

沙棘果渣膳食纤维对丙烯酰胺的吸附特性

崔蔚然, 吕孟玲, 白红雨, 孙 悅, 王 慧, 邵美丽

Adsorption Characteristics of Dietary Fibres from Sea Buckthorn Pomace on Acrylamide

CUI Weiran, L Mengling, BAI Hongyu, SUN Yue, WANG Hui, and SHAO Meili

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040071>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滇橄榄果渣膳食纤维的提取及其体外吸附性能研究

Extraction and *in Vitro* Adsorption Properties of Dietary Fiber from *Phyllanthus emblica* Linn. Pomace

食品工业科技. 2022, 43(2): 174-181 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040269>

乳酸菌肽聚糖对丙烯酰胺的吸附特性研究

Adsorption Properties of *Lactobacillus* Peptidoglycan on Acrylamide

食品工业科技. 2021, 42(13): 103-110 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100087>

利用模拟体系探究沙棘黄酮对丙烯酰胺生成的抑制作用及其机理

Inhibitory Effect and Mechanism of Sea-buckthorn Flavonoids on Acrylamide Formation by Using the Simulation System

食品工业科技. 2023, 44(21): 111-118 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010066>

超声波辅助不同吸附剂吸附蓝莓渣花色苷效果的比较

Effects Comparison of Ultrasound-assisted Adsorption of Anthocyanins from Blueberry Pomace Extracts by Different Adsorbents

食品工业科技. 2020, 41(10): 52-57,62 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.009>

红枣果汁果渣与果酒果渣膳食纤维功能特性的比较研究

Comparative of Functional Properties on Dietary Fiber from Jujube Juice Pomace and Fruit Wine Pomace

食品工业科技. 2020, 41(4): 1-5,12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.04.001>

壳聚糖对蔗糖溶液中单宁酸的吸附性能研究

Study on Adsorption Properties of Chitosan for Tannic Acid in Sucrose Solution

食品工业科技. 2020, 41(3): 12-15,21 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

崔蔚然, 吕孟玲, 白红雨, 等. 沙棘果渣膳食纤维对丙烯酰胺的吸附特性 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 361–368. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040071

CUI Weiran, LÜ Mengling, BAI Hongyu, et al. Adsorption Characteristics of Dietary Fibres from Sea Buckthorn Pomace on Acrylamide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 361–368. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040071

· 营养与保健 ·

沙棘果渣膳食纤维对丙烯酰胺的吸附特性

崔蔚然, 吕孟玲, 白红雨, 孙 悅, 王 慧, 邵美丽*

(东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150000)

摘要: 本文旨在探究沙棘果渣膳食纤维 (Dietary fiber, DF) 吸附丙烯酰胺 (Acrylamide, AA) 的影响因素和吸附稳定性, 同时利用等温吸附模型和动力学模型对沙棘果渣 DF 吸附 AA 过程进行拟合。结果表明, 随着沙棘果渣 DF 添加量增加、吸附时间延长, 吸附率不断增大; 随着 AA 浓度、体系温度、体系 pH 增加, 吸附率呈先增加后降低的趋势。当沙棘果渣 DF 添加量 8 mg/mL、AA 4 μg/mL、pH5、温度 35 °C、作用时间 8 h 时, 吸附率最大, 此时吸附量为 44.8 μg/g。且沙棘果渣 DF-AA 复合物具有较好的体内外稳定性。在胃环境中, 当 pH1.5~2.5、消化时间 1~2 h 时, 沙棘果渣 DF-AA 复合物比较稳定, AA 释放率为 0~12.28%; 在肠环境中, 胆盐浓度 0.1%, 消化时间 3 h 时, 沙棘果渣 DF-AA 复合物稳定性最好, AA 释放率为 14.75%。另外, Langmuir ($R^2=0.93$)、Freundlich ($R^2=0.90$) 2 种等温吸附模型及拟二级动力学模型 ($R^2=0.94$) 均能够很好地拟合沙棘果渣 DF 吸附 AA 过程, 表明该吸附过程既存在物理吸附, 又存在化学吸附。本研究可为沙棘 DF 在 AA 吸附脱毒方面的应用奠定基础。

关键词: 沙棘果渣膳食纤维, 丙烯酰胺, 吸附, 体外模拟消化, 等温吸附模型, 吸附动力学模型

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)06-0361-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040071

本文网刊: 

Adsorption Characteristics of Dietary Fibres from Sea Buckthorn Pomace on Acrylamide

CUI Weiran, LÜ Mengling, BAI Hongyu, SUN Yue, WANG Hui, SHAO Meili*

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China)

Abstract: To explore the influencing factors and adsorption stability of seabuckthorn pomace dietary fiber in adsorbing acrylamide (AA), as well as to fit the adsorption process using isothermal adsorption model and kinetic model. Results indicated that the adsorption rate increased with the addition of seabuckthorn pomace dietary fiber and the extension of adsorption time. However, as the concentration of AA, system temperature, and system pH increased, the adsorption rate initially increased and then decreased. When the seabuckthorn pomace dietary fiber addition was 8 mg/mL, AA concentration was 4 μg/mL, pH was 5, temperature was 35 °C, and adsorption time was 8 h, the adsorption rate was at its maximum, the adsorbed amount was 44.8 μg/g. Moreover, the seabuckthorn pomace dietary fiber-AA complex exhibited good stability both *in vitro* and *in vivo*. In the gastric environment, with a pH of 1.5~2.5 and a digestion time of 1~2 h, the seabuckthorn pomace dietary fiber-AA complex remained relatively stable, with an AA release rate of 0~12.28%. In the intestinal environment, with a bile salt concentration of 0.1% and a digestion time of 3 h, the seabuckthorn pomace dietary fiber-AA complex showed the best stability, with an AA release rate of 14.75%. Additionally, both the Langmuir ($R^2=0.93$) and Freundlich ($R^2=0.90$) isothermal adsorption models, as well as the pseudo-second-order kinetic model ($R^2=0.94$), fitted the adsorption process of AA by seabuckthorn pomace dietary fiber well, indicating the presence of both physical and chemical adsorption. This study lays the foundation for the application of seabuckthorn pomace dietary fiber in AA adsorption detoxification.

