

蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的研究

杨长娥¹, 张海龙^{1,2}, 汪昆立¹, 湛刚³, 胡勇杰³,
李冰⁴, 龚任⁴, 齐玉堂^{1,2}, 张维农^{1,2}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 湖北省油脂精细化工工程技术研发中心, 武汉 430023;
3. 湖北三鼎科技有限公司, 湖北鄂州 436060; 4. 国粮武汉科学研究设计院有限公司, 武汉 430079)

摘要:为了开发适用于食用油的安全、高效黄曲霉毒素吸附剂,以半干法制备的钙基蒙脱土为研究对象,采用单因素实验和正交实验优化了蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的工艺,利用等温吸附实验研究了其吸附机制,并考察蒙脱土吸附对花生油品质的影响。结果表明:在蒙脱土添加量 0.5%、吸附温度 110℃、吸附时间 30 min 的条件下,黄曲霉毒素 B₁ 的脱除率最高,为 (95.15 ± 0.01)% ,花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的含量降低至 (1.995 ± 0.607) μg/kg,符合国家标准 (GB 2761—2017) 要求;蒙脱土吸附花生油中黄曲霉毒素 B₁ 符合 Freundlich 模型,表明该吸附是物理多层吸附和化学单层吸附的复杂过程;蒙脱土对黄曲霉毒素 B₁ 的吸附亲和力强,最大吸附量可达 0.1 mg/g;该蒙脱土还可改善花生油的色泽,降低花生油的酸值和过氧化值,且总生育酚和总甾醇保留率较高。该蒙脱土是一种安全、高效的黄曲霉毒素 B₁ 吸附剂,可用于油脂加工中。

关键词:蒙脱土;花生油;吸附;黄曲霉毒素 B₁

中图分类号:TS225.1; TS201.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)11-0069-06

Removal of aflatoxin B₁ from peanut oil by montmorillonite

YANG Chang'e¹, ZHANG Hailong^{1,2}, WANG Kunli¹, CHEN Gang³,
HU Yongjie³, LI Bing⁴, GONG Ren⁴, QI Yutang^{1,2}, ZHANG Weinong^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Engineering Research Center of Lipid-based Fine Chemicals of Hubei Province, Wuhan 430023, China;
3. Hubei Sanding Technology Co., Ltd., Ezhou 436060, Hubei, China; 4. China Grain Wuhan Scientific Research and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430079, China)

Abstract: To develop a safe and high-efficiency adsorbent for removal of aflatoxins from edible oil, a calcium-based montmorillonite prepared by semi-dry method was used as a research object. The removal process of aflatoxin B₁ (AFB₁) from peanut oil by montmorillonite was optimized by single factor experiment and orthogonal experiment and the adsorption mechanism was studied by isothermal adsorption experiment. In addition, the effect of montmorillonite on the peanut oil quality was studied. The results showed that under the conditions of montmorillonite dosage 0.5%, adsorption temperature 110℃ and adsorption time 30 min, the removal rate of AFB₁ was the highest, which was (95.15 ± 0.01)%, and the content of AFB₁ in peanut oil was (1.995 ± 0.607) μg/kg, which could meet the national standard

(GB 2761 - 2017). The adsorption process of AFB₁ in peanut oil by montmorillonite could be well fitted with Freundlich equation, indicating the adsorption of AFB₁ by montmorillonite was a complex process including physical multilayer adsorption and chemical monolayer adsorption. The montmorillonite had a strong adsorption affinity for AFB₁ and the highest adsorbing

收稿日期:2021-08-20;修回日期:2022-05-25

基金项目:“十三五”国家重点研发计划课题 (2020YFC1606805)

作者简介:杨长娥(1998),女,硕士研究生,研究方向为油脂加工与安全 (E-mail) 1638257803@qq.com。

通信作者:张海龙,博士 (E-mail) zhanghailong@whpu.edu.cn;张维农,教授 (E-mail) zhangweinong@163.com。

capacity was up to 0.1 mg/g. The montmorillonite also could improve the color, and reduce the acid value and peroxide value of peanut oil. The retention rates of total sterols and total tocopherols were high. The montmorillonite is a safe and efficient AFB₁ adsorbent, and can be used in oil processing.

