陈颖, 苏靖程, 鲁燕玲, 等. 硫酸酯化无籽刺梨渣可溶性膳食纤维的亚硝酸盐吸附和体外降脂作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 96−106. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030404

CHEN Ying, SU Jingcheng, LU Yanling, et al. Adsorption of Nitrite and *in Vitro* Lipid-lowering Studies of Sulfated Soluble Dietary Fiber from *Rose sterilis* Pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 96−106. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030404

· 研究与探讨 ·

硫酸酯化无籽刺梨渣可溶性膳食纤维的亚硝酸盐吸附和体外降脂作用

陈　颖[1], 苏靖程[1], 鲁燕玲[1], 郭　磊[1], 范方宇[1,2,3,*], 马　倩[1,*]

（1.西南林业大学生物与食品工程学院, 云南昆明 650224;
2.西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 云南昆明 650224;
3.云南省森林灾害预警与控制实验室, 云南昆明 650224）

摘　要: 采用氨基磺酸-N,N-二甲基甲酰胺法对无籽刺梨渣可溶性膳食纤维（*Rosa sterilis* pomace soluble dietary fiber，RSDF）进行结构修饰，得到硫酸酯化无籽刺梨渣可溶性膳食纤维（Sulfated *Rosa sterilis* pomace soluble dietary fiber，SSDF）。基于吸附动力学和等温吸附模型探究 SSDF 在不同添加量、吸附时间、初始溶液浓度对亚硝酸盐、胆固醇和三种胆酸盐（牛磺胆酸钠、甘氨胆酸钠、胆酸钠）的吸附特性及机理。结果表明，硫酸酯化改性显著提升了 SSDF 对亚硝酸盐的吸附能力，在添加量为 100 mg 时，其吸附量（34.84 mg/g）和吸附率（68.94%）均高于 RSDF（29.01 mg/g，34.24%）。胆固醇吸附方面，SSDF 与 RSDF 差异较小，但 SSDF 在短时间（≤30 min）吸附效果更优。SSDF 和 RSDF 对亚硝酸盐与胆固醇的吸附过程适合用准二级动力学和 Freundlich 模型拟合。此外，SSDF 展现出较好的胆酸盐吸附特性，尤其是对胆酸钠的吸附，最大吸附率达到 90.31%，且吸附符合 Freundlich 模型拟合（R^2>0.9534）。本研究结果为提高无籽刺梨果渣中的可溶性膳食纤维的吸附率及利用率提供理论基础，为硫酸酯化改性膳食纤维在人体健康调节领域的应用提供了科学依据。

关键词: 无籽刺梨, 可溶性膳食纤维, 硫酸酯化改性, 吸附动力学, 等温吸附模型

中图分类号: TS209　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0096−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030404

本文网刊:

Adsorption of Nitrite and *in Vitro* Lipid-lowering Studies of Sulfated Soluble Dietary Fiber from *Rose sterilis* Pomace

CHEN Ying[1], SU Jingcheng[1], LU Yanling[1], GUO Lei[1], FAN Fangyu[1,2,3,*], MA Qian[1,*]

（1.College of Biological and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2.Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Biodiversity Conservation in Southwest China, Kunming 650224, China;
3.Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control of Yunnan Province, Kunming 650224, China）

Abstract: The structural modification of *Rosa sterilis* pomace soluble dietary fiber (RSDF) was performed through the sulfamic acid-N,N-dimethylformamide method to obtain sulfated *Rosa sterilis* pomace soluble dietary fiber (SSDF). The adsorption characteristics and mechanism of SSDF on nitrite, cholesterol, and three bile salts (sodium taurocholate, sodium glycochenodeoxycholate, and sodium cholate) were systematically investigated by analyzing adsorption kinetics and isothermal adsorption model under varying additions, including additive amount, adsorption times, and initial solution concentrations. The results showed that the sulfuric acid esterification modification significantly improved the adsorption

收稿日期: 2025−04−01

基金项目: 云南省“兴滇英才计划”青年人才专项（YNWR-QNBJ-2018-046）; 云南省科技厅中青年学术和技术带头人后备人才项目（202405AC350032）。

作者简介: 陈颖（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: chenying020728@163.com。

*** 通信作者:** 范方宇（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农林产品加工, E-mail: ffy118@163.com。

马倩（1995−）, 女, 博士, 研究方向: 乳制品加工、食品营养与健康, E-mail: maqian0224@163.com。

capacity of SSDF for nitrite. At an addition amount of 100 mg, SSDF exhibited a higher adsorption amount (34.84 mg/g) and adsorption rate (68.94%) compared to RSDF (29.01 mg/g, 34.24%). For cholesterol adsorption, the difference between SSDF and RSDF was minimal. However, SSDF demonstrated superior performance within a short time (≤30 min). The adsorption of nitrite onto cholesterol by SSDF and RSDF was suitable to be fitted by quasi-secondary kinetics and Freundlich model. Furthermore, SSDF exhibited a better adsorption characteristic for cholate, especially for sodium cholate, achieving a maximum adsorption rate of 90.31%. The adsorption process was in accordance with the Freundlich model fitting (R^2>0.9534). This study has the potential to provide theoretical insights into enhancing the adsorption capacity and utilization efficiency of soluble dietary fiber in *Rosa sterilis* pomace. Furthermore, these results can establish a scientific foundation for the application of sulfated modified dietary fiber in human health regulation.

Key words: *Rose sterilis* pomace; soluble dietary fiber; sulfuric acid esterification modification; adsorption kinetics model; isothermal adsorption models

随着现代食品工业的快速发展和消费者饮食结构的改变，大量食用富含食品添加剂的肉制品、腌制食品及罐头类食品，以及高脂、高胆固醇动物内脏和油炸食品等可能导致亚硝酸盐、胆固醇及胆酸盐的过量摄入，从而增加患癌风险，并诱发心血管疾病与消化道疾病[1]。从植物中提取天然活性成分（如多酚、膳食纤维等）开发低副作用天然药物替代品已成为关注焦点[2−3]。无籽刺梨（*Rosa sterilis*）属于蔷薇属蔷薇科落叶灌木植物，因果实无籽得名无籽刺梨[4]。无籽刺梨属于药食同源植物，含有大量的生物活性成分[5−6]，如有机酸、酚类和三萜类化合物等[7−8]，具有抗衰老、抗氧化和增强机体免疫力等作用[9]。无籽刺梨在加工时会产生 40%~50% 果渣，因其质地粗糙及易腐难用，果渣多被填埋或废弃处理，造成了严重的资源浪费。无籽刺梨果渣中含有丰富的可溶性膳食纤维（Soluble dietary fiber, SDF），是开发功能性食品的理想原料[10]。SDF 能通过调节肠道菌群和改善代谢综合征[11]，对控制体重和减轻炎症反应发挥积极作用。此外，周笑犁等[12] 发现刺梨果渣可溶性膳食纤维具有独特的吸附功能，可通过物理吸附、静电相互作用及化学键合等机制，捕获消化道中的亚硝酸盐、胆固醇及胆酸盐，从而减少其吸收或促进排泄。然而，无籽刺梨渣可溶性膳食纤维（*Rosa sterilis* pomace soluble dietary fiber, RSDF）结构致密、表面活性基团较少，对有害物质的吸附能力有限[13]。为此，通过化学改性的手段优化 RSDF 的功能特性是很有必要的。

