DOI:10.12441/spyswjs.20250805002 [文章编号] 1673-1689(2026)08-0001-13

不同脱色剂对米糠油的脱色效果及营养品质的影响

谷春凤 孙 静 庞心怡 陆颖健 李向菲*

(南京财经大学食品科学与工程学院,江苏 南京 210023)

摘要:【目的】评估不同脱色剂对米糠油脱色效果的影响,筛选脱色效果最佳的脱色剂并探究其对米糠油中营养素保留的影响。**【方法】**选用5种脱色剂对米糠油进行脱色处理,通过测定色泽、脱色率、酸价、过氧化值、抗氧化性能,以及叶绿素、类胡萝卜素、谷维素、生育酚的质量分数,综合评价不同脱色剂的脱色效果。对筛选出的最佳脱色剂进行单因素试验,探究不同条件下脱色剂对叶绿素和类胡萝卜素的吸附量,并通过吸附动力学、吸附等温线及吸附热力学模型拟合,深入研究其吸附性能。**【结果】**在5种脱色剂中,白土的脱色效果和营养物质保留率最佳。白土处理米糠油时的脱色率达到60.17%,谷维素及生育酚的质量分数分别为19.44 mg/kg和4.14 mg/kg。吸附动力学结果表明,30 min后的吸附容量趋于稳定,白土对叶绿素的吸附容量达0.001 88 mg/g。拟合结果表明,吸附剂表面有多种结合位点,主要为化学吸附。吸附等温线及热力学拟合结果表明,白土对叶绿素的吸附符合Freundlich模型,是一个自发进行且吸热的多层吸附过程。**【结论】**白土的脱色效果最显著,营养物质保留率也较高,Freundlich吸附模型对白土吸附米糠油中叶绿素的模拟结果,可为米糠油脱色工艺的优化提供理论依据。

关键词:白土;米糠油;脱色;吸附特性

Effects of Different Decolorizing Agents on the Decolorization Efficiency and Nutritional Quality of Rice Bran Oil

*GU Chunfeng SUN Jing PANG Xinyi LU Yingjian LI Xiangfei**

(College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to evaluate the decolorization effects of different decolorizing agents on rice bran oil, screen the optimal decolorizing agent, and explore its influence on nutrient retention in rice bran oil. [**Method**] Five decolorizing agents were selected to decolorize rice bran oil. The decolorization effects of different decolorizing agents were comprehensively evaluated by measuring color, decolorization rate, acid value, peroxide value, and antioxidant performance indicators as well as the mass fractions of chlorophyll, carotenoids, oryzanol, and tocopherol. Single factor experiments were conducted on the selected optimal decolorizing agent to explore its adsorption capacity for chlorophyll and carotenoids under different conditions. Furthermore, adsorption kinetics, adsorption isotherms, and adsorption thermodynamic model fitting were employed to delve into the adsorption properties. [**Result**] Among the five decolorizing agents, white clay showed the best decolorization effect and nutrient retention rate. The decolorization rate of white clay for rice bran oil reached 60.17%, and the mass fractions of oryzanol and tocopherol were 19.44 mg/kg and 4.14 mg/kg, respectively. The adsorption kinetics results showed that the adsorption capacity tended to stabilize after 30 min, and the adsorption capacity of white clay for chlorophyll reached 0.001 88 mg/g. The fitting results showed that there were multiple

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32572590)。

通信作者:李向菲(1986—),女,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事益生菌及粮食副产物功能因子开发研究。E-mail:xiangfeili@nufe.edu.cn

收稿日期:2025-08-05 **修回日期:**2025-09-16

binding sites on the surface of the adsorbent, mainly chemical adsorption. The adsorption isotherms and thermodynamic fitting results indicated that the adsorption of chlorophyll by white clay followed the Freundlich model and was a spontaneous and endothermic layer-by-layer adsorption process. [**Conclusion**] White clay has the most significant decolorization effect and a high retention rate for nutrients. The simulation results of white clay adsorbing chlorophyll from rice bran oil by the Freundlich adsorption model can provide theoretical basis for optimizing the decolorization process of rice bran oil.

Keywords: white clay; rice bran oil; decolorization; adsorption property

米糠油是一种具有独特性能和多种健康益处的植物油，因富含谷维素而著称，营养价值较高[1]。米糠油具有保护心脏、抗氧化、抗炎、抗菌、抗糖尿病和抗肿瘤等多重功能特性[2]，因此广泛应用于食品和化妆品行业，其含有的多种生物活性成分对促进机体代谢、改善氧化损伤和预防疾病发生具有重要作用[3]。因此，米糠油也被世界卫生组织（WHO）和美国心脏协会（AHA）等组织认定为“健康油”[4-5]。

随着生命科学的发展，食用一些可以提高免疫力、改善心血管健康、促进神经发育和调节情绪等方面的功能性食品，已成为人们日常生活中调节身体健康较为便捷、有效的途径[6]。随着人们健康意识的提高，消费者对健康食用油的需求不断增加，米糠油因其高营养价值而备受关注。米糠油通常是通过挤压膨化从米糠中提取获得的，但挤压膨化过程会造成米糠毛油色泽加深且色素固定的问题[7]，严重影响其成品油品质，使其在实际应用中受到较大限制。

目前，吸附脱色是油脂精炼过程中应用最广泛的脱色方法[8]，其原理是借助对油脂中特定色素具有较强选择性吸附能力的脱色剂，在适宜条件下吸附并去除色素及其他杂质，进而达到脱色效果[9]。脱色剂是决定油脂脱色效果的关键因素[10]，其吸附的色素包括叶绿素、类胡萝卜素等天然色素，以及精炼过程中因高温、金属接触等因素形成的新生色素[11]。市场上常用的脱色剂包括白土、凹凸棒土、硅藻土、皂土和活性炭等，不同脱色剂的优缺点明显。白土以膨润土为主要材料，酸改处理后可作为一种无机吸附材料，其比表面积较大，孔结构十分丰富，吸附能力较强，广泛应用于动植物油的脱色处理[12]；凹凸棒土是一种含水富镁铝的硅酸盐黏土矿物，具有层链状结构，其比表面积较高、价格低、储量大[13]；硅藻土不仅具有丰富的纳米孔结构，还具有独特的多孔结构以及优异的稳定性，在脱色领域也展现出巨大的应用潜力[14]；皂土主要由蒙脱石黏土矿物组成，其吸附性能好且价格较低，具有较好的应用前景[15]；活性炭可以通过多孔的结构吸附色素分子，吸附能力强、成本低，但再生方法复杂[16]。

吸附脱色法不仅可去除植物油中的叶绿素、类胡萝卜素等颜色物质，同时也会去除一些氧化产物，从而提高抗氧化稳定性[17]。然而，脱色剂在高温脱色过程中的选择性吸附，会导致谷维素、生育酚、甾醇等营养物质被吸附除去。有研究显示，在传统的米糠油精炼工艺过程中，谷维素的损失率高达 87%[18]。精制玉米油在脱色过程中的总生育酚质量浓度减少了 29.7%[19]。因此，作者在选择脱色剂时，营养物质保留率亦为重要的参考指标，旨在最大限度减少谷维素与生育酚等有益成分的损失。

作者研究了吸附时间、温度、脱色剂添加量对叶绿素和类胡萝卜素吸附性能的影响，旨在筛选出最佳米糠油脱色剂，并根据吸附动力学原理，建立了白土吸附叶绿素的吸附等温线及吸附热力学模型，探讨了白土吸附叶绿素的吸附特性，以此为米糠油脱色提供理论依据和技术基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

