

# 响应面优化组氨酸改性蒙脱土脱除花生油中 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 工艺

汪昆立<sup>1</sup>, 黄俊圻<sup>1</sup>, 张海龙<sup>1,2</sup>, 贺军波<sup>1,2</sup>, 谌刚<sup>3</sup>, 李冰<sup>4</sup>,  
龚任<sup>4</sup>, 齐玉堂<sup>1,2</sup>, 张维农<sup>1,2</sup>

(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 436000; 4. 国粮武汉科学研究设计院有限公司, 武汉 430023)

**摘要:** 为了提高组氨酸改性蒙脱土(His-MMT)脱除花生油中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>(AFB<sub>1</sub>)的效率,在单因素实验的基础上采用响应面法对 His-MMT 脱除花生油中 AFB<sub>1</sub>的工艺条件进行优化,并分析 His-MMT 吸附前后花生油的品质变化情况。结果表明:His-MMT 脱除花生油中 AFB<sub>1</sub>的最佳工艺条件为 His-MMT 添加量 0.17%、吸附温度 110℃、吸附时间 22 min,在此条件下花生油中 AFB<sub>1</sub>含量从 (58.26 ± 0.48) μg/kg 降低到 (1.05 ± 0.07) μg/kg,脱除率为 (98.20 ± 0.11)%;His-MMT 吸附后花生油的红值由 7.0 下降至 5.0,酸值(KOH)由 (0.90 ± 0.02) mg/g 下降至 (0.86 ± 0.01) mg/g,总生育酚和总甾醇的保留率分别为 85.85% 和 97.26%。综上,His-MMT 不仅可以高效脱除花生油中的 AFB<sub>1</sub>,且对花生油的品质影响较小,在花生油精炼中具有较大的应用潜力。

**关键词:** 蒙脱土;改性;组氨酸;黄曲霉毒素;花生油

中图分类号:TS225.1;TS201.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)12-0071-06

## Optimization of removal of aflatoxin B<sub>1</sub> from peanut oil with histidine modified montmorillonite by response surface methodology

WANG Kunli<sup>1</sup>, HUANG Junqi<sup>1</sup>, ZHANG Hailong<sup>1,2</sup>, HE Junbo<sup>1,2</sup>, CHEN Gang<sup>3</sup>,  
LI Bing<sup>4</sup>, GONG Ren<sup>4</sup>, QI Yutang<sup>1,2</sup>, ZHANG Weinong<sup>1,2</sup>

(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 436000, Hubei, China; 4. China Grain Wuhan Scientific Research and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of removing aflatoxin B<sub>1</sub> (AFB<sub>1</sub>) from peanut oil by histidine modified montmorillonite(His-MMT), response surface methodology was used to optimize the removal conditions of AFB<sub>1</sub> from peanut oil by His-MMT based on single factor experiment, and the quality change of peanut oil before and after adsorption was studied. The results showed that the optimal conditions for AFB<sub>1</sub> removal were obtained as follows: dosage of His-MMT 0.17%, adsorption temperature 110℃ and adsorption time 22 min. Under these conditions, the AFB<sub>1</sub> content in peanut oil decreased from (58.26 ± 0.48) μg/kg to (1.05 ± 0.07) μg/kg, and the removal rate was (98.20 ±

0.11)%. After adsorption, the red value of peanut oil decreased from 7.0 to 5.0, the acid value decreased from (0.90 ± 0.02) mgKOH/g to (0.86 ± 0.01) mgKOH/g, and the retention rates of total tocopherol and total sterol were 85.85% and 97.26%, respectively. In conclusion, His-MMT can not only efficiently

收稿日期:2022-07-16;修回日期:2023-07-29

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2020YFC1606805)

作者简介:汪昆立(1998),男,硕士研究生,研究方向为食品科学(E-mail)1402088516@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。

remove AFB<sub>1</sub> from peanut oil, but also has little effect on the quality of peanut oil. His - MMT has great application potential in the refining of peanut oil.

