

花生油的复配吸附剂脱毒工艺优化

左宗明¹, 高盼^{1,2,3}, 杨永^{3,4}, 董志文¹, 钟武^{1,2,3}, 胡传荣^{1,2}, 何东平^{1,2,3}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 武汉 430023; 3. 国家市场监督管理总局重点实验室(食用油质量与安全), 武汉 430040; 4. 武汉食品化妆品检验所, 武汉 430012)

摘要: 旨在寻找安全、高效、低成本的花生油吸附脱毒工艺, 以脱酸花生油为研究对象, 通过比较活性炭、活性白土、凹凸棒土、膨润土 4 种吸附剂对花生油中苯(a)并芘(BaP)和黄曲霉毒素 B₁(AFB₁)的吸附脱除效果, 挑选合适的 2 种吸附剂进行复配用于花生油的脱毒。以吸油率、过滤速度、BaP 含量、AFB₁ 含量、成本为指标, 采用单因素试验及正交试验对复配吸附剂脱毒工艺条件进行优化。结果表明: 活性炭和膨润土进行复配脱除 BaP 和 AFB₁ 的效果较好; 最佳复配吸附剂脱毒工艺条件为活性炭和膨润土复配比例 1:5(质量比)、吸附剂添加量 2.0%(以脱酸花生油质量计)、反应时间 20 min、反应温度 90℃, 在此条件下复配吸附剂的吸油率为 39.47%, 过滤速度为 2.08 mL/min, BaP 含量从 32.11 μg/kg 降至 0.15 μg/kg, AFB₁ 含量从 19.45 μg/kg 降至 0.12 μg/kg, 吸附剂成本低至 4.41 元/t。优化的工艺符合花生油工业化生产低风险、低成本和高效率的目标。

关键词: 花生油; 吸附剂; 复配; 苯(a)并芘; 黄曲霉毒素 B₁

中图分类号: TS225.1; TS224.6 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)10-0011-06

Detoxification process optimization of peanut oil with composite adsorbent

ZUO Zongming¹, GAO Pan^{1,2,3}, YANG Yong^{3,4}, DONG Zhiwen¹,
ZHONG Wu^{1,2,3}, HU Chuanrong^{1,2}, HE Dongping^{1,2,3}

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil of Ministry of Education in China, Wuhan 430023, China; 3. Key Laboratory of National Market Supervision Bureau (Edible Oil Quality and Safety), Wuhan 430040, China; 4. Wuhan Institute for Food and Cosmetic Control, Wuhan 430012, China)

Abstract: In order to find a safe, efficient and low-cost adsorption detoxification process of peanut oil, taking deacidified peanut oil as the research object, by comparing the influence of four kinds of adsorbents, namely activated carbon, activated clay, attapulgite and bentonite, on the removal rate of benzo(a)pyrene (BaP) and aflatoxin B₁ (AFB₁) in peanut oil, two adsorbents were selected and compounded, and used in peanut oil detoxification. With oil absorption rate, filtration rate, BaP content, AFB₁ content and cost as indexes, single factor experiment and orthogonal experiment were used to optimize the detoxification process conditions with composite adsorbent. The results showed that the combination of activated carbon and bentonite had a good detoxification effect. The optimal detoxification process conditions with composite adsorbent were as follows: mass ratio of activated carbon to bentonite 1:5, adsorbents addition 2.0% of deacidified peanut oil mass, reaction time 20 min, and reaction temperature 90℃. Under these conditions, the oil absorption rate of the composite adsorbent was 39.47%, the filtration rate was 2.08 mL/min, and the BaP content decreased from 32.11 μg/kg to 0.15 μg/kg, AFB₁ content decreased from 19.45 μg/kg to 0.12 μg/kg, the adsorbent cost was as low

as 4.41 yuan/t. The process optimized can meet the industrial production of peanut oil with low-risk, low-cost and high efficiency goals.

