

烘烤对亚麻籽油理化品质、化学组成和抗氧化活性的影响

张东^{1,2,3}, 段晓亮³, 王少甲^{1,2}, 曹雁平^{1,2*}

¹北京食品营养与人类健康高精尖创新中心 北京工商大学 北京 100048

²北京市食品添加剂工程技术研究中心 北京工商大学 北京 100048

³国家粮食和物资储备局科学研究院 北京 100037)

摘要 亚麻籽油因较高的营养价值而受到消费者的青睐,然而,热加工对亚麻籽油品质的影响仍有待阐明。利用热空气对亚麻籽进行烘烤,研究不同烘烤条件对亚麻籽油理化品质(酸价、过氧化值、色泽)、化学组成(共轭二烯、共轭三烯、类胡萝卜素、生育酚、总酚、美拉德反应产物、脂肪酸组成)以及氧化稳定指数、DPPH、ABTS 的影响。结果表明:随着烘烤程度增加,亚麻籽油酸价从 0.12 mg KOH/100 g 增加至 1.79 mg KOH/100 g;过氧化值、共轭二烯先增加后减少;类胡萝卜素、总酚、美拉德反应产物、共轭三烯、氧化稳定指数、DPPH 以及 ABTS 均增加, α -亚麻酸含量随烘烤程度增加略微减少。适度烘烤明显改善了亚麻籽油的品质。本研究结果为亚麻籽及亚麻籽油加工提供数据支撑。

关键词 亚麻籽油;热风烘烤;脂肪酸组成;美拉德反应产物;氧化稳定指数

文章编号 1009-7848(2023)12-0105-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.12.012

亚麻籽是亚麻科植物亚麻 (*Linum usitatissimum* L.) 的种子。据美国农业部统计,2018 年全球亚麻籽产量为 318 万 t,我国为 37 万 t^[1],其含油量 35%~50%,属高含油油料作物^[2]。亚麻籽油由亚麻籽通过压榨或浸出工艺制取,是我国西北地区(新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西)以及山西、河北北部重要的食用植物油之一。研究表明,摄入亚麻籽油可显著降低肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-6 和细胞因子水平^[3],可降低血清胆固醇^[4],同时,还可降低乳腺癌和结肠癌组织的生长速度^[5]。亚麻籽油之所以具有这些生理或营养功能,离不开其高含量的 α -亚麻酸(45%~70%)。

受生活和饮食习惯的影响,我国消费者更倾向于浓香型亚麻籽油。而浓香型亚麻籽油是在油脂制取前对油料进行加热,促进油料中蛋白质变性以及油脂体聚集,一方面可增加出油率,另一方面可改善油脂品质,如增加香味,延长货架期等^[6]。然而,过度加热或局部过热导致油料中多环芳烃、反式脂肪酸等有害物的生成^[7]。这些有害物随榨油

工艺迁移至油脂中,影响油脂品质及安全。本文作者前期研究了烘烤对亚麻籽油中脂肪酸、磷脂、甘油酯的影响^[8]。本研究系统分析烘烤对亚麻籽油理化品质、化学组成以及抗氧化活性的影响,为亚麻籽及亚麻籽油适度加工提供理论和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

亚麻籽(水分含量<10%),由甘肃省粮食行业协会提供。

甲醇、乙腈、正己烷、二氯甲烷均为色谱级,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;标准品,美国 Sigma-Aldrich 公司和上海 aladdin 公司。

1.2 仪器与设备

e2695 高效液相色谱仪,美国 Waters 公司;6890N 气相色谱仪,美国 Agilent 公司;Lambda 45 紫外可见分光光度计,美国 Perkin Elmer 公司;ME104T/02 电子天平,瑞士 METTLER TOLEDO 公司;CBR101 自动咖啡炒籽机,韩国 Genesis 公司;UltraScan VIS 色差仪,美国 Hunter Lab 公司;H3-18KR 台式高速冷冻离心机,湖南可成仪器设备有限公司;DGG-9140A 热风烘箱,上海森信实验仪器有限公司;Knifetec 1095 保水磨,丹麦 FOSS 公司;FD-1A-50 真空冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司;OSI-24 油脂氧化稳定性

收稿日期: 2022-12-18

基金项目: 公益性科研院所基本科研业务费项目(JY2013)

第一作者: 张东,男,博士生,副研究员

通信作者: 曹雁平 E-mail: caoy@th.btbu.edu.cn

仪,美国 Omnion 公司。

1.3 方法

1.3.1 亚麻籽烘烤以及亚麻籽油提取 取约 200 g 亚麻籽样品置入金属托盘中,分别在 120,140,160,180 °C 下烘烤 10,20,30 min。烘烤完毕后,迅速降至室温,放入自封袋中于 4 °C 保存备用。亚麻籽置于保水磨中,粉碎 20 s。粉碎后的亚麻籽样品中加入正己烷(固液比为 1:5),超声提取 20 min。5 000 r/min 下离心 10 min,取上清液,50 °C 旋转蒸发至无溶剂滴下。为了除去微量溶剂,亚麻籽油样品置于冷冻干燥机中抽真空 24 h。最后,亚麻籽油样品于 4 °C 保存备用。