**Key words:** montmorillonite; modification; histidine; aflatoxin; peanut oil

黄曲霉毒素是一类由黄曲霉和寄生曲霉产生的含有二呋喃环和香豆素(氧杂萜邻酮)结构的次生代谢产物<sup>[1]</sup>,易对粮油原料如小麦、稻谷、花生、芝麻及其制品造成污染,降低其经济价值<sup>[2]</sup>。目前,已有20多种黄曲霉毒素被分离鉴定,主要包括黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>(AFB<sub>1</sub>)、黄曲霉毒素 B<sub>2</sub>(AFB<sub>2</sub>)、黄曲霉毒素 G<sub>1</sub>(AFG<sub>1</sub>)、黄曲霉毒素 G<sub>2</sub>(AFG<sub>2</sub>)、黄曲霉毒素 M<sub>1</sub>(AFM<sub>1</sub>),其中毒性最强的为 AFB<sub>1</sub>,被列为1类致癌物,是诱发肝癌的主要因素之一<sup>[3]</sup>。迄今为止,已有多个国家制定了黄曲霉毒素的限量法规,如:欧洲联盟(EU)规定食品中 AFB<sub>1</sub>的限量范围为 0.1~12 μg/kg<sup>[2]</sup>;我国 GB 2761—2017 规定花生油和玉米油中 AFB<sub>1</sub>含量不得超过 20 μg/kg,其他食用油中 AFB<sub>1</sub>含量不得超过 10 μg/kg。

目前用于脱除或破坏食用油中黄曲霉毒素的方法有化学法、生物法和物理法<sup>[4]</sup>。张春华<sup>[5]</sup>、刘玉兰<sup>[6]</sup>等发现采用化学碱炼法能有效去除花生油和玉米油中黄曲霉毒素,但该法成本高,并且会造成环境污染和油脂中营养物质损失。Zeinvand - Lorestani 等<sup>[7]</sup>发现假蜜环菌产生的黄曲霉毒素氧化酶对 AFB<sub>1</sub>具有解毒活性。白腐真菌可产生锰过氧化物酶,在 1.5 IU/mL 的酶活下培养 48 h 对黄曲霉毒素的解毒率可达 90%<sup>[8]</sup>。以上生物法脱除黄曲霉毒素条件较为苛刻且成本相对较高,目前无法大规模应用。采用活性白土、硅藻土、蒙脱土等吸附剂进行物理脱毒具有方便、廉价、操作简单等优点,得到广泛应用<sup>[9]</sup>。蒙脱土能够吸附霉菌毒素<sup>[10]</sup>,但其在油脂中的分散性差,吸附脱毒效果不高。为了提高蒙脱土脱除黄曲霉毒素的效果,马文文等<sup>[11]</sup>采用 6 种有机季铵盐对蒙脱土进行改性处理,发现十八烷基三甲基氯化铵改性蒙脱土对花生油中的黄曲霉毒素脱除率最高,可达 84.69%。蒙脱土的改性剂大部分不属于食品添加剂范畴,用于食用油中黄曲霉毒素脱除的安全性有待进一步研究。我们团队前期研究发现将钙基蒙脱土置于 pH 小于组氨酸等电点的酸性环境时,添加一定量的食品添加剂组氨酸,组氨酸会发生质子化带正电,与钙基蒙脱土层间的水合阳离子发生交换,组氨酸得以进入蒙脱土片层间,从而对蒙脱土的形貌以及理化性质产生影响。利用该法对蒙脱土进行改性制备得到组氨酸改性蒙

脱土(His - MMT),其对花生油中黄曲霉毒素脱除效果较好,但有关 His - MMT 脱除花生油中 AFB<sub>1</sub>的工艺及其对油脂品质的影响还未见报道。

本文以 His - MMT 为吸附剂,对花生油中的 AFB<sub>1</sub>进行脱除。首先采用单因素实验考察了 His - MMT 添加量、吸附时间、吸附温度对 AFB<sub>1</sub>脱除率的影响,然后采用响应面法对 His - MMT 吸附脱除花生油中 AFB<sub>1</sub>的工艺条件进行了优化,并考察了吸附脱毒前后花生油的酸值、过氧化值等品质指标,以期为蒙脱土的改性及应用提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