收稿日期: 2024-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31801518)。

作者简介: 崔蔚然 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品中危害物质的防控, E-mail: 2973078573@qq.com。

* 通信作者: 邵美丽 (1974-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品中危害物质的防控, E-mail: shml0915@163.com。

Key words: seabuckthorn pomace dietary fiber; acrylamide; adsorption; *in vitro* digestive simulation; isothermal adsorption model; adsorption kinetic modelling

丙烯酰胺(Acrylamide, AA)主要是天冬酰胺和还原糖发生美拉德反应生成的非酶促褐变反应副产物^[1],具有神经毒性、遗传毒性、生殖毒性及潜在致癌性^[2-3]。AA 作为热加工危害物,广泛分布于薯条、薯片、饼干、谷物及咖啡等高温油炸或焙烤类食品中^[4-5]。它会随着各种食物累积进入体内,带来不可忽视的健康风险。利用生物吸附脱毒法减缓 AA 体内摄入量是控制其体内毒性的有效手段之一。课题组首次证实将高剂量植物乳杆菌 ATCC8014(1×10⁹ CFU/mL)制成冻干粉灌喂大鼠后,可以有效缓解 AA 诱导的大鼠体重减轻、神经毒性及各脏器氧化损伤情况^[6]。Choi 等^[7]将饼干和薯片分别加入到益生菌培养基中,并进行了体外模拟消化试验,结果表明在模拟消化条件下,益生菌可通过吸附 AA 降低其生物可及性。但农林有机高分子废弃物是否能作为生物吸附剂吸附 AA 尚不清楚。

沙棘果渣是沙棘加工生产的主要副产品,主要被用作动物饲料或废弃处理,造成很大的资源浪费和环境污染^[8]。目前,沙棘果渣的深度开发和利用主要集中在总黄酮和蛋白质方面^[9],膳食纤维(Dietary fiber, DF)作为沙棘果渣中含量最多的成分(50%以上),研究却相对较少,未得到充分的开发利用。DF 具有多孔结构,且其结构中含有大量的羟基、羧基等活性基团^[10],具有吸附葡萄糖、胆固醇特性^[11],同时对于重金属、霉菌毒素等食品危害物质也具有良好的吸附脱毒能力^[12-14]。本课题组前期研究证实了沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附能力^[15],但沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响因素、吸附稳定性及吸附机理尚有待进一步研究。

本研究以吸附率为指标,考察不同因素(pH、温度、AA 浓度、沙棘果渣 DF 添加量)对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响;采用溶剂洗脱法和模拟消化法探究沙棘果渣 DF 吸附 AA 后的体内外稳定性;结合等温吸附模型和吸附动力学模型初步探究沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附机理,以期为沙棘果渣 DF 在 AA 吸附脱毒方面的应用奠定理论基础,同时拓展沙棘果渣 DF 的吸附功能性,推动沙棘果渣 DF 进一步开发成食品添加剂或者功能性食品,为提高沙棘产业加工副产品的附加价值提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

沙棘果渣 购自黑龙江省牡丹江市润禾谷沙棘种植园;AA 标准品 纯度≥99%,美国 Amresco 公司;碱性蛋白酶 (7447 U/g)、无水乙醇 北京奥博星生物科技有限公司;甲醇 色谱级,美国 Thermo Fisher 公司;乙腈 分析级,哈尔滨市志飞生物技术公司。

RRH-A750 小型高速多功能粉碎机 浙江永康市红太阳机电有限公司;KQ-400KDB 数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司;HZQ-F100 振荡培养箱 哈尔滨韦恩商贸有限公司;1260II Prime 高效液相色谱仪 美国安捷伦公司。

1.2 实验方法

1.2.1 沙棘果渣基本成分分析 分别参照 GB 5009.3-2010《食品安全国家标准 食品中水分的测定》、GB 5009.4-2010《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》、GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》、GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》、GB 5009.88-2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》对沙棘果渣基本成分进行测定。

1.2.2 沙棘果渣 DF 的制备 将 5 g 沙棘果渣于 60 °C 干燥 24 h,去杂质,粉碎后过 60 目筛,用索式抽提装置脱脂 8 h,干燥,备用。称取样品,调节 pH 为 9.2,加入 4245 U 的碱性蛋白酶,48 °C,超声 280 W、40 min,提取后灭酶 15 min。向提取液中加入 4 倍体积 95% 乙醇,4 °C,醇沉 4 h,收集沉淀。用 78%、95% 乙醇各洗涤沉淀一次,60 °C 烘干至恒重,得到沙棘果渣 DF^[16]。

1.2.3 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率测定 采用高效液相色谱法^[17]测定 AA 含量。

检测条件:色谱柱为 Alltima Inertsil ODSP-C₁₈(150 mm×4.6 mm, 5 μm);流动相为水:甲醇(95:5, V/V);流速为 1 mL/min;进样量为 20 μL;进样温度为 30 °C;紫外检测波长为 205 nm。

标准曲线建立:准确称取 AA 标准品 0.1000 g,用水溶解并定容至 100 mL,浓度为 1.0 mg/mL,用去离子水稀释定容得到 2、4、6、8、10 μg/mL 的丙烯酰胺标准溶液,按照上述的 HPLC 检测条件测定,以 AA 浓度作为横坐标,对应的峰面积作为纵坐标绘制标准曲线。

沙棘果渣 DF 对 AA 吸附的计算公式如下:

$$\text{AA 吸附率}(\%) = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{AA 吸附量}(\mu\text{g/g}) = \frac{(A_0 - A) \times V \times 1000}{m} \quad \text{式 (2)}$$

式中: A₀ 为总 AA 的含量(μg/mL); A 为吸附反应后离心收集的上清液中 AA 含量(μg/mL); V 为溶液体积(mL); m 为 DF 质量(mg)。

1.2.4 各因素对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响

1.2.4.1 pH 对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响 取 10 mL、4 μg/mL AA 溶液,向其中加入沙棘果渣 DF,使其终浓度为 8 mg/mL,分别调节 pH 为 3、5、

7、9、11, 于 35 ℃, 反应 8 h, 然后 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 按照 1.2.3 测定上清液中 AA 含量, 计算沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率和吸附量。