1.3.2 理化品质、化学组成以及抗氧化活性测定

亚麻籽油酸价测定参照 GB 5009.229-2016;过氧化值测定参照 GB 5009.227-2016;生育酚测定参照 GB/T 26635-2011;脂肪酸组成测定参照 GB 5009.168-2016;氧化稳定指数(OSI)测定参照 GB/T 21121-2007;共轭二烯、共轭三烯、色泽、类胡萝卜素、总酚以及抗氧化活性的测定参照本文作者改进方法^[9]。

1.3.3 数据处理 所有数据均采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析, Minitab V18 软件用于主成分分析(PCA)和聚类分析(HCA)。每个样品做 3 次平行实验,所得数据以“平均值±标准偏差”表示。

2 结果与讨论

2.1 酸价

酸价(AV)通常用来表征植物油中游离脂肪酸含量,是植物油重要的品质指标之一。本文研究了烘烤对亚麻籽油酸价的影响(表 1),由表 1 可看出,对照亚麻籽油酸价仅为 0.12 mg KOH/g,符合 GB/T 8235-2019《亚麻籽油》对一级亚麻籽油的要求(<1.0 mg KOH/g)。随着烘烤程度增加,亚麻籽油酸价从 0.45 mg KOH/g (120 °C/10 min)显著增加至 1.78 mg KOH/g(180 °C/30 min)。研究表明,芝麻油^[7]、葵花籽油^[10]的酸价也随烘烤程度增加而增加。这是由于,烘烤过程中,温度增加导致甘油三酯和磷脂的水解变得越来越容易,从而进一步导致植物油酸价升高。本研究中,所有样品酸价均符合 GB/T 8235-2019《亚麻籽油》对二级亚麻籽油的要求(<3.0 mg KOH/g)。

2.2 过氧化值

过氧化值(PV)是植物油品质的重要衡量指标之一,用来评价植物油中脂肪酸氧化产物如过氧化物和氢过氧化物的形成情况。本研究中,对照亚麻籽油过氧化值为 0.98 mmol/kg,随着烘烤程度增加,亚麻籽油过氧化值呈先上升后下降的趋势,在 140 °C 烘烤 30 min 时达到最大值 (8.31 mmol/kg),至 180 °C 烘烤 30 min 时,降至 2.82 mmol/kg (表 1)。所有样品过氧化值均符合 GB 2716-2018《植物油》要求。初始烘烤阶段,过氧化物和氢过氧化物积累速度大于降解速度,而到了烘烤后期,过氧化物和氢过氧化物以降解为主,从而导致了过氧化值出现先上升后下降的趋势。经烘烤制取的花生油^[11]和罂粟籽油^[12]的过氧化值变化趋势与本研究一致。然而,Anjum 等^[10]发现葵花籽油的过氧化值在烘烤过程中呈上升趋势,这可能是由于两者的烘烤温度不足以使过氧化物和氢过氧化物快速降解所致。

2.3 共轭二烯和共轭三烯

共轭二烯(CD)和共轭三烯(CT)反映植物油的氧化程度。如表 1 所示,对照亚麻籽油共轭二烯和共轭三烯分别为 2.03%和 0.28%。当烘烤温度为 120,140 °C 和 160 °C 时,共轭二烯缓慢增加,表明在此过程中脂质氧化产物在逐步累积;而当烘烤温度达到 180 °C 时,共轭二烯明显下降,表明脂质过氧化物加速降解。该研究结果与过氧化值的变化趋势类似。Ghafoor 等^[12]发现罂粟籽油在烘烤过程中共轭二烯同样呈先上升后下降趋势,但是葵花籽油在烘烤过程中共轭二烯呈逐步增加趋势^[10]。本研究中,共轭三烯随烘烤程度增加而增加。这一现象说明,烘烤过程对共轭二烯和共轭三烯形成的影响不同。

2.4 色泽

如图 1 所示,随着烘烤程度的增加,亚麻籽油的色泽逐渐变深。采用色差仪研究了烘烤对亚麻籽油 L^* (亮度值)、 a^* (红绿值)、 b^* 值(黄蓝值)的影响(表 1)。对照亚麻籽油 L^* 、 a^* 、 b^* 值分别为 26.95, 1.46 以及 8.02, L^* 和 b^* 值随烘烤程度增加而降低,而 a^* 值则随烘烤程度增加而增加,当烘烤条件为 180 °C/30 min 时, L^* 、 a^* 、 b^* 值分别达到 23.78, 2.24 以及 2.10, 本研究结果与 Suri 等^[13]和 Tuncel

表1 烘烤对亚麻籽油理化品质、色泽、类胡萝卜素、总酚、美拉德反应产物的影响
Table 1 Effect of roasting on physicochemical properties, color, carotenoids, total phenolic content, and Maillard reaction products of flaxseed oils

