

浓香菜籽油在不同加工单元下多环芳烃和风味品质的变化规律

段旭林¹, 潘尚义¹, 邓莎¹, 周波², 任尧¹, 王安体², 迟原龙^{1*}

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川成都 610065) (2. 四川德阳市年丰食品有限公司, 四川德阳 618000)

摘要: 分析了炒籽、压榨和脱胶等单元下油菜籽和油中多环芳烃的含量, 明确了多环芳烃在浓香菜籽油 3 个加工单元中的迁移规律。在此基础上, 考查了炒籽升温速率和脱胶单元对浓香菜籽油中多环芳烃形成和风味品质的影响。结果显示, 炒籽和压榨单元均造成油菜籽及菜籽油中多环芳烃含量增加, 炒籽后的油菜籽中苯并[a]芘、PAH4 和 EPA16 含量分别增加 0.40、3.79 和 10.51 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。脱胶单元使菜籽油中多环芳烃含量降低, 其中轻质 PAHs 含量减少 7.96 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。炒籽升温速率对浓香菜籽油中多环芳烃含量具有显著影响 ($P<0.05$)。高升温速率下浓香菜籽油中苯并[a]芘、PAH4 和 EPA16 含量分别为 0.91、7.18 和 40.92 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 低升温速率下样品含量分别为 0.38、3.21 和 27.99 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。炒籽升温速率对浓香菜籽油中多酚、生育酚和甾醇含量, 以及挥发性化合物种类和含量影响不显著 ($P>0.05$)。脱胶处理后, 菜籽油中酸价下降 0.45 mg/g , 过氧化值增加 0.49 mmol/kg ; 菜籽油 L^* 和 b^* 明显提升, a^* 降低; 菜籽油中脂质氧化产物和美拉德反应产物含量分别降低 31.19% 和 53.05%。研究结果可为浓香菜籽油生产中工艺参数优化提供有价值的参考。

关键词: 浓香菜籽油; 炒籽单元; 压榨单元; 脱胶单元; 多环芳烃; 挥发性化合物

文章编号: 1673-9078(2023)06-246-251

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.6.1383

Effects of Processing on Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Content and Flavor Quality of Strongly Flavored Rapeseed Oil

DUAN Xulin¹, PAN Shangyi¹, DENG Sha¹, ZHOU Bo², REN Yao¹, WANG Anti², CHI Yuanlong^{1*}

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. Sichuan Deyang Nianfeng Food Co. Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: The contents of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in rapeseed and rapeseed oil after processing activities such as seed frying, squeezing, and degumming were studied and the migration patterns of PAHs investigated. The effects of seed frying heating rate and the influences of degumming on the formation of PAHs and the flavor quality of rapeseed oil were determined. Results indicated that the PAH content of rapeseeds and rapeseed oil increased during seed frying and squeezing. The benzo[a]pyrene, PAH4, and EPA16 contents of rapeseeds increased by 0.40, 3.79, and 10.51 $\mu\text{g}/\text{kg}$ after frying, respectively, whereas PAH contents was reduced by degumming. In particular, the light PAH content decreased by 7.96 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Heating rate had a significant effect on the PAH content of rapeseed oil ($P<0.05$), with benzo[a]pyrene, PAH4, and EPA16 contents of 0.91, 7.18, and 40.92 $\mu\text{g}/\text{kg}$ observed, respectively, under rapid heating and 0.38, 3.21, and 27.99 $\mu\text{g}/\text{kg}$ observed, respectively, under slow heating. However, heating rate had no significant effect on either the polyphenols, tocopherol, and sterol contents or the types and content of volatile compounds in the oil ($P>0.05$). The acidity of the rapeseed oil decreased by 0.45 mg/g and the peroxide value increased by 0.49 mmol/kg after degumming. The L^* and b^* of the rapeseed oil increased significantly, while the a^* value decreased. Lipid oxidation and Maillard reaction products in the rapeseed oil decreased by 31.19% and 53.05%, respectively. The results could provide valuable reference for the optimization of parameters in

引文格式:

段旭林, 潘尚义, 邓莎, 等. 浓香菜籽油在不同加工单元下多环芳烃和风味品质的变化规律[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 246-251.