一级压榨花生油,中粮集团公司;钙基蒙脱土,湖北三鼎科技有限公司;L-组氨酸,上海如吉生物科技公司;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%)、AFB<sub>1</sub>标准品(纯度≥98%),北京百灵威科技有限公司;盐酸,分析纯,国药集团化学试剂上海有限公司;乙腈、甲醇,色谱纯,美国 Fisher 试剂公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

DF-101S 集热式磁力搅拌水浴锅、YRE2000E 旋转蒸发器,巩义予华仪器有限责任公司;1260 InfinityII 高效液相色谱仪,安捷伦科技有限公司;GWB-2B 超纯水机,北京普析通用仪器有限责任公司;TG-16 低速离心机,凯达仪器有限公司;WSL-2 比较测色仪,上海仪电物理光学仪器有限公司;SK3300 超声波清洗机,上海科导超声仪器有限公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 加标花生油样制备

实际生产中,花生油被黄曲霉毒素污染后,AFB<sub>1</sub>含量最高可达 50 μg/kg 以上,因此本实验制备 AFB<sub>1</sub>含量在 50~60 μg/kg 的加标花生油进行吸附实验。将 1 mg AFB<sub>1</sub>溶于 1 mL 甲醇溶液中,充分溶解后,按照需求取一定量 AFB<sub>1</sub>甲醇溶液置于花生油中搅拌均匀,配制加标花生油样,密封放入避光处保存备用。经测定,加标花生油中 AFB<sub>1</sub>含量为 (58.26 ± 0.48) μg/kg。

### 1.2.2 His - MMT 的制备

称取 4 g 钙基蒙脱土于 500 mL 烧杯中,加入 200 mL 超纯水,搅拌 6 h 使其充分溶胀后,置于 100 mL 离心管中,以 4 500 r/min 离心 10 min,获得充分溶胀土,将其置于 200 mL 0.1 mol/L 的盐酸溶液中,然后缓慢加入 2 倍阳离子交换量(CEC)的 L-组氨酸,室温搅拌 24 h 进行改性,改性结束后,以 4 500 r/min 离心 10 min,弃去上清液,将所得沉淀反复水洗离心,直至上清液用 AgNO<sub>3</sub> 溶液检测不变浑浊,最后将洗净的沉淀按照质量体积比 1:15 加入超纯水,搅拌均匀,于 -20 ℃ 冷冻 12 h 后,真空冷冻干燥 40 h,过 0.075 mm (200 目)筛,得到 His - MMT。

### 1.2.3 AFB<sub>1</sub> 的吸附脱除

将一定质量的加标花生油置于 50 mL 圆底烧瓶中,预热至一定温度后,按油质量加入一定比例的 His - MMT 和搅拌子,抽真空(0.09 MPa)后 200 r/min 搅拌一段时间,然后移入离心管以 4 500 r/min 离心 10 min,取上层花生油,待测。

### 1.2.4 AFB<sub>1</sub> 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》中免疫亲和柱-高效液相色谱-柱后光化学衍生-荧光检测法检测花生油样中 AFB<sub>1</sub> 含量。花生油中 AFB<sub>1</sub> 脱除率(Y)按公式(1)计算。

$$Y = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: C<sub>0</sub> 为原料花生油中 AFB<sub>1</sub> 的含量, μg/kg; C<sub>1</sub> 为吸附后花生油中 AFB<sub>1</sub> 的含量, μg/kg。

### 1.2.5 理化指标测定

参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》测定酸值;参照 GB/T 22460—2008《动植物油脂 罗维朋色泽的测定》测定色泽;参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》测定过氧化值;参考文献[12]的方法测定总生育酚和总甾醇含量。