米糠毛油：江苏圣沃油脂科技有限公司；白土：食品级，山东科源生化有限公司；凹凸棒土：食品级，江苏玖川纳米材料科技有限公司；硅藻土（食品级）、皂土（食品级）、活性炭（食品级）、生育酚标准品（纯度≥98%）、质量分数 85% 磷酸溶液（分析纯）、氢氧化钠（纯度≥98%）、正己烷（分析纯）、1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（纯度≥97%）、2，2’-联氮基双-（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）二铵盐（纯度≥98%）：上海阿拉丁生化科技股份有限公

司；谷维素标准品（纯度≥98%）：上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

分析天平：BSA124S型，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；数显恒温磁力搅拌水浴锅：SHJ-4A型，南京卫光仪器设备有限公司；高速冷冻离心机：Sorvall STIR Plus型，美国赛默飞世尔公司；紫外-可见分光光度计：U-721型，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；全波长酶标仪：SpectraMax M2 M2e型，美谷分子仪器（上海）有限公司；高效液相色谱仪：1260 Infinity型，美国Agilent公司。

1.3 脱胶脱酸米糠油样品的制备

参照李奕等[20]的方法并稍加修改，制备脱胶脱酸米糠油。称取适量米糠毛油置于烧杯中，在油中加入质量分数0.15%的磷酸溶液（质量分数85%），搅拌均匀后加入质量分数5%的去离子水，于65 ℃搅拌40 min。反应结束后以10 000 r/min离心30 min，取上层油，即得脱胶米糠油。称取适量脱胶米糠油于烧杯中，加入质量分数12%的氢氧化钠溶液（3.17 mol/L），于50 ℃搅拌30 min。反应结束后，以10 000 r/min离心30 min，取上层油，即得脱胶脱酸米糠油。

1.4 不同脱色剂处理的米糠油样品的制备

称取15 g米糠油于锥形瓶中，加入质量分数1.0%的不同种类脱色剂，于100 ℃搅拌30 min，反应结束后以10 000 r/min离心30 min，取上层油，即得脱色米糠油。

1.5 米糠油的色泽分析

使用分光光度法测定米糠油色泽。以正己烷作为参比，将米糠油样品装入石英皿2/3高度处，进行光谱扫描，波长间隔为1 nm，波长范围为400~700 nm，扫描速度为快速。

1.6 米糠油脱色率的测定

以正己烷作为参比，用紫外-可见分光光度计于447 nm测量米糠油的吸光度，按照式（1）计算脱色率[21]。

$$A=\frac{B_1-B_2}{B_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

A——脱色率，%；

B_1——脱色前的吸光度；

B_2——脱色后的吸光度。

1.7 米糠油基本指标的测定

1.7.1 色泽的测定

参照GB/T 22460—2008《动植物油脂 罗维朋色泽的测定》测定米糠油的色泽。

1.7.2 酸价的测定

参照GB 5009.229—2025《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》测定米糠油的酸价，结果以每克样品中KOH的质量计（mg/g）。

1.7.3 过氧化值的测定

参照GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》测定米糠油的过氧化值。

1.7.4 叶绿素质量分数的测定

参照美国油脂化学家协会标准方法AOCS Official Method Cc 13i-96测定米糠油的叶绿素质量分数。

1.7.5 类胡萝卜素质量分数的测定

参照GB 5009.83—2016《食品安全国家标准 食品中胡萝卜素的测定》测定米糠油的类胡萝卜素质量分数。

1.7.6 谷维素质量分数的测定

参照LS/T 6121.1—2017《粮油检验 植物油中谷维素含量的测定 分光光度法》测定米糠油的谷维素质量分数。

1.7.7 生育酚质量分数的测定

参照GB/T 26635—2025《动植物油脂 生育酚及生育三烯酚含量测定 高效液相色谱法》测定米糠油的生育酚质量分数。

1.8 米糠油抗氧化能力的测定

1.8.1 DPPH自由基清除率的测定

取0.1 mL米糠油样品于琥珀色EP管中，将0.2 mmol/L DPPH-无水乙醇溶液和样品以体积比20∶1加入琥珀色EP管中，充分混合，并在37 ℃条件下避光反应30 min，取上清液于517 nm测定吸光度。将DPPH工作液与无水乙醇以体积比20∶1混合，作为空白对照组。按照式（2）计算DPPH自由基清除率[22]。

$$A_0=\left(1-\frac{A_1}{A_2}\right)\times 100\% \quad (2)$$

式中：

A_0——DPPH自由基清除率，%；

A_1——517 nm测定的样品组吸光度；

A_2——517 nm测定的空白对照组吸光度。

1.8.2 $ABTS^+$自由基清除率的测定

准确称取0.384 g ABTS粉末和0.013 2 g过硫酸钾，分别用超纯水溶解并定容至10 mL，再将ABTS溶液和过硫酸钾溶液混合，避光反应12 h，用无水乙醇稀释，使终溶液在734 nm的吸光度为0.700±0.020，将此溶液作为ABTS工作液。取0.5 mL米糠油样品于琥珀色EP管中，将1 mL ABTS-甲醇工作液和样品以体积比2∶1混合于琥珀色EP管中，在37 ℃避光反应30 min，取上清液于734 nm测定吸光度。将ABTS工作液与甲醇以体积比2∶1混合，作为空白对照组。按照式(3)计算$ABTS^+$自由基清除率[23]。

$$B_0=\left(1-\frac{B_1}{B_2}\right)\times 100\% \tag{3}$$

式中：

B_0——$ABTS^+$自由基清除率，%；

B_1——734 nm测定的样品组吸光度；

B_2——734 nm测定的空白对照组吸光度。

1.9 吸附试验

1.9.1 反应时间对米糠油色素吸附性能的影响

添加质量分数1%的白土到15 g的米糠油中，温度设为100 ℃，在400 r/min下分别反应10、20、30、40、50 min，测定叶绿素以及类胡萝卜素的质量分数并计算其吸附量和去除率。

1.9.2 反应温度对米糠油色素吸附性能的影响

添加质量分数1%的白土到15 g的米糠油中，温度分别设置为80、90、100、110、120 ℃，于400 r/min反应30 min，测定叶绿素以及类胡萝卜素的质量分数并计算其吸附量和去除率。

1.9.3 白土质量分数对米糠油色素吸附性能的影响

添加质量分数分别为1%、2%、3%、4%、5%的白土到15 g的米糠油中，温度设为100 ℃，于400 r/min反应30 min，测定叶绿素以及类胡萝卜素的质量分数并计算其吸附量和去除率。

1.9.4 叶绿素和胡萝卜素吸附量的测定

测定脱色前米糠油中色素的初始质量分数、吸附平衡后米糠油中剩余色素质量分数、脱色前米糠油质量和吸附剂质量，按照式(4)计算吸附量。

$$q=\frac{(C_0-C_e)\times M}{m} \tag{4}$$

式中：

q——吸附量，mg/g；

C_0——脱色前米糠油中色素的初始质量分数，mg/kg；

C_e——吸附平衡后米糠油中剩余色素的质量分数，mg/kg；

M——脱色前米糠油质量，kg；

m——吸附剂质量，g。

1.10 吸附动力学研究

称取15 g米糠油置于500 mL锥形瓶中，添加质量分数3%的白土，置于磁力搅拌器内，在140 r/min、100 ℃条件下持续脱色0~70 min，在此时间内连续测定米糠油吸光度随脱色时间的变化。测定叶绿素、类胡萝卜素的质量分数并计算其吸附量。通过拟一级、拟二级动力学模型对试验结果进行拟合，对脱色过程进行动力学分析。