Key words: peanut oil; adsorbent; compound; BaP; AFB₁

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2023-07-05

作者简介: 左宗明(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白(E-mail) zzm844233711@163.com。

通信作者: 高盼, 讲师, 博士(E-mail) gaopan925@163.com。

花生油富含油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸,其独特的风味和较高的营养价值备受广大消费者青睐^[1]。黄曲霉毒素(AFT)是一类主要由黄曲霉和寄生曲霉等产生的次生有毒代谢产物,广泛存在于土壤、空气及发霉的粮食制品中^[2-4]。现已发现的AFT约有20种,危害较大的是B₁、B₂、G₁、G₂4种,其中黄曲霉毒素B₁(AFB₁)的毒性最强,且具有致癌性^[5]。苯(a)并芘(BaP)属于多环芳烃,具有高度稳定性,与AFT同被列为1类致癌物^[6]。花生在生长、收获、储存和加工过程中易受AFT污染^[7],环境污染和加工过程会产生BaP^[8-9],这2种有害物质皆具有较强的亲脂性,容易在制油过程中从花生迁移至花生油中^[10],危害消费者健康。因此,在花生油的制备过程中,需要将AFT和BaP脱除。

目前,AFT和BaP的脱除方法主要有物理法、化学法和生物法3种^[11]。其中,物理法由于脱毒效果好、速度快、易操作、成本低等优势被广泛研究和应用。物理吸附脱毒法常采用活性炭^[12]、活性白土^[13]、膨润土^[14]和凹凸棒土^[15]等吸附剂。然而单一的吸附剂在脱毒过程中有明显的缺点和局限性,如:活性炭成本高,过滤速度慢;活性白土添加量过高,会导致油脂带有土腥味^[16];天然膨润土的成本较低,但是比表面积小,吸附性能不理想^[17];凹凸棒土杂质较多,会严重影响吸附脱毒能力^[18]。另外,大部分吸附剂只能吸附一类毒素,而对其他毒素和有害物质吸附很少甚至不吸附^[19]。因此,为了弥补单一吸附剂的不足,多种吸附剂复配的方式被应用于植物油脱毒工艺中。张小涛等^[20]采用活性白土和活性炭复配对菜籽油进行脱毒,BaP脱除率达到96.0%。吕雅芳^[21]以活性炭与Fe₃O₄纳米粒子复合制备磁性活性炭对花生油进行脱毒,AFT脱除率高达90.3%。但现有关于植物油吸附脱毒的研究多针对1种有害物质的脱除,鲜有以有害物质AFT和BaP脱除及成本等因素为目标的花生油吸附脱毒研究。

本文比较了活性炭、活性白土、凹凸棒土、膨润土对花生油中AFB₁和BaP的脱除效果,挑选最适吸附剂进行复配对花生油进行脱毒,然后以安全性为基点,以成本、效率为导向,通过单因素试验和正交试验对复配吸附剂脱毒工艺条件进行优化,旨在为实际生产提供低成本、低风险、高效率的解决方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

脱酸花生油,东海粮油工业(张家港)有限公

司;活性白土、活性炭、凹凸棒土、膨润土,浙江缘鑫新材料科技有限公司;双蒸水,实验室自制;正己烷、乙腈、无水乙醇、正庚烷、氢氧化钠、甲醇、氯化钠、氢氧化钾、乙醚、二氯甲烷,国药集团化学试剂有限公司;高纯氮气(纯度99.999%),武汉纽瑞德贸易有限公司。

Sopelco-2560石英毛细管柱,上海楚定分析仪器有限公司;DHG-9123A电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;RE52C旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂;HH-8数显水浴锅,江苏省金坛市友联仪器研究所;UV-1600紫外可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司;DF-101D集热式恒温加热磁力搅拌器,上海司乐仪器有限公司;TD5A-WS台式离心机,湖北省凯达科学仪器有限公司;1200型高效液相色谱仪,美国Agilent公司;HY-1旋涡混匀仪,上海力辰仪器科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 吸附脱毒工艺

称取50.0g脱酸花生油于200mL烧杯中,于油浴中加热至一定温度,加入一定量的吸附剂(以脱酸花生油质量计),保持匀速搅拌反应一定时间后,以4000r/min离心5min,过滤即得到脱毒花生油。