DUAN Xulin, PAN Shangyi, DENG Sha, et al. Effects of processing on polycyclic aromatic hydrocarbon content and flavor quality of strongly flavored rapeseed oil [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 246-251.

收稿日期: 2022-11-01

基金项目: 四川省科技计划项目 (2020YFN0151); 川菜工业化开放课题 (GCZX22-27)

作者简介: 段旭林 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 健康食品工程, E-mail: 550062970@qq.com

通讯作者: 迟原龙 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: chiyl@scu.edu.cn

the production of strongly flavored rapeseed oil.

Key words: strongly flavored rapeseed oil; seed frying; squeezing; degumming; polycyclic aromatic hydrocarbons; volatile compounds

浓香菜籽油指油菜籽经高温焙烤、机械压榨制得的菜籽油，具有独特的风味和丰富的营养，在我国西南地区深受消费者的青睐。炒籽、压榨和脱胶是浓香菜籽油生产中的重要加工单元，不仅直接关系到油脂风味和营养物质的保持和提升，也可能导致一些潜在危害物的形成和迁移，如多环芳烃（Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs）。多环芳烃是具有2个或2个以上苯环的复杂化合物的总称，具有较强的稳定性、亲脂性以及生物富集性，易通过食用油进入人体^[1]。并且多环芳烃可通过脂肪在人体中快速迁移，其部分代谢产物可与细胞蛋白质和DNA结合，能对细胞造成损伤，从而导致癌症和突变^[2]。多环芳烃在环境及食品中普遍存在，目前主要监控的多环芳烃是美国环境保护局（U.S. Environmental Protection Agency, EPA）建议优先控制的16种多环芳烃（EPA16）。加工工艺对食用油中多环芳烃形成的影响已有相关报道。Ji等^[3]发现随着炒籽温度的提高和时间的延长，植物油中的多环芳烃含量逐渐增加。胡朝暉等^[4]指出经脱胶工艺后，菜籽油中的苯并[a]芘含量下降。刘玉兰等^[5]研究得出大豆油生产时加工助剂中多环芳烃含量及加工助剂添加量可能会对大豆油精炼过程中多环芳烃的含量造成影响。尽管如此，浓香菜籽油在不同加工单元下多环芳烃的形成和迁移规律仍不清楚，且加工单元对浓香菜籽油风味品质的影响也有待探究。因此，本文首先考查了浓香菜籽油在炒籽单元、压榨单元和脱胶单元下的多环芳烃含量和分布，揭示多环芳烃在浓香菜籽油加工过程中的形成和迁移规律。在此基础上，考查了炒籽升温速率和脱胶单元对浓香菜籽油多环芳烃、理化性质和风味品

质的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

油菜籽由四川省某食品公司提供；2-辛醇，没食子酸，胆甾烷醇，上海阿拉丁公司； α -、 β -、 γ -和 δ -生育酚标准品，天津阿尔塔科技公司；EPA优先控制的16种PAHs标准品，德国Dr.Ehenstorfer公司；其他化学试剂均为国产分析纯。TQ 8040型气相色谱质谱联用仪，日本岛津公司；K2025高效液相色谱仪，山东悟空仪器公司；50/30 μ m DVB/CAR/PDMS固相萃取头，瑞士思特斯分析仪器公司；SupelcleanTM LC-Si SPE固相萃取管，美国Supelco公司。

1.2 实验方法

1.2.1 浓香菜籽油的生产工艺及加工单元取样

浓香菜籽油的生产过程包含炒籽单元、压榨单元和脱胶单元，工艺流程如图1所示。具体操作如下，将200 kg油菜籽投入滚筒炒籽机进行翻炒，炒籽初始温度为50 $^{\circ}$ C，经30 min翻炒达到终点温度160 $^{\circ}$ C，得到炒后油菜籽。再经螺旋压榨处理分别得到菜籽饼和菜籽毛油。依据工厂的加工工艺条件，待油温冷却至80 $^{\circ}$ C时向菜籽毛油中加入5%（m/m）油重的煮沸NaCl溶液（5%，m/m）进行脱胶，自然沉降21 d后取上层油得到脱胶后成品油，即浓香菜籽油。对油菜籽、炒后油菜籽、菜籽饼、菜籽毛油和脱胶后成品油进行取样，对多环芳烃、理化指标和挥发性风味物质进行检测，样品测试前于4 $^{\circ}$ C避光贮藏。