### 1.2.6 数据处理

采用 SPSS 18.0 进行数据统计,数据表示为“平均值 ± 标准差”;并用 Origin 2018 绘图。

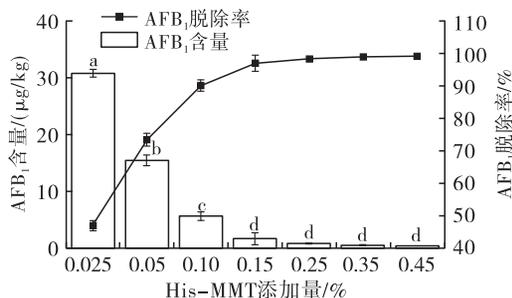
## 2 结果与分析

### 2.1 His - MMT 吸附脱除花生油中 AFB<sub>1</sub> 单因素实验

#### 2.1.1 His - MMT 添加量对花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量与脱除率的影响

在吸附温度 100 ℃, 吸附时间 20 min, His - MMT 添加量分别为 0.025%、0.05%、0.10%、

0.15%、0.25%、0.35%、0.45% 条件下,考察 His - MMT 添加量对花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量与脱除率的影响,结果见图 1。



注:不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。下同

图 1 His - MMT 添加量对花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量与脱除率的影响

由图 1 可知,His - MMT 添加量对脱除花生油中 AFB<sub>1</sub> 有显著的影响,随着 His - MMT 添加量的增加,花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量逐渐减少,AFB<sub>1</sub> 脱除率相应增加。His - MMT 添加量为 0.15% 时, AFB<sub>1</sub> 含量为  $(1.88 \pm 0.83) \mu\text{g}/\text{kg}$ , 已远低于国标花生油中 AFB<sub>1</sub> 的限量  $20 \mu\text{g}/\text{kg}$ , 此时 AFB<sub>1</sub> 脱除率为 96.77%。当 His - MMT 添加量由 0.15% 增加至 0.45% 时, AFB<sub>1</sub> 含量趋于稳定,无显著差异。因此,选择最优 His - MMT 添加量为 0.15%。

#### 2.1.2 吸附温度对花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量与脱除率的影响

在 His - MMT 添加量 0.15%, 吸附时间 20 min, 吸附温度分别为 30、50、70、90、110 ℃ 条件下,考察吸附温度对花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量与脱除率的影响,结果见图 2。

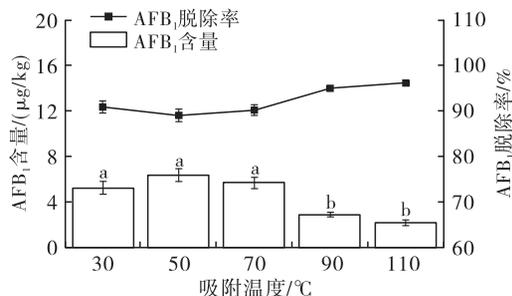


图 2 吸附温度对花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量与脱除率的影响

由图 2 可知,吸附温度从 30 ℃ 上升至 50 ℃,花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量缓慢上升,但无显著差异, AFB<sub>1</sub> 脱除率趋于平稳。当吸附温度从 70 ℃ 上升至 90 ℃ 时,花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量由  $(5.71 \pm 0.48) \mu\text{g}/\text{kg}$  显著降低至  $(2.91 \pm 0.21) \mu\text{g}/\text{kg}$ , 相应的脱除率由 90.20% 上升至 95.01%, 吸附温度继续升高时,花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量无显著变化。产生这种变化的原

因可能是吸附温度在 30 ~ 70 °C 时,对吸附剂的活性无显著影响,当吸附温度升高至 90 °C 时,吸附剂活性被显著激活,而且花生油中 AFB<sub>1</sub> 的运动速度升高,从而提高了吸附脱毒效果,吸附温度继续升高时,则可能会引发油脂中其他反应的进行,阻碍吸附剂对 AFB<sub>1</sub> 的吸附,因而吸附效果趋于稳定。因此,选择最优吸附温度为 90 °C。

### 2.1.3 吸附时间对花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量与脱除率的影响

在 His - MMT 添加量 0.15%, 吸附温度 90 °C, 吸附时间分别为 10、20、30、40、50 min 条件下,考察吸附时间对花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量与脱除率的影响,结果见图 3。