1.2.2 基本理化指标的测定

酸值测定参照GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》;过氧化值测定参照GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》;色泽测定参照GB/T 22460—2008《动植物油脂 罗维朋色泽的测定》;BaP含量的测定参照GB 5009.27—2016《食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定》;AFB₁含量的测定参照GB 5009.22—2016《食品安全国家标准 食品中黄曲霉毒素B族和G族的测定》中的第二法(高效液相色谱-柱前衍生法)。

1.2.3 过滤速度的测定

在500mL的圆底烧瓶中加入100.0g加入吸附剂的脱酸花生油,将圆底烧瓶置于真空脱色装置上,在110℃下恒温油浴中加热搅拌30min,于室温下趁热过滤,从第一滴油滴入抽滤瓶时开始计时,记录过滤5min时滤液的体积,以每分钟滤液体积来表示过滤速度。

1.2.4 吸油率的测定

称取1.000g废吸附剂(脱毒过滤后所得),烘箱烘干后用滤纸包紧装入具塞锥形瓶并加入正己烷没过样品。将锥形瓶放置于超声波提取机中,超声

1 h后,再将锥形瓶中的提取液于旋转蒸发仪上进行旋蒸,得到残油。吸油率为残油质量与废吸附剂质量的比值。

1.2.5 数据处理

使用 Office Excel 处理数据并制图,每组试验重

复3次,试验结果以“平均值±标准偏差”表示。

2 结果与讨论

2.1 脱酸花生油的基本理化指标

脱酸花生油的基本理化指标测定结果见表1。

表1 脱酸花生油的基本理化指标

| 色泽(25.4 mm 比色槽) | BaP 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) | 酸值(KOH)/(mg/g) | 过氧化值/(mmol/kg) | AFB ₁ 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) |
|-----------------|------------------------------------|----------------|----------------|---|
| Y20, R2.5 | 32.11 ± 1.04 | 3.91 ± 0.15 | 1.66 ± 0.04 | 19.45 ± 0.63 |

由表1可看出,脱酸花生油的色泽较浅(红值和黄值较低),BaP含量超过我国限量标准的2倍($\leq 10 \mu\text{g}/\text{kg}$),AFB₁含量接近我国标准要求安全限值($\leq 20 \mu\text{g}/\text{kg}$)。

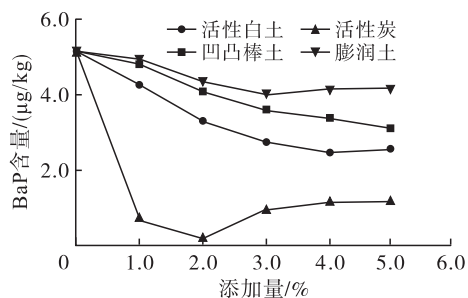


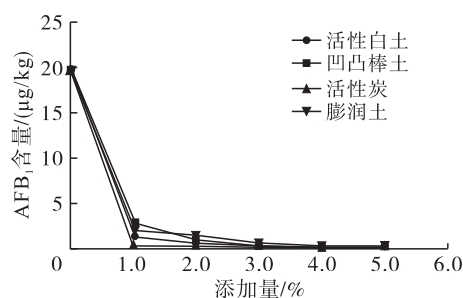
图1 单一吸附剂添加量对花生油脱毒效果的影响

由图1可知,活性炭对花生油中BaP的脱除效果最佳,其次是活性白土、凹凸棒土和膨润土,这与活性炭表面的官能团具有发达的多孔性有关^[22]。当活性炭添加量为1.0%~5.0%时,随着活性炭添加量的增加,花生油中BaP含量呈先降低后增加趋势,当添加量为2.0%时BaP含量最低,BaP脱除率达到96.69%。因此,从安全和成本的角度考虑,建议活性炭的添加量不超过2.0%。