1.2.4.2 温度对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响 取 10 mL 4 μg/mL AA 溶液, 向其中加入沙棘果渣 DF, 使其终浓度为 8 mg/mL, 调节 pH 为 5, 分别在 25、35、45、55、65 ℃ 下反应 8 h, 然后 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 按照 1.2.3 测定上清液中 AA 含量, 计算沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率和吸附量。

1.2.4.3 AA 浓度对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响 取 10 mL 2、4、6、8、10 μg/mL AA 溶液, 向其中加入沙棘果渣 DF, 使其终浓度为 8 mg/mL, 调节 pH 为 5, 在 35 ℃ 下反应 8 h, 然后 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 按照 1.2.3 测定上清液中 AA 含量, 计算沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率和吸附量。

1.2.4.4 沙棘果渣 DF 添加量对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响 取 10 mL 4 μg/mL AA 溶液分别向其中加入不同质量的沙棘果渣 DF, 使其终浓度为 2、5、8、11、14 mg/mL, 调节 pH 为 5, 在 35 ℃ 下反应 8 h, 然后 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 按照 1.2.3 测定上清液中 AA 含量, 计算沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率和吸附量。

1.2.4.5 时间对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响 取 10 mL 4 μg/mL AA 溶液, 向其中加入沙棘果渣 DF, 使其终浓度为 8 mg/mL, 调节 pH 为 5, 35 ℃, 分别反应 2、4、6、8、10 h, 然后 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 按照 1.2.3 测定上清液中 AA 含量, 计算沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率和吸附量。

1.2.5 沙棘果渣 DF 吸附 AA 的稳定性分析

1.2.5.1 沙棘果渣 DF 吸附 AA 的体外稳定性分析

取 10 mL 4 μg/mL AA 加入沙棘果渣 DF 混匀使其终浓度为 8 mg/mL, 调节 pH 为 5, 于 35 ℃, 反应 8 h。然后 8000 r/min 离心 10 min, 收集沉淀(沙棘果渣 DF-AA 复合物)。分别用 1 mL 无菌去离子水、甲醇、乙腈:水(2:1)、丙酮重复洗脱 3 次, 测定洗脱液中 AA 含量, 并按式(3)计算 AA 释放率:

$$Q(\%) = \frac{B}{A_0 - A} \times 100 \quad (3)$$

式中: B 为不同洗脱液中 AA 含量(μg/mL); A₀ 为总 AA 的含量(μg/mL); A 为吸附反应后离心收集的上清液中 AA 含量(μg/mL)。

1.2.5.2 沙棘果渣 DF 吸附 AA 的体内稳定性分析

人工模拟口腔消化: 按照 1.2.5.1 制备沙棘果渣 DF-AA 复合物。将其与 1.75 mL 唾液电解液、0.25 mL α-淀粉酶(1500 U/mL)、12.5 μL CaCl₂(0.3 mol/L) 混合, 定容至 5 mL。于 37 ℃ 孵育 5 min, 得到口腔消化产物。

人工模拟胃消化: 取口腔消化产物与胃液电解液 1:1 混合, 加入胃蛋白酶(终浓度为 2000 U/mL),

调节 pH 分别为 1.5、2.5、3.5。于 37 ℃, 分别孵育 1、2、3 h, 然后 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 测定上清液中 AA 释放率。

人工模拟肠消化: 取胃消化产物与肠液电解液 1:1 混合, 调节 pH 为 7, 加入胰酶(终浓度为 100 U/mL) 和不同质量的胆盐, 使胆盐浓度分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%。于 37 ℃ 分别孵育 3、4、5、6 h, 然后 8000 r/min 离心 10 min, 取上清, 测定上清液中 AA 释放率。

1.2.6 沙棘果渣 DF 对 AA 的等温吸附模型拟合 分别取 10 mL 2、4、6、8、10 μg/mL 的 AA 溶液, 向其中加入沙棘果渣 DF, 使其终浓度为 8 mg/mL, 混匀, 调节 pH 为 5, 于 35 ℃, 反应 8 h, 然后 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 测定上清液中的 AA, 计算沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附量。按式(4)进行计算:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (4)$$

式中: Q_e 为平衡时的吸附量(μg/mg), C₀ 为空白样液中 AA 的含量(μg/mL), C_e 为离心收集上清液中 AA 的含量(μg/mL), V 为溶液体积(mL), m 为沙棘果渣 DF 添加量(mg)。

将所得 Q_e 和 C_e 分别带入 Langmuir 方程和 Freundlich 方程, 对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的数据进行拟合。利用两种等温吸附模型, 得出 Q_m、k_a 及 k_F 等参数, 进一步分析评价沙棘果渣 DF 吸附 AA 过程是否存在物理吸附和(或)化学吸附。

Langmuir 方程及其线性表达式为:

$$Q_e = \frac{Q_m k_a C_e}{1 + k_a C_e} \quad (5)$$

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_m k_a} + \frac{C_e}{Q_m} \quad (6)$$

Freundlich 方程及其线性表达式为:

$$Q_e = k_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

$$\ln Q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (8)$$

式中: k_a 为 Langmuir 方程的平衡常数, k_F 为 Freundlich 方程的特征常数, Q_e 和 Q_m 分别为 AA 的平衡吸附量和最大理论吸附量(μg/mg); C_e 为吸附平衡时溶液中 AA 的浓度(μg/mL); n 为强度常数。

1.2.7 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附动力学模型拟合

取 10 mL 4 μg/mL AA 溶液, 向其中加入沙棘果渣 DF, 使其终浓度为 8 mg/mL, 混匀, 调节 pH 为 5, 于 35 ℃, 分别反应 2、4、6、8、10 h, 然后 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 测定上清液中的 AA, 计算沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附量。按式(9)进行计算:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (9)$$

式中: Q_e 为平衡时的 AA 吸附量(μg/mg); C₀ 为空白样液中 AA 的含量(μg/mL); C_e 为离心收集上清

液中 AA 的含量($\mu\text{g}/\text{mL}$); V 为溶液体积(mL); m 为沙棘果渣 DF 添加量(mg)。

将所得 Q_e 和 C_e 分别带入下式拟一级动力学方程和拟二级动力学方程, 对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的数据进行拟合。