硫酸酯化是改性 SDF 的化学方法之一，该方法通过引入磺酸基团，增强纤维的电荷特性及活性位点，从而增强其吸附性能和抗氧化、抗癌和抑菌等生物活性[14]。硫酸酯化常用方法有氯磺酸-吡啶法、三氧化硫-吡啶法和浓硫酸法，其中氯磺酸为剧毒试剂，刺激性强；吡啶的价格较高，不经济实用；浓硫酸为强酸，易导致样品降解。氨基磺酸-N,N-二甲基甲酰胺法酯化是以氨基磺酸为酯化剂，N,N-二甲基甲酰胺（N,N-dimethylformamide, DMF）为溶剂，与常用方法相比试剂更安全，反应更温和。先前研究发现，SDF 经硫酸酯化改性后生物活性和功能性质会发生改变，Chen 等[15] 采用氯磺酸-吡啶法改性南瓜多糖，得到 0.35 和 0.65 取代度硫酸盐化南瓜多糖，并发现不同取代度硫酸盐化南瓜多糖对 O_2^-·清除效果优于南瓜多糖，抗氧化能力提高。王吟等[16] 以细菌纤维素为原料，通过硫酸酯化改性制备吸附材料，经改性后细菌纤维素对重金属离子 Pb^{2+}的吸附性能有所增加。近年来，国内外关于 RSDF 的研究主要聚集在最佳提取方法和生物活性研究等方面，也有研究报道了 RSDF 的改性方法[17−18]，如酶法、羧甲基化法。关于硫酸酯化改性对 RSDF 吸附特性的系统性研究较少，尤其是改性后 RSDF 对亚硝酸盐、胆固醇及胆酸盐的吸附过程的控制步骤及机制尚未深入探讨。此外，目前大部分研究主要集中从 SDF 对胰脂酶、胆固醇和胆酸盐的吸附的角度探究 SDF 的体外降脂活性[19−20]，而经硫酸酯化改性 SDF 的吸附及降脂机制的研究较少，这将限制其在功能性食品中的应用。

因此，本研究以无籽刺梨渣为原料，通过硫酸酯化改性 RSDF，制备硫酸酯化无籽刺梨渣可溶性膳食纤维（Sulfated rosa sterilis pomace soluble dietary fiber, SSDF），探究不同添加量、吸附时间、初始溶液浓度的 SSDF 对亚硝酸盐、胆固醇和三种胆酸盐（牛磺胆酸钠、甘氨胆酸钠、胆酸钠）的吸附特性，同时，结合动力学与等温吸附模型探究吸附机制，以期提高无籽刺梨的经济价值和缓解无籽刺梨果渣废弃物造成的资源浪费，为天然植物的功能性膳食纤维开发提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

无籽刺梨　产自昆明阿子营；氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾　分析纯，广东光华科技股份有限公司；胆固醇、牛磺胆酸钠、甘氨胆酸钠、胆酸钠　分析纯，上海源叶生物科技有限公司；氢氧化钠、冰醋酸、盐酸、硫酸、硫酸铁铵、磷酸、亚硝酸钠　分析纯，云南杨林工业开发区汕滇药业有限公司；胃蛋白酶（猪胃粘膜）（3000 U/g）、胰蛋白酶（牛胰）（2500 U/mg）　分析纯，南京都莱生物技术有限公司。

DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱　上海齐欣科学仪器有限公司；UV-2600 紫外可见分光光度计

日本岛津仪器有限公司; Sigma-3K15 离心机 德国西格玛有限公司; DZKW-4 电热恒温水浴锅 北京中兴伟业仪器有限公司; DK-98-2 恒温水浴锅 天津市泰斯特仪器有限公司; PHS-3CB pH 计 上海越平仪器股份有限公司; HH-S4 磁力搅拌水浴锅 常州朗越仪器制造有限公司; SHZ-82 恒温振荡器 常州智博瑞仪器制造有限公司; XH-C 旋涡混合器 常州越新仪器制造有限公司; N-1100 旋转蒸发仪 上海泉杰仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 无籽刺梨渣可溶性膳食纤维(RSDF)的提取及改性 RSDF 的提取过程参照本团队前期的方法[21]。采用氨基磺酸为酯化剂, DMF 为溶剂改性 RSDF, 获得改性后的样品, 即 SSDF。改性过程如下: 称取 1 g RSDF, 加入 80 mL DMF(料液比 1∶80 g/mL)水浴加热, 加入 4 g 氨基磺酸反应 195 min。反应结束后放入冰水浴冷却, 3 mol/L NaOH 调节反应液 pH 至 7.0, 加入 4 倍体积 95% 乙醇醇沉 12 h, 离心(5500 r/min, 5 min), 收集沉淀。去离子水复溶, 透析。收集透析袋内液体, 旋转蒸发仪浓缩, 利用 4 倍体积 95% 乙醇醇沉 12 h, 离心(5500 r/min, 5 min)、收集沉淀, 50 ℃ 烘干, 4 ℃ 密封保存备用, 在此条件下得到 SSDF 取代度为 1.84±0.19[21]。

1.2.2 RSDF 和 SSDF 的亚硝酸盐吸附性能测定

1.2.2.1 亚硝酸盐标准曲线绘制及含量测定 参照苏靖程等[18] 方法测定 NO_2^-含量, 略有修改。称取一定量样品于 150 mL 锥形瓶, 加入 1 mol/L 盐酸调 pH 至 2.0, 加入 40 mL 不同浓度的亚硝酸钠溶液, 混匀, 37 ℃ 120 r/min 振荡吸附一定时间。5000 r/min 离心 5 min 后取 0.1 mL 上清液, 加入 1 mL 0.4% 对氨基苯磺酸溶液, 混匀, 静置 5 min 后加入 0.5 mL 0.2% 盐酸萘乙二胺溶液, 加蒸馏水至 150 mL, 混匀, 室温静置 15 min。于波长 538 nm 处测定吸光值, 由标准曲线 y=0.0524x+0.0007, R^2=0.9955 计算 NO_2^-含量, NO_2^-吸附量和吸附率如公式(1)和公式(2)所示。

$$q(mg/g) = \frac{q_0 - q_1}{m} \quad 式(1)$$

$$Q(\%) = \frac{q_0 - q_1}{q_0} \quad 式(2)$$

式中: q 为目标物的吸附量, mg/g; Q 为目标物的吸附率, %; q_0、q_1 分别为吸附前后溶液 NO_2^-含量, mg; m 为样品质量, g。

1.2.2.2 不同因素对样品吸附亚硝酸盐能力的影响 分别探究样品添加量(0.25%、0.3%、0.35%、0.4%、0.45%、0.5%, w/v), 吸附时间(20、40、60、80、100、120 min)和亚硝酸钠溶液的浓度(20、40、60、80、100 μg/mL)对样品吸附亚硝酸盐能力的影响。样品对 NO_2^-吸附量和吸附率依照 1.2.2.1 的方法测定, 同时以不加样品作为空白对照组。

1.2.3 RSDF 和 SSDF 的胆固醇吸附性能测定

1.2.3.1 胆固醇标准曲线制作及含量测定 依据食品安全国家标准 GB 5009.128-2016《食品中胆固醇的测定》绘制胆固醇标准曲线, 并测定样品对胆固醇吸附量和吸附率。取一定量样品于 10 mL 具塞试管, 加入 5 mL 不同浓度的胆固醇溶液, 混匀, 37 ℃ 120 r/min 振荡吸附一定时间。5000 r/min 离心 5 min, 取 0.1 mL 上清液, 加冰醋酸至 4 mL, 沿管壁加入 2 mL 铁矾显色液, 混匀, 室温静置 15 min。于波长 560 nm 处测定吸光值。由标准曲线方程 y=3.7456x+0.0033, R^2=0.9923 测定样品对胆固醇的吸附能力, 胆固醇吸附量和吸附率如公式(1)和公式(2)所示。

1.2.3.2 不同因素对样品吸附胆固醇能力的影响 分别探究样品添加量(0.2%、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2%, w/v), 吸附时间(10、20、30、60、90、120 min)和胆固醇溶液的浓度(0.2、0.4、0.6、0.8、1 mg/mL)对样品吸附胆固醇能力的影响。样品对胆固醇的吸附量和吸附率依照 1.2.3.1 测定, 同时以不加样品作为空白对照组。

1.2.4 模拟体外胃肠道消化模型的建立及 SSDF 的胆酸盐吸附性能测定 在之前实验中发现 SSDF 的综合吸附效果更好, 因此选取 SSDF 进一步探究体外模拟消化环境下对三种胆酸盐(牛磺胆酸钠、甘氨胆酸钠、胆酸钠)的吸附过程。

1.2.4.1 模拟体外胃肠道消化模型建立 参考于美汇等[22] 方法建立体外胃肠道消化模型, 稍作修改。模拟胃液: 取 16.4 mL 1 mol/L 盐酸, 加入 10 g 胃蛋白酶, 以磷酸盐(Phosphate buffer saline, PBS)缓冲液溶解并定容至 1 L。模拟肠液: 称取胰蛋白酶 10 g, 加入 PBS 缓冲液溶解并定容至 1 L。称取适量样品, 加入 4 mL 模拟胃液, 37 ℃、120 r/min 恒温摇床中振荡 1 h, 模拟胃环境消化。用 0.1 mol/L 氢氧化钠调 pH 至 6.3, 加入 4 mL 模拟肠液, 37 ℃、120 r/min 恒温摇床中振荡 1 h, 模拟肠环境消化。