由图1还可知,4种吸附剂对花生油中AFB₁均有较好的脱除效果,其中活性炭的脱除效果最好,其

2.2 单一吸附剂对花生油脱毒效果的影响

在反应温度110℃、反应时间20 min时,选择单一吸附剂添加量为1.0%~5.0%进行花生油脱毒。单一吸附剂添加量对花生油脱毒效果的影响见图1。



次是活性白土和膨润土,凹凸棒土的效果稍差。

综上所述,从成本及脱毒效果考虑,选择活性炭与膨润土进行复配。

2.3 吸附剂复配单因素试验

在吸附剂添加量2.0%、反应温度90℃、反应时间30 min时,选择活性炭与膨润土复配比例(质量比)分别为1:10、1:5、1:1、5:1、10:1进行花生油的脱毒。吸附剂复配比例对花生油各指标的影响见表2。

表2 吸附剂复配比例对花生油各指标的影响

| 复配比例 | 吸油率/% | 过滤速度/(mL/min) | BaP 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) | AFB ₁ 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) | 成本/(元/t) |
|------|---------------|---------------|------------------------------------|---|----------|
| 1:10 | 45.32 ± 4.40 | 2.51 ± 0.07 | 0.47 ± 0.02 | 0.12 ± 0.00 | 2.63 |
| 1:5 | 53.24 ± 4.62 | 2.25 ± 0.05 | 0.19 ± 0.00 | 0.10 ± 0.00 | 3.48 |
| 1:1 | 96.27 ± 5.91 | 1.66 ± 0.02 | 0.42 ± 0.02 | 0.19 ± 0.00 | 7.30 |
| 5:1 | 132.08 ± 7.11 | 1.14 ± 0.02 | 0.52 ± 0.05 | 0.20 ± 0.00 | 11.12 |
| 10:1 | 148.58 ± 7.97 | 1.09 ± 0.02 | 0.69 ± 0.07 | 0.22 ± 0.00 | 11.97 |

注:表中成本为吸附剂成本

由表2可知,随活性炭与膨润土复配比例升高,吸油率升高,过滤速度降低,成本显著升高,当复配比例在1:5时,BaP和AFB₁含量均最低。因此,选择复配比例为1:5进行下一步素试验。

在活性炭与膨润土复配比例1:5、反应温度90℃、反应时间30 min时,选择吸附剂添加量分别为1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%进行花生油的脱毒。吸附剂添加量对花生油各指标的影响见表3。

表3 吸附剂添加量对花生油各指标的影响

| 添加量/% | 吸油率/% | 过滤速度/(mL/min) | BaP 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) | AFB ₁ 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) | 成本/(元/t) |
|-------|--------------|---------------|------------------------------------|---|----------|
| 1.0 | 39.12 ± 4.12 | 2.47 ± 0.05 | 0.49 ± 0.04 | 0.15 ± 0.00 | 1.74 |
| 1.5 | 42.01 ± 4.74 | 2.45 ± 0.05 | 0.22 ± 0.00 | 0.10 ± 0.00 | 2.61 |
| 2.0 | 43.24 ± 3.88 | 2.25 ± 0.03 | 0.19 ± 0.00 | 0.10 ± 0.00 | 3.48 |
| 2.5 | 38.77 ± 3.90 | 2.18 ± 0.03 | 0.19 ± 0.00 | 0.12 ± 0.00 | 4.35 |
| 3.0 | 37.71 ± 4.07 | 2.09 ± 0.03 | 0.20 ± 0.00 | 0.14 ± 0.00 | 5.22 |

由表3可知,随吸附剂添加量的增加,BaP含量先降低,在吸附剂添加量为1.5%和2.0%后基本不变,AFB₁含量先降低后增大,在吸附剂添加量为2.0%时最低。随吸附剂添加量增加,吸附剂吸油率变化不明显,过滤速度呈缓慢下降趋势。综合考虑,

选择吸附剂添加量为2.0%进行下一步试验。

在活性炭与膨润土复配比例1:5、反应温度90℃、吸附剂添加量2.0%时,选择反应时间分别为10、20、30、40、50 min进行花生油的脱毒。反应时间对花生油各指标的影响见表4。