拟一级反应动力学方程及其线性表达式:

$$\frac{dQ_e}{dt} = k_1(Q_e - Q_t) \quad \text{式 (10)}$$

$$\log(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad \text{式 (11)}$$

拟二级反应动力学方程及其线性表达式:

$$\frac{dQ_e}{dt} = k_2(Q_e - Q_t)^2 \quad \text{式 (12)}$$

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad \text{式 (13)}$$

式中: Q_e 为平衡时的 AA 吸附量($\mu\text{g}/\text{mg}$); Q_t 为 t 时刻的 AA 吸附量($\mu\text{g}/\text{mg}$); t 为反应时间(h); k_1 为拟一级速率常数($1/\text{h}$); k_2 为拟二级速率常数($\text{mg}/(\mu\text{g}\cdot\text{h})$)。

1.3 数据处理

每组试验重复 3 次, 结果表示为平均值 \pm 标准误差。数据采用 SPSS 23.0 进行统计分析, $P<0.05$ 为差异显著, 采用 Originpro 2021 进行作图分析。

2 结果与分析

2.1 沙棘果渣基本成分分析

本试验沙棘果渣基本成分如表 1 所示。其中, 水分 4.33%、脂肪 17.83%、蛋白质 23.61%、可溶性 DF12.37%、不溶性 DF34.78%、灰分 1.58%。这些成分中含量最多的是 DF, 质量分数占比 47.16%(可溶性 DF 和不溶性 DF), 说明沙棘果渣可作为一种很好的 DF 原料, 用于后续试验研究。

2.2 丙烯酰胺的标准曲线

由图 1 所示, AA 标准曲线为 $Y=66606X+42080$, $R^2>0.99$, 表明在 0~10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的范围内具有良好的线性关系。

2.3 各因素对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响

2.3.1 pH 对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响 由图 2 可知, 随着 pH 增加, 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率呈先增加后减少的趋势。pH 为 3、5 时, AA 的吸附率显著高于 pH 为 7、9、11 时的吸附率($P<0.05$), 且 pH 为 5 时, 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率和吸附量最大。可能是沙棘果渣 DF 因表面羧基、羟基解离带负电荷。当 pH 较低时, 大量 H^+ 占据吸附位点,

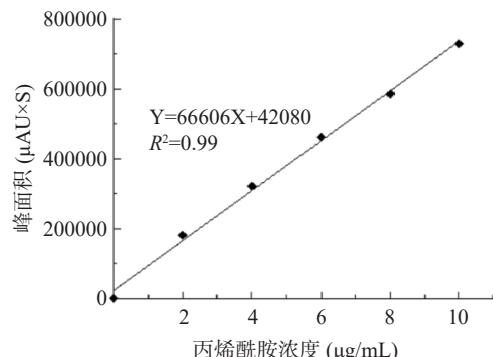


图 1 AA 标准曲线

Fig.1 Standard curve of AA

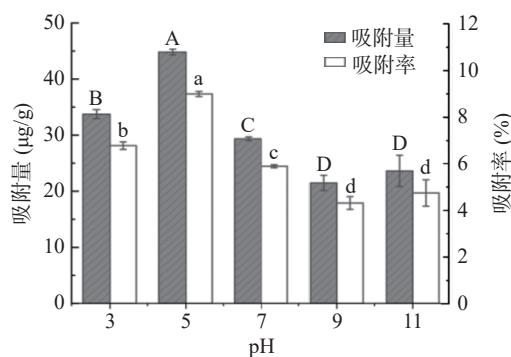


图 2 pH 对 AA 吸附的影响

Fig.2 Effects of pH on adsorption of AA

注: 不同大小写字母表示沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附在不同 pH 条件下差异显著($P<0.05$)。

竞争阻碍了 AA 与沙棘果渣 DF 表面基团的作用。随着 pH 的逐渐增加, H^+ 减少, 沙棘果渣 DF 表面-OH 和-COOH 等官能团与 AA 作用机率增加, 从而吸附率增大^[18]。在碱性环境中, 过量的 OH^- 与沙棘果渣 DF 的-OH 之间的静电排斥作用增大, 抑制 AA 与沙棘果渣 DF 表面基团的作用, 影响吸附效果^[19]。

2.3.2 温度对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响 由图 3 可知, 在 25~35 °C 之间, AA 吸附率随着温度的升高显著增大($P<0.05$), 在 35 °C 时吸附率达到最大, 此时吸附量达 44.8 $\mu\text{g}/\text{g}$; 在 35~65 °C 之间, AA 吸附率随着温度的升高而减小。该结果与温度对米糠 DF 吸附 Pb^{2+} 的影响结果类似^[20]。原因可能是一定温度范围内, 随着温度升高, 沙棘果渣 DF 表面活性和动能增加, 使得沙棘果渣 DF 与 AA 之间碰撞机率增加, 促进吸附。超过该温度范围, 沙棘果渣 DF 自身结构可能发生改变, 同时部分被吸附的 AA 可能发生解吸, 吸附率降低^[21]。

表 1 沙棘果渣基本成分
Table 1 Basic components of seabuckthorn pomace

样品	组成成分(%)						
	水分	脂肪	蛋白质	可溶性DF	不溶性DF	总DF	灰分
沙棘果渣	4.33±0.08	17.83±0.07	23.61±0.54	12.37±0.06	34.78±0.20	47.16±0.15	1.58±0.09

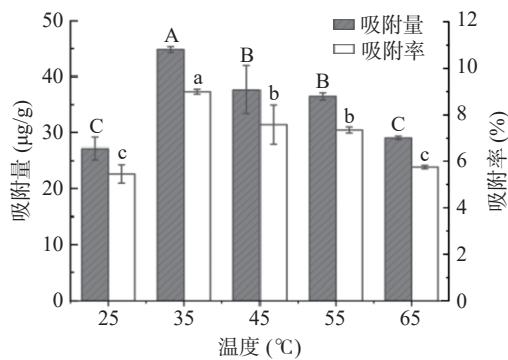


图 3 温度对 AA 吸附的影响

Fig.3 Effects of temperature on the adsorption of AA

注: 不同大小写字母表示沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附在不同温度条件下差异显著($P<0.05$)。