1.10.1 拟一级动力学模型

拟一级动力学模型常用于描述吸附过程中的物理吸附，其中吸附速率受到吸附位点和物质传递步骤的影响。拟一级动力学模型公式见式(5)。

$$q_t=q_{e,1}\left(1-e^{-k_1t}\right) \tag{5}$$

式中：

q_t——t时刻吸附剂的吸附量，mg/g；

$q_{e,1}$——吸附剂的吸附容量，mg/g；

k_1——拟一级动力学速率常数，min^{-1}；

t——吸附反应时间，min。

1.10.2 拟二级动力学模型

拟二级动力学模型用于描述吸附过程中化学反应控制的情况，其中吸附速率受表面活性位点和物质传递步骤的影响。拟二级动力学模型公式见式(6)。

$$\frac{t}{q_t}=\frac{t}{q_{e,2}}+\frac{1}{k_2q_{e,2}^2} \tag{6}$$

式中：

q_t——t时刻吸附剂的吸附量，mg/g；

$q_{e,2}$——吸附剂的吸附容量，mg/g；

k_2——拟二级动力学速率常数，g/(mg·min)；

t——吸附反应时间，min。

1.11 吸附等温线研究

称取15 g米糠油置于500 mL锥形瓶中，加入质量分数1%~4%的白土，置于磁力搅拌器上，转速保持140 r/min，于100 ℃下脱色30 min，并记录脱色过程中米糠油的吸光度变化。测定叶绿素、类胡萝卜素的质量分数并计算其吸附容量。采用

Langmuir、Freundlich和Temkin模型吸附等温线对试验结果进行拟合，对脱色过程进行分析。

1.11.1 Langmuir模型

Langmuir模型适用于描述吸附质在均匀表面上的吸附，尤其适用于单分子层吸附的情况。Langmuir模型公式见式(7)。

$$q_e=\frac{q_m K_L C_e}{1+K_L C_e} \quad (7)$$

式中：

q_e——吸附剂的吸附容量，mg/g；

q_m——吸附剂的理论吸附容量，mg/g；

C_e——吸附平衡时，溶液中剩余色素的质量浓度，mg/L；

K_L——吸附平衡常数，L/mg。

1.11.2 Freundlich模型

Freundlich模型广泛用于描述多层吸附、非均匀表面和吸附位点之间相互作用的复杂情况。Freundlich模型公式见式(8)。

$$q_e=K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

式中：

q_e——吸附剂的吸附容量，mg/g；

C_e——吸附平衡时，溶液中剩余色素的质量浓度，mg/L；

K_F——吸附平衡常数，(mg/g)·(L/mg)$^{\frac{1}{n}}$；

n——常数。

1.11.3 Temkin模型

Temkin模型是一种用于描述吸附过程的理论模型，主要用于分析吸附剂表面能量分布不均匀性，以及吸附质分子间相互作用对吸附行为的影响，尤其适用于化学吸附或存在分子间作用力的体系。Temkin模型属于经验吸附模型，由试验数据拟合得到，并非严格理论推导得到，因此公式两侧物理量的量纲并不严格对等，仅用于对本研究吸附试验数据进行拟合分析。Temkin模型公式见式(9)。

$$q_e=\frac{RT}{b_T}\ln(K_T)+\frac{RT}{b_T}\ln(C_e) \quad (9)$$

式中：

q_e——吸附剂的吸附容量，mg/g；

C_e——吸附平衡时，溶液中剩余色素的质量浓度，mg/L；

R——气体常数，8.314 J/(mol·K)；

T——绝对温度，K；

K_T——Temkin吸附平衡常数，L/mg；

b_T——与吸附热相关的常数，J/mol；

1.12 吸附热力学研究

根据Langmuir模型的拟合参数，通过吉布斯自由能(G)、焓(H)和熵(S)的变化来分析米糠油中叶绿素和类胡萝卜素的吸附情况。通过公式(10)~(11)对各温度下的吸附热力学进行研究。其中，以ln K'_L对1/T作图，由所得直线的斜率和截距即可计算得到ΔH和ΔS。

$$\Delta G=-RT\ln K'_L \quad (10)$$

式中：

ΔG——吉布斯自由能变，kJ/mol；

R——气体常数，8.314 J/(mol·K)；

T——绝对温度，K；

K'_L——Langmuir等温线拟合得到的特征常数。

$$\ln K'_L=\frac{\Delta S}{R}-\frac{\Delta H}{RT} \quad (11)$$

式中：

K'_L——Langmuir等温线拟合得到的特征常数；

ΔS——熵变，kJ/(mol·K)；

R——气体常数，8.314 J/(mol·K)；

ΔH——焓变，kJ/mol；

T——绝对温度，K。

1.13 数据分析

所有试验均重复3次，采用SPSS 16.0进行方差分析(ANOVA)，采用GraphPad Prism以及Origin制图。

2 结果与讨论

2.1 不同脱色剂对米糠油色泽的影响

L^*值表示颜色亮度，a^*值、b^*值分别表示颜色在红绿、黄蓝维度上的偏移[24]。由表1可知，白土、凹凸棒土及皂土处理组的亮度显著高于活性炭处理组($P<0.05$)，而与硅藻土处理组相比没有显著差异。5种脱色剂处理后，米糠油的a^*值都显著低于空白组，其中白土处理组的a^*值更接近于0，表示其颜色趋近于中性灰。白土处理组的b^*值与凹凸棒土处理组相比没有显著差异，但显著低于其他3个处理组($P<0.05$)，表明白土和凹凸棒土脱色后的米糠油的黄色由深变浅，且白土处理后的黄色更浅。有研究表明，油脂在进行吸附脱色时，脱去了会发生键合作用的皂类物质和磷

表 1　不同脱色剂处理后的米糠油的色泽

Table 1　Color of rice bran oil treated with different decolorizing agents

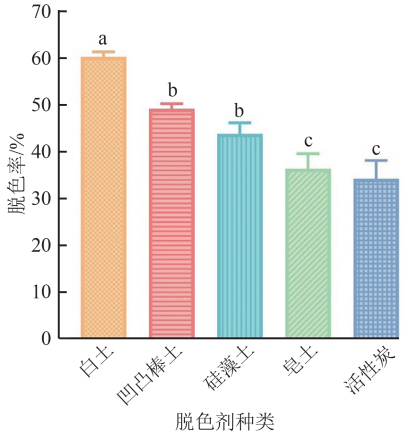
脱色剂	L^*值	a^*值	b^*值
空白组	25.26±0.04^{c}	16.57±0.52^{a}	40.03±0.18^{bc}
白土	81.91±3.28^{a}	3.45±1.09^{b}	27.88±2.18^{c}
凹凸棒土	78.24±1.89^{a}	6.07±0.88^{b}	35.91±2.69^{bc}
硅藻土	74.66±1.85^{ab}	7.05±0.85^{b}	46.46±6.92^{b}
皂土	77.32±2.37^{a}	6.19±1.13^{b}	41.16±6.96^{b}
活性炭	72.81±5.39^{b}	6.93±2.65^{b}	60.52±5.46^{a}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

脂，防止在后续的高温脱臭过程中产生新的加工色素[25]。

2.2　不同脱色剂对米糠油脱色率的影响

由图 1 可知，5 种脱色剂对米糠油脱色率的影响存在差异，其影响程度由高至低依次为：白土>凹凸棒土>硅藻土>皂土>活性炭。其中白土的脱色率达到 60.17%，显著高于其他 4 种脱色剂（P<0.05）；皂土和活性炭的脱色效果相对较差，脱色率均低于 40%。何立军等[26]进行了关于大豆干燥油脱色的研究，发现活性白土的脱色效果优于中性膨润土和凹凸棒土；此外，董志文[27]分析了不同植物油适合的复合脱色材料，发现白土的脱色效果优于凹凸棒土、硅藻土和皂土。本研究结果与这些研究结果一致。上述结论进一步验证，白土对米糠油具有较强的脱色效果，这与既往研究得出的规律一致：白土脱色效果与其比表面积呈正相关，通常粒度越小，比表面积越大，