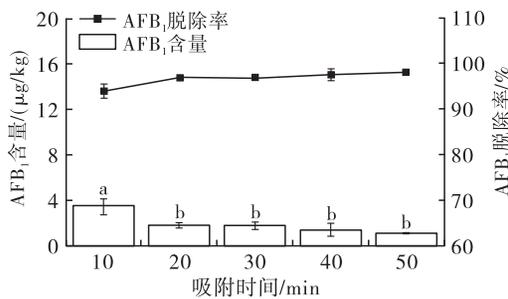


图3 吸附时间对花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量与脱除率的影响

由图 3 可知,吸附时间对 AFB<sub>1</sub> 含量有一定的影响。在吸附时间为 10 min 时,His - MMT 已能显著降低花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量,AFB<sub>1</sub> 含量从 (58.26 ± 0.48) μg/kg 下降至 (3.54 ± 0.78) μg/kg, AFB<sub>1</sub> 脱除率高达 93.92%,这说明 His - MMT 在较短时间内就能达到良好的吸附效果。当吸附时间由 10 min 延长至 20 min 时,花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量显著降低至 (1.84 ± 0.21) μg/kg,脱除率上升至 96.84%。吸附时间由 20 min 延长至 50 min 时,花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量无显著变化,这可能是因为吸附时间过长时,在吸附脱毒的同时,部分 AFB<sub>1</sub> 分子从 His - MMT 表面脱落下来,重新被释放到花生油中,因而吸附与脱附之间几乎动态平衡,导致花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量趋于稳定<sup>[13]</sup>。因此,选择最优吸附时间为 20 min。

### 2.2 His - MMT 吸附脱除花生油中 AFB<sub>1</sub> 响应面优化实验

在单因素实验的基础上,以 His - MMT 添加量、吸附时间、吸附温度为变量,AFB<sub>1</sub> 脱除率为响应值,进行三因素三水平的响应面实验。依据 Design - Expert 12 软件,采用 Box - Behnken 响应面设计进行了 17 组实验,其中包括 12 组析因实验与 5 组中心实验,响应面实验因素水平见表 1,响应面实验设计及结果见表 2,方差分析见表 3。

表 1 响应面实验因素水平

水平	A His - MMT 添加量/%	B 吸附温度/°C	C 吸附时间/min
-1	0.10	70	10
0	0.15	90	20
1	0.20	110	30

表 2 响应面实验设计及结果

实验号	A	B	C	AFB <sub>1</sub> 脱除率/%
1	1	-1	0	96.81
2	1	1	0	98.87
3	0	0	0	96.26
4	1	0	1	98.04
5	-1	0	-1	85.35
6	0	0	0	96.16
7	0	0	0	96.69
8	0	0	0	96.85
9	1	0	-1	95.72
10	0	1	-1	95.98
11	0	1	1	98.18
12	0	0	0	96.55
13	0	-1	-1	87.99
14	-1	0	1	92.97
15	0	-1	1	93.48
16	-1	1	0	95.23
17	-1	-1	0	84.30

表 3 方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	307.52	9	34.17	230.30	< 0.000 1	***
A	124.80	1	124.80	841.19	< 0.000 1	***
B	82.42	1	82.42	555.51	< 0.000 1	***
C	38.82	1	38.82	261.65	< 0.000 1	***
AB	19.65	1	19.65	132.41	< 0.000 1	***
AC	7.03	1	7.03	47.42	0.000 2	***
BC	2.71	1	2.71	18.25	0.003 7	**
A <sup>2</sup>	13.53	1	13.53	91.17	< 0.000 1	***
B <sup>2</sup>	3.45	1	3.45	23.26	0.001 9	**
C <sup>2</sup>	12.03	1	12.03	81.07	< 0.000 1	***
残差	1.04	7	0.15			
失拟项	0.70	3	0.23	2.73	0.177 9	
纯误差	0.34	4	0.09			
总和	308.56	16				

注: \*\* 表示非常显著( $p < 0.01$ ), \*\*\* 表示极其显著( $p < 0.001$ )