参数	对照	120 °C			140 °C			160 °C			180 °C		
		10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min
酸价/mg KOH·g ⁻¹	0.12 ± 0.02 ^a	0.45 ± 0.00 ^b	0.69 ± 0.01 ^c	0.77 ± 0.02 ^d	0.44 ± 0.02 ^b	0.87 ± 0.04 ^e	1.10 ± 0.02 ^f	0.84 ± 0.02 ^e	1.32 ± 0.00 ^g	1.53 ± 0.03 ⁱ	1.37 ± 0.05 ^h	1.49 ± 0.02 ⁱ	1.78 ± 0.00 ^j
过氧化值/ mmol·kg ⁻¹	0.98 ± 0.01 ^a	2.13 ± 0.02 ^b	2.14 ± 0.04 ^b	2.62 ± 0.03 ^c	2.85 ± 0.08 ^c	6.14 ± 0.15 ^e	8.31 ± 0.25 ⁱ	7.36 ± 0.03 ^g	6.66 ± 0.05 ^f	6.52 ± 0.02 ^f	7.93 ± 0.11 ^h	5.54 ± 0.12 ^d	2.82 ± 0.08 ^e
共轭二烯/%	2.03 ± 0.01 ^{a,b}	2.02 ± 0.02 ^{a,b}	1.99 ± 0.01 ^a	2.03 ± 0.05 ^{a,b}	2.07 ± 0.00 ^b	2.32 ± 0.00 ^c	2.49 ± 0.00 ^{d,e}	2.27 ± 0.02 ^c	2.43 ± 0.05 ^d	2.64 ± 0.00 ^f	2.60 ± 0.06 ^f	2.50 ± 0.01 ^e	2.46 ± 0.01 ^{d,e}
共轭三烯/%	0.28 ± 0.01 ^a	0.27 ± 0.01 ^a	0.28 ± 0.00 ^a	0.29 ± 0.01 ^a	0.30 ± 0.01 ^{a,b}	0.33 ± 0.01 ^{b,c}	0.36 ± 0.02 ^c	0.31 ± 0.05 ^{a,b}	0.46 ± 0.02 ^d	0.53 ± 0.01 ^e	0.45 ± 0.01 ^d	0.58 ± 0.00 ^f	0.75 ± 0.03 ^g
<i>L</i> [*]	26.95 ± 0.05 ^m	26.88 ± 0.00 ^l	26.82 ± 0.01 ^k	26.66 ± 0.01 ^j	26.24 ± 0.00 ⁱ	25.87 ± 0.03 ^g	23.70 ± 0.00 ^a	26.07 ± 0.01 ^h	24.37 ± 0.03 ^e	24.29 ± 0.01 ^d	24.59 ± 0.01 ^f	24.12 ± 0.01 ^c	23.78 ± 0.01 ^b
<i>a</i> [*]	1.46 ± 0.00 ^h	1.45 ± 0.04 ^a	1.46 ± 0.02 ^a	1.49 ± 0.01 ^a	1.46 ± 0.01 ^a	1.48 ± 0.01 ^a	1.75 ± 0.04 ^b	1.73 ± 0.01 ^b	1.80 ± 0.01 ^c	1.93 ± 0.01 ^d	1.75 ± 0.03 ^b	1.97 ± 0.02 ^d	2.24 ± 0.02 ^e
<i>b</i> [*]	8.02 ± 0.05 ^f	8.26 ± 0.00 ^k	9.61 ± 0.03 ^l	8.19 ± 0.06 ^j	7.27 ± 0.06 ^h	7.22 ± 0.08 ^h	4.87 ± 0.01 ^g	4.44 ± 0.02 ^f	4.13 ± 0.05 ^d	3.16 ± 0.04 ^c	4.25 ± 0.01 ^e	2.57 ± 0.00 ^b	2.10 ± 0.08 ^e
类胡萝卜素/ mg·kg ⁻¹	8.05 ± 0.08 ^d	7.02 ± 0.00 ^c	6.52 ± 0.04 ^b	6.78 ± 0.02 ^b	8.24 ± 0.01 ^e	8.56 ± 0.00 ^f	8.85 ± 0.02 ^g	10.34 ± 0.03 ^h	13.04 ± 0.04 ⁱ	14.86 ± 0.15 ^k	13.48 ± 0.08 ^j	15.23 ± 0.01 ^l	15.95 ± 0.15 ^m
γ -生育酚/mg·kg ⁻¹	369.86 ± 2.08 ^g	364.18 ± 0.58 ^{f,g}	352.99 ± 4.77 ^{e,f}	353.35 ± 1.11 ^{e,f}	360.79 ± 5.02 ^{f,g}	340.41 ± 6.00 ^e	294.48 ± 0.07 ^d	339.81 ± 3.88 ^e	187.88 ± 0.55 ^a	217.30 ± 9.68 ^b	226.99 ± 1.72 ^b	275.14 ± 3.98 ^c	363.92 ± 1.70 ^{f,g}
总酚/mg GAE/kg ⁻¹	22.21 ± 0.35 ^b	21.05 ± 0.35 ^b	17.07 ± 0.70 ^b	16.53 ± 0.53 ^a	17.93 ± 0.34 ^a	23.46 ± 0.18 ^b	26.56 ± 0.17 ^c	35.39 ± 0.18 ^d	54.36 ± 0.52 ^e	60.24 ± 0.26 ^f	82.85 ± 2.54 ^g	92.59 ± 0.87 ^h	119.10 ± 2.90 ⁱ
非酶褐变指数 (Abs420 nm)	0.20 ± 0.00 ^b	0.18 ± 0.01 ^{a,b}	0.19 ± 0.00 ^{a,b}	0.19 ± 0.00 ^{a,b}	0.18 ± 0.01	0.20 ± 0.00 ^b	0.19 ± 0.00 ^{a,b}	0.26 ± 0.00 ^c	0.38 ± 0.01 ^d	0.44 ± 0.00 ^f	0.39 ± 0.01 ^e	0.44 ± 0.00 ^f	0.50 ± 0.00 ^g
羟甲基糠醛/ mg·kg ⁻¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.04 ± 0.00 ^b	0.07 ± 0.01 ^c	0.02 ± 0.00 ^a	0.26 ± 0.00 ^d	1.45 ± 0.10 ^e