2.3.3 AA 浓度对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响

由图 4 可知, 随着 AA 浓度增加, 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率呈先增大后减小趋势。且 AA 浓度为 $4 \mu\text{g/mL}$ 时, 沙棘果渣 DF 对 AA 吸附率最大, 显著高于其他浓度下的 AA 吸附率($P<0.05$)。这可能是由于 AA 浓度低时, 沙棘果渣 DF 表面的结合位点相对处于饱和状态, 吸附率与 AA 浓度呈正相关; 随着 AA 浓度增大到一定程度, 其与沙棘果渣 DF 表面位点的结合出现竞争性抑制, 吸附率与 AA 浓度呈负相关^[22]。

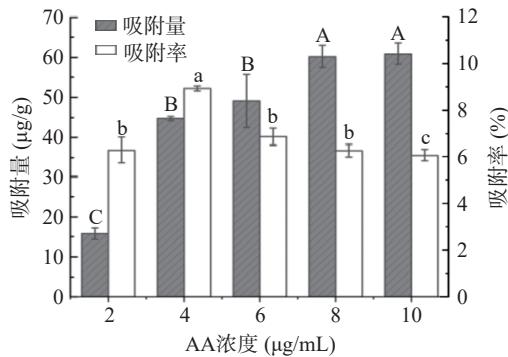


图 4 AA 浓度对 AA 吸附的影响

Fig.4 Effects of AA concentration on adsorption of AA

注: 不同大小写字母表示沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附在不同 AA 浓度条件下差异显著($P<0.05$)。

2.3.4 沙棘果渣 DF 添加量对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响

由图 5 可知, 在 $2\sim14 \text{ mg/mL}$ 范围内, 沙棘果渣 DF 对 AA 吸附率随着添加量增加而增大, 但沙棘果渣 DF 添加量超过 8 mg/mL 后, AA 吸附率增幅明显较小($P>0.05$)。这是由于随着沙棘果渣 DF 添

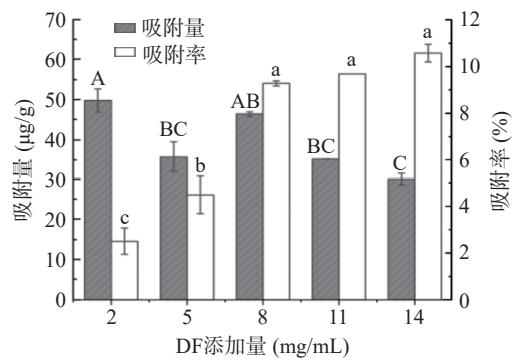


图 5 沙棘果渣 DF 添加量对 AA 吸附的影响

Fig.5 Effects of DF addition of seabuckthorn pomace on adsorption of AA

注: 不同大小写字母表示沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附在不同沙棘果渣 DF 添加量条件下差异显著($P<0.05$)。

加量增多, 其表面的结合位点随之增多, 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率增大^[23]。当沙棘果渣 DF 添加量达到一定值时, 沙棘果渣 DF 与 AA 达到吸附平衡, 即使再增加沙棘果渣 DF, 其对 AA 的吸附率增幅也不会明显^[24]。

2.3.5 时间对沙棘果渣 DF 吸附 AA 的影响 由图 6 可知, 在 $2\sim8 \text{ h}$ 范围内, 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附速率随着吸附时间延长而增加。继续延长吸附时间, 吸附率增幅明显减小($P>0.05$), 表明反应 8 h 时, 沙棘果渣 DF 对 AA 结合速度相对较慢, 这与沙棘果渣 DF 表面的多孔状结构以及有效结合位点的数量有关^[25]。

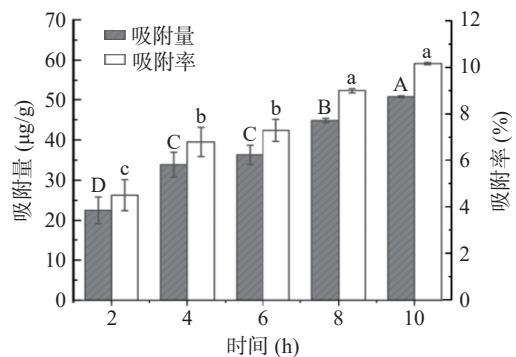


图 6 时间对 AA 吸附的影响

Fig.6 Effects of time on adsorption of AA

注: 不同大小写字母表示沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附在不同时间条件下差异显著($P<0.05$)。

2.4 沙棘果渣 DF 吸附 AA 的稳定性分析

2.4.1 沙棘果渣 DF 吸附 AA 的体外稳定性分析

由表 2 可知, 分别用甲醇、乙腈:水(2:1)、丙酮重复

表 2 沙棘果渣 DF-AA 复合物的体外稳定性

Table 2 Stabilities of the DF-AA complex *in vitro*

样品	AA 释放率(%)											
	无菌去离子水			甲醇			乙腈:水(2:1)			丙酮		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DF	$16.22\pm2.92^{\text{A}}$	$10.41\pm0.18^{\text{B}}$	$5.75\pm1.15^{\text{C}}$	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

注: 不同大写字母表示无菌去离子水洗脱不同次数时, AA 释放率差异显著($P<0.05$), ND: 未检出。

洗脱沙棘果渣 DF-AA 复合物三次, 均无 AA 释放; 用无菌去离子水重复洗脱沙棘果渣 DF-AA 复合物三次, 释放率分别为 16.22%、10.41%、5.75% ($P < 0.05$), 表明沙棘果渣 DF-AA 复合物在有机溶剂中非常稳定, 在无菌去离子水中则 AA 有一定程度的释放, 这可能是由于无菌去离子水破坏了沙棘果渣 DF 与 AA 之间形成的疏水作用力, 从而影响复合物的稳定性^[26]。