不同小写字母表示组间差异显著（P<0.05）。

图 1　不同脱色剂对米糠油脱色率的影响

Fig. 1　Decolorization rates of different decolorizing agents for rice bran oil

因此在其他条件相同时，物理吸附的脱色效果越好[28]。

2.3　米糠油色泽及叶绿素和类胡萝卜素质量分数

米糠毛油中的天然色素包括叶绿素、胡萝卜素以及黄酮类色素等，其中叶绿素占比最大[29]。不同脱色剂处理后的米糠油光谱扫描图见图 2。在 400~700 nm 的可见光范围内有 4 个吸收峰，413、670 nm 分别为类胡萝卜素以及叶绿素 a 的主要吸收峰[30-31]。白土处理后的米糠油吸光度明显低于其他处理组，对应类胡萝卜素和叶绿素处的吸光度明显降低。绝大多数的色素无毒，但会影响油脂的外观，降低其贮藏稳定性。叶绿素对光、热敏感，在油脂运输和贮存过程中容易转化成脱镁叶绿素，从而会促进油脂发生氧化反应[32]。β-胡萝卜素在光和热条件下不稳定，在贮存过程中容易发生降解，其降解产物会对油脂产生较为明显的促氧化作用[33]。不同脱色剂对米糠油中叶绿素及类胡萝卜素的吸附效果差异见图 3。白土对叶绿素的吸附能力显著优于其他 4 种脱色剂（P<0.05），而 5 种脱色剂对类胡萝卜素的吸附效果无显著差异。李世磊等[34]的研究显示，在相同反应条件下，不同脱色剂对叶绿素的脱除效果从强到弱分别为白土>凹凸棒土>皂土；孙玉萍等[35]发现活性白土对大豆油中叶绿素的脱除能力要强于凹凸棒土。本研究结果与这些研究结果一致。

2.4　不同脱色剂对米糠油酸价、过氧化值的影响

5 种脱色剂处理后的米糠油的酸价和过氧化值见表 2。不同脱色剂对米糠油酸价的影响并无显著差异，而经 5 种脱色剂处理后的米糠油过氧化值均

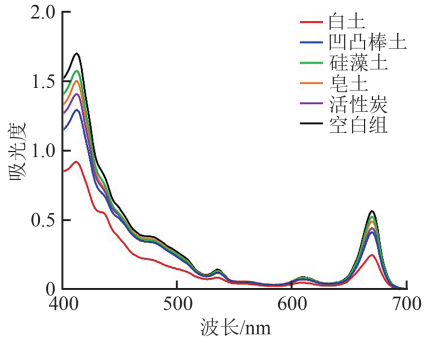
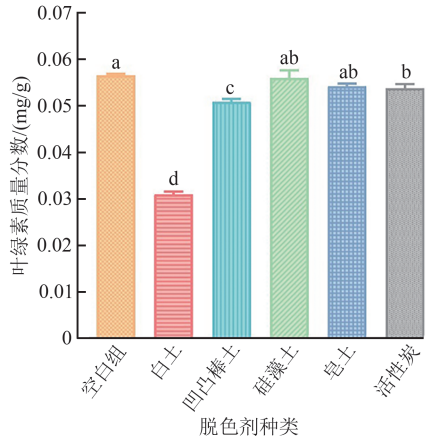
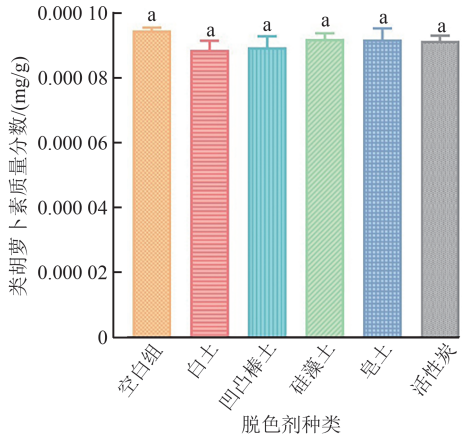


图 2　不同脱色剂处理后的米糠油光谱扫描图

Fig. 2　Spectral scanning images of rice bran oil treated with different decolorizing agents



(a) 不同脱色剂对米糠油叶绿素质量分数的影响



(b) 不同脱色剂对米糠油类胡萝卜素质量分数的影响

不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 3　不同脱色剂对米糠油叶绿素及类胡萝卜素质量分数的影响

Fig. 3　Effects of different decolorizing agents on the mass fractions of chlorophyll and carotenoids in rice bran oil

有所降低，白土脱色后的米糠油过氧化值下降了72.7%。根据国家标准，米糠油的酸价需≤4.0 mg/g，过氧化值需≤0.375 g/100 g，这5种脱色剂处理后的米糠油的指标均符合国家标准要求。这与祝振杰等[36]的研究结果类似，原因是脱色剂在脱色时可以吸附氧化产物并促进氢过氧化物的分解。

2.5　不同脱色剂处理对米糠油谷维素及生育酚质量分数的影响

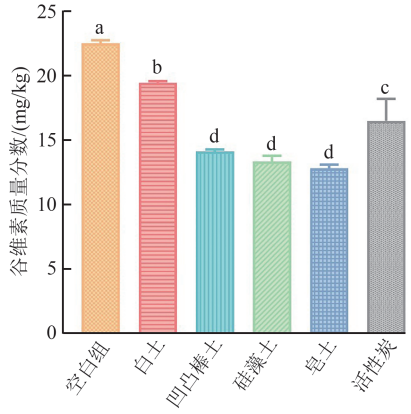
如图4所示，白土脱色后的谷维素质量分数(19.44 mg/kg)和生育酚质量分数(4.14 mg/kg)显著高于其他4种脱色剂(P<0.05)，谷维素、生育酚的保留率分别达86.33%、85.79%。凹凸棒土、硅藻土和皂土对谷维素的处理效果没有显著差异。不同脱色剂对生育酚质量分数的影响效果差异显著，

表 2　不同脱色剂对米糠油酸价、过氧化值的影响

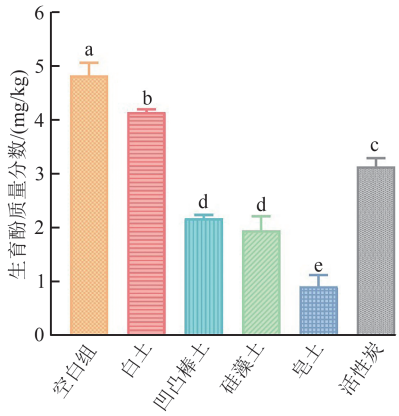
Table 2　Effects of different decolorizing agents on the oleic acid value and peroxide value of rice bran oil

脱色剂	酸价/(mg/g)	过氧化值/(g/100 g)
空白组	2.23±0.09^{a}	0.22±0.01^{a}
白土	2.28±0.12^{a}	0.06±0.01^{d}
凹凸棒土	2.08±0.15^{a}	0.16±0.01^{b}
硅藻土	2.26±0.09^{a}	0.10±0.01^{c}
皂土	2.09±0.14^{a}	0.08±0.01^{cd}
活性炭	2.06±0.09^{a}	0.06±0.02^{d}

注：不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。



(a) 不同脱色剂对米糠油中谷维素质量分数的影响



(b) 不同脱色剂对米糠油中生育酚质量分数的影响

不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 4　脱色剂种类对米糠油谷维素及生育酚质量分数的影响

Fig. 4　Effects of different decolorizing agents on the mass fractions of oryzanol and tocopherol in rice bran oil