1.2.4.2 胆酸盐标准曲线及含量测定 参考 Huang 等[23] 的方法测定胆酸盐含量, 稍作修改。取一定量样品于 10 mL 具塞试管, 进行体外模拟消化。取消化后样品加入 4 mL 不同浓度的胆酸盐(牛磺胆酸钠、甘氨胆酸钠、胆酸钠)溶液, 混匀, 37 ℃ 120 r/min 振荡吸附一定时间。5000 r/min 离心 5 min 后取 0.1 mL 上清液, 加入 4 mL 60% 硫酸溶液, 摇匀, 70 ℃ 水浴 20 min, 流水冷却至室温。于波长 387 nm 处测定吸光值。标准曲线方程及相关系数如下, 牛磺胆酸钠: y=4.1171x+0.0081, R^2=0.9957; 甘氨胆酸钠: y=3.92x+0.0124, R^2=0.9901; 胆酸钠: y=0.6182x−0.0049, R^2=0.9959。由标准曲线测定样品对不同胆酸盐的吸附能力, 胆酸盐吸附量和吸附率如公式(1)和公式(2)所示。

1.2.4.3　不同因素对样品吸附胆酸盐能力的影响　分别探究样品添加量(0.25%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%, w/v)，吸附时间(10、20、30、60、120 min)和胆酸盐溶液(牛磺胆酸钠、甘氨胆酸钠、胆酸钠溶液)的浓度(0.05、0.1、0.15、0.25、0.3 mmol/L)对样品吸附胆酸盐能力的影响。样品对胆酸盐的吸附量和吸附率依照 1.2.4.2 测定，同时以不加样品作为空白对照组。

1.2.5　吸附模型的建立

1.2.5.1　吸附动力学模型　吸附动力学模型可反映吸附速度，吸附速度指单位重量吸附剂在单位时间内对吸附质吸收的物理量。吸附速度决定吸附剂对吸附质的吸附过程，该过程一般由三阶段构成[24]。准一级动力学模型通常适用于物理吸附或表面扩散主导的机制；准二级动力学模型则涉及吸附剂与吸附质间的化学作用。参考来思彤等[25]的方法稍作修改。以 100 μg/mL 的亚硝酸钠标准溶液和 1 mg/mL 胆固醇溶液作为吸附体系，将一定质量的 SSDF 和 RSDF 与吸附体系混合后分别在 37 ℃、120 r/min 恒温摇床中振荡 t 时刻，5000 r/min 离心 5 min 后取上清液测定 SSDF 和 RSDF 对亚硝酸盐和胆固醇吸附量。准一级动力学和准二级动力学方程假定 t 时刻 SSDF 和 RSDF 对亚硝酸盐和胆固醇吸附量 q_t 与平衡吸附量 q_e 差值(q_e-q_t)为吸附驱动力。准一级动力学方程和准二级动力学方程公式如(3)和公式(4)所示。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \qquad 式（3）$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \qquad 式（4）$$

式中：q_e 为平衡吸附量，mg/g；q_t 为 t 时刻吸附量，mg/g；t 为吸附时间，min；k_1 为准一级动力学模型吸附速率常数，min^{-1}；k_2 为准二级动力学模型吸附速率常数，g/(mg·min)。

1.2.5.2　等温吸附模型研究　等温吸附模型用于描述恒定温度时液体浓度与吸附量之间关系，Langmuir 等温吸附模型是描述吸附剂表面单分子层吸附的理想模型，Freundlich 等温吸附模型则表示吸附过程存在多分子层吸附。参考崔蔚然等[26]的方法稍作修改。分别取不同浓度的亚硝酸钠溶液、胆固醇溶液、胆酸盐溶液，加入一定质量的 SSDF，混匀，在 37 ℃下反应 120 min，5000 r/min 离心 5 min 后取上清液测定 SSDF 对亚硝酸盐、胆固醇和胆酸盐吸附量。Langmuir 方程和 Freundlich 方程线性形式如公式(5)和公式(6)所示。

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{c_e}{q_m} + \frac{1}{k_L q_m} \qquad 式（5）$$

$$\ln q_e = \frac{1}{n}\ln c_e + \ln k_f \qquad 式（6）$$

式中：q_e 为平衡吸附量，mg/g；q_m 为最大吸附量，mg/g；c_e 为吸附平衡时溶液中溶质浓度，μg/mL、mg/mL 或 mmol/L；k_L 为吸附平衡常数；k_f 为样品吸附能力的量度；n 为吸附强度量度。

1.3　数据处理

所有实验均进行三次平行，采用 IBM SPSS Statistics 26 软件对数据进行统计学意义分析(显著水平为 $P<0.05$)；使用 Origin 2021 软件对实验数据进行绘图。

2　结果与分析

2.1　SSDF 和 RSDF 的亚硝酸盐吸附特性分析

2.1.1　不同因素对 SSDF 和 RSDF 的亚硝酸盐吸附特性的影响　亚硝酸盐防腐性能优异，在食品保鲜中应用广泛。但亚硝酸盐中亚硝酸根离子处于酸性环境中生成强致癌物亚硝胺，而 SDF 吸附亚硝酸盐离子后，能够防止亚硝酸盐过量对人体造成毒害[27]。图 1(A)为样品添加量对亚硝酸盐吸附影响。随着添加量增大，SSDF 和 RSDF 对亚硝酸盐吸附量逐渐减小，吸附率逐渐增大。当样品添加量为 0.25%(w/v)时，SSDF 对亚硝酸盐的吸附量和吸附率分别为 34.84 mg/g、68.94%，较未改性的 RSDF 对亚硝酸盐的吸附量(29.01 mg/g)和吸附率(34.24%)提高了 5.83 mg/g、34.70%。此外，在低添加量的情况下，SSDF 和 RSDF 对亚硝酸盐的吸附率较低，而吸附量较高，可能是因为在溶液浓度固定时，低添加量样品的吸附位点未被完全占据，样品能够吸附的亚硝酸盐量有限，导致吸附量较高、吸附率较低，当增加样品添加量时，吸附位点随之增加，总吸附量增加，吸附率显著提高。然而，吸附量会因位点逐渐饱和而降低，刘静娜等[28]在探究盐酸改性的西瓜皮不溶性膳食纤维对亚硝酸盐的吸附作用时也得出了相似变化趋势，发现吸附量随着盐酸改性的西瓜皮不溶性膳食纤维的添加量的增加而减少，对 NO_2^- 去除率增加。而当样品添加量为 0.5%(w/v)时，SSDF 和 RSDF 吸附效果相差不显著。这可能是因为硫酸酯化改性提升了 RSDF 对亚硝酸盐的吸附能力，但这种提升存在上限，当添加量超过一定阈值时，SSDF 的吸附优势被稀释。实验表明低添加量的 SSDF 亚硝酸盐吸附性能优于 RSDF。

图 1(B)为吸附时间对样品吸附亚硝酸盐性能的影响。随吸附时间增加，SSDF 和 RSDF 吸附量和吸附率呈先快速上升后相对平稳的趋势。SSDF 各吸附时间点的吸附量与吸附率均高于 RSDF，SSDF 最大吸附量和吸附率为 34.79 mg/g 和 68.64%；RSDF 最大吸附量和吸附率 28.86 mg/g 和 33.33%。SSDF 和 RSDF 富含酚酸等活性基团，这类基团在吸附亚硝酸盐中起主要作用[29]。在酸性条件下，NO_2^- 与 H^+ 结合生成 HNO_2，进而形成 N_2O_3 等强电子亲和性氮氧化合物。这些化合物可与酚酸等基团中的负电荷氧原子结合引发吸附。因此，推测 SSDF 中的磺酸