2.4.2 沙棘果渣 DF 吸附 AA 的体内稳定性分析

2.4.2.1 人工模拟胃环境 由表 3 可知, pH 与作用时间均会对沙棘果渣 DF-AA 复合物的稳定性产生影响。沙棘果渣 DF-AA 在 pH 为 1.5、2.5 的人工胃液中分别作用 1 h 后, 无 AA 释放, 说明在此条件下, 该复合物是最稳定的。继续作用至 3 h 时, 三种 pH 的胃液中都检测到了不同程度的 AA 释放, 释放率分别为 14.59%、23.03%、37.45%。由此可以看出沙棘果渣 DF-AA 复合物的稳定性随着 pH 的增加和消化时间的延长而降低。这可能是由于 pH 较低时, 影响沙棘果渣 DF 颗粒的比表面积和总孔体积, 从而增加了其吸附位点^[27], 而随着 pH 升高, 沙棘果渣 DF 的表面吸附位点相对减少, 使得被释放的 AA 重新结合到沙棘果渣 DF 表面的机会减少, 导致沙棘果渣 DF-AA 复合物中 AA 释放率升高。

表 3 pH 对沙棘果渣 DF-AA 复合物稳定性的影响

Table 3 Effects of pH on the stability of the DF-AA complex

样品	时间(h)	AA的释放率(%)		
		1.5	2.5	3.5
	1	ND	ND	10.82±0.02 ^{Ac}
沙棘果渣DF	2	ND	12.28±1.44 ^{Bb}	26.46±1.32 ^{Ab}
	3	14.59±0.06 ^{Ca}	23.03±0.34 ^{Ba}	37.45±1.09 ^{Aa}

注: 不同大写字母代表 AA 释放率在相同时间下不同 pH 时差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示 AA 释放率在相同 pH 条件下作用不同时间时差异显著 ($P < 0.05$); ND: 未检出。

2.4.2.2 人工模拟肠环境 由表 4 可知, 沙棘果渣 DF-AA 复合物在不同胆盐浓度 (0.1%~0.4%) 和消化时间 (3~6 h) 中均能释放 AA。在相同胆盐浓度下, 随着消化时间延长, 沙棘果渣 DF-AA 复合物中 AA 释放率增加, 消化时间为 3 h 时, AA 释放率显著低于其他时间 ($P < 0.05$)。在相同消化时间下, 随着胆

表 4 胆盐对沙棘果渣 DF-AA 复合物稳定性的影响

Table 4 Effect of bile salt on the stability of sea buckthorn fruit residue DF-AA complex

样品	时间(h)	AA的释放率(%)			
		0.1%	0.2%	0.3%	0.4%
	3	14.75±0.47 ^{Dd}	18.23±0.28 ^{Db}	16.80±0.38 ^{Cc}	22.76±0.52 ^{Ca}
沙棘果渣DF	4	17.97±0.86 ^{Cc}	21.31±0.38 ^{Cb}	22.64±0.40 ^{Bb}	25.42±0.46 ^{Ba}
	5	20.59±0.57 ^{Bc}	25.02±0.24 ^{Bb}	23.74±0.41 ^{Bb}	32.57±1.33 ^{Aa}
	6	31.30±0.37 ^{Ac}	29.21±0.61 ^{Ab}	32.92±0.72 ^{Aba}	33.63±0.79 ^{Aa}

注: 不同大写字母代表 AA 释放率在相同胆盐浓度作用不同时间时差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示 AA 释放率在相同时间不同胆盐浓度时差异显著 ($P < 0.05$); ND: 未检出。

盐浓度增加, AA 释放率逐渐增大, 胆盐浓度为 0.1% 时, AA 释放率显著低于其他胆盐浓度 ($P < 0.05$), 即沙棘果渣 DF-AA 复合物在胆盐浓度 0.1%, 作用时间为 3 h 时, AA 释放率最低, 为 14.75%。肠环境的 AA 释放可能是由于胆汁酸盐通过疏水相互作用、静电作用、氢键与沙棘果渣 DF 结合, 竞争性占据了 AA 的吸附位点, 使被释放的 AA 再与沙棘果渣 DF 结合的能力降低, 导致 AA 释放率增大^[28]。

2.5 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附等温模型拟合及分析

Langmuir 和 Freundlich 2 种吸附等温模型常用来评价生物吸附过程。Langmuir 吸附等温模型假设有限吸附位点均一分布在吸附剂表面, 吸附质在吸附剂表面发生单层吸附, 适用于物理吸附^[29]。Freundlich 吸附等温模型假设吸附剂表面具有异质性, 吸附质在吸附剂表面既可能发生单层吸附, 也可能发生多层吸附, 适用于化学吸附和物理吸附的复杂吸附过程^[30]。

由图 7 和表 5 可知, Langmuir 模型 ($R^2=0.93$) 和 Freundlich 模型 ($R^2=0.90$) 均有较高的相关系数,

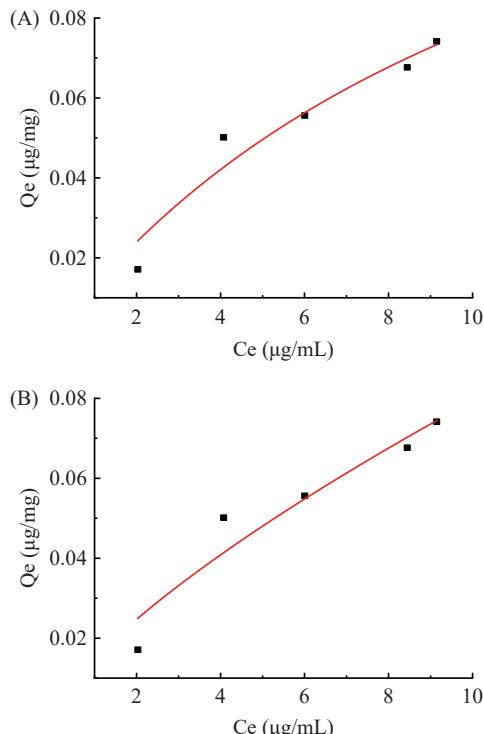


图 7 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附等温模型拟合图

Fig.7 Fitted isothermal model for the adsorption of AA by seabuckthorn pomace DF

注: (A) 和 (B) 分别代表沙棘果渣 DF 吸附 AA 的 Langmuir 模型和 Freundlich 模型。

表 5 不同吸附等温模型及相关吸附常数

Table 5 Different adsorption isotherm models and adsorption constants

R^2	Langmuir模型		Freundlich模型		
	Q_m (μg/mg)	k_a (mL/μg)	R^2	n	k_F (μg/mg)
0.93	0.17	0.08	0.90	1.37	0.01

