

# 吸附剂对植物油中 3-氯丙醇酯、缩水甘油酯和多环芳烃脱除效果的研究

迟华忠<sup>1</sup>, 安 骏<sup>2</sup>, 吴祥骞<sup>1</sup>, 赵盼盼<sup>1</sup>, 陆 奕<sup>1</sup>, 杨 涛<sup>2</sup>

(1. 佳格食品(中国)有限公司, 江苏 苏州 215400; 2. 中南林业科技大学 食品科学与工程学院, 长沙 420004)

**摘要:**为探究吸附法脱除植物油中 3-氯丙醇酯(3-MCPDE)、缩水甘油酯(GEs)和多环芳烃(PAHs)的效果,以活性炭、活性白土和硅藻土为吸附剂,对植物油中的 3-MCPDE、GEs 和 PAHs 进行脱除。结果表明:在吸附剂添加量为 0.1% (以油样质量计)时,活性炭、活性白土和硅藻土对玉米油中的 GEs 的脱除效果差异显著,脱除效果依次为活性白土 > 活性炭 > 硅藻土,但 3 种吸附剂对 3-MCPDE 的脱除率均低于 10%;随着活性白土添加量的增加,其对玉米油中 GEs 和 3-MCPDE 的脱除率呈上升趋势,在活性白土添加量 1% 时,玉米油中 GEs 的脱除率达到 100%,此时 3-MCPDE 的脱除率为 27.78%;活性白土对不同植物油中 3-MCPDE 和 GEs 的脱除能力存在差异;与活性白土相比,活性白土与活性炭复合使用对玉米油中 PAHs 的脱除效果更佳,PAH4 脱除率最高可达 81.57%。综上,不同吸附剂对植物油中有害物质呈现出不同的脱除能力,在实际应用中需选择合适的吸附剂。

**关键词:**吸附剂;植物油;3-氯丙醇酯;缩水甘油酯;多环芳烃

中图分类号:TS225.1;TS201.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)05-0120-06

## Removal effect of adsorbent on 3-monochloropropane-1,2-diol esters, glycidyl esters and polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetable oil

CHI Huazhong<sup>1</sup>, AN Jun<sup>2</sup>, WU Xiangqian<sup>1</sup>, ZHAO Panpan<sup>1</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, YANG Tao<sup>2</sup>

(1. Standard Foods Co., Ltd., Suzhou 215400, Jiangsu, China; 2. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 420004, China)

**Abstract:** To investigate the efficacy of adsorption in removing 3-monochloropropane-1,2-diol esters (3-MCPDE), glycidyl esters (GEs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from vegetable oils, activated carbon, activated clay, and diatomaceous earth were employed as adsorbents to remove 3-MCPDE, GEs and PAHs from vegetable oil. The results showed that at a 0.1% adsorbent dosage (based on oil mass), there was a significant difference in the removal efficiency of GEs in corn oil by three adsorbents, with performance ranking as activated clay > activated carbon > diatomaceous earth. However, the removal rates for 3-MCPDE remained below 10% for all adsorbents. Increasing activated clay dosage, GEs and 3-MCPDE removal rates in corn oil increased, achieving complete elimination (100%) for GEs at 1% dosage while attaining 27.78% removal rate for 3-MCPDE. Notably, activated clay displayed variations in adsorption capacity for 3-MCPDE and GEs across different vegetable oils. Compared with activated clay, the combination of activated clay and activated carbon had a better removal effect on PAHs in corn oil, and achieved maximum removal rate of 81.57% for PAH4. In summary,

different adsorbents present different adsorption and removal capabilities for harmful substances in vegetable oil, and suitable adsorbents need to be selected in practical applications.