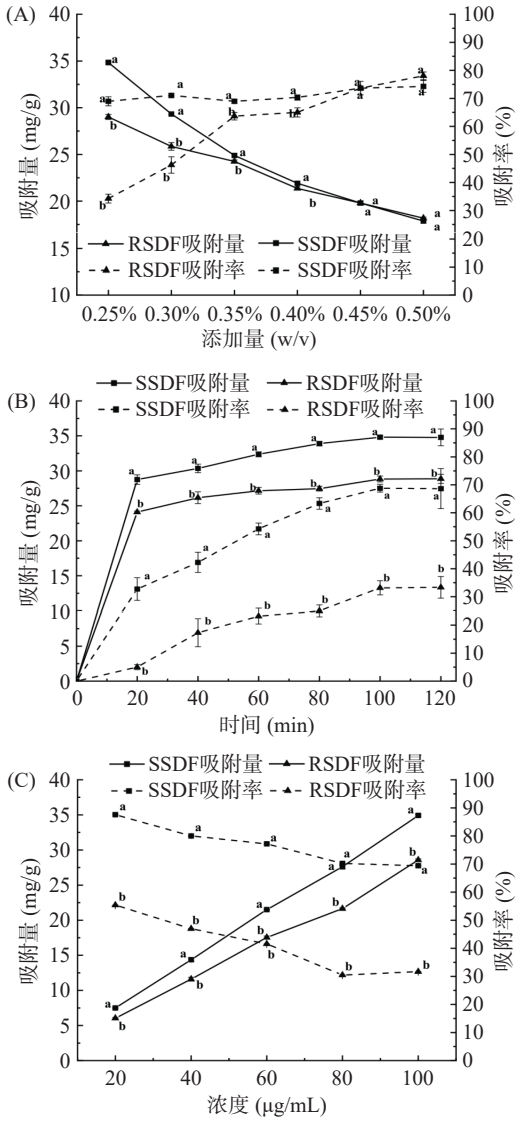


图 1 不同因素对 SSDF 和 RSDF 的亚硝酸盐吸附特性的影响

Fig.1 Effects of different factors on the nitrite adsorption characteristics of SSDF and RSDF

注: 不同小写字母分别表示组内 SSDF 和 RSDF 的吸附量或吸附率具有显著性差异(P<0.05); RSDF: 无籽刺梨果渣可溶性膳食纤维; SSDF: 硫酸酯化改性的 RSDF; 图 2~图 8 同。

基团可能具有类似功能, 从而增强其对亚硝酸盐的吸附性能[30]。图 1(C)为亚硝酸盐浓度对样品吸附亚硝酸盐性能的影响。在亚硝酸盐浓度 20~100 μg/mL 下, SSDF 的吸附量和吸附率均高于未改性的 RSDF。SSDF 和 RSDF 对亚硝酸盐吸附量随浓度增加呈正比例增长, 但吸附率随浓度增大而先下降后平衡。当固定样品添加量和吸附时间, 亚硝酸盐浓度低时, 亚硝酸盐含量少, SSDF 和 RSDF 有空余吸附位点吸附亚硝酸盐, 但溶液中没有足够的亚硝酸盐分子被吸附, 所以 SSDF 和 RSDF 吸附量小, 吸附率高。亚硝酸盐浓度高时, SSDF 和 RSDF 吸附位点大部分被占据, 吸附不完全导致吸附量升高, 吸附率降低。

2.1.2 亚硝酸盐吸附动力学分析 采用准一级和准二级动力学模型探究 SSDF 和 RSDF 的亚硝酸盐吸附机理, 由图 2 和表 1 可知, SSDF 和 RSDF 的准一级动力学模型 R^2 为 0.8205、0.7844, 准二级动力学模型 R^2 为 0.9957、0.9970。准二级动力学模型拟合值高于准一级动力学模型, 与拟合曲线离散程度一致, 拟合性较好。准一级动力学模型计算出 SSDF 和 RSDF 对亚硝酸盐平衡吸附量(q_e)为 47.77、32.37 mg/g; 准二级动力学模型计算出 SSDF 和 RSDF 的 q_e 为 35.21、28.82 mg/g, 准二级动力学模型平衡吸附量与实际吸附量更接近。准一级动力学模型通常用于描述以扩散为主导的物理吸附过程, 准二级动力学用于描述物理和化学吸附共同存在, 且化学吸附为主要的吸附过程[31]。SSDF 和 RSDF 对酸性环境下亚硝酸盐的吸附符合准二级动力学模型, 吸附速率控制步骤可能主要为化学吸附。

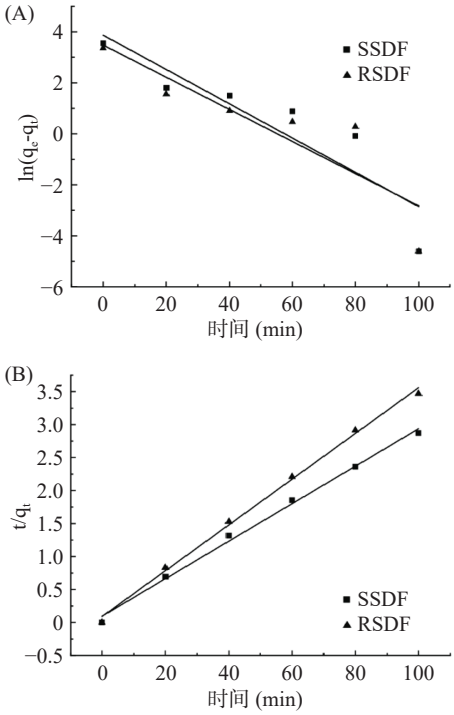


图 2 亚硝酸盐吸附动力学模型拟合线性图

Fig.2 Fitting linear diagram of nitrite adsorption kinetics model

注: (A)准一级动力学; (B)准二级动力学。

表 1 亚硝酸盐吸附动力学模型相关参数

Table 1 Parameters of nitrite adsorption kinetics model

样品	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	k_1(min^{-1})	q_e(mg/g)	R^2	k_2 [g/(mg·min)]	q_e(mg/g)	R^2
SSDF	0.0672	47.77	0.8205	0.0084	35.21	0.9957
RSDF	0.0630	32.37	0.7844	0.0131	28.82	0.9970

注: RSDF: 无籽刺梨果渣可溶性膳食纤维; SSDF: 硫酸酯化改性的RSDF; 表2~表5同。

2.1.3　亚硝酸盐等温吸附模型分析　对 SSDF 和 RSDF 吸附亚硝酸盐的过程进行 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合。拟合过程中，Langmuir 方程中以 c_e/q_e 对 c_e 作线性拟合；Freundlich 方程中以 $\ln q_e$ 对 $\ln c_e$ 作线性拟合。Langmuir 和 Freundlich 模型拟合图见图 3，相关参数见表 2。

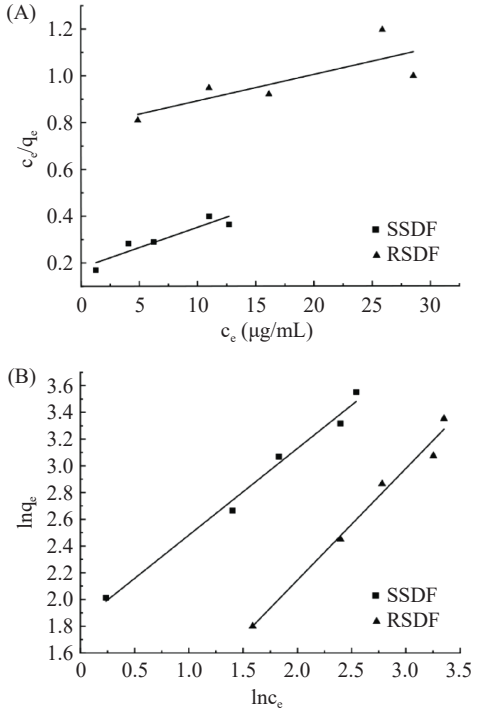


图 3　亚硝酸盐等温吸附模型拟合线性图

Fig.3　Fitting linear diagram of nitrite isothermal adsorption model

注：(A)Langmuir 模型；(B)Freundlich 模型。

Langmuir 模型 R^2 为 0.6241、0.8659，Freundlich 模型 R^2 为 0.9830、0.9870。Langmuir 模型中，理论最大吸附容量 q_m 与实际最大吸附量存在明显差异，而 Freundlich 模型与数据拟合度更高。因此，Freundlich 模型更适于描述 SSDF 和 RSDF 对亚硝酸盐的吸附，Freundlich 模型是一个经验公式，假设吸附过程是吸附能和吸附位点不均一的多分子层吸附[31]，亚硝酸盐在酸性条件下可能以 HNO_2 分子或 NO_2^- 离子形式存在，其与样品表面的硫酸基团、羟基等位点的相互作用更符合 Freundlich 模型的多层吸附假设[32]。n 值是描述吸附效果优劣的参数，反映吸附强度异质性，大小一般在 2~10 范围内。n<1 时，吸附作用较差；1<n<2 时，吸附作用良好；n>2 时，吸附作用优异[31]。结果表明，SSDF(1.154)和 RSDF(1.196)的 n 值均大于 1，表明两者对亚硝酸盐的吸附作用表现良好。由 Freundlich 模型相关系数 $\ln k_f$ 值可看出 SSDF 和 RSDF 亚硝酸盐吸附能力强弱，SSDF 的 $\ln k_f$ 值高于 RSDF(1.8338>0.4727)，表明其吸附容量更强。综上，在酸性环境下，SSDF 的亚硝酸盐吸附能力优于 RSDF。