表明 Langmuir 和 Freundlich 2 种模型均适用于拟合沙棘果渣 DF 吸附 AA 过程。这说明沙棘果渣 DF 与 AA 之间不仅可发生单层吸附, 也可发生多层吸附, 即沙棘果渣 DF 吸附 AA 过程中同时存在物理吸附和化学吸附^[31]。

从 Langmuir 模型分析可以看出, 沙棘果渣 DF 对 AA 的最大吸附量 Q_m 为 0.17 $\mu\text{g}/\text{mg}$; 由 Freundlich 模型分析可知, n 为 1.37(n 表示吸附亲和力), 而 n 值在 1~10 范围内表明吸附效果较好, 说明沙棘果渣 DF 吸附 AA 的过程是容易进行的。

2.6 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附动力学模型拟合及分析

由图 8 和表 6 可知, 与拟一级动力学模型 ($R^2=0.73$) 相比, 拟二级动力学模型具有更高的相关系数 ($R^2=0.94$), 这表明拟二级动力学比拟一级动力学更适合沙棘果渣 DF 吸附 AA 过程。而拟二级动力学模型适用于化学吸附过程, 因此进一步证明沙棘果渣 DF 吸附 AA 过程中存在化学吸附。该结果与植物乳杆菌 ATCC8014 肽聚糖吸附 AA 过程也存在化学吸附结论相类似^[32]。

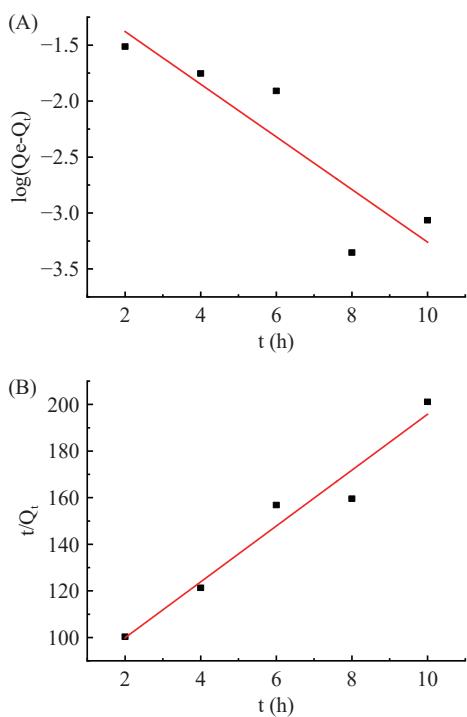


图 8 沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附动力学模型拟合图

Fig.8 Fitted kinetic model of the adsorption of AA by seabuckthorn pomace DF

注: (A) 和 (B) 分别代表沙棘果渣 DF 吸附 AA 的拟一级反应动力学模型和拟二级反应动力学模型。

表 6 不同动力学模型及相关吸附常数

Table 6 Different kinetic models and related adsorption constants

拟一级动力学模型		拟二级动力学模型	
R^2	$k_1(1/\text{h})$	R^2	$k_2(\text{mg}/(\mu\text{g}\cdot\text{h}))$
0.73	0.54	0.94	1.89

3 结论

本文探究了沙棘果渣吸附 AA 的影响因素和体内外稳定性, 结果发现沙棘果渣 DF 添加量、AA 浓度、温度、pH 及吸附时间均会不同程度影响棘果渣 DF 对 AA 的吸附能力。最佳吸附条件为: 沙棘果渣 DF 添加量 8 mg/mL 、AA 浓度 4 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、温度 35 $^{\circ}\text{C}$ 、pH5、吸附时间 8 h, 此时沙棘果渣 DF 对 AA 的吸附率最大, 吸附量为 44.8 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。沙棘果渣 DF 吸附 AA 后, 具有较好的体内外稳定性, 在胆盐浓度 0.1%, 消化时间为 3 h 时, 沙棘果渣 DF-AA 复合物稳定性最好, AA 释放率为 14.75%。沙棘果渣 DF 吸附 AA 的机制初探表明, Langmuir、Freundlich 2 种等温吸附模型及二级吸附动力学模型均能很好的拟合沙棘果渣 DF 吸附 AA 的过程, 说明沙棘果渣 DF 吸附 AA 过程中既存在物理吸附, 又存在化学吸附。后续尚需深入探究吸附机制, 阐明沙棘果渣 DF 吸附 AA 过程中涉及的各种作用力和化学键。本研究为沙棘果渣 DF 作为生物吸附剂吸附 AA 奠定理论基础, 也为综合开发利用沙棘果渣提供新思路。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- PAN M F, LIU K X, YANG J Y, et al. Review of research into the determination of acrylamide in foods[J]. *Foods*, 2020, 9(4): 524.
- RIFAI L, SALEH F A. A review on acrylamide in food: Occurrence, toxicity, and mitigation strategies[J]. *International Journal of Toxicology*, 2020, 39(2): 93–102.
- GUPTA D, SINGH S, SONI R, et al. Possible metabolic effect of acrylamide on biological system[J]. *Food Safety and Health*, 2023, 1(2): 126–138.
- SEMLA M, GOC Z, MARTINIAKOVA M, et al. Acrylamide: A common food toxin related to physiological functions and health[J]. *Physiological Research*, 2017, 66(2): 205.
- ESPOSITO F, FASANO E, DE VIVO A, et al. Processing effects on acrylamide content in roasted coffee production[J]. *Food Chemistry*, 2020, 319: 126550.
- ZHAO S J, ZHAO X D, LIU Q B, et al. Protective effect of *Lactobacillus plantarum* ATCC8014 on acrylamide-induced oxidative damage in rats[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2020, 63: 1–14.
- CHOI S M, YANG L, CHANG Y X, et al. Study of the efficacy of probiotic bacteria to reduce acrylamide in food and *in vitro* digestion[J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1263.
- HUSSAIN S, SHARMA M, BHAT R. Valorisation of sea buckthorn pomace by optimization of ultrasonic-assisted extraction of soluble dietary fibre using response surface methodology[J]. *Foods*, 2021, 10(6): 1330.
- ZHANG X T, LI M Q, ZHU L C, et al. Sea buckthorn pretreatment, drying, and processing of high-quality products: Current status and trends[J]. *Foods*, 2023, 12(23): 4255.