Key words: montmorillonite; peanut oil; adsorption; aflatoxin

黄曲霉毒素(Aflatoxins)是由黄曲霉(*Aspergillus flavus*)和寄生曲霉(*A. parasiticus*)产生的一类致癌性真菌毒素。迄今为止,已经检测出20多种黄曲霉毒素,其中黄曲霉毒素B₁的毒性最强,是诱发肝癌的主要因素之一^[1]。黄曲霉常污染的油料作物有花生、玉米等^[2]。以黄曲霉毒素污染的花生和玉米为原料制取食用油,易造成花生油和玉米油中黄曲霉毒素超标。我国GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》规定花生油和玉米油中黄曲霉毒素B₁含量不得超过20 μg/kg,其他食用油中黄曲霉毒素B₁含量不得超过10 μg/kg。

目前用于去除、破坏或减少食用油中黄曲霉毒素的方法有化学法、生物法和物理法^[3]。化学法去除黄曲霉毒素的脱除率高,如刘玉兰等^[4]采用化学碱炼法将玉米油中黄曲霉毒素B₁的含量由73.35 μg/kg降至5 μg/kg以下,脱除率大于90%。但化学法在酸性条件下,被破坏的内酯环结构可以再次关闭并重新生成黄曲霉毒素B₁^[5]。生物法脱除黄曲霉毒素的效率也较高,曾凡正等^[6]筛选了一种能够固态发酵花生粕从而降解黄曲霉毒素B₁的微生物菌株,利用该菌株发酵液提取粗酶添加到脱胶过程中,花生油的黄曲霉毒素B₁降解率可达81%。但在实际应用中,生物法技术有待完善,条件较为苛刻且成本相对较高,目前无法实现大规模应用^[7]。物理法是采用活性白土等吸附剂对黄曲霉毒素进行脱除,脱除率较高,是近年来的研究热点。马文文等^[8]采用6种有机季铵盐改性的钠基蒙脱土脱除花生油中的黄曲霉毒素,发现十八烷基三甲基氯化铵改性蒙脱土对黄曲霉毒素的脱除率最高,可达84.69%;陈金定等^[9]发现向黄曲霉毒素污染的玉米油中添加2%活性白土或凹凸棒石或WY2活性炭,可将玉米油中黄曲霉毒素的含量降至2 μg/kg。

蒙脱土的有机改性剂大部分季铵盐不属于食品添加剂,用于食用油脱除黄曲霉毒素的安全性有待进一步研究。活性白土是以蒙脱土为原料经湿法生产或干法生产得到的,但湿法生产存在需经多次粉磨和干燥,能耗大,洗涤水消耗大,产品回收率低,环境污染严重等缺点,而干法生产存在加酸量大,洗涤

废水污染环境,产品中游离酸高,脱色率不稳定等缺点。半干法是在上述活性白土两种生产方法的基础上发展起来的,相比前述两种方法简化了工艺流程,优化了加酸量,减少了含酸废液对环境的污染,提高了产品的回收率^[10]。本研究以半干法制备的一种具有吸附黄曲霉毒素潜能的钙基蒙脱土为研究对象,采用单因素实验和正交实验确定了该蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素的最佳工艺,同时采用等温吸附曲线考察了其吸附黄曲霉毒素B₁的类型,并系统评价了其对花生油品质的影响。该研究旨在拓宽蒙脱土的应用领域,也为适用于食用油的高效、低成本和安全的真菌毒素吸附剂的开发提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

花生油,由实验室用霉变花生压榨制得;蒙脱土(半干法制备的钙基蒙脱土),湖北三鼎科技有限公司;谷甾醇(纯度≥98%)、豆甾醇(纯度≥95%)、菜油甾醇(纯度≥98%)、α-生育酚(纯度≥98%)、δ-生育酚(纯度≥98%)、γ-生育酚(纯度≥94%)和黄曲霉毒素B₁标准品(纯度≥98%),百灵威科技有限公司;氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、氯化钾、吐温-20、乙醚、异丙醇、三氯甲烷、冰乙酸、无水乙醇、氢氧化钠、硫代硫酸钠、抗坏血酸均为分析纯,甲醇、乙腈均为色谱纯,国药集团化学试剂有限公司;黄曲霉毒素免疫亲和柱,北京中科汇仁科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