2.2　RSDF 和 SSDF 的胆固醇吸附特性分析

2.2.1　不同因素对 RSDF 和 SSDF 的胆固醇吸附特性的影响　SDF 能够结合胆固醇，防止其被肠道吸收，从而降低血液中的胆固醇水平。有助于预防心血管疾病，改善整体健康水平。如图 4(A)所示，SSDF 和 RSDF 的胆固醇吸附量随样品添加量的增加而减小，吸附率则增大。当样品添加量较少时，溶液中样品可接触的胆固醇分子较多，不足以结合大量胆固醇分子，吸附位点未被完全占据，此时吸附量较高而吸附率低；添加量变大，样品总表面积增大，接触胆固醇面积增大，过程中吸附时间和胆固醇浓度不变，随添加量增多，SSDF 和 RSDF 吸附位点未能全部被胆固醇分子占满，吸附量减少。SDF 本身具备溶胀性，随添加量增加，溶胀性更明显，体积膨胀，接触面相对增加，吸附率上升[33−34]。当添加量为 0.2%(w/v)时，SSDF 和 RSDF 的吸附量分别为 263.68 mg/g、300.17 mg/g；当添加量为 2%(w/v)时，SSDF 和 RSDF 吸附量分别为 29.84 mg/g、32.02 mg/g，两者吸附能力差距随样品添加量增加逐渐减小。当添加量在 1.2%~2%(w/v)时，SSDF 和 RSDF 对胆固醇的吸附率增势缓慢，整体数值在 60% 左右，由此推测 SSDF 和 RSDF 在添加量 1.2%(w/v)时对胆固醇吸附达到平衡。

图 4(B)为吸附时间对样品吸附胆固醇性能的影响。10~30 min 时，SSDF 吸附效果优于 RSDF，SSDF 适合短时间吸附胆固醇。30~120 min，SSDF 和 RSDF 的吸附量和吸附率逐渐趋于稳定，并达到最大值，SSDF 的最大吸附量和吸附率分别为 28.01 mg/g 和 53.85%，而 RSDF 的最大吸附量和吸附率分别为 30.33 mg/g 和 58.61%。SSDF 在短时间(≤30 min)吸附效果更优，但 SSDF 和 RSDF 总体胆固醇吸附效果差距不明显。在初始吸附阶段，样品与胆固醇溶液接触，随时间延长胆固醇分子逐渐占据样品表面吸附位点，吸附量与吸附率呈现上升趋势；吸附后期阶段，胆固醇分子透过样品表面向样品内部扩散，吸附量和吸附率趋于平衡[35]。图 4(C)为胆固醇浓度对样品吸附胆固醇性能的影响。SSDF 和

表 2　亚硝酸盐等温吸附模型相关参数

Table 2　Parameters related to nitrite isothermal adsorption model

样品	Langmuir模型				Freundlich模型			
	等温方程	q_m(mg/g)	k_L	R_1^2	等温方程	n	$\ln k_f$	R_2^2
SSDF	$c_e/q_e=0.0173\times c_e+0.1787$	57.80	0.0968	0.8659	$\ln q_e=0.6482\times \ln c_e+1.8338$	1.154	1.8338	0.9870
RSDF	$c_e/q_e=0.0113\times c_e+0.7799$	88.50	0.0145	0.6241	$\ln q_e=0.8359\times \ln c_e+0.4727$	1.196	0.4727	0.9830

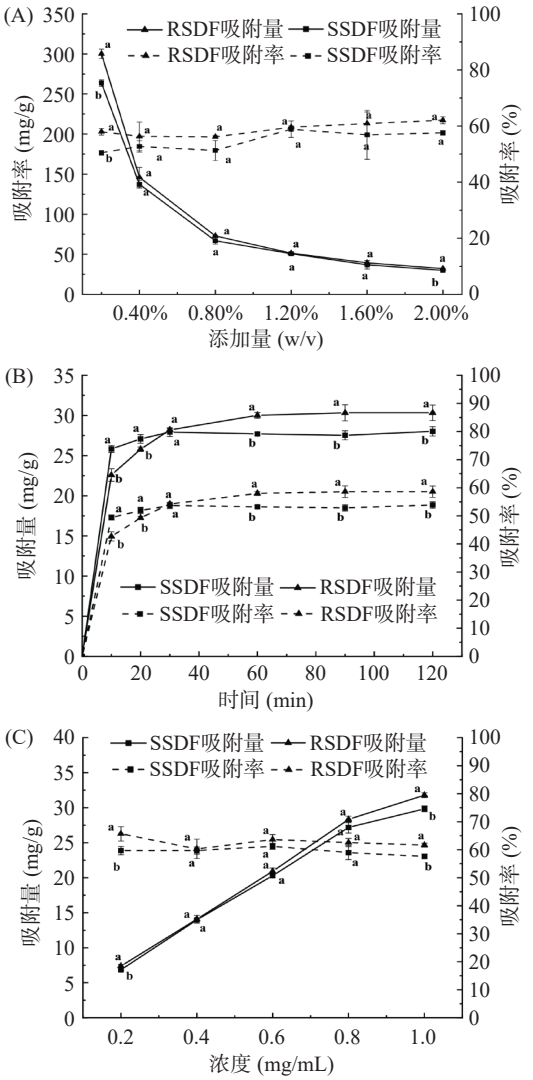


图 4 不同因素对 SSDF 和 RSDF 的胆固醇吸附特性的影响

Fig.4 Effect of different factors on the cholesterol adsorption characteristics of SSDF and RSDF

注: 不同小写字母分别表示组内 SSDF 和 RSDF 的吸附量或吸附率具有显著性差异(P<0.05)。

RSDF 胆固醇吸附量随浓度增加正比例增大, 吸附率则随浓度的增加而小幅度下降。这可能是因为, 胆固醇浓度低时, 溶液中胆固醇分子总量少, SSDF 和 RSDF 表面存在大量空余吸附位点对吸附有利[36], 并且 SSDF 和 RSDF 中存在羟基等活性基团能与胆固醇分子更好结合。王晓晶等[34] 在探究葡萄籽水不溶性膳食纤维对胆固醇的吸附特性时, 发现葡萄籽水不溶性膳食纤维的吸附量随胆固醇溶液浓度的升高而升高, 本研究的变化趋势与之相似。

2.2.2 胆固醇吸附动力学分析 图 5 为胆固醇的动力学模型拟合图, 表 3 为相关参数, SSDF 和 RSDF 准一级动力学模型相关系数 R^2 为 0.9456、0.9737, 准二级动力学模型 R^2 为 0.9989、0.9981, 准二级动力学模型 R^2 更接近 1, 拟合效果更好。准一级动力学模型得出 SSDF 和 RSDF 理论吸附量(qe)分别为 32.74 和 20.78 mg/g, 准二级动力学模型得出的 q_e 分别为 27.93 和 31.05 mg/g, 因此, 准二级动力学模型理论值与实验值更接近。SSDF 和 RSDF 对胆固醇的吸附更符合准二级动力学模型, 吸附速率控制步骤可能主要为化学吸附。