[10] GAO Q, ZHOU X J, MA R, et al. Hydrogen peroxide modification affects the structure and physicochemical properties of dietary fibers from white turnip (*Brassica rapa* L)[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1024.

[11] HE Y, WANG B X, WEN L K, et al. Effects of dietary fiber on human health[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(1): 1–10.

[12] RAJI Z, KARIM A, KARAM A, et al. A review on the heavy metal adsorption capacity of dietary fibers derived from agro-based wastes: Opportunities and challenges for practical applications in the food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023.

[13] QI J, LI Y, MAJEEED H, et al. Adsorption mechanism modeling using lead (Pb) sorption data on modified rice bran-insoluble fiber as universal approach to assess other metals toxicity[J]. *International Journal of Food Properties*, 2019, 22(1): 1397–1410.

[14] MECA G, MENEGHELLI G, RITIENI A, et al. Influence of different soluble dietary fibers on the bioaccessibility of the minor Fusarium mycotoxin beauvericin[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(5): 1362–1368.

[15] 吕孟玲, 唐祯玥, 张雨松, 等. 超声辅助酶法制备沙棘果渣膳食纤维及其功能特性研究[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(9): 149–159. [LÜ Mengling, TANG Zhenyue, ZHANG Yusong, et al. Preparation and functional properties of dietary fiber from Seabuckthorn fruit residue by ultrasonic-assisted enzymatic method[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(9): 149–159.]

[16] 黄鹏, 刘畅, 王昌涛, 等. 沙棘水不溶性膳食纤维酶法改性的工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(5): 253–256,260.

[HUANG Peng, LIU Chang, WANG Changtao, et al. Process study of enzymatic modification of water-insoluble dietary fiber from Seabuckthorn[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(5): 253–256,260.]

[17] 石声鑫. 食品中丙烯酰胺的测定及其含量控制方法[J]. *现代食品*, 2016(24): 121–125. [SHI Shengxin. Determination of acrylamide in foodstuffs and methods for its level control[J]. *Modern Food*, 2016(24): 121–125.]

[18] LIN D R, JI R, WANG D, et al. The research progress in mechanism and influence of biosorption between lactic acid bacteria and Pb(II): A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(3): 395–410.

[19] HAMADEEN H M, ELKHATIB E A, BADAWY M E I, et al. Green low cost nanomaterial produced from *Moringa oleifera* seed waste for enhanced removal of chlorpyrifos from wastewater: Mechanism and sorption studies[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105376.

[20] 邱静. 高吸附性米糠纤维的制备及其吸附特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 42–50. [QI Jing. Study on preparation and adsorption properties of highly adsorbable rice bran fiber[J]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 42–50.]

[21] OVES M, KHAN M S, ZAIDI A. Biosorption of heavy metals by *bacillus thuringiensis* strain OSM29 originating from industrial effluent contaminated north Indian soil[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2013, 20(2): 121–129.

[22] WANG L, WU J, LUO X H, et al. Dynamic high-pressure microfluidization treatment of rice bran: effect on Pb(II) ions adsorption *in vitro*[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(7): 1980–1989.

[23] JAWAD A H, BARDHAN M, ISLAM M A, et al. Insights into the modeling, characterization and adsorption performance of mesoporous activated carbon from corn cob residue via microwave-assisted H_3PO_4 activation[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2020, 21: 100688.

[24] HASHEM A, ANIAGOR C O, NASR M F, et al. Efficacy of treated sodium alginate and activated carbon fibre for Pb (II) adsorption[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 176: 201–216.

[25] XUE Z H, GAO X D, JIA Y N, et al. Structure characterization of high molecular weight soluble dietary fiber from mushroom *lentinula edodes* (Berk.) pegler and its interaction mechanism with pancreatic lipase and bile salts[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 153: 1281–1290.

[26] 赵思佳, 李蕊, 刘彤, 等. 5 株乳酸菌吸附丙烯酰胺稳定性的比较[J]. *食品科学*, 2019, 40(24): 151–156. [ZHAO Sijia, LI Rui, LIU Tong, et al. Comparison of the stability of acrylamide adsorption by five strains of lactic acid bacteria[J]. *Food Science*, 2019, 40(24): 151–156.]

[27] 王金玉, 王赛男, 卢佳宏, 等. 盐酸改性豆渣不溶性膳食纤维对亚硝酸盐的吸附特性及机理[J]. *大豆科学*, 2022, 41(4): 463–471. [WANG Jinyu, WANG Sainan, LU Jiahong, et al. Adsorption properties and mechanism of insoluble dietary fiber modified by hydrochloric acid on soybean residue[J]. *Soybean Science*, 2022, 41(4): 463–471.]

[28] STORY J A, DAVID K. Comparison of the binding of various bile acids and bile salts *in vitro* by several types of fiber[J]. *Journal of Nutrition*, 1976, 106(9): 1292.

[29] REN G M, JIN Y, ZHANG C M, et al. Characteristics of *Bacillus* sp. PZ-1 and its biosorption to Pb(II)[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2015, 117: 141–148.

[30] MOROSANU I, TEODOSIU C, PADURARU C, et al. Biosorption of lead ions from aqueous effluents by rapeseed biomass[J]. *New Biotechnology*, 2017, 39: 110–124.

[31] TEJADA-ORTIGOZA V, GARCIA-AMEZQUITA L E, SERMENT-MORENO V, et al. Moisture sorption isotherms of high pressure treated fruit peels used as dietary fiber sources[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 43: 45–53.

[32] LÜ M L, BAI H Y, REN H W, et al. Mechanisms of acrylamide biosorption by *Lactobacillus plantarum* ATCC8014 peptidoglycan[J]. *LWT*, 2024, 199: 116086.