可提高大麻籽的蛋白质含量和出油率,且经过热处理增加了其总酚、总黄酮含量[11]。李翠翠等研究炒籽温度对葵花籽酱挥发性风味成分的影响中发现,未焙炒样品主要风味成分为正己醇和乙酸,140 ℃焙炒的样品中主要含醛类物质,具有油脂味,170 ℃和200 ℃焙炒的样品主要含吡嗪类物质,具有焙烤风味[12]。

目前大多数研究都关注加工工艺对亚麻油品质的影响[13-14],对亚麻籽粕关注的较少。因此,作者主要研究热处理对亚麻籽粕品质的影响,了解加工过程中亚麻籽粕营养成分、热特性及挥发性物质的变化,为提升亚麻籽粕的附加值,拓展其在食品领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

亚麻籽(哈萨克斯坦):由丰益(上海)生物技术研发中心有限公司提供;石油醚(沸点 30~60 ℃)、硫酸钾、五水硫酸铜、碳酸钠、硝酸铝、亚硝酸钠、正己烷、氢氧化钠、无水乙醇、福林酚、没食子酸标准品(纯度≥90%)、芦丁(纯度 95%)、氨基酸混合标准溶液:上海国药集团化学试剂有限公司产品;木酚素标准品(纯度>99%):上海阿拉丁生化科技股份有限公司产品。

Gene café 小型家用咖啡烘焙机:广东大正咖啡集团有限公司产品;FX7 螺旋压榨机:广州旭众食品机械有限公司产品;DIN EN 研磨机:艾卡(广州)仪器设备有限公司产品;ANKOM XT4 全自动脂肪提取仪:美国 ANKOM 公司产品;FOSS Kjeltec 8400 型自动凯氏定氮仪:上海展仪仪器设备有限公司产品;LA8080 氨基酸分析仪:日立高新技术公司产品;Agilent 1200 型液相色谱仪、Agilent 7890B-5977MSD 气质联用仪:美国安捷伦科技有限公司产品;UV-1800 紫外-可见分光光度计:日本岛津公司产品;Q2000 差式扫描量热仪:美国 TA 公司产品。

1.2 方法

1.2.1 热处理及亚麻籽粕制备方法 称取经过挑选的亚麻籽 250 g,将其置于滚筒咖啡机中,分别在 90、120、150、180 ℃下翻炒 30 min,取出备用。亚麻籽粕的制取:利用压榨机榨取未加热及加热后的亚麻籽,所得物质即为亚麻籽粕。实验以未进行热处理的冷榨亚麻籽粕为对照。

1.2.2 基本营养成分的测定 水分测定:参照 GB 5009.3—2016 中直接干燥法测定[15];脂肪测定:参照 GB 5009.6—2016 中索氏抽提法测定[16];蛋白质测定:参照 GB 5009.5—2016 中凯氏定氮法测定[17];膳食纤维测定:参考 GB 5009.88—2014 方法中的酶质量法测定[18]。

1.2.3 游离氨基酸的测定 分别称取 20 g 样品于烧杯中,按 1 g:4 mL 添加正己烷并搅拌 2 h 后进行抽滤,重复提取 1 次,待滤渣中溶剂挥发完全,备用。参考 GB/T 18246—2019 中的方法测定氨基酸[19]。色谱条件:色谱柱 ZORBAX Eclipse XDB-C_{18}(60 mm×4.6 mm);反应温度:150 ℃;流量:0.4 mL/min;流动相:柠檬酸锂缓冲溶液;衍生试剂:茚三酮;进样量:20 μL;外标法定量。

1.2.4 游离糖的测定 称取 100 mg 样品,加 30 mL 水,超声 15 min 后离心并转入容量瓶中,加入 1 mL 0.01 g/mL 柠檬酸水溶液,定容至 100 mL。固相萃取柱依次用 5 mL 甲醇和 10 mL 水活化,样品液润洗,待溶液留至与硅胶面齐平后,再加入样品溶液 10 mL,收集后上机。色谱条件:色谱柱Carbohydrate1

(150 mm×4.6 mm);流动相:氢氧化钠-醋酸钠水溶液;流量:1 mL/min;柱温:30 ℃;进样量:20 μL;外标法定量。

1.2.5 SDG 的测定 参考付亚琦的方法[20]略微修改。称取 1.00 g 样品于 50 mL 离心管中,加入 15 mL 体积分数 60%乙醇,超声 15 min,6 000 r/min 离心 5 min,转移上清液并重复提取 3 次,体积分数 60%乙醇定容至 50 mL,取 1.00 mL 提取液到 15 mL 离心管,加 50 μL 0.2 mol/L 氢氧化钠溶液,60 ℃反应 20 min,离心 5 min,有机相膜过滤并上机。SDG 标准曲线:y=6.746 5x+1.052 8,r^2=0.999 95,线性范围为 1~500 μg/g。色谱柱:ZORBAX Eclipse Plus-C_{18} (4.6 mm×250 mm×5 μm);流量:0.7 mL/min;柱温箱:25 ℃;检测波长:280 nm;流动相:分别为体积分数 1%的甲酸溶液和体积分数 1%的甲醇溶液;进样体积:10 μL;外标法定量。