注:表中数值为平均值±标准差;同一行不同字母表示差异有统计学意义($P < 0.05$);nd:未检出。



注:下层从左至右:120℃/10~30 min,140℃/10~30 min;中层从左至右:160℃/10~30 min,180℃/10~30 min;上层:对照。

图1 对照和经烘烤后制取的亚麻籽油颜色变化

Fig.1 Color changes of control and roasted flaxseed oils

等^[14]的发现基本一致。这些变化是由于烘烤导致美拉德反应形成的棕色物质以及色素如类胡萝卜素的释放共同作用。

2.5 类胡萝卜素

类胡萝卜素是一种广泛存在于动植物中的色素,其在光捕获方面具有重要的作用^[15]。本文研究了烘烤对亚麻籽油中类胡萝卜素的影响,在对照亚麻籽油中,类胡萝卜素的含量为8.05 mg/kg。初始烘烤阶段(120~140℃),类胡萝卜素含量从6.78 mg/kg缓慢增加至8.85 mg/kg,但当烘烤温度为160~180℃时,类胡萝卜素含量显著增加(15.95 mg/kg)。这是由于在烘烤过程中蛋白质发生变性,导致类胡萝卜素-蛋白质复合物崩解,从而释放出类胡萝卜素。有研究表明,烘烤过程中,开心果油^[16]中类胡萝卜素含量同样呈增加趋势。

2.6 生育酚

生育酚是植物油重要的营养伴随物之一,主要包括 α - β - γ -和 δ -型,亚麻籽油中的生育酚主要以 γ -型为主。对照亚麻籽油中 γ -生育酚含量为369.86 mg/kg,但在120,140和160℃烘烤条件下,由于 γ -生育酚-蛋白质复合物作用力的增加,使得亚麻籽油中 γ -生育酚含量呈现一个下降趋势。在180℃的烘烤条件下,由于油料细胞膜的严重破坏,亚麻籽油中 γ -生育酚含量随时间延长而

增加。本文作者发现花生油中生育酚含量在烘烤初期也呈缓慢下降趋势,与本研究结果一致^[11]。

2.7 总酚

对照亚麻籽油中总酚(TPC)为22.21 mg 没食子酸当量(GAE)/kg。当烘烤温度为120℃时,总酚含量略有下降,可能是由于低温加强了酚类化合物与蛋白质等其它生物大分子的作用力。而当烘烤温度继续增加时,亚麻籽中总酚含量呈上升趋势,当烘烤条件为180℃/30 min时,亚麻籽油中总酚含量达到最高值(119.10 mg GAE/kg)。Suri等^[13]发现,亚麻籽油中总酚含量随着微波功率增加而增加。Ahmed等^[17]认为,导致这一现象是因为烘烤导致了油料种子细胞膜的破裂,进而增加了总酚的释放。然而,余盖文发现,总酚含量随着烘烤程度增加而降低^[2]。这说明,温度对总酚含量的影响显而易见。

2.8 美拉德反应产物

油料在烘烤过程中发生美拉德反应,生成棕色甚至黑色美拉德反应产物^[9]。非酶褐变指数(BI)和5-羟甲基糠醛(HMF)是反映美拉德反应程度的两个重要指标(表1)。对照亚麻籽油非酶褐变指数为0.20,在120和140℃的烘烤条件下,亚麻籽油非酶褐变指数无显著性变化,而在160和180℃的烘烤条件下显著增加。当烘烤条件为180℃/30 min时,达到最大值0.50。5-羟甲基糠醛在对照亚麻籽油和120℃(10~30 min)、140℃(10~30 min)以及160℃/10 min烘烤条件下制取的亚麻籽油中均未检出。但随着烘烤程度继续增加,5-羟甲基糠醛呈显著增加趋势。这些结果均说明,在120和140℃的烘烤条件下美拉德反应不明显,而在160和180℃的烘烤条件下,美拉德反应较为剧烈。在经烘烤制取的杏仁油、榛子油、核桃油、葵花籽油等中,5-羟甲基糠醛含量同样随烘烤程度增加而增加^[18]。

2.9 脂肪酸组成

研究了烘烤对亚麻籽油脂肪酸组成的影响(表2)。从对照和经烘烤制取的亚麻籽油中共鉴定出11种脂肪酸,包括:棕榈酸、棕榈一烯酸、十七烷酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、 α -亚麻酸、花生酸、山嵛酸、芥酸以及木焦油酸。其中 α -亚麻酸、亚油酸以及棕榈酸为主要脂肪酸。对照亚麻籽油中, α -

表 2 烘烤对亚麻籽油脂肪酸组成的影响 (%)
Table 2 Effect of roasting on fatty acid composition of flaxseed oils (%)