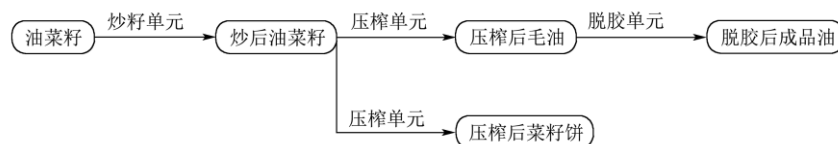


图1 浓香菜籽油的生产工艺流程图

Fig.1 The processing flow chart of strong flavor rapeseed oil production

1.2.2 3种炒籽升温速率下浓香菜籽油的加工方法

分别采用低升温速率、中升温速率和高升温速率对油菜籽进行炒籽加工，菜籽升温曲线如图2所示。炒籽后的压榨和脱胶加工条件同1.2.1中方法，收集3种炒籽升温速率下的脱胶后成品油，并于4 $^{\circ}$ C避光贮藏待测。

1.2.3 酸价和过氧化值的检测

依据GB 5009.229-2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》和GB 5009.227-2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》分别测定菜籽毛油和成品油的酸价和过氧化值。

1.2.4 多酚、生育酚和甾醇含量的测定

采用福林酚显色法^[6]测定样品中多酚含量，结果

以没食子酸当量表示 (mg/kg)。依据 GB 5009.82-2016 《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》方法测定样品中生育酚含量。参考耿树香等^[7]的方法采用气相色谱质谱联用仪测定样品中甾醇含量, 与 NIST17 质谱数据库比对定性, 以胆甾烷醇为内标进行定量。

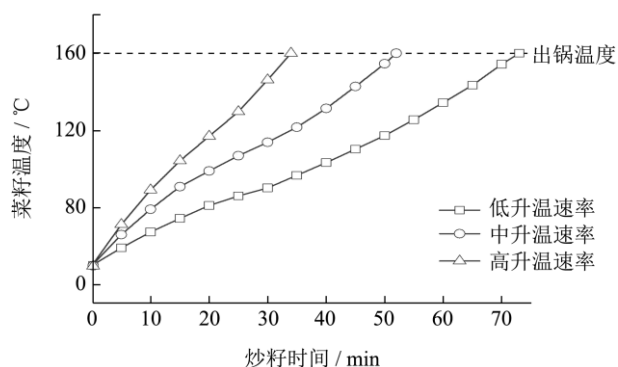


图 2 3 种炒籽升温速率下菜籽升温曲线

Fig.2 The heating curves of rapeseed at three heating rates

1.2.5 挥发性化合物的测定

参考季德胜等^[8]的方法, 采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用法对挥发性化合物进行检测。质谱结果与 NIST17 质谱数据库比对, 确定浓香菜籽油中匹配度 ≥ 80 的挥发性化合物种类, 以 2-辛醇为内标进行定量。

1.2.6 多环芳烃的提取与检测

参考张东东^[1]的方法对菜籽和油品中多环芳烃进行提取, 采用气相色谱质谱联用仪的多反应监测模式进行检测。色谱条件: 安捷伦 DB-EUPAH (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m), 升温程序为 80 $^{\circ}$ C (1 min), 40 $^{\circ}$ C/min 升温至 210 $^{\circ}$ C (6 min), 以 10 $^{\circ}$ C/min 升温至 225 $^{\circ}$ C, 最后以 2 $^{\circ}$ C/min 升温至 310 $^{\circ}$ C (3 min), 总计 57.25 min。流速 1 mL/min。采用高压不分流进样。离子源温度 280 $^{\circ}$ C, 进样口温度 280 $^{\circ}$ C, 接口温度 300 $^{\circ}$ C, 载气为氦气, 进样量 1 μ L。测定油菜籽、炒后油菜籽、菜籽饼、菜籽毛油和成品油样品中的苯并[a]芘; 苯并[a]蒎、蒎、苯并[b]荧蒎、苯并[a]芘之和 (PAH4); EPA 建议评估的 16 种多环芳烃之和