DF-101S集热式磁力搅拌水浴锅、YRE2000E旋转蒸发仪,巩义予华仪器有限责任公司;WSL-2比较测色仪,上海仪电物理光学仪器有限公司;JY602B分析天平,上海浦春计量仪器有限公司;AN0542电子天平,上海民桥精密科学仪器有限公司;TG-16离心机,湖南凯达科学仪器有限公司;THZ-82水浴恒温振荡器,江苏金坛亿通电子有限公司;Agilent 1260型高效液相色谱仪(配置紫外和荧光检测器),安捷伦科技有限公司;PHRED-HR光化学衍生器,北京中科汇仁科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的脱除

准确称取 20 g 花生油于 50 mL 圆底烧瓶中,加入一定量蒙脱土,抽真空并充氮气后置于油浴锅中磁力搅拌,在设定的温度和时间条件下进行实验,待油冷却后破真空,抽滤得脱除黄曲霉毒素 B₁ 的油样。

1.2.2 黄曲霉毒素 B₁ 的检测

采用 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》中的高效液相色谱-柱后衍生法测定油样中黄曲霉毒素 B₁ 的含量。色谱条件:Agela C18 高效液相色谱柱(4.6 mm × 150 mm, 5 μm);流动相 A 为水,流动相 B 为甲醇-乙腈(体积比 50:50),等度洗脱(68% A, 32% B);检测器激发波长 360 nm,发射波长 440 nm;流速 0.9 mL/min;柱温 40 °C;进样量 10 μL。

花生油中黄曲霉毒素 B₁ 脱除率(Y)按下式计算。

$$Y = (C_1 - C_2) / C_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中:C₁为吸附前花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的含量,μg/kg; C₂为吸附后花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的含量,μg/kg。

1.2.3 吸附机制分析

配制不同黄曲霉毒素 B₁ 含量(60 ~ 180 μg/kg)的花生油样,分别加入 0.1% 的蒙脱土,在吸附温度 100 °C 和吸附时间 20 min 的条件下进行吸附实验,待油冷却后破真空,抽滤得油样,检测经吸附后油样中黄曲霉毒素 B₁ 的质量浓度。绘制蒙脱土对黄曲霉毒素 B₁ 的等温吸附曲线,分别采用 Ferundlich 模型、Langmuir 模型和 Henry/Linear 模型对蒙脱土吸附黄曲霉毒素 B₁ 的过程进行拟合^[11]。

Ferundlich 模型公式如式(2)所示。

$$\ln Q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K_F \quad (2)$$

Langmuir 模型公式如式(3)所示。

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_m} C_e + \frac{1}{Q_m K_L} \quad (3)$$

Henry/Linear 模型公式如式(4)所示。

$$Q_e = K_d C_e \quad (4)$$

式中:C_e为吸附平衡时吸附质在液体介质中的残余质量浓度,mg/L; Q_e为吸附平衡时吸附质在吸附剂上的吸附量,mg/g; Q_m为平衡时最大吸附量,mg/g; K_F、K_L、K_d分别为 Ferundlich、Langmuir 和 Henry/Linear 模型中的吸附平衡常数; $\frac{1}{n}$ 用来表示吸附剂和吸附质之间的亲和力, $\frac{1}{n} > 1$ 表示吸附亲