脂肪酸	对照	120 °C			140 °C			160 °C			180 °C		
		10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min
C16:0	5.04 ± 0.00 ^a	5.09 ± 0.00 ^c	5.12 ± 0.01 ^c	5.12 ± 0.00 ^b	5.10 ± 0.00 ^d	5.12 ± 0.01 ^c	5.12 ± 0.00 ^b	5.16 ± 0.01 ^f	5.18 ± 0.00 ^g	5.19 ± 0.00 ^g	5.19 ± 0.00 ^g	5.22 ± 0.00 ^h	5.24 ± 0.00 ^h
C16:1	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a
C17:0	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a
C18:0	3.94 ± 0.00 ^{e,f}	3.94 ± 0.00 ^f	3.94 ± 0.00 ^f	3.93 ± 0.01 ^{d,e,f}	3.94 ± 0.00 ^{e,f}	3.92 ± 0.01 ^{b,c,d}	3.93 ± 0.01 ^{c,d,e,f}	3.92 ± 0.00 ^{b,c,d,e}	3.91 ± 0.01 ^{a,b}	3.91 ± 0.00 ^a	3.91 ± 0.00 ^a	3.92 ± 0.01 ^{a,b}	3.92 ± 0.00 ^{a,b,c}
C18:1	19.59 ± 0.01 ^a	19.62 ± 0.01 ^{a,b}	19.65 ± 0.01 ^{b,c}	19.65 ± 0.00 ^{b,c,d}	19.65 ± 0.00 ^{b,c}	19.64 ± 0.01 ^b	19.64 ± 0.00 ^b	19.73 ± 0.01 ^f	19.71 ± 0.02 ^{e,f}	19.69 ± 0.02 ^{d,e}	19.69 ± 0.02 ^{d,e}	19.70 ± 0.01 ^{e,f}	19.74 ± 0.05 ^f
C18:2	15.33 ± 0.01 ^a	15.41 ± 0.01 ^{b,c}	15.42 ± 0.00 ^c	15.39 ± 0.00 ^b	15.44 ± 0.01 ^d	15.44 ± 0.01 ^d	15.45 ± 0.00 ^b	15.49 ± 0.01 ^e	15.49 ± 0.00 ^c	15.50 ± 0.00 ^f	15.50 ± 0.00 ^f	15.54 ± 0.00 ^{g,h}	15.55 ± 0.00 ^h
C18:3	55.56 ± 0.02 ^b	55.43 ± 0.01 ^f	55.36 ± 0.01 ^f	55.40 ± 0.01 ^g	55.32 ± 0.01 ^{e,f}	55.33 ± 0.01 ^{e,f}	55.31 ± 0.01 ^e	55.14 ± 0.01 ^{c,d}	55.16 ± 0.01 ^d	55.17 ± 0.02 ^d	55.17 ± 0.02 ^d	55.08 ± 0.01 ^b	55.00 ± 0.03 ^a
C20:0	0.13 ± 0.00 ^{a,b}	0.13 ± 0.00 ^{a,b}	0.13 ± 0.00 ^{a,b}	0.13 ± 0.00 ^{a,b}	0.13 ± 0.00 ^{a,b}	0.13 ± 0.00 ^{a,b}	0.13 ± 0.00 ^{a,b}	0.14 ± 0.01 ^c	0.13 ± 0.00 ^b	0.13 ± 0.00 ^a	0.13 ± 0.00 ^{a,b}	0.13 ± 0.00 ^{a,b}	0.13 ± 0.00 ^{a,b}
C22:0	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.00 ^a
C22:1	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.00 ^a
C24:0	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a	0.10 ± 0.00 ^a
饱和脂肪酸	9.40 ± 0.00 ^a	9.43 ± 0.00 ^a	9.47 ± 0.00 ^a	9.44 ± 0.00 ^a	9.47 ± 0.00 ^a	9.47 ± 0.00 ^a	9.48 ± 0.00 ^a	9.52 ± 0.00 ^a	9.53 ± 0.00 ^a	9.52 ± 0.00 ^a	9.52 ± 0.00 ^a	9.56 ± 0.00 ^a	9.59 ± 0.00 ^a
单不饱和脂肪酸	19.71 ± 0.01 ^a	19.73 ± 0.01 ^b	19.76 ± 0.01 ^b	19.77 ± 0.00 ^b	19.77 ± 0.01 ^c	19.76 ± 0.02 ^c	19.77 ± 0.01 ^c	19.85 ± 0.01 ^d	19.82 ± 0.01 ^d	19.81 ± 0.00 ^d	19.82 ± 0.01 ^e	19.82 ± 0.01 ^e	19.86 ± 0.01 ^e
多不饱和脂肪酸	70.89 ± 0.01 ^f	70.84 ± 0.02 ^d	70.77 ± 0.02 ^d	70.79 ± 0.00 ^d	70.76 ± 0.01 ^d	70.77 ± 0.04 ^d	70.76 ± 0.01 ^d	70.63 ± 0.00 ^b	70.65 ± 0.01 ^{b,c}	70.67 ± 0.02 ^c	70.67 ± 0.02 ^c	70.62 ± 0.01 ^b	70.55 ± 0.03 ^a

注:表中数值为平均值±标准差;同一行不同字母表示差异有统计学意义(P<0.05)。

亚麻酸、饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸以及多不饱和脂肪酸含量分为55.56%, 9.40%, 19.71%, 70.89%, 脂肪酸组成和含量与来自印度和巴西的亚麻籽油类似^[13,19]。烘烤过程中, α -亚麻酸和多不饱和脂肪酸含量轻微下降而饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸含量增加, 这是由于烘烤过程中 α -亚麻酸的氧化降解所致。这一结果与Suri等^[13]的结果一致, 即经微波烘烤后, 亚麻籽油中 α -亚麻酸和多不饱和脂肪酸含量同样呈轻微下降趋势。但余盖文等发现, 当温度超过200℃, α -亚麻酸发生显著下降, 导致亚麻籽油品质和营养变差^[2]。