**Key words:** adsorbent; vegetable oil; 3-monochloropropane-1,2-diol esters; glycidyl

收稿日期:2024-12-30;修回日期:2025-02-14

作者简介:迟华忠(1966),男,工程师,主要从事食用油的质量管理及检测等方面的工作(E-mail) bensonchi@sfworldwide.com.cn。

通信作者:安 骏,高级工程师,博士(E-mail) anjunyang@126.com。

esters; polycyclic aromatic hydrocarbons

3-氯丙醇酯(3-MCPDE)和缩水甘油酯(GEs)是植物油精炼过程中,特别是在高温脱臭环节产生的污染物质<sup>[1]</sup>,两者形成机制相似,通常伴随形成。3-MCPDE与GEs在人体胃肠道中被脂肪酶完全水解得到3-氯丙醇(3-MCPD)和缩水甘油(Gly),3-MCPD和Gly具有致癌、致畸和肾毒性,并且容易在人体肾脏组织中积累并引发肿瘤<sup>[2-3]</sup>,已被国际癌症研究机构分别列为2B类致癌物和2A类致癌物<sup>[4]</sup>。2020年9月,欧盟发布(EU)2020/1322号法规,规定了植物油中GEs最大限量为1.0 mg/kg,椰子油、菜籽油、大豆油、棕榈仁油、橄榄油、玉米油、葵花籽油及其混合植物油的3-MCPDE最大限量为1.25 mg/kg<sup>[5]</sup>。多环芳烃(PAHs)是一类由2个及2个以上苯环以线状、角状或团簇状方式排列的稠合芳香化合物,同样具有致癌、致畸、致突变作用<sup>[6]</sup>。因此,研究如何有效脱除食用油中的有害化合物显得十分关键。

3-MCPDE和GEs的控制和脱除技术一直是行业关注的热点与难点问题,可通过抑制及脱除其前体物质,如控制甘油一酯、甘油二酯和氯离子的含量<sup>[7]</sup>,适当降低脱臭温度和缩短脱臭时间<sup>[8]</sup>,以及采用酶解法、分子蒸馏法和吸附法<sup>[9-10]</sup>等脱除方式来降低植物油中GEs和3-MCPDE含量。脱除方式中,酶解法由于酶的参与会有水解甘油三酯的风险,分子蒸馏法的成本较高,相比之下,吸附法不仅具有投资少、脱除效率高、能耗低等优势,还能吸附油脂中的有害成分如PAHs和塑化剂等<sup>[11]</sup>。常见的吸附剂有活性白土、活性炭、沸石、生物炭等。程威威<sup>[12]</sup>研究了常见的吸附剂对GEs的吸附效果,发现酸洗活性炭对GEs的吸附效果最好,对棕榈油中GEs吸附率可达95.49%。Sim等<sup>[13]</sup>指出,控制3-MCPDE和GEs减少的因素是活性白土的孔隙结构,而不是其酸度分布。目前虽有吸附法脱除3-MCPDE和GEs的相关报道,但现有研究多关注油脂中3-MCPDE、GEs的单一脱除,对于3-MCPDE、GEs和PAHs同时脱除的报道较少。

本研究选取活性白土、活性炭和硅藻土为吸附剂,研究吸附剂种类和添加量对玉米油中3-MCPDE和GEs的脱除效果,在此基础上,研究吸附剂对常见植物油中3-MCPDE和GEs的吸附脱除效果,此外考察了复合吸附剂对PAHs的吸附脱除效果,以为同时吸附脱除植物油中的3-MCPDE、GEs和PAHs提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