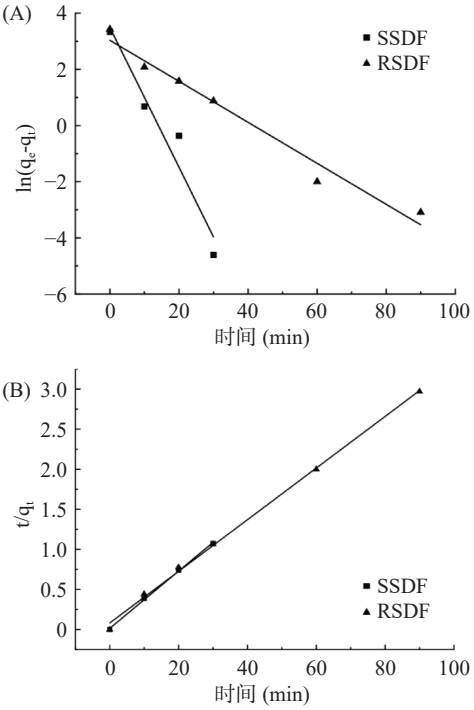


图 5 胆固醇吸附动力学模型拟合线性图

Fig.5 Fitting linear diagram of cholesterol adsorption kinetics model

注: (A)准一级动力学、(B)准二级动力学。

表 3 胆固醇吸附动力学模型相关参数

Table 3 Parameters of cholesterol adsorption kinetic model

样品	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	k_1	q_e(mg/g)	R^2	k_2	q_e(mg/g)	R^2
SSDF	0.2486	32.74	0.9456	0.0928	27.93	0.9989
RSDF	0.0730	20.78	0.9737	0.0128	31.05	0.9981

2.2.3 胆固醇等温吸附模型分析 图 6 为胆固醇等温吸附模型拟合图, 表 4 为相关参数, Langmuir 等温吸附模型 R^2 为 0.7540、0.8332, Freundlich 等温吸附模型 R^2 为 0.9574、0.9778, 后者拟合度更高, 拟合曲

表 4 胆固醇等温吸附模型相关参数

Table 4 Parameters of cholesterol isothermal adsorption model

样品	Langmuir模型				Feundlich模型			
	等温方程	q_m(mg/g)	k_L	R^2	等温方程	n	$\ln k_f$	R^2
SSDF	c_e/q_e=0.012×c_e+0.0074	77.51	1.7432	0.7540	$\ln q_e$=0.8227×$\ln c_e$+4.2998	1.2155	4.2998	0.9574
RSDF	c_e/q_e=0.012×c_e+0.0064	81.30	1.9218	0.8332	$\ln q_e$=0.7987×$\ln c_e$+4.3749	1.2520	4.3749	0.9778

线与点位偏差更小，SSDF 和 RSDF 对胆固醇的吸附更符合 Freundlich 模型，吸附机制为多分子层吸附，既有物理吸附、静电相互作用，也有羟基等活性基团与胆固醇分子的结合作用。SSDF 和 RSDF 的 $\ln k_f$ 值分别为 4.2998 和 4.3749，两者相差 0.0751，说明 SSDF 和 RSDF 的胆固醇吸附能力相差不大。

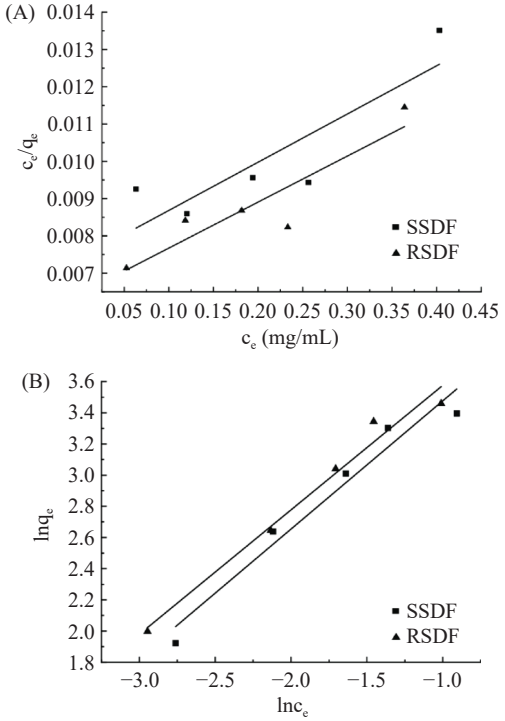


图 6　胆固醇等温吸附模型拟合线性图

Fig.6　Fitting diagram of cholesterol isotherm adsorption model

注：(A)Langmuir 模型、(B)Freundlich 模型。

2.3　SSDF 的胆酸盐吸附性能

2.3.1　不同因素对 SSDF 的胆酸盐吸附特性的影响

基于 SSDF 和 RSDF 对吸附亚硝酸盐和胆固醇的研究结果，选取综合吸附性能较好的 SSDF 进行后期胆酸盐吸附研究。人体内 90% 以上胆汁酸以牛磺胆酸、甘氨胆酸钠和胆酸钠等结合物形式存在，这些结合物进入肠道帮助脂肪消化后，大部分会被重吸收。SDF 若吸附胆酸盐，可减少其重吸收，迫使肝脏利用更多胆固醇合成新的胆酸盐，从而降低血液中的胆固醇水平[37]。图 7(A)~图 7(B)为样品添加量对胆酸盐吸附影响。随样品添加量增加，SSDF 对三种胆酸盐吸附量呈反比例下降，而吸附率呈正比例增长后趋于平衡。SSDF 添加量为 2.5%(w/v)时，对于三种胆酸盐的平衡吸附量按照大小排序为胆酸钠>牛磺胆酸钠>甘氨胆酸钠，分别为 8.07、3.16、2.16 mg/g，平衡吸附率分别为 74.38%、42.84%、35.57%。当 SSDF 质量增加，总表面积也会增大，有更多的吸附位点能与胆酸盐结合，进而提高了 SSDF 的胆酸盐吸附率。同时，因为 SSDF 添加量增大，SSDF 未能完全吸附胆酸盐，因此，吸附位置出现空余，导致单位质量 SSDF 吸附量出现下降。

图 7(C)~图 7(D)为吸附时间对样品吸附胆酸盐性能的影响。SSDF 对三种胆酸盐的吸附都在 30 min 内达到最大吸附量和吸附率，随后吸附量和吸附率随时间增加逐渐减小，最终平衡。在体外模拟消化中，部分 SSDF 溶于混合消化液中，溶液粘度增加，流变性能发生变化，此时 SSDF 对胆酸盐的吸附是未溶解的固体部分和溶解于消化液的部分的双重作用[30]。SSDF 与胆酸盐分子会在短时间内接触并

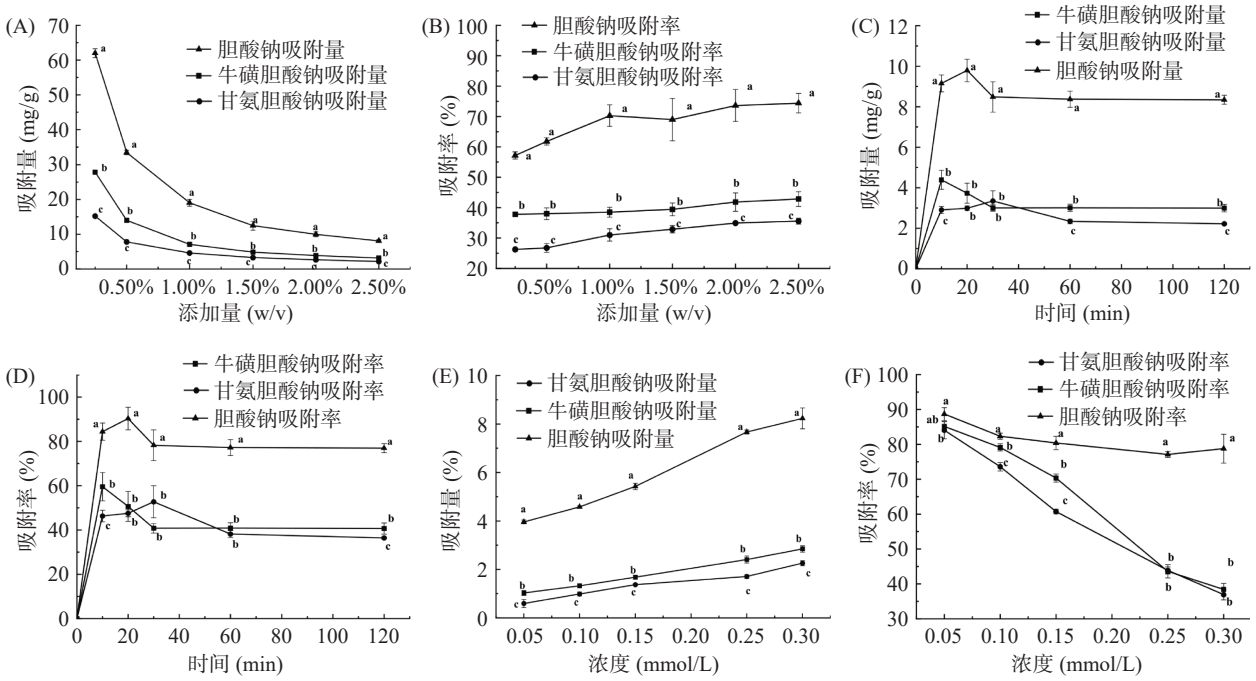


图 7　不同因素对 SSDF 的胆酸盐吸附特性的影响

Fig.7　Effects of different factors on the adsorption characteristics of bile salts from SSDF