表4 反应时间对花生油各指标的影响

| 反应时间/min | 吸油率/% | 过滤速度/(mL/min) | BaP 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) | AFB ₁ 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) |
|----------|--------------|---------------|------------------------------------|---|
| 10 | 27.11 ± 2.75 | 2.39 ± 0.04 | 0.79 ± 0.09 | 0.21 ± 0.00 |
| 20 | 39.19 ± 3.07 | 2.27 ± 0.03 | 0.15 ± 0.00 | 0.14 ± 0.00 |
| 30 | 43.24 ± 3.97 | 2.25 ± 0.03 | 0.19 ± 0.00 | 0.10 ± 0.00 |
| 40 | 49.17 ± 4.04 | 2.32 ± 0.04 | 0.24 ± 0.01 | 0.12 ± 0.00 |
| 50 | 54.01 ± 4.52 | 2.24 ± 0.03 | 0.20 ± 0.00 | 0.17 ± 0.00 |

由表4可知,随反应时间的延长,BaP和AFB₁含量呈先降低后增大的趋势,其中BaP含量在20 min时最低,AFB₁含量在30 min时最低。反应时间对过滤速度影响不明显,而吸油率会随着反应时间的延长而逐渐增大。在吸附进程中,油脂首先被吸附剂表面吸附,然后逐渐渗透到吸附剂内部孔隙中,反应时间的延长不仅会增大吸油率,导致油脂损失,成本增加,而且吸附剂中存在的微量金属杂质在高

温的条件下可能会催化油脂发生反应,产生有害物质,增大风险因子。因此,选取反应时间为20 min进行下一步试验。

在活性炭与膨润土复配比例1:5、反应时间20 min、吸附剂添加量2.0%时,选择反应温度分别为50、70、90、110、130℃进行花生油的脱毒。反应温度对花生油各指标的影响见表5。

表5 反应温度对花生油各指标的影响

| 反应温度/℃ | 吸油率/% | 过滤速度/(mL/min) | BaP 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) | AFB ₁ 含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) |
|--------|--------------|---------------|------------------------------------|---|
| 50 | 40.20 ± 4.11 | 1.91 ± 0.02 | 0.94 ± 0.12 | 0.21 ± 0.00 |
| 70 | 40.19 ± 4.02 | 2.10 ± 0.02 | 0.51 ± 0.04 | 0.18 ± 0.00 |
| 90 | 39.19 ± 3.68 | 2.27 ± 0.03 | 0.15 ± 0.00 | 0.14 ± 0.00 |
| 110 | 41.11 ± 3.81 | 2.32 ± 0.03 | 0.11 ± 0.00 | 0.20 ± 0.00 |
| 130 | 40.07 ± 4.14 | 2.47 ± 0.04 | 0.24 ± 0.00 | 0.25 ± 0.00 |

由表5可知,随着反应温度的升高,吸油率变化不明显,过滤速度逐渐增大,这是因为高温会降低油脂黏度,加快花生油的过滤进程。随反应温度升高,BaP和AFB₁含量呈先降低后增大趋势,反应温度110℃时BaP含量最低,为0.11 $\mu\text{g}/\text{kg}$,反应温度90℃时AFB₁含量最低,为0.14 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。综合考虑,选择反应温度为110℃进行下一步试验。

2.4 吸附剂复配正交试验

在单因素试验的基础上,以吸附剂复配比例(A)、吸附剂添加量(B)、反应时间(C)、反应温度

(D)为因素,吸油率(y_1)、过滤速度(y_2)、BaP含量(y_3)、AFB₁含量(y_4)、成本(y_5)为指标,采用综合评分法[综合评分 = 0.1 × 吸油率隶属度 + 0.2 × 过滤速度隶属度 + 0.3 × BaP含量隶属度 + 0.3 × AFB₁含量隶属度 + 0.1 × 成本隶属度,过滤速度隶属度 = (指标值 - 指标最小值)/(指标最大值 - 指标最小值),其他4个指标隶属度 = (指标最大值 - 指标值)/(指标最大值 - 指标最小值)],选用L₁₆(4⁵)正交表设计四因素四水平的正交试验,优化花生油脱毒工艺条件。正交试验方案及结果见表6。