玉米油、花生油、芝麻油、菜籽油,市售;1060FF型活性白土,黄山白岳活性白土有限公司;NK-611型木质活性炭(铁 $\leq 0.2\%$ ,氧化物 $\leq 0.4\%$ ,pH 4.0~11.0,比表面积 $880\text{ m}^2/\text{g}$ ,总孔容 $0.86\text{ cm}^3/\text{g}$ )、NK-608型木质活性炭(铁 $\leq 0.35\%$ ,氧化物 $\leq 0.5\%$ ,pH 4.0~11.0,比表面积 $800\text{ m}^2/\text{g}$ ,总孔容 $0.878\text{ cm}^3/\text{g}$ )、NK-609型木质活性炭(铁 $\leq 0.35\%$ ,氧化物 $\leq 0.5\%$ ,pH 4.0~11.0,比表面积 $850\text{ m}^2/\text{g}$ ,总孔容 $0.82\text{ cm}^3/\text{g}$ )、溧阳南方活性炭有限公司;H305型木质活性炭(灰分 $6.8\%$ ,pH 3~9,铁 $\leq 0.05\%$ )、安徽鑫汇碳业有限公司;粉末活性炭(亚甲基蓝吸附值 $\geq 180\sim 270\text{ mg/g}$ ,焦糖脱色率 $\geq 100\%\sim 130\%$ ,碘值 $600\sim 1\,000\text{ mg/g}$ ,水分 $\leq 10\%$ ,pH 5~7),中溧良友(江苏)环境科技有限公司;ZX-312型活性炭(亚甲基蓝吸附值 $\geq 225\text{ mg/g}$ ,铁 $\leq 0.10\%$ ,氧化物 $\leq 0.20\%$ ,重金属 $\leq 0.01\%$ ,pH 3.0~7.0),江苏竹溪活性炭有限公司;DZ400型硅藻土,临江大源硅藻土新材料环保科技有限公司;溴化钠、碳酸氢钠、苯硼酸、无水硫酸钠、硫酸(质量分数 $98\%$ )、乙醚、乙酸乙酯均为分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;甲醇、丙酮、正庚烷、甲苯、异辛烷、四氢呋喃、二氯甲烷、正己烷,均为色谱纯,德国CNW公司;3-氯-1,2-丙二醇棕榈酸二酯(纯度 $\geq 98.0\%$ )、棕榈酸缩水甘油酯(纯度 $\geq 98.0\%$ )、D<sub>5</sub>-3-氯-1,2-丙二醇棕榈酸二酯(纯度 $\geq 98.0\%$ )、D<sub>5</sub>-缩水甘油棕榈酸酯(纯度 $\geq 98.0\%$ )、TRC公司;苯并(b)荧蒽(纯度 $98.7\%$ )、蒽(纯度 $98.7\%$ )、苯并(a)蒽(纯度 $99\%$ )、o2si公司;苯并(a)芘(纯度 $100\%$ )、上海安谱实验科技有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

Trace1310/ISQ700三重四极杆气相色谱-质谱联用仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;HP-5MS色谱柱( $30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$ )、Agilent LC 1260高效液相色谱仪,安捷伦科技有限公司;PAH专用柱( $250\text{ mm}\times 4.6\text{ mm}\times 5\text{ }\mu\text{m}$ );XD-DCY-12SL水浴氮吹仪,上海析达仪器有限公司;TD6台式大容量低速离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;MS204TS/02电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;SHA-2冷冻水浴恒温振

荡器,常州崢嵘仪器有限公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 植物油中 3-MCPDE 和 GEs 的吸附脱除

称取 100 g 油样于烧杯中,加入一定量吸附剂,搅拌均匀后放入 105 °C 烘箱中吸附 80 min,期间每隔 10 min 将其取出搅拌 1 min,吸附结束后将混合物过滤得到待测样品。

### 1.2.2 植物油中 3-MCPDE 和 GEs 的测定

参照 AOCs Official Method Cd 29a-13 方法测定 3-MCPDE 和 GEs 含量,并稍加改进。油样中加入氘代同位素内标,以溴化钠酸性溶液将 GEs 转变成 3-溴-1,2-丙二醇酯(3-MBPDE); 3-MCPDE 和 3-MBPDE 经硫酸甲醇溶液进行酯键断裂反应,分别形成 3-氯丙醇(3-MCPD)和 3-溴-1,2-丙二醇(3-MBPD);酸水解得到的溶液经碳酸氢钠溶液中和、硫酸钠溶液盐析以及正庚烷除去脂肪酸甲酯等杂质后,使用苯基硼酸衍生,用乙酸乙酯和异辛烷萃取衍生物,采用三重四极杆气相色谱-质谱联用仪检测。以 3-MCPD 含量评价油脂中 3-MCPDE 的含量,以 Gly 含量评价油脂中 GEs 的含量,内标法定量。