2.10 抗氧化活性

研究了烘烤对亚麻籽油 DPPH 和 ABTS 的影响。对照亚麻籽油 DPPH、ABTS 值分别为 236.49, 412.56 $\mu\text{mol Trolox 当量(TE)}/100\text{ g}$, 在 120, 140 和 160℃的烘烤条件下亚麻籽油 DPPH 无显著变化, 但在 160℃下, 亚麻籽油 DPPH 值从 274.91 增加至 368.39 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ (表 3)。ABTS 值随烘烤程度增加而增加。推测亚麻籽在烘烤过程中, 极性组分如酚类的释放以及美拉德反应产物形成, 共同导致了亚麻籽油抗氧化活性的增加。

2.11 氧化稳定指数(OSI)

植物油在加工或贮藏过程中容易产生氢过氧化物, 氢过氧化物很

不稳定, 形成后又迅速降解为小分子化合物。当这些小分子化合物数量达到一定程度后, 导致植物油出现“哈喇味”, 影响其品质。氧化稳定指数(OSI)用来反映植物油小分子化合物形成的难易程度, 从而进一步反映植物油的货架期。本试验分析了烘烤对亚麻籽油 OSI 值的影响(表 3)。对于对照亚麻籽油, 其 OSI 值仅为 1.93 h, 远低于其它未经烘烤制取的植物油如花生油(7.28 h)、黑种草籽油(6.28 h), 这是由于亚麻籽油中高含量的 α -亚麻酸所致^[11,20]。亚麻籽油 OSI 值在 120, 140 和 160℃时基本稳定不变, 但在 180℃时显著增加。当烘烤条件为 180℃/30 min 时, OSI 值达到最大值(2.7 h)。烘烤过程中, 一方面类胡萝卜素和总酚含量随烘烤程度增加而增加; 另一方面, 烘烤过程导致了美拉德反应产物的形成。而这些化合物均具有抗氧化作用, 它们的协同作用使得亚麻籽油 OSI 值增加。段旭林等^[21]采用热重-差示量热分析法(TG-DSC)对比研究浓香亚麻籽油、菜籽油和花生油的初始氧化温度, 发现亚麻籽油初始氧化温度为 168.0℃, 远小于浓香菜籽油(204.7℃)和花生油(186.2℃)。