表6 正交试验方案及结果

| 试验号 | A | B | C | D | $y_1/\%$ | $y_2/(\text{mL}/\text{min})$ | $y_3/(\mu\text{g}/\text{kg})$ | $y_4/(\mu\text{g}/\text{kg})$ | $y_5/(\text{元}/\text{t})$ | 综合评分 |
|-------|-------|-------|--------|--------|----------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------|
| 1 | 1:1 | 3.0% | 10 min | 90 °C | 74.41 | 1.64 | 1.03 | 0.34 | 9.04 | 0.30 |
| 2 | 1:1 | 1.5% | 40 min | 110 °C | 69.94 | 1.72 | 0.57 | 0.27 | 6.87 | 0.52 |
| 3 | 1:1 | 2.0% | 20 min | 130 °C | 92.90 | 1.88 | 0.47 | 0.34 | 7.30 | 0.47 |
| 4 | 1:1 | 2.5% | 30 min | 70 °C | 88.60 | 1.42 | 0.78 | 0.25 | 8.17 | 0.42 |
| 5 | 1:5 | 3.0% | 40 min | 130 °C | 54.52 | 2.36 | 0.34 | 0.27 | 5.22 | 0.68 |
| 6 | 1:5 | 1.5% | 10 min | 70 °C | 36.88 | 2.42 | 1.18 | 0.25 | 2.61 | 0.51 |
| 7 | 1:5 | 2.0% | 30 min | 90 °C | 53.24 | 2.25 | 0.19 | 0.10 | 3.48 | 0.87 |
| 8 | 1:5 | 2.5% | 20 min | 110 °C | 43.64 | 2.25 | 0.11 | 0.22 | 4.35 | 0.79 |
| 9 | 1:10 | 3.0% | 20 min | 70 °C | 36.74 | 2.23 | 0.80 | 0.24 | 4.37 | 0.59 |
| 10 | 1:10 | 1.5% | 30 min | 130 °C | 47.97 | 2.94 | 0.77 | 0.28 | 1.97 | 0.65 |
| 11 | 1:10 | 2.0% | 10 min | 110 °C | 32.11 | 2.73 | 1.03 | 0.29 | 2.63 | 0.55 |
| 12 | 1:10 | 2.5% | 40 min | 90 °C | 42.78 | 2.54 | 0.52 | 0.16 | 3.50 | 0.77 |
| 13 | 5:1 | 3.0% | 30 min | 110 °C | 129.47 | 1.03 | 0.49 | 0.30 | 12.86 | 0.33 |
| 14 | 5:1 | 1.5% | 20 min | 90 °C | 126.80 | 1.36 | 0.51 | 0.24 | 10.25 | 0.44 |
| 15 | 5:1 | 2.0% | 40 min | 70 °C | 139.01 | 1.04 | 0.93 | 0.26 | 11.12 | 0.25 |
| 16 | 5:1 | 2.5% | 10 min | 130 °C | 108.36 | 1.41 | 1.21 | 0.44 | 11.99 | 0.08 |
| k_1 | 0.427 | 0.475 | 0.360 | 0.595 | | | | | | |
| k_2 | 0.713 | 0.530 | 0.555 | 0.547 | | | | | | |
| k_3 | 0.640 | 0.535 | 0.573 | 0.470 | | | | | | |
| k_4 | 0.275 | 0.515 | 0.568 | 0.443 | | | | | | |
| R | 0.438 | 0.060 | 0.213 | 0.152 | | | | | | |

由表6可知,正交试验的4个因素主次关系为A(吸附剂复配比例)>C(反应时间)>D(反应温度)>B(吸附剂添加量)。最优方案组合为 $A_2B_3C_3D_1$,即吸附剂复配比例为1:5,吸附剂添加量为2.0%,反应时间为20 min,反应温度为90 °C。最优方案经过3次平行试验得到的综合评分分别为0.871、0.867、0.865,平均综合评分为0.868,在此工艺条件下吸油率为39.47%,过滤速度为2.08 mL/min, BaP含量为0.15 $\mu\text{g}/\text{kg}$, AFB₁含量为0.12 $\mu\text{g}/\text{kg}$,吸附剂成本为4.41元/t。