(EPA16); EPA16 中 2~4 个苯环的多环芳烃之和, 简称轻质多环芳烃 (Light PAHs, LPAHs); EPA16 中 4 个苯环以上的多环芳烃之和, 简称重质多环芳烃 (Heavy PAHs, HPAHs)。

1.2.7 数据分析

采用 IBM SPSS 25 对菜籽毛油和成品油的酸价、过氧化值、抗氧化活性物质、挥发性风味物质和多环芳烃进行显著性分析, $P < 0.05$ 代表显著水平。利用 Origin 2018 对实验数据进行制图。

2 结果与讨论

2.1 多环芳烃在浓香菜籽油加工单元的形成和迁移规律

采用 1.2.1 中实验方法得到油菜籽和浓香菜籽油, 它们的多环芳烃含量均总体呈上升趋势, 见表 1。成品油中苯并[a]芘和 PAH4 含量分别为 0.91 μ g/kg 和 6.95 μ g/kg, 均低于我国 GB 2762-2017 《食品安全国家标准 食品中污染物限量》和欧盟 No 835/2011 中的限量标准, 表明该浓香菜籽油中多环芳烃处于安全水平。加工单元对油菜籽和菜籽油中多环芳烃的含量具有较大影响, 见图 3。炒籽单元导致油菜籽中多环芳烃含量大幅升高, 其中 EPA16 增加量达到 10.51 μ g/kg, 张东东^[1]同样指出经 160 $^{\circ}$ C 焙炒 30 min 后, 油菜籽中苯并[a]芘、PAH4 含量分别增加了 0.63、2.50 μ g/kg, 这是由于炒籽单元的高温环境引发油菜籽中的有机物等不完全热解, 从而导致多环芳烃的形成^[9]。压榨单元加工后菜籽油中多环芳烃较炒后油菜籽含量略有增加, 其中 PAH4 增加近 3 μ g/kg, 这可能是由于亲脂性的多环芳烃易于在油相中富集的缘故。脱胶单元处理后菜籽油中多环芳烃含量明显降低, EPA16 减少约 8 μ g/kg。刘玉兰等^[5]指出水化脱胶对 EPA16 去除率可达 15.45%, 这可能是脱除的磷脂等物质对 EPA16 有一定的吸附作用所致。但脱胶单元是否会导致菜籽油中风味品质发生明显降低将在本文接下来的研究中予以说明。

表 1 3 个加工单元下菜籽和油品中多环芳烃的含量

多环芳烃	油菜籽	炒后油菜籽	压榨后菜籽饼	压榨后毛油	脱胶后成品油
苯并[a]芘	ND	0.40 \pm 0.01	0.51 \pm 0.02	0.89 \pm 0.01	0.91 \pm 0.03
PAH4	0.95 \pm 0.09	4.74 \pm 0.14	5.17 \pm 0.64	7.57 \pm 0.14	6.95 \pm 0.48
LPAHs	30.66 \pm 3.16	39.29 \pm 0.10	35.98 \pm 0.78	37.81 \pm 0.14	29.85 \pm 1.57
HPAHs	0.58 \pm 0.03	2.48 \pm 0.05	3.04 \pm 0.29	4.61 \pm 0.02	4.63 \pm 0.10
EPA16	31.25 \pm 3.19	41.76 \pm 0.16	39.02 \pm 0.48	42.42 \pm 0.16	34.48 \pm 1.67