其中，白土对生育酚质量分数的影响效果最小，皂土脱色后米糠油的生育酚质量分数最低。根据脱色后米糠油中营养物质的质量分数变化，发现米糠油的最佳脱色剂是白土。Sun等[21]研究了活性

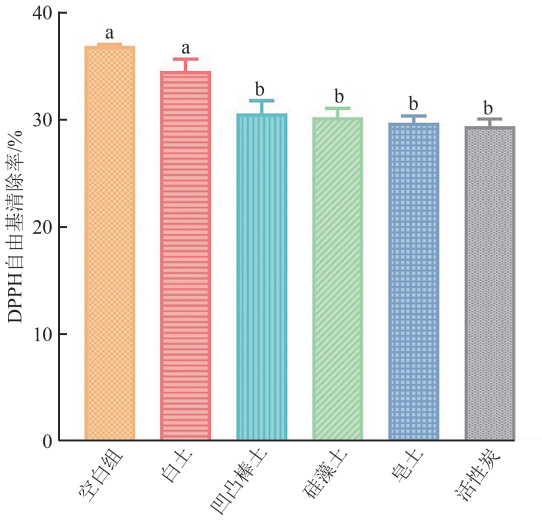
白土、活性炭、凹凸棒土、膨润土、硅藻土对米糠油脱色效果及其营养成分、有害物质滞留的影响，其中活性白土对谷维素的保留率最高，达到了 85.98%。Worasith 等[37]用电子顺磁共振研究了改性高岭土脱色前后米糠油中自由基组分的变化，发现脱色处理后米糠油中谷维素、生育酚的保留率分别为 70%、97.5%，说明该脱色处理对生育酚含量的影响不大。对比之下，本研究采用的白土脱色法更加均衡地保留了米糠油中的营养物质，并且对谷维素的质量分数影响较小、保留率更高。

2.6 不同脱色剂处理对米糠油抗氧化性能的影响

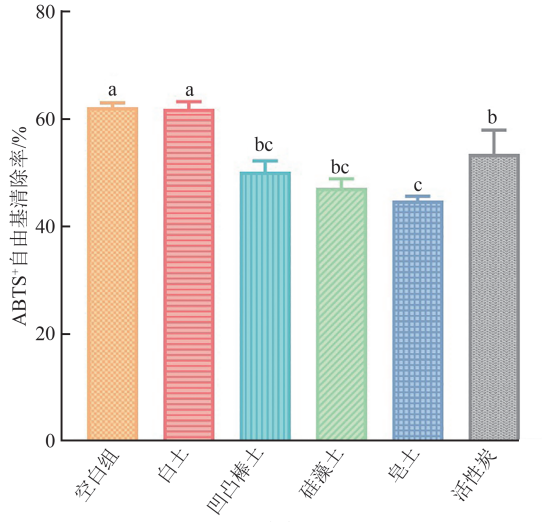
如图 5(a)所示，白土处理组的 DPPH 自由基清除率达 34.55%，显著高于凹凸棒土、硅藻土、皂土及活性炭处理组。如图 5(b)所示，白土处理组的 $ABTS^+$ 自由基清除率达到 60% 以上，且与空白组之间没有显著差异；凹凸棒土、硅藻土、皂土及活性炭处理组的 $ABTS^+$ 自由基清除率均显著低于白土处理组($P<0.05$)。这些结果表明，不同脱色剂处理后的米糠油抗氧化活性存在显著差异，白土脱色后依然可较好地保持米糠油的抗氧化性能。刘建国等[25]研究发现，精炼工艺降低了葵花籽油的体外抗氧化能力，这可能是由于精炼过程中，油中天然色素的流失造成的。脱色后的米糠油中生育酚质量分数降低，其抗氧化能力也下降，这与蔡硕等[38]的研究结果较为一致：油莎豆油的抗氧化能力与生育酚、总酚质量分数呈显著正相关。

2.7 反应不同时间对白土吸附米糠油中叶绿素和类胡萝卜素的影响

如图 6 所示，白土对叶绿素和类胡萝卜素的去除率在 50 min 时分别达到 78.48%、56.66%，表明白土对叶绿素的吸附效率高于对类胡萝卜素的吸附效率。此外，白土对色素的吸附速率在前 30 min 较快，在 30 min 后趋于平衡。因此，白土对米糠油的最佳脱色时间为 30 min。吸附初始阶段属于快速吸附阶段，米糠油中的色素分子快速占据脱色剂表面活性位点，传质动力较强，吸附过程以高速率进行，吸附量以较快速度增加；随着吸附的持续进行，吸附过程逐渐进入慢速吸附阶段，吸附剂表面活性位点逐渐减少，色素分子水平也降低，传质动力减弱，从而导致吸附速率下降[39]。



(a) 不同脱色剂对米糠油DPPH自由基清除率的影响



(b) 不同脱色剂对米糠油$ABTS^+$自由基清除率的影响

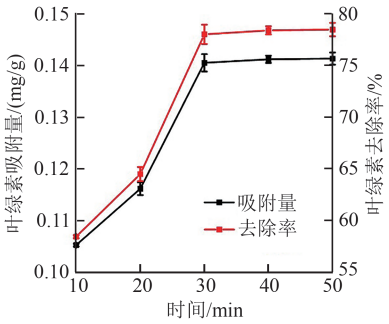
不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

图 5 脱色剂种类对米糠油 DPPH 自由基和 $ABTS^+$ 自由基清除率的影响

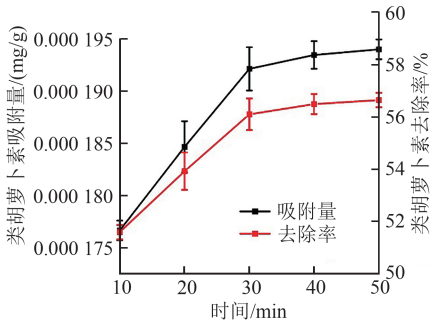
Fig. 5 Effects of different decolorizing agents on the DPPH radical and $ABTS^+$ radical scavenging rates of rice bran oil

2.8 反应不同温度对白土吸附米糠油中叶绿素和类胡萝卜素的影响

如图 7 所示，随着温度上升，白土对色素的吸附量逐渐增大，100 ℃之后总体呈平稳趋势。吸附过程可能是吸热过程，较高的温度更有利于吸附反应的进行。较低的脱色温度可以减少热敏物质的损失，同时节省能源消耗并降低生产成本。因此，选择 100 ℃为白土去除米糠油中叶绿素和类胡萝卜素的最佳温度。



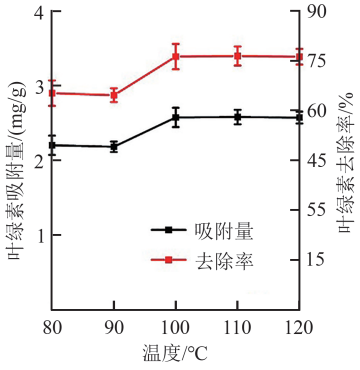
(a) 不同时间下白土对米糠油叶绿素吸附量和去除率的影响



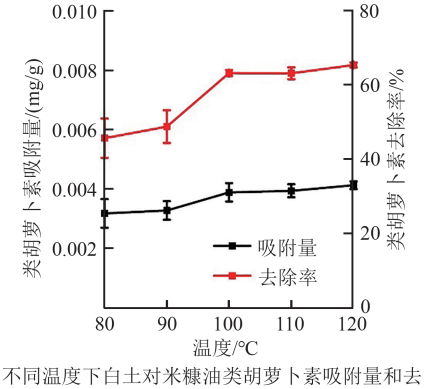
(b) 不同时间下白土对米糠油类胡萝卜素吸附量和去除率的影响

图 6　反应时间对白土吸附米糠油叶绿素和类胡萝卜素的影响

Fig. 6　Effects of reaction time on the adsorption of chlorophyll and carotenoids in rice bran oil by white clay