3 结论

从安全、成本、效率的角度出发,采用活性炭和膨润土复配进行花生油中 AFB₁ 和 BaP 的吸附脱除,采用单因素试验考察吸附剂复配比例、吸附剂添加量、反应时间、反应温度对吸附剂吸油率、过滤速度、AFB₁含量、BaP含量和成本的影响,在此基础上通过正交试验优化,确定最佳的花生油中 AFB₁ 和 BaP 脱除工艺条件为吸附剂复配比例1:5、吸附剂添加量2.0%、反应时间20 min、反应温度90 °C,此条件下测得吸附剂对花生油的吸油率为39.47%,过滤速度为2.08 mL/min,花生油中 BaP 含量为0.15 $\mu\text{g}/\text{kg}$, AFB₁含量为0.12 $\mu\text{g}/\text{kg}$,成本为4.41元/t,此时过滤速度较快,吸油率较低,有害物含量远低于安全限值。

参考文献:

- [1] 林丹,陈丽香,蒋杰海,等. 紫外线辐照花生油贮藏过程中的脂肪酸组成分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 229-236, 242.
- [2] 柴芃沛,韩锁义,崔梦杰,等. 花生籽仁抗黄曲霉菌生理生化机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(30): 89-97.
- [3] 王晓威,郝晓艳,于明明,等. 潍坊市面粉、大米、花生油中黄曲霉毒素污染状况调查[J]. 食品安全导刊, 2022(5): 81, 83.
- [4] 梁剑锋,李亚. 小油坊黄曲霉毒素 B₁ 紫外光降解技术模拟及脱毒效果研究[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(4): 15-18, 22.
- [5] FAN S F, LI Q, ZHANG X G, et al. Simultaneous determination of aflatoxin B₁, B₂, G₁, and G₂ in corn powder, edible oil, peanut butter, and soy sauce by liquid chromatography with tandem mass spectrometry utilizing turbulent flow chromatography [J]. Sep Sci, 2015, 38(8): 1310-1317.
- [6] 董星辰,张晓昀,王亚男,等. 高效降解苯并芘假单胞菌的分离、鉴定与应用[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(3): 1-7.
- [7] 董文亚,陈晨,赵秀兰,等. 山东省市售花生及其制品中黄曲霉毒素 B₁污染状况分析与膳食暴露评估[J]. 中国油脂, 2023, 48(7): 67-72.

(下转第24页)