1.2.6 总酚及总黄酮的测定 参考刘仙俊等的方法[21]稍微修改。提取液制备:准确称取 1.00 g 样品于离心管中,加入 10 mL 体积分数 70%的乙醇超声提取 2 h,5 000 r/min 离心 5 min,收集上清液,重复上述操作提取 1 h,合并两次提取的上清液定容至 25 mL,备用。总酚标准曲线为:y=114.74x+0.024 4,r^2=0.999 8,线性范围为 1~6 μg/mL。总黄酮标准曲线为:y=11.11x-0.003 2,r^2=0.999 5,线性范围为 8~80 μg/mL。

1.2.7 热特性测定 称取样品 3~5 mg,按质量比 1∶2 加超纯水,置于 DSC 坩埚中,压盖密封。扫描温度范围为 15~140 ℃,升温速率为 5 ℃/min。

1.2.8 挥发性成分测定 参考曾著莉等的方法进行挥发性成分测定[22]。色谱条件:色谱柱为 HP-5MS (60 m×0.25 mm×0.25 μm);载气:高纯氦气;流量 1.0 mL/min;进样温度:250 ℃,不分流;进样量:1 μL;离子源温度:240 ℃;电子能量:70 eV。通过比较 NIST14.L 谱库的质谱数据,只记录匹配度≥800 的结果。

1.2.9 数据统计分析 挥发性成分测定实验设 2 组重复,其余均设 3 组重复。采用 SPSS 25 软件进行统计学分析。采用 Origin 2021 软件绘图,数据结果均以平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 热处理对亚麻籽粕中基本营养成分的影响

亚麻籽粕营养丰富、全面,能够改善血糖上升水平、肥胖和其他慢性疾病,因此在食品中应用具有很大潜力。亚麻籽粕的基本营养成分也因品种、生长环境和加工工艺的不同而有所不同。

由图 1 可知,随着热处理温度的增加,亚麻籽粕中水分逐步降低,温度升高有利于水分从亚麻籽粕中挥发,从而降低水分质量分数。脂肪质量分数也随着温度升高逐步降低,与对照(冷榨亚麻籽粕)相比,经 180 ℃处理的亚麻籽粕中脂肪质量分数从 23.2%下降到 17.3%,这是因为高温会对细胞壁结构造成不同程度的破坏,使细胞间距变大、细胞壁变薄,压榨过程中更多的油脂从细胞中挤出,从而降低亚麻籽粕中的残油[23]。亚麻籽粕中蛋白质的质量分数随着温度的升高而逐步增加,这是因为亚麻籽粕中脂肪和水的质量分数减少,从而使蛋白质的质量分数得到提高。

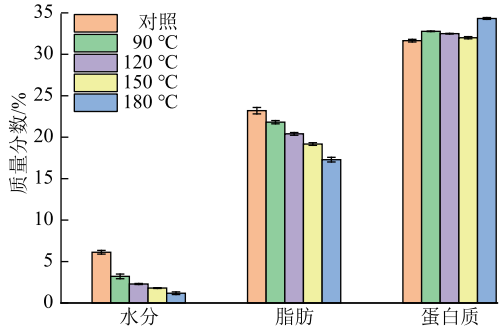


图 1 热处理对亚麻籽粕中基本营养成分的影响

Fig. 1 Effect of heat treatment on basic nutrients in flaxseed meal

2.2 热处理对亚麻籽粕中膳食纤维的影响

由图 2 可知,经超过 90 ℃处理后,不溶性膳食纤维质量分数呈下降趋势,可溶性膳食纤维质量分数随着温度的上升逐渐呈上升趋势,与对照相比(质量分数 11.33%),150 ℃处理的亚麻籽粕增加了 36.92%,180 ℃处理的样品增加了 83.83%,这是因为在焙炒及压榨过程中,物料受到高温作用,以及强烈的剪切力和高压作用,会使物料的多糖糖苷键迅速裂解,使物料中的大分子物质转化为小分子化合物[24],从而提高了可溶性膳食纤维质量分数。从总膳食纤维来看,与对照(质量分数 44.94%)相比,热处理温度在 150 ℃以内的亚麻籽粕中总膳食纤维略微上升,180 ℃处理的亚麻籽粕有明显增大。