注：不同小写字母(a~c)表示组内胆酸钠、牛磺胆酸钠和甘氨胆酸钠吸附具有差异显著(P<0.05)。

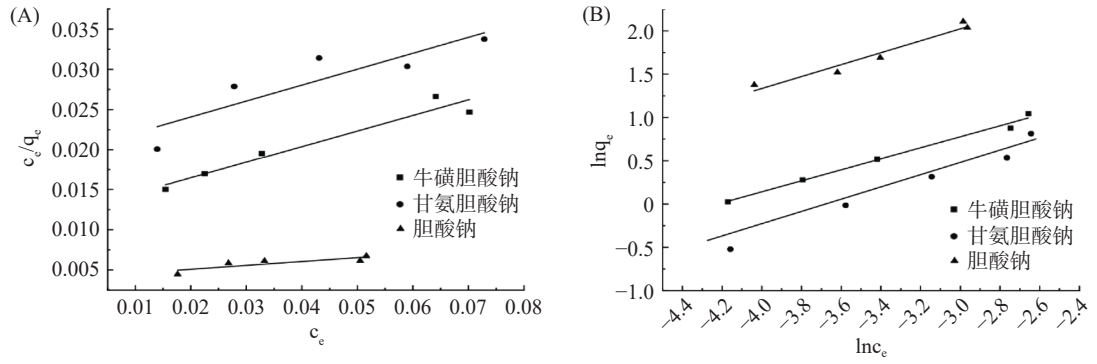


图 8 胆酸盐等温吸附模型拟合线性图

Fig.8 Fitting linear diagram of cholate isothermal adsorption model

注:(A)Langmuir 模型;(B)Freundlich 模型。

表 5 胆酸盐等温吸附模型相关参数

Table 5 Parameters of cholate isothermal adsorption model

胆酸盐	Langmuir模型				Freundlich模型			
	等温方程	q_m(mg/g)	k_L	R^2	等温方程	n	lnk_f	R^2
牛磺胆酸钠	$c_e/q_e=0.1945\times c_e+0.0126$	5.1414	15.4377	0.9434	$lnq_e=0.6351\times lnc_e+2.6825$	1.5746	2.6825	0.9912
甘氨胆酸钠	$c_e/q_e=0.1981\times c_e+0.0201$	5.0480	9.8557	0.7905	$lnq_e=0.7078\times lnc_e+2.6051$	1.4128	2.6051	0.9816
胆酸钠	$c_e/q_e=0.0483\times c_e+0.0041$	20.7039	11.7800	0.7158	$lnq_e=0.6886\times lnc_e+4.0893$	1.4522	4.089	0.9534

吸附,随着吸附时间增加,模拟体外消化环境中的部分胆酸盐分子在摇晃时扩散到溶液中,并不会完全吸附在 SSDF 上,吸附和扩散随着时间增长逐渐达到平衡,反应体系保留住的胆酸盐含量为定值。由于最终平衡吸附量小于非平衡吸附量,所以动力学模型不适用于此吸附过程。图 7(E)~图 7(F)为胆酸盐浓度对样品吸附胆酸盐性能的影响。SSDF 对三种胆酸盐吸附量随胆酸盐浓度增大呈正比例增长,吸附率则随胆酸盐浓度增加呈反比例下降,最后趋于平衡。胆酸盐浓度在 0.05 mmol/L 时,胆酸钠、牛磺胆酸钠、甘氨胆酸钠吸附量最小,分别为 3.96、1.03、0.59 mg/g,但吸附率最大,分别为 88.68%、85.14%、84.05%。低浓度下,SSDF 主要吸附溶液中扩散至样品表面的胆酸盐分子,此时胆酸盐分子总量少,SSDF 表面吸附位点有空余,活性基团未被完全结合,致使吸附量随胆酸盐浓度升高而增加。胆酸盐浓度从 0.25~0.3 mmol/L 时,胆酸盐的吸附容量逐渐饱和,吸附位点占用量达到上限,所以吸附率慢慢减小,最后逐渐平衡。

2.3.2 胆酸盐等温吸附模型分析 图 8 为胆酸盐吸附等温吸附模型拟合图,表 5 为相关参数,Langmuir 等温吸附模型的拟合值 R^2 为 0.7158、0.9434,Freundlich 等温吸附模型的拟合值 R^2 为 0.9534、0.9912,Freundlich 等温吸附模型拟合曲线与数据偏差小,线性相关程度更高。因此,SSDF 对三种胆酸盐的吸附适合用 Freundlich 等温吸附模型描述,SSDF 对胆酸盐的吸附存在物理吸附和静电相互作用,也有活性基团与胆酸盐分子的结合作用,属于多分子层吸附。Freundlich 模型中 lnk_f 可描述吸附能力的大小,lnk_f 大小依次为胆酸钠>牛磺胆酸钠>甘氨胆酸钠,与上述实验结论一致。

3 结论

硫酸酯化改性影响 RSDF 对亚硝酸盐、胆固醇及胆酸盐的吸附性能。在亚硝酸盐吸附中,SSDF 的吸附量与吸附率均优于 RSDF,其过程符合准二级动力学模型和 Freundlich 等温模型,表明化学吸附和多分子层吸附占主导作用,这与改性引入的磺酸基团通过静电相互作用增强了吸附能力有关。在胆固醇吸附中,SSDF 在短时间内吸附效果更优,但整体与 RSDF 差异较小。在胆酸盐吸附中,SSDF 对胆酸钠的吸附能力最强,且吸附过程中受浓度和添加量显著影响,符合 Freundlich 模型。本研究证实硫酸酯化改性可有效调控膳食纤维的吸附特性,为其在功能性食品(如降脂、解毒等)中的应用奠定了理论基础,也为无籽刺梨果渣的资源再利用提供理论依据。

© The Author(s) 2026. 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

[1] 任平国,任逸飞,徐启红,等. 刺梨多酚提取工艺优化及其抑制亚硝化功能分析[J/OL]. 饲料工业, 1−16[2025-03-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1169.S.20250305.1921.026.html.

[REN Pingguo, REN Yifei, XU Qihong, et al. Optimization of Extraction process of polyphenols from *Rosa roxburghii* and its inhibition of nitrosation function analysis[J/OL]. Feed Industry, 1−16[2025-03-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1169.S202503.05.1921.026.html.]