2.12 主成分分析及聚类分析

采用主成分分析(PCA)解释对照和经烘烤制取的亚麻籽油酸价、过氧化值、色泽、共轭二烯、共轭三烯、类胡萝卜素、 γ -生育酚、总酚、非

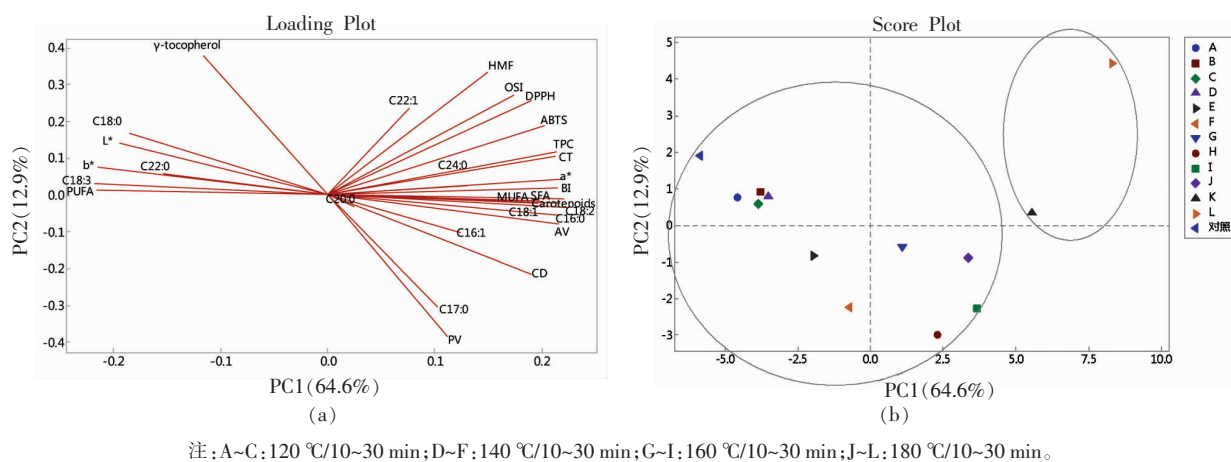
表 3 烘烤对亚麻籽油抗氧化活性及氧化稳定指数的影响

参数	对照	120℃			140℃			160℃			180℃		
		10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min
DPPH/ $\mu\text{mol TE} \cdot (100\text{ g})^{-1}$	236.49 ± 5.98 ^{a,b,c}	229.58 ± 7.01 ^{a,b}	245.84 ± 4.00 ^{b,c,d}	227.13 ± 1.00 ^a	239.79 ± 6.81 ^{a,b,c}	245.13 ± 2.00 ^{b,c,d}	226.38 ± 5.90 ^a	245.29 ± 3.99 ^{b,c,d}	251.33 ± 0.99 ^{c,d}	257.76 ± 1.00 ^d	274.91 ± 14.94 ^e	325.37 ± 8.92 ^f	368.39 ± 11.01 ^g
ABTS/ $\mu\text{mol TE} \cdot (100\text{ g})^{-1}$	412.56 ± 2.08 ^a	414.82 ± 3.14 ^a	411.10 ± 4.18 ^a	402.64 ± 9.36 ^a	445.81 ± 10.16 ^b	446.00 ± 5.21 ^b	409.95 ± 6.16 ^a	496.43 ± 1.04 ^c	523.79 ± 7.25 ^d	505.46 ± 4.18 ^c	525.98 ± 7.28 ^d	720.84 ± 9.31 ^e	783.00 ± 5.23 ^f
氧化稳定指数(h)	1.93 ± 0.04 ^a	1.85 ± 0.04 ^a	1.98 ± 0.04 ^a	2.05 ± 0.04 ^a	1.85 ± 0.04 ^a	2.05 ± 0.04 ^a	1.83 ± 0.05 ^a	1.98 ± 0.04 ^a	1.85 ± 0.04 ^a	2.05 ± 0.04 ^a	2.30 ± 0.04 ^b	2.43 ± 0.04 ^b	2.70 ± 0.04 ^b

注:表中数值为平均值±标准差;同一行不同字母表示差异有统计学意义($P<0.05$)。

酶褐变指数、5-羟甲基糠醛、脂肪酸组成与 DPPH、ABTS、氧化稳定指数的相关性。两个主成分解释了 77.5% 的变量,其中 PC1 解释了 64.6%,由胡萝卜素、饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸、共轭二烯、共轭三烯、 α -亚麻酸以及色泽等贡献;PC2 解释了 12.9% 的变量,主要跟过氧化值和 γ -生育酚相关(图 2a)。载荷图(图 2a)显示 DPPH、ABTS、氧化稳定指数与总酚、非酶褐

变指数、5-羟甲基糠醛、 a^* 、共轭二烯、共轭三烯、类胡萝卜素、棕榈酸、油酸、亚油酸等显著正相关;而与硬脂酸、 α -亚麻酸、 L^* 、 b^* 以及多不饱和脂肪酸显著负相关。得分图(图 2b)将样品区分为两组,第 1 组为 11 个样品,包括对照、120 °C(10~30 min)、140 °C(10~30 min)、160 °C(10~30 min)以及 180 °C/10 min,第 2 组 2 个样品,包括 180 °C/20 min 和 180 °C/30 min。



注: A~C: 120 °C/10~30 min; D~F: 140 °C/10~30 min; G~I: 160 °C/10~30 min; J~L: 180 °C/10~30 min。

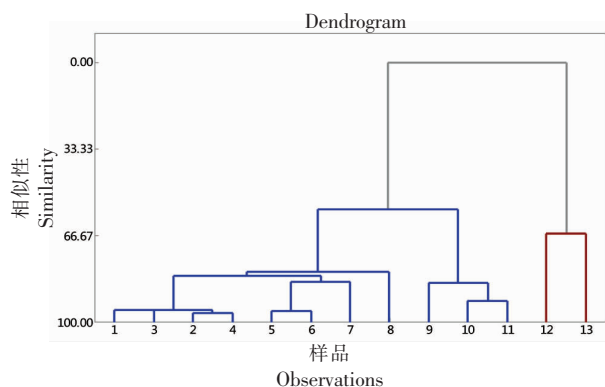
图 2 亚麻籽油主成分分析

Fig.2 Loading plot (a) and score plot (b) of principal component analysis for control and roasted flaxseed oils

对照和经烘烤制取的亚麻籽油聚类分析(HCA)结果见图 3。由图 3 可以看出,13 个亚麻籽油样品被分为 2 组,第 1 组包括对照、120 °C(10~30 min)、140 °C(10~30 min)、160 °C(10~30 min)以及 180 °C/10 min 11 个样品,其特点是较低的抗氧化活性和氧化稳定指数;第 2 组包括 180 °C(20~30 min)2 个样品,其抗氧化活性和氧化稳定指数高于第 1 组。HCA 结果与 PCA 结果一致。

3 结论

利用热空气对亚麻籽进行烘烤,分析不同烘烤条件对亚麻籽油理化品质、化学组成和抗氧化活性的影响。研究表明:烘烤显著改变了亚麻籽油的理化性质(酸价、过氧化值),增加了营养伴随物如总酚、类胡萝卜素的溶出,提高了抗氧化性,但导致了亚麻籽油 α -亚麻酸的略微下降(1.0%),高温 180 °C 烘烤显著加速了美拉德反应。在本研究的试验条件下,所有亚麻籽油均符合我国国标的相关要求。



注: 1: 对照; 2~4: 120 °C/10~30 min; 5~7: 140 °C/10~30 min; 8~10: 160 °C/10~30 min; 11~13: 180 °C/10~30 min。

图 3 亚麻籽油聚类分析

Fig.3 Hierarchical clustering analysis for control and roasted flaxseed oils

参 考 文 献

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT[EB/OL]. [2022-04-20]. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>.