2.3 热处理对亚麻籽粕中游离氨基酸的影响

游离氨基酸是热处理过程中产生挥发性物质的前体物质。图 3 为热处理对亚麻籽粕中总游离氨

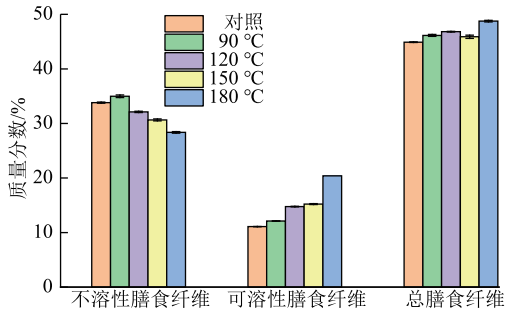


图 2　热处理对亚麻籽粕中膳食纤维质量分数的影响

Fig. 2　Effect of heat treatment on the mass fraction of dietary fiber in flaxseed meal

基酸质量分数的影响。不同的热处理温度会引起亚麻籽粕中总游离氨基酸不同程度的损失。与对照相比（17 种游离氨基酸总质量分数 4 084.33 mg/kg），150 ℃处理的亚麻籽粕中总游离氨基酸质量分数下降到 2 873.09 mg/kg，损失了 29.66%。180 ℃处理的亚麻籽粕中总游离氨基酸质量分数为 778.05 mg/kg，与对照相比，损失了 80.95%。

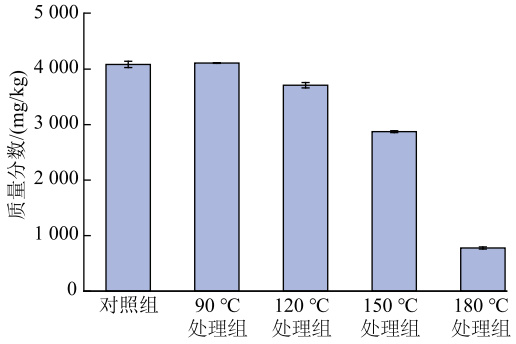


图 3　热处理对亚麻籽粕中总游离氨基酸质量分数的影响

Fig. 3　Effect of heat treatment on the mass fraction of total free amino acid in flaxseed meal

由图 4 可知，对照中主要的游离氨基酸为谷氨酸、精氨酸、苏氨酸和天冬氨酸，其中谷氨酸质量分数最高，为 961.88 mg/kg，其次是精氨酸、苏氨酸和天冬氨酸，质量分数分别为 661.26、471.21、407.98 mg/kg。与对照相比，150 ℃处理的亚麻籽粕中谷氨酸质量分数降低了 26.33%，180 ℃处理组中谷氨酸质量分数降低了 91.60%。与对照相比，150 ℃和 180 ℃处理的亚麻籽粕中精氨酸质量分数分别降低了 36.60%和 67.41%。苏氨酸在 90 ℃处理后就开始出现明显变化，150 ℃时质量分数降低了 85.82%。天冬氨酸在 150 ℃处理时质量分数仅降低了 12.72%，但 180 ℃时，天冬氨酸质量分数发生大幅度降低(降低 74.63%)。这些氨基酸在加热过程中会发生一系列的美拉德反应，从而使游离氨基酸质量分数降低，形成挥发性风味物质及褐色大分子物质等，最终使亚麻籽粕具有特殊的风味和颜色[25-26]。

2.4　热处理对亚麻籽粕中游离糖的影响

游离糖也是挥发性物质的前体物质，会和氨基酸在焙炒过程中发生美拉德反应，质量分数也会随之改变。由表 1 可知，对照中含有少量的蔗糖和葡萄糖，果糖、麦芽糖未检出。150 ℃及以下焙炒亚麻籽粕中总游离糖质量分数未出现显著差异。与对照相比，180 ℃焙炒的亚麻籽粕中总游离糖质量分数下降了 46.22%。与对照相比，热处理温度在 150 ℃以内的亚麻籽粕中蔗糖质量分数未出现明显差异，但 180 ℃处理组较对照降低了 43.46%。随着焙炒温度的增加，葡萄糖质量分数呈先上升后下降趋势，90 ℃处理组中葡萄糖质量分数最高，150 ℃处理组中葡萄糖质量分数较对照降低了 27.27%，而 180 ℃