对表 2 实验数据进行拟合分析,得到 His - MMT 添加量(A)、吸附温度(B)、吸附时间(C)与 AFB<sub>1</sub> 脱除率(Y)的二次多项回归方程:  $Y = -20.703 + 546.574A + 0.983B + 1.664C - 2.216AB - 2.652AC - 0.004BC - 716.933A^2 - 0.002B^2 - 0.017C^2$ 。

由表 3 可知,模型的 F 值为 230.30, p 值小于

0.000 1,表明回归模型极其显著。失拟项  $p$  值为 0.177 9,大于 0.05,不显著,说明该模型拟合较好,使用该模型对脱除花生油中 AFB<sub>1</sub> 的条件进行优化是可行的。该拟合模型的 A、B、C 3 个因素的  $p$  值均小于 0.001,说明 His - MMT 添加量、吸附温度、吸附时间对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果的影响极其显著。根据  $F$  值可知,3 个因素对 AFB<sub>1</sub> 脱除效果影响的顺序从大到小依次为 A (His - MMT 添加量) > B (吸附温度) > C (吸附时间)。二次项  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  和交互项  $AB$ 、 $AC$ 、 $BC$  的  $p$  值均小于 0.01,说明交互作用显著<sup>[14]</sup>。3 个因素对 AFB<sub>1</sub> 脱除率的影响并非线性关系,而是呈现二次抛物面关系。

根据 Box - Behnken 实验结果和二次多项回归方程,利用 Design - Expert 12 软件得到 His - MMT

脱除花生油中 AFB<sub>1</sub> 的最佳工艺条件为 His - MMT 添加量 0.17%、吸附温度 110℃、吸附时间 22 min,在此条件下 AFB<sub>1</sub> 脱除率预测值为 99.31%。为检验模型预测准确性,在最优条件下进行 3 组平行实验,花生油中 AFB<sub>1</sub> 含量由  $(58.26 \pm 0.48) \mu\text{g}/\text{kg}$  下降至  $(1.05 \pm 0.07) \mu\text{g}/\text{kg}$ , AFB<sub>1</sub> 脱除率可达  $(98.20 \pm 0.11)\%$ ,与预测值差 1.11 百分点,说明本实验可靠,使用响应面分析法对 His - MMT 吸附脱除花生油中 AFB<sub>1</sub> 的条件进行优化是可行的。

### 2.3 His - MMT 吸附脱除 AFB<sub>1</sub> 对花生油品质的影响

在最佳工艺条件下采用 His - MMT 吸附脱除花生油中 AFB<sub>1</sub>,吸附前后花生油的理化指标如表 4 所示。

表 4 吸附前后花生油的理化指标

花生油	色泽(25.4 mm 槽)	酸值(KOH)/(mg/g)	过氧化值/(mmol/kg)	总生育酚/(mg/100 g)	总甾醇/(mg/100 g)
吸附前	Y20, R7.0	0.90 ± 0.02	4.87 ± 0.06	33.93 ± 0.28	284.74 ± 4.18
吸附后	Y20, R5.0	0.86 ± 0.01	4.91 ± 0.09	29.13 ± 0.60	276.93 ± 0.96

注:Y 代表黄值,R 代表红值

由表 4 可知,吸附前后花生油的黄值没有变化,红值由 7.0 下降至 5.0。吸附后酸值 (KOH) 由  $(0.90 \pm 0.02) \text{mg}/\text{g}$  略下降至  $(0.86 \pm 0.01) \text{mg}/\text{g}$ ,这可能是由于 His - MMT 添加量过少,吸附过程中由于吸附剂的空间结构与吸附方式特点,优先吸附色素等其他物质,从而无法对游离脂肪酸达到良好的吸附效果<sup>[15]</sup>。吸附后过氧化值略有上升,由  $(4.87 \pm 0.06) \text{mmol}/\text{kg}$  上升至  $(4.91 \pm 0.09) \text{mmol}/\text{kg}$ ,这可能是由于 His - MMT 中的金属元素充当催化剂,引发了油脂的自动氧化,而吸附剂添加量过少,无法对这些过氧化物达到有效的吸附作用,因而过氧化值略有上升<sup>[16]</sup>。总生育酚含量由吸附前的  $(33.93 \pm 0.28) \text{mg}/100 \text{g}$  下降至  $(29.13 \pm 0.60) \text{mg}/100 \text{g}$ ,保留率为 85.85%;总甾醇含量由吸附前的  $(284.74 \pm 4.18) \text{mg}/100 \text{g}$  下降至  $(276.93 \pm 0.96) \text{mg}/100 \text{g}$ ,保留率为 97.26%;总生育酚与总甾醇保留率较高,且总甾醇保留率高于总生育酚。