色谱条件:HP-5MS 色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm);初始柱温 60 °C,保持 1 min,以 10 °C/min 升至 200 °C,以 25 °C/min 升至 250 °C,保持 10 min;载气为氦气(纯度 ≥ 99.999%);流速 1.0 mL/min;进样量 1 μL(不分流进样)。

质谱条件:电子轰击离子源(EI),离子监测模式(SIM),离子源温度 200 °C,传输线温度 280 °C,溶剂延迟时间 5 min。3-MCPD-D<sub>5</sub> 衍生物定量离子  $m/z$  150,定性离子  $m/z$  150、203; 3-MCPD 衍生物定量离子  $m/z$  147,定性离子  $m/z$  91、147、196; 3-MBPDE 衍生物定量离子  $m/z$  147,定性离子  $m/z$  91、

147、240; 3-MBPD-D<sub>5</sub> 衍生物定量离子  $m/z$  150,定性离子  $m/z$  150、245。

按公式(1)计算 3-MCPDE 和 GEs 的脱除率(Y)。

$$Y = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N_0$  为吸附前植物油中 3-MCPDE 或 GEs 的含量,μg/kg; $N$  为吸附后植物油中 3-MCPDE 或 GEs 的含量,μg/kg。

### 1.2.3 植物油中 PAHs 的吸附脱除

向玉米油中分别加入 1% 活性白土以及不同型号的 0.15% 活性炭与 1% 的活性白土(以油样质量计)复配的复合吸附剂,在 105 °C 下吸附 30 min,吸附结束后将混合物过滤得到待测样品。

### 1.2.4 植物油中 PAHs 的测定

参考 GB 5009.265—2021《食品安全国家标准食品中多环芳烃的测定》第二法高效液相色谱法对植物油中 PAHs 进行测定。

PAHs 脱除率的计算同 3-MCPDE 和 GEs。

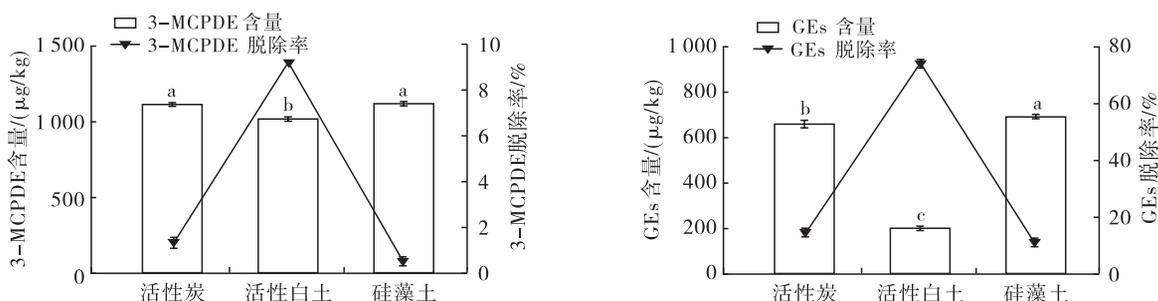
### 1.2.5 数据处理

实验中每个样品均做 3 次平行,使用 Excel 2021 进行数据整理与统计,结果以“平均值 ± 标准差”表示,采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行单因素方差分析(ANOVA)显著性差异比较,采用 Duncan 法进行事后多重比较,采用 Graphpad Prism 9.5 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同吸附剂对 3-MCPDE 和 GEs 脱除效果的影响

选取 1060FF 型活性白土、NK-611 型木质活性炭、DZ400 型硅藻土作为吸附剂,在吸附剂添加量 0.1% (以油样质量计)条件下,考察不同吸附剂对玉米油中 3-MCPDE 和 GEs 脱除效果的影响,结果如图 1 所示。



注:不同字母表示组间具有显著差异( $p < 0.05$ )。下同

Note: Different letters indicate significant differences between groups ( $p < 0.05$ ). The same below