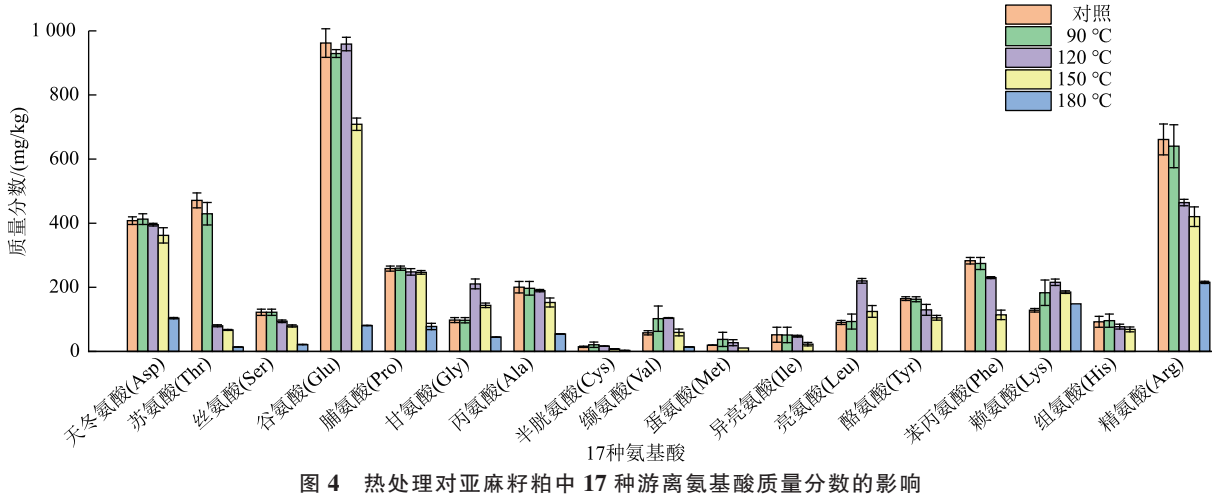


图 4　热处理对亚麻籽粕中 17 种游离氨基酸质量分数的影响

Fig. 4　Effects of heat treatment on the mass fraction of 17 kinds of free amino acids in flaxseed meal

焙炒时葡萄糖未检出。刘晓君认为在加热过程中蔗糖水解转化为葡萄糖和果糖,但加热过程中葡萄糖和果糖的增加量又未匹配蔗糖的减少量,从而判断其在加热时也有消耗[25]。作者发现,亚麻籽粕中游离葡萄糖质量分数在 150 ℃以后显著降低,说明过高温度会加大葡萄糖的消耗。

表 1　热处理对亚麻籽粕中游离糖的影响

Table 1　Effect of heat treatment on free sugars in flaxseed meal

样品	质量分数/(g/hg)				
	蔗糖	葡萄糖	果糖	麦芽糖	总游离糖
对照	2.14±0.11^{b}	0.11±0.01^{c}	—	—	2.25±0.10^{b}
90 ℃处理亚麻籽粕	2.08±0.10^{b}	0.17±0.01^{d}	—	—	2.25±0.09^{b}
120 ℃处理亚麻籽粕	2.08±0.10^{b}	0.15±0.01^{d}	—	—	2.23±0.10^{b}
150 ℃处理亚麻籽粕	2.06±0.10^{b}	0.08±0.01^{b}	—	—	2.13±0.10^{b}
180 ℃处理亚麻籽粕	1.21±0.06^{a}	—	—	—	1.21±0.06^{a}

注:表中不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

2.5　热处理对亚麻籽粕中生物活性物质的影响

SDG 是一种与人体雌激素生理活性相似的植物激素,可作为功能因子添加到保健食品中,亚麻籽是其主要来源之一。亚麻木酚素的结构上存在很多羟基,导致其脂溶性较差,一般不随油脂的去除而减少,大多残留在亚麻籽粕中[27]。亚麻籽中还含有较多的酚类化合物,分为简单酚酸类和较复杂的木酚素类,这些化合物通常具有较强的抗氧化活性[28]。黄酮类化合物常以糖苷的形式存在,也有游离体,多存在于植物体内,具有多种营养及药理学功能[29]。由图 5 可知,热处理温度在 150 ℃以内可以最大程度保留生物活性物质,热处理温度达 180 ℃时,生物活性物质明显降低。

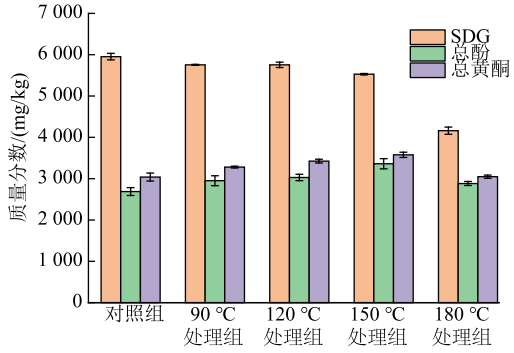


图 5　热处理对亚麻籽粕中生物活性物质的影响

Fig. 5　Effect of heat treatment on the mass fraction of bioactive substances in flaxseed meal

当热处理温度低于 150 ℃时对亚麻籽粕中 SDG 质量分数影响较小,热处理温度为 150 ℃时 SDG 质量分数与对照比只降低了 7.14%,当 180 ℃时,亚麻籽粕中 SDG 的质量分数与对照比降低了 30.13%,原因可能是 SDG 在亚麻籽中以大分子聚合物形式存在,一定加热条件下,结构相对稳定,但温度过高可能使 SDG 结构遭到破坏,而使其质量分数下降[28]。