和力弱, $0 < \frac{1}{n} < 1$ 表示吸附亲和力强, $\frac{1}{n} = 1$ 表示吸附呈线性相关。

1.2.4 理化指标测定

采用 GB/T 22460—2008 测定色泽;采用 GB 5009. 229—2016 测定酸值;采用 GB 5009. 227—2016 测定过氧化值。

1.2.5 总甾醇和总生育酚含量的检测

参考金玮玲^[12]的方法,采用高效液相色谱法检测花生油中总甾醇和总生育酚的含量。称取 1 g 油样于皂化瓶中,加入 30 mL 无水乙醇后混匀,再分别加入 100 mg/mL 现配抗坏血酸 5 mL 和 1 mol/L 氢氧化钠溶液 20 mL,轻微振荡后皂化 1.5 h。皂化后的油样置于 250 mL 分液漏斗,分别用 50 mL 的蒸馏水和无水乙醚分 2 ~ 3 次清洗皂化瓶,上述洗液全部并入分液漏斗中,轻轻振荡 2 ~ 4 min,静置分层。弃去水层,再用 50 ~ 100 mL 蒸馏水洗涤乙醚层,直至洗涤水不显碱性即可。收集乙醚层并旋转蒸发,残留物用无水乙醇定容到 50 mL 容量瓶中。

色谱条件:Luna C18 高效液相色谱柱(4.6 mm × 150 mm, 5 μm),流动相为甲醇,检测波长 210 nm,流速 1 mL/min,柱温 28 °C,进样量 20 μL。

总甾醇含量为豆甾醇、谷甾醇和菜油甾醇含量之和;总生育酚含量为 α-生育酚、γ-生育酚和 δ-生育酚含量之和。

1.2.6 数据处理

所有的实验数据用 SPSS 18.0 软件处理,且都以 3 次重复测量的“平均值 ± 标准差”表示。采用单因素方差分析的 Duncan 分析各组间差异,当 p < 0.05 时表示实验组间有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 蒙脱土添加量对花生油中黄曲霉毒素 B₁ 脱除效果的影响

在吸附温度 90 °C、吸附时间 15 min,花生油样含有 57.34 μg/kg 黄曲霉毒素 B₁ 的条件下,考察蒙脱土添加量对花生油中黄曲霉毒素 B₁ 脱除效果的影响,结果见图 1。由图 1 可知,蒙脱土添加量对花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的脱除有显著影响。黄曲霉毒素 B₁ 的脱除率随蒙脱土添加量的增加而增加,当蒙脱土添加量达到 0.4% 时,花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的含量由 57.34 μg/kg 降至 3.54 μg/kg,脱除率达到最大值 93.83%;蒙脱土添加量再增加时,脱除率无显著变化。

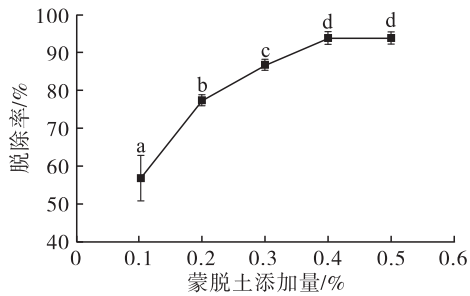


图1 蒙脱土添加量对花生油中黄曲霉毒素 B₁ 脱除效果的影响

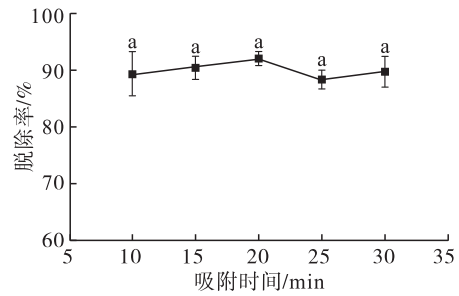


图3 吸附时间对蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的影响

2.1.2 吸附温度对蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的影响

在蒙脱土添加量 0.4%、吸附时间 15 min 条件下,考察吸附温度对蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的影响,结果见图 2。