- [2] 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.
YU G W, SHI X W, HONG M J, et al. Effects of frying temperature of flaxseed on quality of pressed flaxseed oil[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6): 29-33.
- [3] SHIM Y Y, GUI B, ARNISON P G, et al. Flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) bioactive compounds and peptide nomenclature: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 38(1): 5-20.
- [4] YANG L, LEUNG K Y, CAO Y, et al. α -Linolenic acid but not conjugated linolenic acid is hypocholesterolaemic in hamsters[J]. British Journal of Nutrition, 2005, 93(4): 433-438.
- [5] DAVID P. Cancer chemotherapy: New recruits [J]. Nature, 1983, 304: 675.
- [6] SUN X, ZHANG B, HAN J, et al. Effect of roasting temperature and time on volatile compounds, total tocopherols, and fatty acids of flaxseed oil[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(4): 1624-1638.
- [7] JI J, LIU Y, SHI L, et al. Effect of roasting treatment on the chemical composition of sesame oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101: 191-200.
- [8] ZHANG D, LI X J, DUAN X L, et al. Lipidomics reveals the changes in lipid profile of flaxseed oil affected by roasting[J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130431.
- [9] ZHANG D, LI X J, ZHANG Z Y, et al. Influence of roasting on the physicochemical properties, chemical composition and antioxidant activities of peanut oil[J]. LWT, 2022, 154: 112613.
- [10] ANJUM F, ANWAR F, JAMIL A, et al. Microwave roasting effects on the physico-chemical composition and oxidative stability of sunflower seed oil[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2006, 83(9): 777-784.
- [11] ZHANG D, LI X J, CAO Y P, et al. Effect of roasting on the chemical components of peanut oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 109249.
- [12] GHAFOOR K, ÖZCAN, M M, AL-JUHAIMI F, et al. Changes in quality, bioactive compounds, fatty acids, tocopherols, and phenolic composition in oven and microwave-roasted poppy seeds and oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 490-496.
- [13] SURI K, SINGH B, KAUR A, 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: 126974.
- [14] TUNCEL N B, UYGUR A, YÜCEER Y K. The effects of infrared roasting on hcn content, chemical composition and storage stability of flaxseed and flaxseed oil[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2017, 94(6): 877-884.
- [15] REBELO B A, FARRONA S, VENTURA M R, et al. Canthaxanthin, a red-hot carotenoid: applications, synthesis, and biosynthetic evolution[J]. Plants, 2020, 9(8): 1039.
- [16] RABADÁN A, GALLARDO-GUERRERO L, GANDUL-ROJAS B, et al. Effect of roasting conditions on pigment composition and some quality parameters of pistachio oil[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 49-57.
- [17] AHMED I A M, JUHAIMI F Y A, OSMAN M A, et al. Effect of oven roasting treatment on the antioxidant activity, phenolic compounds, fatty acids, minerals, and protein profile of samh (*Mesembryanthemum forsskalei* Hochst) seeds[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109825.
- [18] DURMAZ G, GÖKMEN V. Determination of 5-hydroxymethyl-Furfural and Furfural in oils as indicators of heat pre-treatment[J]. Food Chemistry, 2010, 123(3): 912-916.
- [19] PIVA G S, WESCHENFELDER T A, FRANCESCHI E, et al. Extraction and modeling of flaxseed (*Linum usitatissimum*) oil using subcritical propane[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 228: 50-56.
- [20] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Impact of infrared and dry air roasting on the oxidative stability, fatty acid composition, Maillard reaction products and other chemical properties of black cumin (*Nigella sativa* L.) seed oil [J]. Food Chemistry, 2019, 295: 537-547.
- [21] 段旭林, 胡容, 王瑞, 等. 浓香菜籽油、花生油和亚麻籽油风味特性及氧化稳定性的研究[J]. 中国油脂, 2022, 47(9): 71-75.
DUAN X L, HU R, WANG R, et al. Flavor char-

acteristics and oxidation stability of strong flavor rapeseed oil, peanut oil and flaxseed oil[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(9): 71-75.

Effect of Dry-air Roasting on the Physicochemical Properties, Chemical Composition, and Antioxidant Activities of Flaxseed Oils

Zhang Dong^{1,2,3}, Duan Xiaoliang³, Wang Shaojia^{1,2}, Cao Yanping^{1,2*}

(¹Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health, Beijing Technology & Business University (BTBU), Beijing 100048

²Beijing Engineering and Technology Research Center of Food Additives, Beijing Technology & Business University (BTBU), Beijing 100048

³Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037)

Abstract Flaxseed oil is favored by consumers because of its high nutritional value. However, the effect of thermal processing on the quality of flaxseed oil remains to be clarified. The effects of dry-air roasting on the physicochemical properties (acid value, peroxide value, color), chemical composition (conjugated diene, conjugated triene, carotenoids, tocopherol, total phenolics, Maillard reaction products, fatty acid composition), oxidation stability index, DPPH, and ABTS of flaxseed oil were investigated. The results showed that with the increase of roasting degree, the color of flaxseed oil became darker, the acid value increased, the peroxide value and conjugated diene first increased and decreased, while carotenoids, total phenols, Maillard reaction products, conjugated trienes, oxidation stability index, DPPH, and ABTS increased during roasting. The content of α -linolenic acid decreased slightly in the roasting process. Moderate roasting significantly improved the quality of flaxseed oils. The results of this study would provide support for flaxseed and flaxseed oil processing.

Keywords flaxseed oil; dry-air roasting; fatty acid composition; Maillard reaction products; oxidative stability index