与对照相比(总酚 2 689.14 mg/kg),热处理温度为 90~120 ℃的亚麻籽粕中,总酚质量分数未有明显变化,当温度达 150 ℃时,总酚质量分数出现明显上升(较对照组增加了 24.96%),180 ℃时总酚质量分数较 150 ℃又有所下降,同时与对照相比无显著差异。有研究认为适当加热会使亚麻籽粕中细胞结构破坏,促进酚类物质的释放,从而使其质量分数增加,温度过高会使酚类物质结构被破坏,从而使总酚质量分数降低[30]。

亚麻籽粕中总黄酮质量分数随着热处理温度的增加呈先上升后下降的趋势,150 ℃处理时,总黄酮质量分数最高,为 3 577.61 mg/kg,较对照(3 038.10 mg/kg)升高了 17.76%。其升高原因可能是一定的加热温度能激活或诱导黄酮化合物合成一些酶系,从而促进黄酮物质生成,但超过一定温度后,合成黄酮相关的酶被钝化,黄酮化合物也在高温下被逐渐降解,导致质量分数下降[31]。

2.6　热处理对亚麻籽粕热特性的影响

从图 6 可以看出,随着热处理温度的增加,所有亚麻籽粕在 80~115 ℃出现吸热峰,并伴随着能量变化,热处理温度在 120 ℃及以下的亚麻籽粕 DSC 曲线趋势基本一致,超过 150 ℃后,其 DSC 曲线趋于平缓。随着温度的升高,亚麻籽粕的起始温度T_o和热吸收峰温度 T_p 呈先上升再下降的趋势,变化范围分别为 86.35~92.72 ℃、101.84~105.93 ℃,终

止温度 T_c 呈下降趋势,其中对照的 T_c 为 114.71 ℃。150 ℃处理组的 T_c 下降幅度较小，为 111.97 ℃,而 180 ℃处理组的 T_c 为 105.97 ℃。随着热处理温度的增加，热焓值 ΔH 逐渐降低，其中对照的 ΔH 为 5.63 J/g,150 ℃处理组的 ΔH 为 3.99 J/g，下降了 29.13%,而 180 ℃处理组的 ΔH 为 0.51 J/g,较对照下降了 90.94%,可能是因为冷榨亚麻籽粕中蛋白质体包裹在淀粉体周围阻止了水分的进入,因此糊化需要更多的能量来破坏这一结合体,而随着热处理温度的增加,蛋白质结构被破坏,所以需要更少的能量。

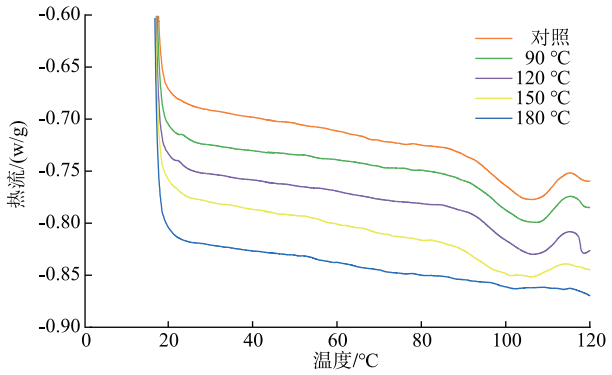


图 6　不同热处理温度下的亚麻籽粕 DSC 曲线

Fig. 6　DSC curves of flaxseed meal at different heat treatment temperatures

2.7　热处理对亚麻籽粕挥发性成分的影响

油料等作物在焙炒时,蛋白质、糖类和油脂等物质在高温下发生一系列化学反应,产生不同类型和香味的挥发性物质,这些物质赋予了油料特殊的香气[32]。由图 7 可知,对照中醇类和烷烃类物质质量分数较高,分别为 18.34%和 26.88%,焙炒后的亚麻籽粕中醇类和烷烃类物质减少,可能醇类和烷烃类物质是存在于亚麻籽粕中的固有物质。150 ℃焙炒亚麻籽粕中醛类和芳香族类物质比对照组高,分别为 8.17%和 9.13%。180 ℃焙炒亚麻籽粕中酮类物质及杂环类物质较对照和 150 ℃焙炒亚麻籽粕明显增多,其质量分数分别为 8.82%和30.32%。

由表 2 可以看出,冷榨亚麻籽粕中主要醇类物质为乙醇和 1-己醇,经过热处理后,亚麻籽粕中醇类物质明显降低,可能是温度升高使这一类物质更容易在压榨过程中被油脂带出或者转化成别的物质。这与刘国琴等研究的热榨与冷榨亚麻油风味物质中醇类物质变化相似[33]。