注: ND 表示未检出。

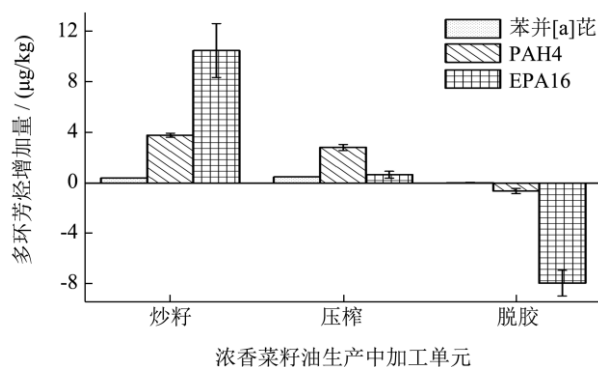


图3 加工单元对油菜籽及菜籽油中多环芳烃含量的影响

Fig.3 The effect of processing units on PAHs in rapeseed and rapeseed oil

2.2 炒籽升温速率对浓香菜籽油中多环芳烃的影响

由于炒籽单元是导致浓香菜籽油中多环芳烃增长的重要工序，升温速率是炒籽加工中的关键参数，因此考查了3种炒籽升温速率对浓香菜籽油中多环芳烃的影响，结果见表2。随着炒籽升温速率的增加，浓香菜籽油中的苯并[a]芘、PAH4和EPA16含量逐渐升高，分别由低升温速率的0.38、3.21和27.99 µg/kg上升至高升温速率的0.91、7.18和40.92 µg/kg，增加了139.47%、123.68%和46.20%。这可能是由于炒籽升温速率过快时，易引发局部油料出现烤焦现象，其多环芳烃含量大幅增加^[10]。多环芳烃的毒性和稳定性随苯环数的增加而逐步增加，EPA16中HPAHs对人体危害性较强^[2]。浓香菜籽油中的LPAHs和HPAHs随

炒籽升温速率的增加由25.93、2.06 µg/kg上升至35.52、5.40 µg/kg，分别增加了36.98%、162.14%，这表明炒籽升温速率增加可能导致危害较强的HPAHs含量增长较快。Ji等^[3]研究了焙烤油料对油脂中多环芳烃含量的影响，指出如菜籽油等多不饱和脂肪酸含量较高的油脂在焙烤时较易产生HPAHs。

2.3 炒籽升温速率对浓香菜籽油的理化性质和风味品质的影响

3种炒籽升温速率下浓香菜籽油的酸价均低于1.50 mg/g，且过氧化值低于1.20 mmol/kg（见表3），表明菜籽油具有良好的品质。随着炒籽升温速率的升高，浓香菜籽油中的酸价和过氧化值显著降低（ $P < 0.05$ ），这可能与高升温速率下所用炒籽时间更短有关。浓香菜籽油中富含多酚、生育酚和甾醇等抗氧化活性物质，可提升浓香菜籽油营养品质及氧化稳定性^[11]。炒籽升温速率提升会导致浓香菜籽油中的多酚、生育酚和甾醇含量呈现不同程度的降低，但并不显著（ $P > 0.05$ ）。3种炒籽升温速率下浓香菜籽油中共检出40种挥发性化合物（数据未列出），主要包括脂质氧化产物8种（醛类4种、醇类2种、酮类1种和酸类1种），硫苷降解物15种（腈类11种，异硫氰酸酯类2种和含硫类2种），美拉德反应产物15种（吡嗪类7种、呋喃类3种、吡咯类4种和吡喃1种）和其他类2种，3种浓香菜籽油的风味物质种类无显著区别（ $P > 0.05$ ）。随着炒籽升温速率的增加，浓香菜籽油中的脂质氧化产物含量显著降低（ $P < 0.05$ ），这与菜籽油中酸价和过氧化值的变化规律一致。

表2 3种炒籽升温速率下浓香菜籽油中多环芳烃的含量

Table 2 The contents of PAHs in strong flavor rapeseed oil at three heating rates (µg/kg)

多环芳烃	低升温速率	中升温速率	高升温速率
苯并[a]芘	0.38±0.05 ^c	0.70±0.04 ^b	0.91±0.06 ^a
PAH4	3.21±0.31 ^c	6.01±0.33 ^b	7.18±0.41 ^a
LPAHs	25.93±0.84 ^c	31.47±1.46 ^b	35.52±1.89 ^a
HPAHs	2.06±0.35 ^c	3.69±0.15 ^b	5.40±0.34 ^a
EPA16	27.99±0.83 ^c	35.16±1.49 ^b	40.92±2.22 ^a

注：不同字母代表列间数据存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。下表同。

表3 3种炒籽升温速率下浓香菜籽油的酸价、过氧化值和抗氧化物质含量

Table 3 The AV, POV and antioxidant contents of strong flavor rapeseed oil at three heating rates