图 1 不同吸附剂对玉米油中 3-MCPDE 和 GEs 脱除效果的影响

Fig. 1 Effect of different adsorbents on the removal effect of 3-MCPDE and GEs in corn oil

由图 1 可知,不同种类吸附剂对 3-MCPDE 的脱除率不同,脱除率大小排序为活性白土 > 活性炭 >

硅藻土,其中,活性白土对 3-MCPDE 的脱除率显著高于其他 2 种吸附剂( $p < 0.05$ ),其将 3-MCPDE 的含量从 1 122.2  $\mu\text{g}/\text{kg}$  降低至 1 018.6  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,脱除率为 9.23%,这可能是因为活性白土有较大的比表面积,增强了吸附效果,但这 3 种吸附剂对玉米油中 3-MCPDE 的脱除效果均不佳。任我行<sup>[14]</sup>研究发现,在活性白土添加量为 0.5% 时,大豆油中 3-MCPDE 的脱除率可以达到 21.23%。研究表明<sup>[9, 15]</sup>,大多数吸附剂对 3-MCPDE 的脱除效果普遍较差,这与本研究结果一致。

由图 1 还可知,不同吸附剂对 GEs 均具有一定的脱除效果,但脱除效果差异显著( $p < 0.05$ ),这可能与 GEs 的特性和吸附剂的性质等因素有关。其

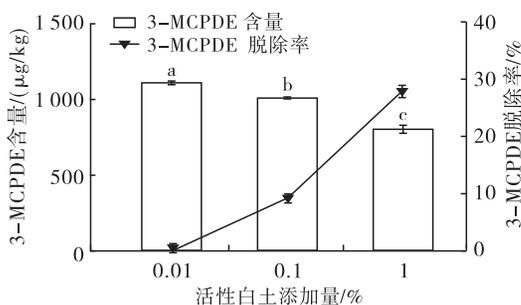


图 2 活性白土添加量对玉米油中 3-MCPDE 和 GEs 脱除效果的影响

Fig. 2 Effect of dosage of activated clay on the removal effect of 3-MCPDE and GEs in corn oil

由图 2 可知,随着活性白土添加量的增加,3-MCPDE 和 GEs 的脱除率均呈上升趋势,这与 Schurz<sup>[16]</sup>的研究结果一致。当活性白土添加量为 1% 时,玉米油中 3-MCPDE 的脱除率为 27.78%,GEs 的脱除率为 100%。有学者推测活性白土的添加量对油脂中酯类污染物含量减少有一定的影响,大量的活性白土有利于进一步降低 3-MCPDE 和 GEs 含量<sup>[17]</sup>,但高剂量的活性白土可能并不总是有利于最大限度地降低成品油中的酯类污染物含量<sup>[18]</sup>,且不同类型的活性白土的最佳添加量不同。

### 2.3 活性白土对不同植物油中 3-MCPDE 和 GEs 脱除效果的影响

在活性白土添加量 1% 的条件下对花生油、芝麻油和菜籽油中 3-MCPDE 和 GEs 进行吸附脱除,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,活性白土添加量为 1% 时,花生油中 3-MCPDE 和 GEs 的脱除率分别为 10.90% 和 100%,芝麻油中 3-MCPDE 和 GEs 的脱除率分别为 7.50% 和 58.44%,菜籽油中 3-MCPDE 和 GEs 的脱除率分别为 2.71% 和 100%。这表明植物油种类对于活性白土吸附 3-MCPDE 和 GEs 有较大影响。不同植物油可能由于其组成成分存在差异,导

致其物理化学性质不同,这些性质的差异会影响吸附剂与 3-MCPDE 和 GEs 之间的相互作用,从而影响其吸附脱除效果。同时,吸附剂对不同物质的吸附能力和选择性往往取决于其表面性质、孔径大小、官能团种类等<sup>[19]</sup>。在研究中,虽然吸附条件相同,但吸附剂对不同植物油中的 3-MCPDE 和 GEs 可能表现出不同的亲和力和选择性,从而导致脱除率的差异。