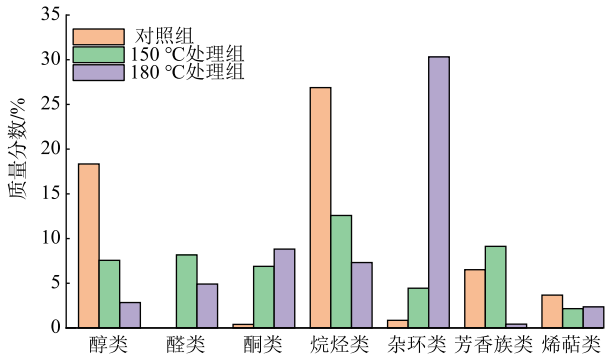


图 7　热处理对亚麻籽粕中挥发性成分的影响

Fig. 7　Effect of heat treatment on the mass fraction of volatile components in flaxseed meal

烷烃类化合物主要来源于脂肪酸烷氧自由基的均裂[34],3 种工艺条件下,分别检测出 7、3、4 种烷烃类物质,3 种工艺中都存在十一烷、十二烷和十三烷,其质量分数也随温度的增加逐渐减小。由于热处理温度升高使脂肪酸氧化程度增大,烷烃类物质质量分数和种类都有所下降,但是烷烃类物质的阈值很高,对风味贡献不大。

冷榨亚麻籽粕中未检测出醛类物质,150 ℃焙炒亚麻籽粕中己醛质量分数最高(5.89%),其次是壬醛(1.32%)。己醛是亚油酸自动氧化产生的 13-氢过氧化物裂解后生成的物质[35],具有油脂味和花香味。己醛随着温度的升高而降低,这可能是由于多不饱和脂肪酸在高温时受热氧化降解产生大量其他种类的挥发性物质。壬醛也是油酸氧化的产物,具有花生味和香草味[35]。

芳香族化合物在冷榨和 150 ℃处理的亚麻籽粕中质量分数较高,其中对二甲苯和邻二甲苯质量分数较高,热处理温度达 180 ℃时,芳香族化合物质量分数降低。烯萜类物质一般具有松木味和青草味，在亚麻籽粕总挥发性物质中质量分数较低,经过热处理后其质量分数更少[35]。

酮类化合物可能是通过不饱和脂肪酸的热氧化或降解及氨基酸降解产生[36],一般具有果木味、脂肪味和焦燃味等[35]。由表 2 可以看出,3 种工艺制得的亚麻籽粕中分别鉴定出 1、7、5 种酮类物质,其中经热处理的亚麻籽粕均有 1-甲氧基-2-丙酮、2,3-戊二酮、3,5-辛二烯-2-酮和 2-庚酮，说明热处理有助于酮类物质的生成。

杂环类物质主要包括吡嗪、呋喃、吡咯,是美拉德反应的产物。其中冷榨亚麻籽粕中杂环类物质质

表 2　亚麻籽粕中挥发性成分分析结果

Table 2　Analysis of volatile components in flaxseed meal

挥发性成分		质量分数/%		
		冷榨亚麻籽粕	150 ℃焙炒亚麻籽粕	180 ℃焙炒亚麻籽粕
醇类	乙醇	6.53±0.83	—	—
	1-戊醇	—	1.12±0.08	0.34±0.01
	1-己醇	10.47±1.09	4.17±0.12	1.15±0.05
	(*E*)-3-己烯-1-醇	0.86±0.04	1.01±0.04	0.64±0.01
	4-甲基-2-己醇	0.48±0.01	—	—
	苯甲醇	—	0.56±0.02	—
	1-戊烯-3-醇	—	—	0.70±0.03
	苯乙醇	—	0.32±0.02	—
	1-辛醇	—	0.37±0.01	—
醛类	3-甲基-丁醛	—	0.36±0.04	—
	2-甲基-丁醛	—	—	0.43±0.07
	己醛	—	5.89±0.12	1.66±0.09
	糠醛	—	—	0.46±0.04
	(*E*)-2-己烯醛	—	0.16±0.05	—
	苯甲醛	—	—	0.23±0.01
	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛	—	0.44±0.07	1.22±0.05
	壬醛	—	1.32±0.01	0.92±0.06
酮类	1-甲氧基-2-丙酮	—	3.65±0.12	1.38±0.14
	2,3-戊二酮	—	0.41±0.04	2.39±0.08
	1-(2-呋喃基)-1-丙酮	—	0.43±0.06	—
	(*Z*)-6-辛烯-2-酮	—	—	3.76±0.07
	5-乙基二氢-2(3H)-呋喃酮	0.40±0.08	0.31±0.03	—
	3,5-辛二烯-2-酮	—	1.27±0.04	1.02±0.03
	2-庚酮	—	0.59±0.02	0.27±0.03
	2-环己烯-1-酮	—	0.23±0.02	—
烷烃类	辛烷	1.12±0.05	—	—
	1-丁基吡咯烷	—	—	0.75±0.21
	癸烷	3.79±0.09	—	—
	2,2,4,4-四甲基辛烷	0.38±0.06	—	—
	十一烷	6.83±0.18	4.34±0.32	2.83±0.16
	3-甲基十一烷	1.21±0.10	—	—
	十二烷	8.90±1.34	5.53±0.19	2.51±0.09
	十三烷	4.65±0.56	2.71±0.16	1.22±0.04
烯萜类	胡椒稀	—	0.20±0.06	—
	α-蒎烯	0.44±0.00	0.43±0.05	0.21±0.02
	1-乙基-环己烯	—	—	0.97±0.01
	D-柠檬烯	3.23±0.02	1.36±0.04	1.18±0.09
	γ-松油烯	—	0.18±0.02	—