### 3 结论

本文在单因素实验的基础上采用响应面实验对 His - MMT 脱除花生油中 AFB<sub>1</sub> 的工艺条件进行优化。结果表明,响应面模型拟合较好,使用该模型对 His - MMT 脱除花生油中 AFB<sub>1</sub> 的条件进行优化是可行的。在 His - MMT 添加量 0.17%、吸附温度 110℃、吸附时间 22 min 的条件下, AFB<sub>1</sub> 脱除率最高,可达  $(98.20 \pm 0.11)\%$ 。吸附剂 His - MMT 能

在添加量很少的情况下高效脱除花生油中的 AFB<sub>1</sub>,且对花生油品质的影响较小,对甾醇与生育酚的吸附作用弱,营养物质的损失少,同时还能降低油脂色泽,使花生油色泽清亮。

### 参考文献:

- [1] AFSAH - HEJRI L, JINAP S, HAJEB P, et al. A review on mycotoxins in food and feed: Malaysia case study [J]. Compr Rev Food Sci F, 2013, 12(6): 629 - 651.
- [2] MARSHALL H, MENEELY J P, QUINN B, et al. Novel decontamination approaches and their potential application for post - harvest aflatoxin control [J]. Trends Food Sci Tech, 2020, 106: 489 - 96.
- [3] JI J, XIE W. Removal of aflatoxin B<sub>1</sub> from contaminated peanut oils using magnetic attapulgite [J/OL]. Food Chem, 2021, 339: 128072[2022 - 07 - 16]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128072>.
- [4] 张牧臣, 郑楠, 王加启. 食品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 污染研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 312 - 320.
- [5] 张春华, 张森, 黄蔚霞. 花生油中黄曲霉毒素脱除技术研究[J]. 中国油脂, 2014, 39(7): 62 - 64.
- [6] 刘玉兰, 陈金定, 裴娅晓, 等. 碱炼法脱除玉米油中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(6): 48 - 51.
- [7] ZEINVAND - LORESTANI H, SABZEVARI O, SETAYESH N, et al. Comparative study of in vitro prooxidative properties and genotoxicity induced by aflatoxin B<sub>1</sub> and its laccase - mediated detoxification products [J]. Chemosphere, 2015, 135: 1 - 6.

(下转第 109 页)