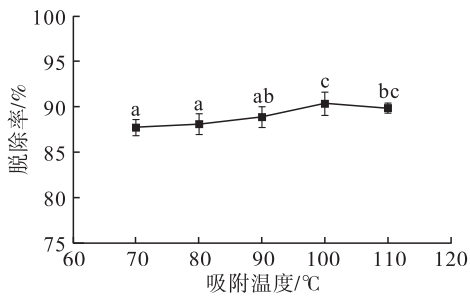


图2 吸附温度对蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的影响

由图 2 可知,吸附温度对蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 有显著影响,脱除率随着吸附温度的升高先增加后降低,当吸附温度升至 100 °C 时,脱除率增至 90.34%,当吸附温度超过 100 °C 时,继续升高温度脱除率略有下降。这可能是由于吸附温度在 70 ~ 100 °C 时,升高温度能加速黄曲霉毒素 B₁ 的分子运动速度,且能提高吸附剂的活性,从而有利于吸附剂脱除黄曲霉毒素 B₁;但当吸附温度超过 100 °C 时,继续升高温度,花生油会发生氧化、色素分解、解吸附等反应,这些反应干扰了黄曲霉毒素 B₁ 与蒙脱土的结合^[13]。

2.1.3 吸附时间对蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的影响

在吸附温度 100 °C、蒙脱土添加量 0.4% 的条件下,考察吸附时间对蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的影响,结果见图 3。由图 3 可知,吸附时间对蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 无显著影响,脱除率在吸附时间大于 20 min 时出现略微的下降,这可能是由于吸附达到平衡后,随着吸附时间的延长,吸附剂表面吸附的黄曲霉毒素 B₁ 发生解吸^[14]。

2.2 正交实验

在单因素实验的基础上,采用正交实验对蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ (黄曲霉毒素 B₁ 含量 41.136 μg/kg) 的工艺进行优化。选用 L₁₆ (4⁵) 正交表,以蒙脱土添加量(A)、吸附温度(B)、吸附时间(C)为自变量,黄曲霉毒素 B₁ 的脱除率为因变量进行正交实验。正交实验因素水平见表 1,正交实验设计及结果见表 2,方差分析见表 3。

表 1 正交实验因素水平

水平	蒙脱土添加量/%	吸附温度/°C	吸附时间/min
1	0.2	80	15
2	0.3	90	20
3	0.4	100	25
4	0.5	110	30

表 2 正交实验设计及结果

实验号	A	B	C	D (空列)	E (空列)	脱除率/%
1	1	1	1	1	1	82.95
2	1	2	2	2	2	81.10
3	1	3	3	3	3	80.91
4	1	4	4	4	4	86.43
5	2	1	2	3	4	86.09
6	2	2	1	4	3	84.52
7	2	3	4	1	2	90.07
8	2	4	3	2	1	91.24
9	3	1	3	4	2	91.00
10	3	2	4	3	1	92.38
11	3	3	1	2	4	91.44
12	3	4	2	1	3	93.56
13	4	1	4	2	3	93.17
14	4	2	3	1	4	94.16
15	4	3	2	4	1	94.97
16	4	4	1	3	2	96.45
k ₁	82.85	88.30	88.84	90.18	90.38	
k ₂	87.98	88.04	88.93	89.24	89.66	
k ₃	92.09	89.35	89.33	88.96	88.04	
k ₄	94.69	91.92	90.51	89.23	89.53	
R	11.84	3.88	1.67	1.22	2.34	

表3 方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
A	320.65	3.00	43.33	2.81	**
B	37.68	3.00	5.09	2.81	*
C	7.09	3.00			
误差	15.48	6.00			
总误差	380.53	15.00			

注:**表示 $p < 0.01$,差异极显著;*表示 $p < 0.05$,差异显著

由表2可知,各因素对黄曲霉毒素 B_1 脱除率影响的大小顺序为 $A > B > C$,即蒙脱土添加量>吸附温度>吸附时间。由表3可知,蒙脱土添加量和吸附温度(F 比 $>F$ 临界值)对蒙脱土脱除黄曲霉毒素 B_1 的脱除率分别有极显著和显著影响,吸附时间对蒙脱土脱除黄曲霉毒素 B_1 的脱除率影响不显著。

由表2可知,蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B_1 的最佳工艺条件为 $A_4 B_4 C_4$,即蒙脱土添加量0.5%、吸附温度 110°C 、吸附时间30 min。在最佳条件下进行了两次平行验证实验,黄曲霉毒素 B_1 的实际脱除率为 $(95.15 \pm 0.01)\%$,花生油中黄曲霉毒素 B_1 含量降低至 $(1.995 \pm 0.607)\mu\text{g}/\text{kg}$,低于国家标准(GB 2761—2017)限量 $20\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