续表 2

挥发性成分		质量分数/%		
		冷榨亚麻籽粕	150 ℃焙炒亚麻籽粕	180 ℃焙炒亚麻籽粕
杂环类	甲基吡嗪	0.85±0.04	0.80±0.23	3.27±0.33
	2,5-二甲基吡嗪	—	1.82±0.38	9.92±0.32
	2,3-二甲基吡嗪	—	—	0.84±0.11
	2-乙基-5-甲基吡嗪	—	—	1.64±0.02
	三甲基吡嗪	—	—	3.25±0.02
	2-乙基-3-甲基吡嗪	—	—	0.75±0.07
	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	—	0.88±0.14	3.88±0.04
	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	—	—	0.38±0.02
	2,5-二氢呋喃	—	0.07±0.02	—
	2-乙基-呋喃	—	0.65±0.22	0.74±0.12
	1-甲基-1H-吡咯	—	—	1.18±0.09
	吡咯	—	—	3.98±0.12
	3-甲基-1H-吡咯	—	—	0.48±0.08
芳香族类	甲苯	—	1.37±0.11	—
	乙苯	0.53±0.12	0.45±0.14	0.15±0.04
	对二甲苯	3.74±0.06	5.70±1.25	—
	邻二甲苯	1.42±0.04	0.66±0.04	0.28±0.08
	苯乙烯	—	0.32±0.04	—
	1-甲氧基-4-丙烯基苯	0.83±0.08	0.41±0.01	—
	2-甲基萘	—	0.23±0.02	—

量分数只有 0.85%,150 ℃和 180 ℃处理组中杂环类物质质量分数分别为 4.22%和 30.31%。3 种工艺分别鉴定出杂环类物质 1、5、12 种，其中 180 ℃处理组中吡嗪类物质占杂环类物质质量的 78.91%。这些物质的感觉阈值都较低,对热处理亚麻籽粕的风味具有很大贡献,构成了特有的烤香和坚果香等[35]。

此外,热处理亚麻籽粕的醛、酮及杂环类物质质量分数增多和游离氨基酸及游离糖的减少有关,氨基酸通过 Strecker 降解生成了醛和氨基酮，同时为吡嗪类物质提供了氮源,游离糖则为其提供了碳源[26]。经过热处理的亚麻籽粕因油脂氧化及美拉德反应产生了更多低阈值的酮类及杂环类物质,所以风味浓郁。

3 结 语

热处理温度在 150 ℃以内仅引起不溶性膳食纤维、总游离氨基酸和 SDG 的小幅度减少,同时能够促进可溶性膳食纤维、总酚和总黄酮质量分数的提升，且其热焓值变化不明显。热处理温度高达 180 ℃时,会引起总游离氨基酸、SDG、总酚和总黄酮等有益成分及热焓值的大幅度下降,从而降低亚麻籽粕的营养价值。通过挥发性成分分析发现,冷榨亚麻籽粕中醇类和烷烃类物质质量分数较高,但对风味贡献不大,150 ℃焙炒亚麻籽粕中醛类、酮类及杂环类物质质量分数较冷榨亚麻籽粕高,这些低阈值的物质赋予亚麻籽粕特殊的香气,180 ℃焙炒亚麻籽粕中酮类及杂环类物质质量分数较 150 ℃焙炒亚麻籽粕高,所以具有更浓郁的焙烤香气。综上,将亚麻籽粕的热处理温度控制为 150 ℃以内为佳,不仅能提升亚麻籽粕风味,还能最大程度地保留营养价值。

参考文献:

[1] 张兰. 亚麻籽粕中亚麻胶提取及其功能特性的研究[D]. 天津:天津科技大学,2010.