(a) 不同温度下白土对米糠油叶绿素吸附量和去除率的影响



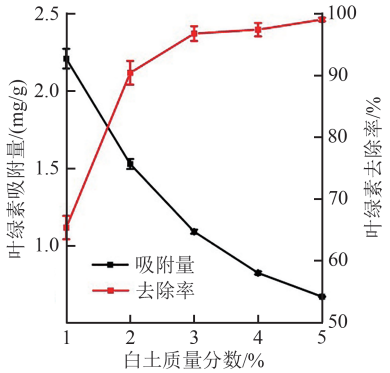
(b) 不同温度下白土对米糠油类胡萝卜素吸附量和去除率的影响

图 7　反应温度对白土吸附米糠油叶绿素和类胡萝卜素的影响

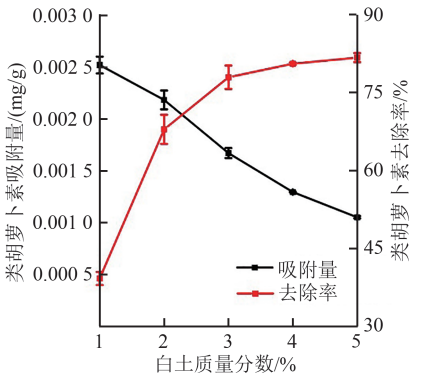
Fig. 7　Effects of reaction temperature on the adsorption of chlorophyll and carotenoids in rice bran oil by white clay

2.9　白土质量分数对米糠油叶绿素和类胡萝卜素吸附量和去除率的影响

脱色剂用量是影响吸附过程的关键因素之一，合理高效地使用脱色剂在实际应用中具有重要意义[40]。如图 8 所示，随着白土质量分数的增加，色素的去除率先上升后趋于稳定，而吸附量呈下降趋势。当白土质量分数从 1% 增加至 3% 时，叶绿素去除率由 65.38% 增加至 96.75%，类胡萝卜素去除率由 39.21% 增加至 77.99%。这是因为对于一定含量的色素，脱色剂添加量直接决定了可以发生吸附的活性位点的数量，因此脱色剂添加量的增加提高了色素的去除率[41]。当白土质量分数从 1% 增加至 3% 时，白土对叶绿素的吸附量从 2.21 mg/g 下降至 0.67 mg/g，白土对类胡萝卜素的吸附量从 0.002 5 mg/g 下降至 0.001 1 mg/g。脱色剂用量的增加会造成活性点位过剩，从而导致单位质量脱色剂的吸附量降低。因此，从经济角度考虑，选择白土质量分数为 3%。



(a) 不同白土质量分数对米糠油叶绿素吸附量和去除率的影响



(b) 不同白土质量分数对米糠油类胡萝卜素吸附量和去除率的影响

图 8　白土质量分数对米糠油叶绿素和类胡萝卜素吸附量的影响

Fig. 8　Effects of mass fraction on the adsorption of chlorophyll and carotenoids in rice bran oil by white clay

2.10　吸附动力学研究结果

为了研究白土吸附过程的主要控制机制，采用了2种模型描述白土吸附过程。

由表3可知，拟二级动力学模型的拟合效果更接近实际测量结果，且拟二级动力学模型的动力学系数（R_2^2）高于拟一级动力学模型的动力学系数（R_1^2）。结果表明，白土对叶绿素的吸附符合拟二级动力学模型，拟合结果说明吸附剂表面有多种结合位点，白土吸附叶绿素主要为化学吸附，这一结论与Pohndorf等[42]的研究结果一致。有研究表明，叶绿素和类胡萝卜素在白土上的吸附，可能是其与白土表面路易斯酸位点和布朗斯特酸位点发生化学反应的结果[43]。

表3　吸附动力学拟合参数

Table 3　Adsorption kinetics fitting parameters

吸附色素	拟一级动力学			拟二级动力学		
	k_1/min^{-1}	$q_{e,1}$/(mg/g)	R_1^2	k_2/(kg/(mg·min))	$q_{e,2}$/(mg/g)	R_2^2
叶绿素	0.323	0.001 837	0.982	0.000 29	0.001 957	0.999

由图9可知，在吸附的初期阶段，白土对叶绿素的吸附容量迅速增加，在吸附反应时间为30 min时，白土对叶绿素的吸附容量达到了0.001 88 mg/g。随着反应时间的延长，吸附容量的增长速率逐渐减缓，并最终趋于稳定。这可能是由于白土表面含有丰富的活性位点，在与色素接触时迅速发生相互作用，但随着吸附时间的增加，活性位点逐渐减少[44]。

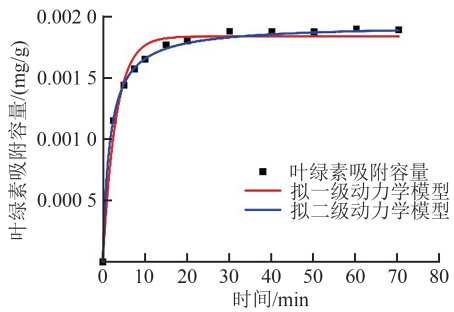


图9　白土吸附叶绿素的吸附动力学模型

Fig. 9　Kinetic models of chlorophyll adsorption by white clay

2.11　吸附等温线研究结果

白土吸附叶绿素的吸附等温线见图10。采用Langmuir、Freundlich和Temkin等温线模型，研究了白土对叶绿素的吸附行为，获得其吸附容量。

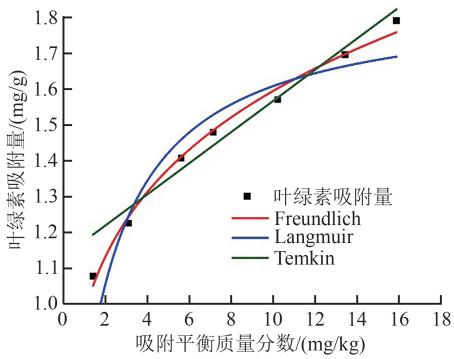


图10　白土吸附叶绿素的吸附等温线模型

Fig. 10　Adsorption isotherm models of white clay for chlorophyll

由表4可知，Langmuir、Freundlich和Temkin吸附等温线模型R^2分别为0.888、0.991以及0.976。其中Freundlich吸附等温线模型的R^2>0.99，拟合效果更好，可以更好描述白土对叶绿素的吸附过程，这一结论与Pohndorf等[42]的研究结果一致。Freundlich模型表明，吸附剂表面是不均匀的，不同部位对吸附质的吸附能力不同，这意味着吸附剂表面存在多种能量状态的吸附位点[45]。根据拟合结果可知，白土吸附色素是一个多层吸附的过程，吸附质既可以直接吸附在吸附剂表面的活性位点上，还可以在已吸附层上逐层累积，形成多层吸附结构[46]。当n>1时，表明吸附质与吸附剂之间的相互作用较强，吸附过程更易发生。

表4　白土吸附叶绿素的吸附等温线参数

Table 4　Adsorption isotherm parameters of white clay for chlorophyll

吸附色素	Langmuir模型			Freundlich模型			Temkin模型		
	q_m/(mg/g)	K_L/(L/mg)	R_L^2	n	K_F/((mg/g)·(L/mg)$^{\frac{1}{n}}$)	R_F^2	RT/b_T	K_T/(L/mg)	R_T^2
叶绿素	1.803	0.828	0.888	4.808	0.977	0.991	0.290 33	0.931 4	0.976