- evaluation of its physicochemical and sensory attributes [J]. *J Food Sci Technol*, 2017, 54(7): 2145–2155.
- [50] 马佳乐. 挤压膨化花生浸油工艺的优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [51] 徐红华, 申德超, 许岩. 挤压膨化技术对大豆油脂及豆粕质量的影响[J]. *农机化研究*, 2004, 26(6): 60–62.
- [52] WANG T, JOHNSON L A. Survey of soybean oil and meal qualities produced by different processes[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2001, 78(3): 311–318.
- [53] 王玮, 刘恩岐. 挤压加工对食品营养品质的影响[J]. *农产品加工: 学刊*, 2008, 4(3): 71–74.
- [54] LIU J, JIN S, SONG H, et al. Effect of extrusion pretreatment on extraction, quality and antioxidant capacity of oat (*Avena sativa* L.) bran oil [J/OL]. *J Cereal Sci*, 2020, 95: 102972 [2022–06–21]. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102972>.
- [55] 熊强, 董智勤, 朱芳州. 脉冲电场技术在食品工业上的应用进展[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(2): 326–339, 255.
- [56] GUDERJAN M, ELEZ – MARTÍNEZ P, KNORR D. Application of pulsed electric fields at oil yield and content of functional food ingredients at the production of rapeseed oil[J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2007, 8(1): 55–62.
- [57] VENEZIANI G, ESPOSTO S, TATICCHI A, et al. Extra-virgin olive oil extracted using pulsed electric field technology: cultivar impact on oil yield and quality[J/OL]. *Front Nutr*, 2019: 134 [2022–06–21]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00134>.
- [58] YU J, WANG M, ZHANG M, et al. Effect of infrared ray roasting on oxidation stability and flavor of virgin rapeseed oils[J]. *J Food Sci*, 2021, 86(7): 2990–3000.
- [59] WANG Z, LI S, GE S, et al. Review of distribution, extraction methods, and health benefits of bound phenolics in food plants[J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(11): 3330–3343.
- [60] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Influence of dry air and infrared pre-treatments on oxidative stability, Maillard reaction products and other chemical properties of linseed (*Linum usitatissimum* L.) oil [J]. *J Food Sci Technol*, 2022, 59(1): 366–376.
- [61] 李杨, 江连洲, 齐宝坤, 等. 超声波辅助水酶法提取花生油工艺[J]. *中国油脂*, 2012, 37(3): 10–13.
- [62] AL JUHAIMI F, USLU N, ÖZCAN M M. The effect of preultrasonic process on oil content and fatty acid composition of hazelnut, peanut and black cumin seeds [J/OL]. *J Food Process Preserv*, 2018, 42(1): e13335 [2022–06–21]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13335>.
- [63] PHAN V M, JUNYUSEN T, LIPLAP P, et al. Effects of ultrasonication and thermal cooking pretreatments on the extractability and quality of cold press extracted rice bran oil [J/OL]. *J Food Process Eng*, 2019, 42(2): e12975 [2022–06–21]. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12975>.
- [64] 乔泽茹, 刘国琴, 李琳. 预处理对低温压榨花生油风味物质的影响[J]. *粮油食品科技*, 2020, 28(2): 22–29.
-
- (上接第 15 页)
- [8] 张志刚, 姚玉军, 顾翔宇, 等. 植物油中塑化剂、苯并芘来源及沙棘籽油风险减控方法[J]. *中国油脂*, 2021, 46(10): 88–91, 115.
- [9] 张娅娣. 植物油中苯并芘的来源及检测方法研究进展[J]. *粮食科技与经济*, 2021, 46(2): 80–83.
- [10] 张东, 李秀娟, 李晓宁, 等. 不同制油工艺及去除红衣对花生黄曲霉毒素的影响[J]. *中国油脂*, 2018, 43(11): 69–72.
- [11] 李培武, 张道宏, 杨扬, 等. 粮油制品中黄曲霉毒素脱毒研究进展[J]. *中国油料作物学报*, 2010, 32(2): 315–319.
- [12] 刘国栋, 熊丽云, 潘建伟, 等. 真菌毒素吸附物理脱毒的研究进展[J]. *粮食与饲料工业*, 2018(2): 29–33.
- [13] 孙萍. 亚麻籽油中的苯并(a)芘的脱除工艺及其生产线设计研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [14] 姜德铭, 刘晓萌, 邹球龙, 等. 4种黄曲霉毒素吸附剂对花生油综合品质的影响[J]. *中国油脂*, 2023, 48(4): 75–80.
- [15] 柳漆利, 张珊, 张蕊, 等. 凹凸棒土吸附处理梨果汁中棒曲霉素的工艺研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(9): 2575–2580.
- [16] 李冯程, 金文闻, 张永强, 等. 冷榨油茶籽毛油脱胶与脱色工艺研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(7): 2728–2737.
- [17] 罗林飞, 葛源, 居树萍, 等. 改性膨润土的吸附性能研究[J]. *安徽化工*, 2021, 47(6): 55–56.
- [18] 谷风, 翦英红, 刘虹. 响应曲面法优化废弃食用油脂脱色工艺[J]. *化学试剂*, 2020, 42(12): 1446–1452.
- [19] 孙思远. 蒙脱土有机改性及对花生油中黄曲霉毒素 B₁ 吸附研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [20] 张小涛, 刘玉兰, 赵欢欢. 吸附法同时脱除菜籽油苯并芘及色泽最佳工艺条件研究[J]. *中国油脂*, 2013, 38(12): 10–14.
- [21] 吕雅芳. 改性活性炭和碳纳米管对花生油中黄曲霉毒素吸附脱除的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- [22] SING K S W, EVERETT D H, HAUL R A W, et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity[J]. *Appl Chem*, 1985, 57(4): 603–619.