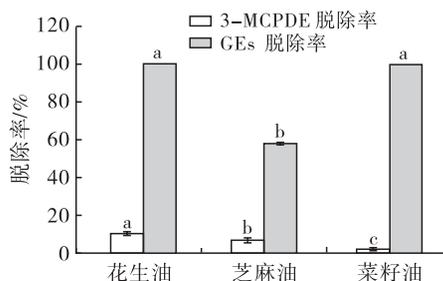


图 3 活性白土对不同植物油中 3-MCPDE 和 GEs 脱除效果的影响

Fig. 3 Effect of activated clay on the removal effect of 3-MCPDE and GEs in different vegetable oils

### 2.4 不同吸附剂对玉米油中 PAHs 脱除效果的影响

不同吸附剂(1. 活性白土;2. 粉末活性炭 + 活

性白土;3. NK-611 型木质活性炭 + 活性白土;4. NK-608 型木质活性炭 + 活性白土;5. NK-609 型木质活性炭 + 活性白土;6. H305 型木质活性炭 + 活性白土;7. ZX-312 型活性炭 + 活性白土)对玉米油中 PAHs(苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘和蒽,PAH4)脱除效果的影响见图4。

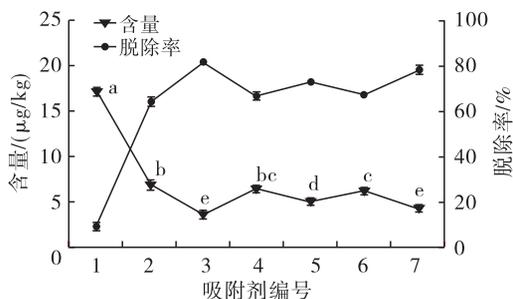


图4 不同吸附剂对玉米油中 PAHs 脱除效果的影响

Fig.4 Effect of different adsorbents on the removal effect of polycyclic aromatic hydrocarbons in corn oil

由图4可知,当只添加活性白土时,玉米油中 PAH4 的脱除率最低,仅为 7.85%,含量为 17.8 μg/kg,仍高于欧盟标准(No 835/2011)中 PAH4 的限量(10 μg/kg)。这可能是极性较弱的 PAHs 与极性吸附剂活性白土的亲和性较差<sup>[20]</sup>,导致活性白土对 PAHs 的脱除率低。经活性炭和活性白土复合处理后,玉米油中的 PAH4 含量明显下降,脱除率均高于 60%,其中,NK-611 型木质活性炭 + 活性白土的 PAH4 脱除率最高,达到 81.57%。有研究报告<sup>[21]</sup>,活性白土本身几乎无法脱除苯并(a)芘,然而,当将活性白土添加到活性炭中时,活性白土可优先脱除植物油中的色素等杂质,使活性炭对苯并(a)芘的脱除能力得以保留,进而提升了活性炭对苯并(a)芘的脱除效率,这与本研究结果一致。

### 3 结论

本研究采用吸附法对植物油中的 3-MCPDE、GEs 和 PAHs 进行脱除。结果表明:3 种吸附剂(1060FF 型活性白土、NK-611 型木质活性炭、DZ400 型硅藻土)对玉米油中的 GEs 均有一定的脱除效果,其中活性白土对 GEs 的脱除效果最佳,但 3 种吸附剂对 3-MCPDE 的脱除效果均不佳;活性白土添加量 1% 时可以完全吸附玉米油中的 GEs,3-MCPDE 脱除率为 27.78%;活性白土对不同植物油中 3-MCPDE 和 GEs 的脱除效果差异显著。与活性白土相比,活性炭与活性白土复合使用对玉米油中 PAHs 的脱除效果更佳。综上,不同吸附剂对植物油中有害物质呈现出不同的脱除能力,在实际应用中需选择合适吸附剂。