- Stud,2012,43(3):175-186.
- [6] 王德志,马传国,王高林. 专用油脂在食品工业中的应用[J]. 中国油脂, 2008, 33(4):7-11.
- [7] 王德志,马传国,王高林,等. 速冻食品专用油脂制备及其在汤圆中的应用评价[J]. 中国粮油学报,2010,25(12):71-74.
- [8] 刘元法. 食品专用油脂[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2017:232-233.
- [9] LI J, NAN J, WU H, et al. Middle purity soy lecithin is appropriate for food grade nanoliposome: preparation, characterization, antioxidant and anti-inflammatory ability [J/OL]. Food Chem, 2022, 389: 132931 [2023-02-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132931>.
- [10] 刘宝亮,康可佳. 食品乳化剂的特性及在油脂乳化中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2008(2):61-64.
- [11] 韩小存. 硬脂酰乳酸钙对面粉理化指标的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(10):101-103.
- [12] 蔡沙,蔡芳,施建斌,等. 马铃薯馒头制作工艺和贮藏、消化特性分析[J]. 食品工业, 2021, 42(5):18-22.
- [13] 程宝宝. 食品乳化剂复配在食品生产中的应用[J]. 食品安全导刊, 2021(24):133,135.
- [14] 蒋子敬,王冉冉,牛跃庭,等. 棕榈油基焙烤专用脱模剂乳化工艺配方优化研究[J]. 食品工业, 2017, 38(1):39-42.
- [15] 徐振波,王兴国,刘元法,等. 乳化剂在全牛油基人造奶油配方中应用[J]. 中国油脂, 2008, 33(7):7-12.
- [16] 马传国,李大房,查学梅,等. 速冻食品专用油的制备研究[J]. 中国油脂, 2006, 31(5):14-16.
- [17] 崔秀秀,王炎,赵亚丽,等. 基于酶促酯交换的速冻专用油脂制备及应用研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(10):187-193.
- [18] ROUSTA L K, YAZDI A P G, KHORASANI S, et al. Optimization of novel multigrain pasta and evaluation of physicochemical properties: using D-optimal mixture design[J]. Food Sci Nutr, 2021, 9(10):5546-5556.
- [19] 郭训练,方佳兴,许青莲,等. 棕榈油基液态起酥油乳化剂配方优化及其应用[J]. 食品工业科技,2018,39(20):55-60.
- [20] 薛栓栓. 猪油与紫苏籽油酯交换制备营养型人造奶油及其性能研究[D]. 武汉:华中农业大学,2020.
- [21] 谭文英,吴颖,胡勇. 复合脂肪替代品的制备及理化性质研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(2):150-153.
- [22] 朱婷伟. 酶促酯交换构建速冻专用油脂及其微观结构与宏观性能变化规律研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [23] 康宝,孙聪,杨瑞楠,等. 高油酸花生油酶促酯交换合成类可可脂的研究[J/OL]. 中国油脂;2023,48(8):96-103,114.
- [24] ZHU T W, ZHAO Y L, ZONG M H, et al. Improvement of physical properties of palm stearin and soybean oil blends by enzymatic interesterification and their application in fast frozen food[J]. RSC Adv, 2017, 7(55):34435-34441.
- [25] ZHANG Z, SONG J, LEE W, et al. Characterization of enzymatically interesterified palm oil-based fats and its potential application as cocoa butter substitute [J/OL]. Food Chem, 2020, 318: 126518 [2023-02-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126518>.
- [26] 王炎. 酶促酯交换制备速冻食品专用油脂的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- [27] 刘琴. 贮藏温度对速冻专用油脂结晶行为及物理性能的影响研究[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
- [28] 顾娟,郁美丽,李义,等. 蜡质玉米淀粉对糯米粉及速冻汤圆品质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2022(1):39-43, 48.
- (上接第75页)
- [8] YEHIA R S. Aflatoxin detoxification by manganese peroxidase purified from *Pleurotus ostreatus* [J]. Braz J Microbiol, 2014, 45(1):127-133.
- [9] 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.
- [10] 梁晓维,李发弟,张军民,等. 蒙脱石和凹凸棒石对霉菌毒素吸附性能的研究[J]. 中国畜牧兽医, 2014, 41(11):133-138.
- [11] 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 B<sub>1</sub> 条件优化研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(6):139-145.
- [12] 黄俊圻,张海龙,吕晓雅,等. 蒙脱土用于植物油脱色效果综合评价研究[J]. 中国油脂, 2022,47(6):15-20.
- [13] 马文文. 有机改性蒙脱土吸附脱除花生油中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 及其安全性评价[D]. 山东泰安:山东农业大学, 2016.
- [14] 张尚一. 污泥吸附剂的制备及其对染料吸附性能的研究[D]. 山东青岛:青岛大学, 2019.
- [15] 周灵群. 凹凸棒石油脂脱色行为及其机理[J]. 食品科学, 2019, 40(3):87-93.
- [16] 张振山,康媛解,刘玉兰. 植物油脱色技术研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(1):121-126.