项目	低升温速率	中升温速率	高升温速率
酸价 (KOH) / (mg/g)	1.44±0.05 ^a	1.37±0.04 ^b	1.28±0.05 ^c
过氧化值/(mmol/kg)	1.15±0.06 ^a	1.04±0.05 ^b	0.95±0.06 ^c
多酚含量/(mg/kg)	457.45±24.28 ^a	450.43±26.38 ^a	427.39±26.01 ^a
生育酚含量/(mg/kg)	510.43±18.79 ^a	510.08±44.29 ^a	482.91±21.16 ^a
甾醇含量/(mg/kg)	4 613.57±174.45 ^a	4 519.58±39.50 ^a	4 434.46±108.03 ^a

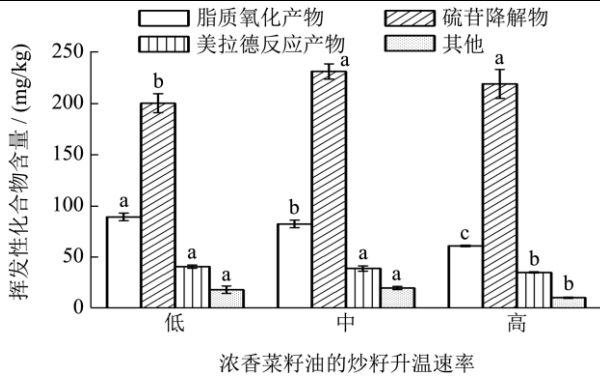


图4 3种炒籽升温速率下浓香菜籽油的挥发性化合物类别及含量

Fig.4 The type and content of volatile compounds in strong flavor rapeseed oil at three heating rates

2.4 脱胶单元对菜籽油的理化性质和风味品质的影响

表4 脱胶单元下菜籽油的理化指标和抗氧化物质含量

Table 4 The physicochemical indexes and antioxidant contents of rapeseed oil under degumming unit

项目	脱胶前毛油	脱胶后成品油
酸价 (KOH)/(mg/g)	1.80±0.03 ^a	1.35±0.04 ^b
过氧化值/(mmol/kg)	0.41±0.01 ^b	0.90±0.01 ^a
<i>L</i> *	67.71±0.15 ^b	88.61±0.02 ^a
色度	<i>a</i> *	15.25±0.04 ^a
	<i>b</i> *	100.76±0.18 ^b
多酚含量/(mg/kg)	487.73±25.21 ^a	425.58±34.97 ^a
生育酚含量/(mg/kg)	508.31±22.30 ^b	488.79±15.34 ^b
甾醇含量/(mg/kg)	5 802.86±73.30 ^a	5 527.45±55.01 ^b

采用 1.2.1 中实验方法得到脱胶前毛油和脱胶后成品油,经脱胶处理后,浓香菜籽油的酸价(KOH)降低 0.45 mg/g(见表4),这可能是脱胶过程中去除的磷脂对游离脂肪酸具有一定吸附能力所致^[12];菜籽油的过氧化值升高 0.49 mmol/kg,这可能是菜籽油在脱胶过程中持续氧化的缘故。菜籽油的 *L**和 *b**明显上升, *a**下降,表现为油脂色泽更加清亮和浅淡,证明脱胶工艺可明显提升油脂色泽质量。此外,脱胶工艺会导致浓香菜籽油中的多酚、生育酚和甾醇含量有小幅的降低(<15%)。Zhang 等^[13]同样指出脱胶会使得菜籽油的 *L**和 *b**增加, *a**下降,并且菜籽油的多酚和甾醇等抗氧化活性物质经脱胶后保留率较高。脂质氧化、硫苷降解以及美拉德反应是浓香菜籽油风味的主要来源,其中脂质氧化产物可赋予浓香菜籽油油脂香味,硫苷降解物使得菜籽油呈现独特菜青味和辛辣味,美拉德反应产物表现为坚果香气^[14]。经脱胶后菜籽油中挥发性化合物的含量有一定程度的降低,其