### 参考文献:

- [1] CHENG W W, LIU G Q, WANG L Q, et al. Glycidyl fatty acid esters in refined edible oils: A review on formation, occurrence, analysis, and elimination methods[J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2017, 16(2): 263-281.
- [2] GROSSE Y, BAAN R, SECRETAN-LAUBY B, et al. Carcinogenicity of chemicals in industrial and consumer products, food contaminants and flavourings, and water chlorination byproducts[J]. Lancet Oncol, 2011, 12(4): 328-329.
- [3] PUBLICATION E. Risks for human health related to the presence of 3- and 2- monochloropropanediol (MCPD), and their fatty acid esters, and glycidyl fatty acid esters in food[J/OL]. EFSA J, 2016, 14(5): 4426 [2024-12-30]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4426>.
- [4] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some chemicals present in industrial and consumer products, food and drinking-water[J]. IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum, 2013, 101: 9-549.
- [5] COMMISSION REGULATION (EU) 2020/1322 of 23 September 2020 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of 3-monochloropropanediol (3-MCPD), 3-MCPD fatty acid esters and glycidyl fatty acid esters in certain foods[J]. Off J Eur Union, 2021, 310:2-5.
- [6] PURCARO G, MORET S, CONTE L S. Overview on polycyclic aromatic hydrocarbons: Occurrence, legislation and innovative determination in foods[J]. Talanta, 2013, 105: 292-305.
- [7] ARRIS F A, THAI V T S, MANAN W N, et al. A revisit to the formation and mitigation of 3-chloropropane-1,2-diol in palm oil production[J/OL]. Foods, 2020, 9(12): E1769 [2024-12-30]. <https://doi.org/10.3390/foods9121769>.
- [8] FRANKE K, STRIJOWSKI U, FLECK G, et al. Influence of chemical refining process and oil type on bound 3-chloro-1,2-propanediol contents in palm oil and rapeseed oil[J]. LWT - Food Sci Technol, 2009, 42(10): 1751-1754.
- [9] 刘玉兰, 任我行, 马宇翔, 等. 吸附法脱除大豆油中 3-氯丙醇酯及缩水甘油酯的研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(11): 57-62.
- [10] 刘壮, 刘莹, 罗日明, 等. 植物油精炼过程中缩水甘油酯和 3-氯丙醇酯的形成及脱除研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(3): 64-70.
- [11] LIU C, JIN R N, OUYANG X K, et al. Adsorption behavior of carboxylated cellulose nanocrystal: Polyethyleneimine composite for removal of Cr(VI) ions[J]. Appl Surf Sci, 2017, 408: 77-87.

(下转第 140 页)