2.12 吸附热力学研究结果

由表5可知，ΔH为正值，表明白土吸附叶绿素伴随着吸热反应，温度升高有利于吸附反应进行，平衡吸附量随温度升高而增大，表明白土吸附叶绿素需要外界提供能量，米糠油脱色过程是一个吸热过程。$\Delta S>0$，说明整个吸附系统的无序程度是随着吸附过程的进行而增强的，符合熵增加原理，这一研究结果与武占省等[47]的研究结果相似。此外，$\Delta G<0$表明吸附过程是自发进行的，根据热力学公式可知绝对温度与ΔG呈负相关，随着绝对温度的升高，ΔG不断下降，K值不断增大，这表明在较高的绝对温度下会使得吸附亲和力增强。

表5 白土吸附叶绿素的热力学参数

Table 5 Thermodynamic parameters for the adsorption of chlorophyll by white clay

绝对温度/K	ΔG/(kJ/mol)	ΔH/(kJ/mol)	ΔS/(kJ/(mol·K))
298	−15.921 3		
308	−17.216 0	19.818 9	0.120 0
318	−18.317 8		

3 结论

在5种脱色剂中，白土对米糠油具有较高的脱色率(60.17%)，白土主要吸附叶绿素，白土脱色后的米糠油中谷维素及生育酚的质量分数最高，且其清除DPPH自由基和$ABTS^+$自由基的能力也显著强于其他脱色剂。此外，当时间为30 min、温度为100 ℃、白土质量分数为3%时，白土对叶绿素及类胡萝卜素的吸附效率最高，脱色性能最好。白土对叶绿素的吸附速率在30 min后逐渐达到平衡，吸附动力学符合拟二级动力学模型，且吸附能力与白土表面的活性位点数量成正比，表明吸附限速原因可能是由于表面活性位点被占据。吸附等温线模型符合Freundlich模型，表明白土对叶绿素的吸附主要是一个多层吸附的过程。热力学研究结果表明，该吸附过程是自发进行的，吸附过程中会吸热。本研究目前仅研究到吸附特性，后续将结合结构表征试验对白土吸附色素的机理进行研究。

参考文献

[1] 李向菲，沈丹，黄俊凯，等. 米糠功能活性成分及其功效的研究进展[J]. 食品工业科技，2022，43(13)：466-474.
Li X F，Shen D，Huang J K，et al. Research progress on functional active components and its efficacy in rice bran [J]. Science and Technology of Food Industry，2022，43(13)：466-474.(in Chinese)

[2] Punia S，Kumar M，Sandhu K S，et al. Rice-bran oil：an emerging source of functional oil[J]. Journal of Food Processing and Preservation，2021，45(4)：e15318.

[3] 叶虔臻，王微，李春松，等. 米糠油应用研究进展[J]. 食品工业科技，2019，40(3)：300-306.
Ye Q Z，Wang W，Li C S，et al. Research progress in comprehensive application of rice bran oil[J]. Science and Technology of Food Industry，2019，40(3)：300-306.(in Chinese)

[4] Fox M，Newcomb K，Oliveira C，et al. Facile analysis of rice bran oil to compare free unsaturated fatty acid compositions of parental and hybrid rice lines[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society，2022，99(12)：1103-1111.

[5] 王勇，刘吕睿，于美汇，等. 风味稻米油的风味分析及形成机制研究[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(11)：152-162.
Wang Y，Liu L，Yu M H，et al. Flavor characteristics and formation mechanism of flavored rice bran oil[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(11)：152-162.(in Chinese)

[6] 陈卫. 功能食品与膳食健康[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(4)：1-7.
Chen W. Functional foods and dietary health[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(4)：1-7.(in Chinese)

[7] 刘玉兰，郑来宁，王动民，等. 米糠挤压膨化对其毛油品质及脱色效果的影响[J]. 粮食与油脂，2015，28(8)：45-49.
Liu Y L，Zheng L N，Wang D M，et al. The influence of extrusion on the quality and decolorization effect of crude rice bran oil[J]. Cereals & Oils，2015，28(8)：45-49.(in Chinese)

[8] 张振山，康媛解，刘玉兰. 植物油脂脱色技术研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版)，2018，39(1)：121-126.
Zhang Z S，Kang Y J，Liu Y L. Research progress on bleaching technology of vegetable oils[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)，2018，39(1)：121-126.(in Chinese)

[9] 张国馥，郜山保，王娟娟，等. 浅析油脂精炼技术—吸附脱色[J]. 粮食与油脂，2011，24(11)：28-30.
Zhang G F，Gao S B，Wang J J，et al. Analysis of oil refining technology—absorption decolorization[J]. Journal of Cereals & Oils，2011，24(11)：28-30.(in Chinese)

[10] 李晓澄，吕亚萍，叶展. 石墨烯吸附材料结构性质解析及其在菜籽油脱色中的应用[J]. 粮油食品科技，2024，32(4)：105-111.
Li X C，LV Y P，Ye Z. Structural and performance

analysis of graphene adsorption materials and their application in rapeseed oil decolorization[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 105-111.(in Chinese)

[11] 后萍. 浅析精炼工艺对植物油品质的影响[J]. 现代食品, 2023(18): 56-58.
Hou P. Analysis of the influence of refining process on the quality of vegetable oil[J]. Modern Food, 2023(18): 56-58.(in Chinese)

[12] 李明哲, 高林辉, 李晨, 等. 响应曲面法优化广西田东活性白土制备工艺研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(10): 3605-3616.
Li M Z, Gao L H, Li C, et al. Optimization of preparation process of activated bentonite from Tiandong, Guangxi based on response surface methodology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(10): 3605-3616.(in Chinese)

[13] 李鑫, 周嫄, 赵平, 等. DDAB改性凹凸棒土对水体中四环素的吸附[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 614-622.
Li X, Zhou Y, Zhao P, et al. Adsorption of tetracycline in water by DDAB modified attapulgite[J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2025, 46(6): 614-622.(in Chinese)

[14] 闫良国, 任丽瑶, 于欢, 等. 硅藻土复合催化材料在有机污水治理中的应用[J]. 中国粉体技术, 2025, 31(4): 131-142.
Yan L G, Ren L Y, Yu H, et al. Application of diatomite composite catalytic materials in organic wastewater treatment[J]. China Powder Science and Technology, 2025, 31(4): 131-142.(in Chinese)

[15] 罗钰湲, 李辛娅, 梁佳翔, 等. 菠萝皮渣纤维素/皂土复合水凝胶的制备及其染料吸附性能[J]. 轻工学报, 2022, 37(5): 41-49.
Luo Y Y, Li X Y, Liang J X, et al. Preparation and dye adsorption properties of pineapple peel cellulose/bentonite composite hydrogels[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(5): 41-49.(in Chinese)

[16] 高慧, 蔡雨情, 贾文静, 等. 响应面法优化热转化后低极性人参皂苷的活性炭脱色工艺[J]. 山东第二医科大学学报, 2025, 47(2): 128-135.
Gao H, Cai Y Q, Jia W J, et al. Optimization of activated carbon decolorization process of low polarity ginsenosides after thermal conversion by response surface analysis[J]. Journal of Shandong Second Medical University, 2025, 47(2): 128-135.(in Chinese)

[17] Strieder M M, Engelmann J I, Pohndorf R S, et al. The effect of temperature on rice oil bleaching to reduce oxidation and loss in bioactive compounds[J]. Grasas y Aceites, 2019, 70(1): e287.

[18] Manjula S, Subramanian R. Enriching oryzanol in rice bran oil using membranes[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2008, 151(2): 629-637.

[19] Wang Y J, Xu L L, Zong A Z, et al. Variations in 3-chloropropanol esters, glycidyl esters, and lipid accompaniments during the simulated moderate decolorization process of maize germ oil[J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143567.