2.3 吸附机制

蒙脱土对花生油中黄曲霉毒素 B_1 的等温吸附曲线如图4所示。

采用Ferundlich模型、Langmuir模型和Henry/Linear模型对蒙脱土吸附花生油中黄曲霉毒素 B_1 的过程进行拟合,模型的拟合参数结果见表4。

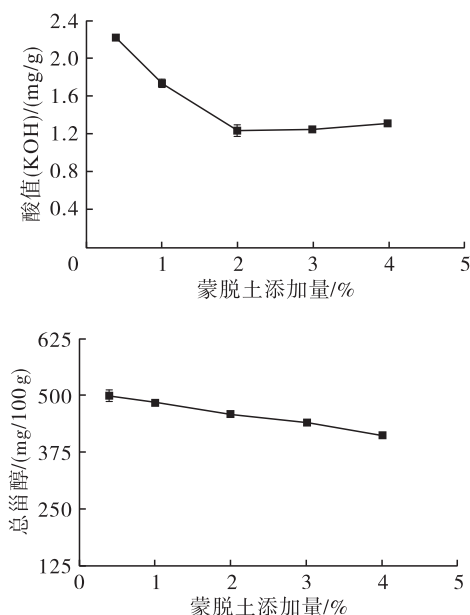


图5 蒙脱土对花生油品质的影响

由表4可知,Langmuir模型中线性相关系数 R^2 为0.180, Ferundlich模型中线性相关系数 R^2 为0.924, Henry/Linear模型中线性相关系数 R^2 为0.914。因此,蒙脱土吸附花生油中黄曲霉毒素 B_1 更符合Ferundlich模型,表明蒙脱土吸附黄曲霉毒素 B_1 过程是多层物理吸附和单层化学吸附的复杂过程^[15]。Ferundlich模型中,吸附平衡常数 K_F 为0.6103,其中 $0 < \frac{1}{n} = 0.7979 < 1$,表明蒙脱土对黄曲霉毒素 B_1 的吸附亲和力较强,其最大吸附量为0.1 mg/g(见图4)。

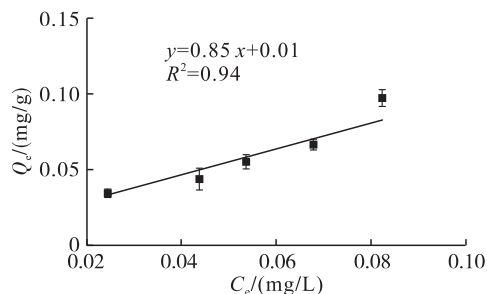
图4 蒙脱土对花生油中黄曲霉毒素 B_1 的等温吸附曲线

表4 等温吸附模型拟合参数

Ferundlich 模型		Langmuir 模型		Henry/Linear 模型	
K_F	$1/n$	R^2	Q_m	K_L	R^2
0.6103	0.7979	0.924	0.3970	3.285	0.180
				1.0925	0.914

2.4 蒙脱土对花生油品质的影响

在吸附温度 100°C 、吸附时间20 min条件下,蒙脱土对花生油的酸值、过氧化值、总生育酚含量和总甾醇含量的影响见图5。

由图5可知:随着蒙脱土添加量的增加,花生油的酸值、总生育酚和总甾醇含量均下降;加入1%的蒙脱土可将油样中黄曲霉毒素几乎完全吸附脱除,此时与原油[酸值(KOH)2.15 mg/g、总生育酚含量32.33 mg/100 g、总甾醇含量539.98 mg/100 g]相比,酸值下降了24%,总生育酚和总甾醇的保留率分别为75%和91%。当蒙脱土添加量为0.4%时,过氧化值出现了上升现象(原油过氧化值为2.82 mmol/kg),而后随着蒙脱土添加量的增加,过氧化值逐渐下降,这可能是由于蒙脱土添加量少,高温产生的过氧化物没有完全被蒙脱土吸附,随着蒙脱土添加量的增加,吸附过氧化物的量也增多,过氧化值下降。