- [12] 陈通, 陆道礼, 陈斌. GC-IMS 技术结合化学计量学方法在食用植物油分类中的应用[J]. 分析测试学报, 2017(10): 1235-1239.
- [13] 陈通, 谷航, 陈明杰, 等. 基于气相离子迁移谱对葵花籽油精炼程度的检测[J]. 食品科学, 2019(18): 312-316.
- [14] 任凌云, 董斌, 王瑞杰, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱技术的花生油风味成分分析方法研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 149-155.
- [15] 肖岚, 幸勇, 唐英明, 等. 气相色谱-离子迁移谱分析不同植物油浸提的花椒油的挥发性成分[J]. 中国油脂, 2020, 45(8): 138-144.
- [16] 徐萌, 高达利, 张师军. 食品包装高分子材料技术进步与升级[J]. 中国塑料, 2021, 35(3): 74-82.
- [17] SANGRONIZ A, ZHU J B, TANG X, et al. Packaging materials with desired mechanical and barrier properties and full chemical recyclability [J/OL]. Nat Commun, 2019, 10(1): 3559 [2024-01-25]. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11525-x>.
- [18] 谭名, 张海波, 叶萍萍, 等. 植物油加速氧化过程中品质变化进程的研究[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 203-210.
- [19] LÓPEZ-DE-DICASTILLO C, PEZO D, NERÍN C, et al. Reducing oxidation of foods through antioxidant active packaging based on ethyl vinyl alcohol and natural flavonoids [J]. Packag Technol Sci, 2012, 25(8): 457-466.
- [20] 丁丽琼, 罗清, 覃茜, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析墨兰不同花器官香气成分[J]. 热带作物学报, 2023, 44(9): 1879-1888.
- [21] 尹文婷, 师瑞, 马宇翔, 等. 浓香葵花籽油气味活性物质的 HS-SPME 萃取条件优化及 GC-O-MS 分析[J]. 中国油脂, 2023, 48(2): 91-97.
- [22] 师瑞, 尹文婷, 马雪停, 等. SDE-GC-O-MS 鉴定浓香葵花籽油香气活性物质[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 113-117.
- [23] 杨学博, 陈秋翰, 刘寿春, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱和偏最小二乘判别分析技术分析酵母-藿香复合对罗非鱼脱腥效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024(12): 319-326.
- [24] 黄宇杏, 方炜聪, 徐纯伟, 等. GC-MS-O 结合 OAV 鉴定花生油特征香气成分[J]. 现代食品科技, 2023(4): 278-288.
- [25] 仲琴. 菜籽油精炼和储藏过程中品质及香气成分变化研究[D]. 四川 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [26] 曾桥, 吕生华, 段洁, 等. 基于气相离子迁移谱技术分析杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 73-82.
- [27] 袁桃静, 赵笑颖, 庞一扬, 等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 对 5 种食用植物油挥发性风味成分分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 102-111.
- [28] 周萍萍, 黄健花, 宋志华, 等. 浓香葵花籽油挥发性风味成分的鉴定[J]. 食品工业科技, 2012, 33(14): 128-131.
- [29] 尹文婷, 师瑞, 马雪停, 等. 葵花籽油挥发性风味物质研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 42-47.
- [30] WANG D, DONG Y, WANG Q, et al. Limonene, the compound in essential oil of nutmeg displayed antioxidant effect in sunflower oil during the deep-frying of Chinese Maye [J]. Food Sci Nutr, 2020, 8(1): 511-520.
- [31] SONG J, SHAO Y, YAN Y, et al. Characterization of volatile profiles of three colored quinoas based on GC-IMS and PCA [J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2021, 146: 111292 [2024-01-25]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111292>.
- [32] 张菁菁, 王艳, 刘笑笑, 等. 亚麻籽油在煎炸过程中的品质变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 50-58.
- (上接第 124 页)
- [12] 程威威. 植物油精炼中缩水甘油酯生成及其吸附消除机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [13] SIM B I, MUHAMAD H, LAI O M, et al. New insights on degumming and bleaching process parameters on the formation of 3-monochloropropane-1, 2-diol esters and glycidyl esters in refined, bleached, deodorized palm oil [J]. J Oleo Sci, 2018, 67(4): 397-406.
- [14] 任我行. 油脂精炼过程 3-MCPD 酯和缩水甘油酯的控制与脱除研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.
- [15] 杨威, 刘辉, 雷芬芬, 等. 花生油制取工艺主要工段 3, 4-苯并(a)芘及 3-氯丙醇酯的产生及脱除[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 27-35.
- [16] SCHURZ K. Method for reducing the 3-MCPD content in refined vegetable oils: WO10063450 [P]. 2010-06-10.
- [17] PUDEL F, BENECKE P, FEHLING P, et al. On the necessity of edible oil refining and possible sources of 3-MCPD and glycidyl esters [J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2011, 113(3): 368-373.
- [18] HEW K S, ASIS A J, TAN T B, et al. Revising degumming and bleaching processes of palm oil refining for the mitigation of 3-monochloropropane-1, 2-diol esters (3-MCPDE) and glycidyl esters (GE) contents in refined palm oil [J/OL]. Food Chem, 2020, 307: 125545 [2024-12-30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125545>.
- [19] 张亚昕. 碳基吸附剂对食用油中多环芳烃的脱除研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [20] 纪俊敏, 侯杰, 姜苗苗, 等. 吸附法脱除植物油中多环芳烃的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 129-140.
- [21] 罗凡, 费学谦, 方学智, 等. 脱色工艺中不同脱色剂对油茶籽油中苯并芘脱除效果的影响[J]. 中国油脂, 2012, 37(6): 47-50.