[2] 周政. 我国亚麻籽油产业发展现状及存在问题[J]. 中国油脂，2020，45(9)：134-136.
[3] BEKHIT A E A，SHAVANDI A，JODJAJA T，et al. Flaxseed：composition，detoxification，utilization，and opportunities[J]. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**，2018，13：129-152.
[4] 曹伟伟，黄庆德，邓乾春. 亚麻籽粉食品的开发利用研究进展[J]. 食品研究与开发，2017，38(7)：200-205.
[5] 邓乾春，马方励，魏晓珊，等. 亚麻籽加工品质特性研究进展[J]. 中国油料作物学报，2016，38(1)：126-134.
[6] 杨宏志. 亚麻籽脱毒和木脂素提取工艺研究[D]. 北京：中国农业大学，2005.
[7] 李成. 加工对亚麻籽油有益脂质伴随物和抗氧化能力的影响[J]. 科技资讯，2019，17(27)：53-54.
[8] HAMA J R. Comparison of fatty acid profile changes between unroasted and roasted brown sesame（*Sesamum indicum* L.）seeds oil[J]. **International Journal of Food Properties**，2017，20：957-967.
[9] 蔡孟森. 热榨核桃粕的综合利用[D]. 广州：华南理工大学，2015.
[10] 温贺，杨森，赵振新，等. 冷榨与热榨紫苏粕营养成分分析[J]. 中国粮油学报，2020，35(10)：136-140.
[11] BABIKER E E，USLU N，JUHAIMI F A，et al. Effect of roasting on antioxidative properties，polyphenol profile and fatty acids composition of hemp(*Cannabis sativa* L.) seeds[J]. **LWT– Food Science and Technology**，2020，139(582)：1-10.
[12] 李翠翠，侯利霞，汪学德，等. 炒籽温度及初始水分含量对葵花籽酱挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学，2020，41(14)：278-285.
[13] 余盖文，史训旺，洪梦佳，等. 炒籽温度对压榨亚麻籽油品质的影响[J]. 中国油脂，2019，44(6)：29-33.
[14] 周洋. 加工对亚麻籽油有益脂质伴随物和抗氧化能力的影响[D]. 无锡：江南大学，2018.
[15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会，国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中水分的测定：GB 5009.3—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016.
[16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会，国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定：GB 5009.6—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016.
[17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会，国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定：GB 5009.5—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016.
[18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定：GB 5009.88—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2015.
[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会总局.饲料中氨基酸的测定：GB /T 18246—2019[S]. 北京：中国标准出版社，2019.
[20] 付亚琦. 亚麻籽木酚素不同水解产物结构鉴定及活性研究[D]. 杭州：浙江工商大学，2014.
[21] 刘仙俊，张慧珍，王潇潇，等. 5 种豆类中总多酚、总黄酮含量及抗氧化活性比较研究[J]. 食品研究与开发，2020，41(7)：52-57.
[22] 曾著莉，魏晋梅，牛黎莉，等. HS-SPME-GC-MS 分析马铃薯挥发性风味物质[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(6)：123-130.
[23] 邓博心. 预烘烤对花生水酶法制油油脂释放行为及品质的影响[D]. 无锡：江南大学，2018.
[24] 李鑫宇. 挤压膨化对豆渣复配粉特性的影响及其应用[D]. 哈尔滨：哈尔滨商业大学，2020.
[25] 刘晓君. 炒籽对花生油风味和品质的影响[D]. 无锡：江南大学，2011.
[26] 王楠楠. 美拉德反应对芝麻油氧化稳定性的影响[D]. 郑州：河南工业大学，2019.
[27] 杜木香. 亚麻木酚素的纯化、结构修饰及其衍生物的生物活性研究[D]. 广州：暨南大学，2019.
[28] 于丛丛. 制油工艺对亚麻籽饼粕酚类化合物含量及其抗氧化性能的影响[D]. 无锡：江南大学，2019.
[29] 张少颖. 不同加工方法对花生总黄酮含量的影响[J]. 中国粮油学报，2010，25(8)：104-108.
[30] KANCHAN S，BALWINDER S，AMRITPAL K，et al. Influence of microwave roasting on chemical composition，oxidative stability and fatty acid composition of flaxseed(*Linum usitatissimum* L.) oil[J]. **Food Chemistry**，2020，326：1-10.
[31] 方从兵，宛晓春，江昌俊. 黄酮类化合物生物合成的研究进展[J]. 安徽农业大学学报，2005(4)：94-100.
[32] 王永瑞，吴俊芳，徐宇丽，等. HS-SPME-GC-MS 对水酶法提取胡麻油香气成分的分析[J].中国调味品，2018，43(2)：135-138.
[33] 刘国琴，方昭西，李琪. 热榨与冷榨对亚麻油风味物质的影响及风味特征成分分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2015，43(11)：1-7.
[34] 康翠翠，施文正，刁玉段，等. 加热温度对花鲈鱼肉挥发性成分的影响[J]. 食品科学，2017，38(18)：60-66.
[35] 魏长庆，刘文玉，曹栋. 胡麻油挥发性香气提取分析研究进展[J]. 食品工业科技，2015，36(19)：379-384.
[36] 段秀霞，施文正，汪之和. 不同加热温度对罗氏沼虾肉挥发性成分的影响[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(5)：94-102.