中脂质氧化产物和美拉德反应产物含量分别降低 31.19%和 53.05%,表明脱胶处理将会减弱浓香菜籽油的油脂和坚果香味。

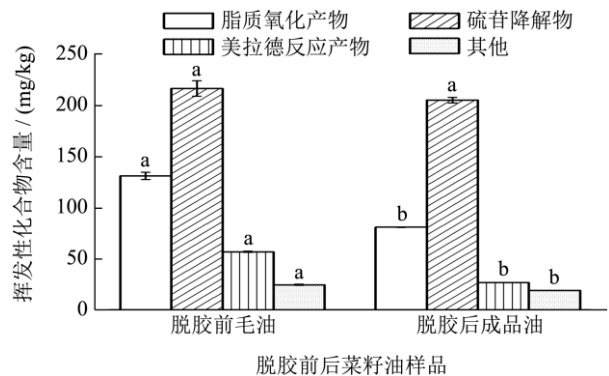


图5 脱胶单元下菜籽油的挥发性化合物类别和含量

Fig.5 The type and content of volatile compounds in rapeseed oil under degumming unit

3 结论

炒籽和压榨单元均会导致浓香菜籽油中多环芳烃含量的增加,其中炒籽单元是浓香菜籽油中多环芳烃形成的主要阶段。脱胶单元使浓香菜籽油中多环芳烃含量降低,其中 EPA16 含量减少尤为突出。炒籽升温速率对浓香菜籽油中多环芳烃含量具有显著影响($P<0.05$)。随着炒籽升温速率的增加,浓香菜籽油中苯并[a]芘、PAH4 和 EPA16 含量显著升高($P<0.05$)。炒籽升温速率对浓香菜籽油中抗氧化活性物质含量和挥发性风味物质种类和含量影响不显著($P>0.05$)。脱胶单元对浓香菜籽油中抗氧化活性物质影响较小,可以明显提升油脂色泽质量,也将减弱浓香菜籽油的油脂和坚果香味。

参考文献

- [1] 张东东.炒香型油脂生产中多环芳烃的控制[D].郑州:河南工业大学,2016.
- [2] Sun Y, Wu S, Gong G Trends of research on polycyclic aromatic hydrocarbons in food: A 20-year perspective from 1997 to 2017 [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 83: 86-98.
- [3] Ji J, Liu Y, Ma Y. Variations of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetable oils during seed roasting pre-treatment [J]. Polycyclic Aromatic Compounds, 2022, 42(5): 2447-2460.
- [4] 胡朝曦,张维,李湘,等.脱胶对浓香菜籽油苯并芘去除的影响[J].中国油脂,2018,43(8):100-103.
- [5] 刘玉兰,温运启,马宇翔,等.大豆油精炼过程中多环芳烃的迁移规律[J].食品科学,2018,39(22):263-268.

- [6] Yang M, Huang F, Liu C, et al. Influence of microwave treatment of rapeseed on minor components content and oxidative stability of oil [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(11): 3206-3216.
- [7] 耿树香,宁德鲁,杨明佳,等.云南 11 种油料作物油脂主要功能性成分评价[J].*中国油脂*,2021,46(1):108-111.
- [8] 季德胜,郑桂青,孙俊,等.顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用分析辣椒油中的风味物质[J].*现代食品科技*,2017,33(6):276-284.
- [9] 石龙凯,刘玉兰,崔瑞福,等.油籽炒籽条件对油脂中多环芳烃含量影响的研究[J].*中国粮油学报*,2016,31(3):79-83.
- [10] 任勇.芝麻油加工过程对多环芳烃形成的影响[D].郑州:河南工业大学,2016.
- [11] Fine F, Brochet C, Gaud M, et al. Micronutrients in vegetable oils: The impact of crushing and refining processes on vitamins and antioxidants in sunflower, rapeseed, and soybean oils [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2016, 118(5): 680-697.
- [12] Yao Y, Liu C, Xiong W, et al. Silicon dioxide as an efficient adsorbent in the degumming of rapeseed oil [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122344.
- [13] Zhang L, Akhymetkan S, Chen J, et al. Convenient method for the simultaneous production of high-quality fragrant rapeseed oil and recovery of phospholipids via electrolyte degumming [J]. *LWT*, 2022, 155: 112947.
- [14] Mao X, Zhao X, Huyan Z, et al. Relationship of glucosinolate thermal degradation and roasted rapeseed oil volatile odor [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(40): 11187-11197.