[20] 李奕, 宋嘉欣, 李昊辰, 等. 油莎豆油的脱胶和脱酸工艺[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17): 158-165.
Li Y, Song J X, Li H C, et al. Study on degumming and deacidification technology of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) oil [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 158-165.(in Chinese)

[21] Sun B B, Gao P, Yu H, et al. Optimization of composite decolorizer efficacy based on decolorization efficiency, toxicity, and nutritional value of rice bran oil[J]. Journal of Oleo Science, 2023, 72(8): 755-765.

[22] Liu R R, Xu Y, Chang M, et al. Antioxidant interaction of α-tocopherol, γ-oryzanol and phytosterol in rice bran oil [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128431.

[23] 刘丹. 不同红花油茶种籽脂肪酸构成及种仁油体外抗氧化活性研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023: 17.

[24] Lee S, Kim K S, Kang J W. Development of deep learning color recognition model for color measurement processes [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2024, 19(4): 2779-2785.

[25] 刘建国, 韩珊珊, 刘要卫, 等. 葵花籽油中天然色素及挥发性成分在精炼阶段的变化规律[J]. 食品科学, 2025, 46(4): 218-226.
Liu J G, Han S S, Liu Y W, et al. Changes of natural pigments and volatile components in sunflower oil during refining[J]. Food Science, 2025, 46(4): 218-226.(in Chinese)

[26] 何立军, 孙日飞, 马莉, 等. 大豆干燥油脱色效果与脱色剂的关系研究[J]. 现代食品, 2023, 29(6): 82-84.
He L J, Sun R F, Ma L, et al. Study on relationship between decolorizing effect of soybean drying oil and decolorizing agent[J]. Modern Food, 2023, 29(6): 82-84.(in Chinese)

[27] 董志文. 不同植物油复合脱色材料选择的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2020: 30.

[28] 卢杨, 徐爱军. 活性白土对食用油脂的脱色研究[J]. 粮油加工, 2010(9): 13-16.
Lu Y, Xu A J. Study on the decolorization of edible oils by activated clay [J]. Cereals and Oils Processing, 2010

（9）：13-16.（in Chinese）

[29] Pohndorf R S，Pinheiro C P，Pinto L A A. Kinetic study of adsorption of pigments and oxidation products in the bleaching of rice bran oil[J]. International Journal of Food Engineering，2016，12（3）：211-219.

[30] Daun J K. Spectrophotometric analysis of chlorophyll pigments in canola and rapeseed oils [J]. Lipid Technology，2012，24（6）：134-136.

[31] Uncu O，Ozen B，Tokatli F. Authentication of Turkish olive oils by using detailed pigment profile and spectroscopic techniques[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2020，100（5）：2153-2165.

[32] 张武昌，王荣. 光和温度对叶绿素a和脱镁叶绿酸a降解的影响[J]. 海洋科学，2000，24（4）：50-52.
Zhang W C，Wang R. Effect of light and temperature on the degradation of Chlorophyll a and phaeophorbide a[J]. Marine Sciences，2000，24（4）：50-52.（in Chinese）

[33] 张文龙，黄成义，赵晨伟，等. 植物油中的色素及吸附脱色研究进展[J]. 中国油脂，2022，47（6）：21-28.
Zhang W L，Huang C Y，Zhao C W，et al. Progress on pigment and adsorption bleaching of vegetable oil[J]. China Oils and Fats，2022，47（6）：21-28.（in Chinese）

[34] 李世磊，程倩，初柏君，等. 不同脱色剂对油脂中叶绿素脱除的影响[J]. 中国油脂，2024，49（5）：21-24，77.
Li S L，Cheng Q，Chu B J，et al. Influence of different decolorants on chlorophyll removal from oils[J]. China Oils and Fats，2024，49（5）：21-24，77.（in Chinese）

[35] 孙玉萍，于雷，杨亚，等. 大豆油活性白土脱色工艺的研究[J]. 中国油脂，2026，51（3）：10-16.
Sun Y P，Yu L，Yang Y，et al. Decolorization process of soybean oil by activated clay[J]. China Oils and Fats，2026，51（3）：10-16.（in Chinese）

[36] 祝振杰，陈小军，高艳昌，等. 米糠油加工过程中组成及品质变化的研究[J]. 中国油脂，2024，49（8）：27-35.
Zhu Z J，Chen X J，Gao Y C，et al. Composition and quality change of rice bran oil during processing[J]. China Oils and Fats，2024，49（8）：27-35.（in Chinese）

[37] Worasith N，Goodman B A. Vitamin E oxidation and tocopheroxyl radical stabilization in bleached rice bran oil [J]. Food Bioscience，2013，4：46-49.

[38] 蔡硕，张霞，朱艳书，等. 精炼过程对油莎豆油品质的影响[J]. 中国油脂，2025，50（2）：14-22.
Cai S，Zhang X，Zhu Y S，et al. Effect of refining process on quality of *Cyperus esculentus* L. oil[J]. China Oils and Fats，2025，50（2）：14-22.（in Chinese）

[39] Zheng M Q，Wang J W. Effects of B_2O_3 on the adsorption desulfurization performance of Ag-CeO_x/TiO_2-SiO_2 adsorbent as well as its adsorption-diffusion study[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering，2021，9（6）：106378.

[40] 刘元法，王兴国，金青哲，等. 油脂脱色过程中吸附剂对色素及微量成分的影响[J]. 中国油脂，2005，30（2）：25-27.
Liu Y F，Wang X G，Jin Q Z，et al. Effects of different adsorbent on pigment and trace components in oil bleaching[J]. China Oils and Fats，2005，30（2）：25-27.（in Chinese）

[41] Hao T，Zhou Q，Jiang J Y，et al. Density functional theory study on the microscopic mechanism of NO_2 adsorption and reduction by potassium-doped biochar：the key role of the active sites[J]. Biochar，2025，7（1）：67.

[42] Pohndorf R S，Cadaval T R S Jr，Pinto L A A. Kinetics and thermodynamics adsorption of carotenoids and chlorophylls in rice bran oil bleaching[J]. Journal of Food Engineering，2016，185：9-16.

[43] Pradas E G，Sánchez M V，Viciana M S，et al. Adsorption of chlorophyll-a from acetone solution on natural and activated bentonite[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology，1994，61（2）：175-178.

[44] 刘民，马帅. 纳米高效活性白土对亚甲基蓝的吸附性能研究[J]. 材料保护，2022，55（10）：200-205，212.
Liu M，Ma S. Study on adsorption performance of nanometer high-efficiency activated clay towards methylene blue[J]. Materials Protection，2022，55（10）：200-205，212.（in Chinese）

[45] 王乐，曹澄宇，卫春会，等. 酒糟多孔生物炭的制备及其对亚甲基蓝的吸附机理探究[J]. 中国酿造，2025，44（1）：131-140.
Wang L，Cao C Y，Wei C H，et al. Preparation of distiller’s grains porous biochar and its adsorption mechanism for methylene blue [J]. China Brewing，2025，44（1）：131-140.（in Chinese）

[46] Lopez M A R，Ferreira G M D，Torres Duarte Figueiredo M，et al. Mechanisms of phenol adsorption on banana leaves and coffee husk biochars[J]. ACS Omega，2025，10（16）：15989-16005.

[47] 武占省，李春. 活性白土对油脂溶液中叶绿素的吸附行为研究[J]. 非金属矿，2009，32（2）：40-42.
Wu Z S，Li C. Adsorption behavior of chlorophyll from oil solution by acid-activated bentonite[J]. Non-Metallic Mines，2009，32（2）：40-42.（in Chinese）