在吸附温度100℃、吸附时间20 min条件下,蒙脱土对花生油色泽的影响如表5所示。由表5可知,蒙脱土具有较好的脱色效果,随着其添加量的增加,油样色泽改善明显。当蒙脱土添加量超过1%时,黄值下降明显,已不能取10定红值,后续分别取黄值4和3来检测油样色泽红值。

表5 蒙脱土对花生油色泽的影响

蒙脱土添加量/%	色泽(25.4 mm 槽)
原油	Y10, R1.5
0.4	Y10, R1.3
1	Y4, R0.7
2	Y4, R0.4
3	Y3, R0.3
4	Y3, R0.2

3 结论

本研究将半干法制备的钙基蒙脱土用于花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的脱除,在蒙脱土添加量0.5%、吸附温度110℃、吸附时间30 min条件下,花生油中黄曲霉毒素 B₁ 脱除率为95.15%,油样中黄曲霉毒素 B₁ 含量降低至(1.995 ± 0.607) μg/kg,符合国家标准(GB 2761—2017)要求;蒙脱土对花生油中黄曲霉毒素 B₁ 的吸附更符合 Ferundlich 模型,最大吸附量为0.1 mg/g。此外,蒙脱土可降低花生油酸值、过氧化值和色泽,且总生育酚和总甾醇保留较高。因此,该蒙脱土是一种安全、高效的黄曲霉毒素 B₁ 吸附剂,可用于油脂加工中。

参考文献:

[1] JI J M, XIE W L. Removal of aflatoxin B₁ from contaminated peanut oils using magnetic attapulgite [J/OL]. Food

- Chem, 2021, 339:128072[2021-08-01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128072>.
- [2] SUN S M, ZHAO R, XIE Y L, et al. Reduction of aflatoxin B₁ by magnetic graphene oxide/TiO₂ nanocomposite and its effect on quality of corn oil [J/OL]. Food Chem, 2021, 343:128521[2021-08-01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128521>.
- [3] 黄伟锋, 马传国, 陈小威, 等. 吸附法消减真菌毒素的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1):328-334.
- [4] 刘玉兰, 陈金定, 裴娅晓, 等. 碱炼法脱除玉米油中黄曲霉毒素 B₁ 的研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(6):48-51.
- [5] 纪俊敏, 吕雅芳, 张岩, 等. 食用植物油中常见真菌毒素及其脱除方法[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2):50-58.
- [6] 曾凡正, 高阳, 李进伟, 等. 花生油生物精炼法去除黄曲霉毒素的研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(1):6-10.
- [7] BAI X J, SUN C P, XU J, et al. Detoxification of zearalenone from corn oil by adsorption of functionalized GO systems[J]. Appl Surf Sci, 2018, 430:198-207.
- [8] 马文文, 刁恩杰, 李向阳, 等. 改性蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素 B₁ 条件优化研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(6):139-145.
- [9] 陈金定, 刘玉兰, 张振山, 等. 玉米油中黄曲霉毒素 B₁ 的吸附脱除效果研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(2):78-81.
- [10] 闫景辉, 李景梅, 惠博然. 半干法制备高效活性白土新工艺的研究[J]. 长春理工大学学报, 2003, 26(4):37-39.
- [11] 王高峰. 双亲蒙脱石霉菌毒素吸附材料的制备与性能研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2019.
- [12] 金玮玲. 功能性油脂的制备及其调节血脂功效评价[D]. 武汉:武汉轻工大学, 2014.
- [13] 刘悦, 刘元法, 王兴国. 油脂脱色过程对游离脂肪酸影响研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(4):91-96.
- [14] DENG Y J, VELÁZQUEZ A L B, BILLES F, et al. Bonding mechanisms between aflatoxin B₁ and smectite [J]. Appl Clay Sci, 2010, 50(1):92-98.
- [15] XU H W, SUN J D, WANG H M, et al. Adsorption of aflatoxins and ochratoxins in edible vegetable oils with dopamine-coated magnetic multi-walled carbon nanotubes [J/OL]. Food Chem, 2021, 365:130409[2021-08-01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130409>.