[2] SPILLER G A. Interaction of dietary fiber with other dietary

components: A possible factor in certain cancer etiologies 1[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1978, 31(10): S231−S232.
[3] WADDELL I S, ORFILA C. Dietary fiber in the prevention of obesity and obesity-related chronic diseases: From epidemiological evidence to potential molecular mechanisms[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(27): 8752−8767.
[4] 秦毅臻, 何洋, 冯怡婷, 等. 超声辅助碱法提取无籽刺梨结合多酚工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 1−9. [QIN Yizhen, HE Yang, FENG Yiting, et al. Optimization of ultrasound-assisted alkali extraction of bound polyphenol from *Rosa sterilis* and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 1−9.]
[5] 何菲菲, 梁克红, 王诗语, 等. 无籽刺梨风味成分及生物活性物质研究进展[J]. 现代食品, 2024(7): 23−25,29. [HE Feifei, LIANG Kehong, WANG Shiyu, et al. Research progress on flavor components and bioactive substances of *Rosa sterilis*[J]. Modern Food, 2024(7): 23−25,29.]
[6] 安雪菲, 但汉龙, 罗旭璐, 等. 无子刺梨的体内外抗氧化活性及化学成分分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, 42(5): 177−182. [AN Xuefei, DAN Hanlong, LUO Xulu, et al. Antioxidant activities and content analysis of chemical constituents in *Rosa sterilis*[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2022, 42(5): 177−182.]
[7] CHEN Guangjing, KAN Jianquan. Characterization of a novel polysaccharide isolated from *Rosa roxburghii* Tratt fruit and assessment of its antioxidant *in vitro* and *in vivo*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 166−174.
[8] WANG Lei, ZHANG Bin, XIAO Jie, et al. Physicochemical, functional, and biological properties of water-soluble polysaccharides from *Rosa roxburghii* Tratt fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 249: 127−135.
[9] 蒋兰兰, 鲁敏, 安华明. 刺梨与无籽刺梨果实中药化学成分及抗氧化物质的比较分析[J]. 果树学报, 2023, 40(1): 111−125. [JIANG Lanlan, LU Min, AN Huaming. Comparative analysis of chemical components of traditional Chinese medicine and antioxidants between *Rosa roxburghii* and *R. sterilis* fruits[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(1): 111−125.]
[10] LI Peidong, LI Chao, FU Xiong, et al. Physicochemical, functional and biological properties of soluble dietary fibers obtained from *Rosa roxburghii* Tratt pomace using different extraction methods[J]. Process Biochemistry, 2023, 128: 40−48.
[11] 胡文凯, 王艳丽, 彭镰心, 等. 谷物膳食纤维和酚类物质结合对肠道健康影响的研究进展[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(9): 147−156. [HU Wenkai, WANG Yanli, PENG Lianxin, et al. Research progress on the effects of cereal dietary fiber and phenolic substances on gut health[J]. Storage and Process, 2024, 24(9): 147−156.]
[12] 周笑犁, 王瑞, 高蓬明, 等. 刺梨果渣膳食纤维的体外吸附性能[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(2): 187−191. [ZHOU Xiaoli, WANG Rui, GAO Pengming, et al. Adsorption capacity of dietary fibers from *Roxburgh rose* pomace *in vitro*[J]. Food Research and Development, 2018, 39(2): 187−191.]
[13] WANG Shaokang, XIA Jie, de PAEPE K, et al. Ultra-high pressure treatment controls *in vitro* fecal fermentation rate of insoluble dietary fiber from *Rosa roxburghii* tratt pomace and induces butyrogenic shifts in microbiota composition[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(36): 10638−10647.
[14] 张子木, 罗凯, 黄秀芳. 植物多糖改性研究进展[J]. 山东化工, 2021, 50(9): 77−79,101. [ZHANG Zimu, LUO Kai, HUANG Xiufang. Research progress on modification of plant polysaccharides[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(9): 77−79,101.]
[15] CHEN Ling, HUANG Gangliang. Antioxidant activities of sulfated pumpkin polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 743−746.
[16] 王吟, 孙凤玲, 杨一琼. 改性细菌纤维素硫酸酯对 Pb(Ⅱ)吸附性能的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 114−118. [WANG Yin, SUN Fengling, YANG Yiqiong. Influnce on adsorption property modified bacterial cellulose sulfate to Pb (Ⅱ)[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1): 114−118.]
[17] 朱仁威, 谭沙, 刘庆庆, 等. 不同处理方法对刺梨果渣可溶性膳食纤维结构和体外降脂功能的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1−15[2025-03-25]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060370. [ZHU Renwei, TAN Sha, LIU Qingqing, et al. Effects of different treatments on the structure and *in vitro* hypolipidemic function of soluble dietary fiber from *Rosa roxburghii* tratt pomace [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−15[2025-03-25]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060370.]
[18] 苏靖程, 李晗, 范方宇. 无籽刺梨渣膳食纤维的羧甲基化改性及性质[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 34−42. [SU Jingcheng, LI Han, FAN Fangyu. Carboxymethylation modification and properties of dietary fiber from *Rosa sterilis* pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 34−42.]
[19] YU Panling, PAN Xueyu, CHEN Mingjie, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction of soluble dietary Fiber from *Hericium erinaceus* and its *in vitro* lipid-lowering effect[J]. Food Chemistry, 2024, 23: 101657.
[20] BRAOJOS C, REBOLLO-HERNANZ M, CAÑAS S, et al. Cocoa shell ingredients improve their lipid-lowering properties under simulated digestion: *in vitro* and HepG2 cells study[J]. Food Research International, 2024, 196: 115037.
[21] 苏靖程, 张传单, 范方宇. 无籽刺梨渣可溶性膳食纤维硫酸酯化改性及性质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 255−261. [SU Jingcheng, ZHANG Chuandan, FAN Fangyu. Sulfation modification and properties analysis of soluble dietary fiber from *Rosa sterilis* pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 255−261.]
[22] 于美汇, 赵鑫, 尹红力, 等. 碱提醇沉黑木耳多糖体外和体内降血脂功能[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 232−237. [YU Meihui, ZHAO Xin, YIN Hongli, et al. *In vitro* and *in vivo* hypolipidemic effect of *Auricularia auricular* polysaccharides[J]. Food Science, 2017, 38(1): 232−237.]
[23] HUANG Hairong, CHEN Jiajun, CHEN Yi, et al. Modification of tea residue dietary fiber by high-temperature cooking assisted enzymatic method: Structural, physicochemical and functional properties[J]. LWT, 2021, 145: 111314.
[24] 梁淑铃. 多糖基复合材料的制备及其重金属离子吸附性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2023. [LIANG Shuling. Preparation of polysaccharide-based composites and their heavy metal ion adsorption properties[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.]
[25] 来思彤, 崔清亮, 孙元琳, 等. 高压脉冲电场对麦麸吸附亚硝酸钠特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(5): 248−253. [LAI Sitong, CUI Qingliang, SUN Yuanlin, et al. Effect of high voltage pulse electric field on adsorption characteristics of sodium nitrite by wheat bran[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(5): 248−253.]
[26] 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. [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.]

[27] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124983.

[28] 刘静娜, 庄远红. 盐酸改性西瓜皮不溶性膳食纤维对亚硝酸盐的吸附作用[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(4): 72−77. [LIU Jingna, ZHUANG Yuanhong. Adsorption of nitrite by hydrochloric acid modified insoluble dietary fiber in watermelon peel[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(4): 72−77.]

[29] 赵宇楠, 贾丹丹, 蔡丹, 等. 食用菌发酵对人参不溶性膳食纤维结构及功能特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 80−88. [ZHAO Yunan, JIA Dandan, CAI Dan, et al. Effect of edible fungal fermentation on structure and functional properties of ginseng insoluble dietary fiber[J]. Food Science, 2023, 44(22): 80−88.]

[30] HUA Mei, LU Jiaxi, QU Di, et al. Structure, physicochemical properties and adsorption function of insoluble dietary fiber from ginseng residue: A potential functional ingredient[J]. Food Chemistry, 2019, 286: 522−529.

[31] 周崇银, 李晗, 范方宇, 等. 西番莲果皮不溶性膳食纤维对金属离子的吸附特性[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 160−167. [ZHOU Chongyin, LI Han, FAN Fangyu, et al. Characteristics of metallic ion adsorption on insolubledietary fiber from passion peel [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(14): 160−167.]

[32] 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 characteristics and mechanism of hydrochloric acid modified okara insoluble dietary fiber to nitrite[J]. Soybean Science, 2022, 41(4): 463−471.]

[33] 陈欢欢. 藕节改性可溶性膳食纤维对胰脂酶和胆固醇的吸附作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. [CHEN Huanhuan. Study on adsorption of pancreatic lipase and cholesterol by soluble dietary fiber of modified *Lotus* root nodes[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.]

[34] 王晓晶, 杨亚茹, 褚盼盼. 葡萄籽水不溶性膳食纤维对胆固醇吸附的特性[J]. 食品工业, 2019, 40(4): 115−119. [WANG Xiaojing, YANG Yaru, CHU Panpan. The adsorption properties of grape seed water insoluble dietary fiber[J]. The Food Industry, 2019, 40(4): 115−119.]

[35] QIN Lei, FENG Lihua, LI Chang, et al. Amination/oxidization dual-modification of waste *Ginkgo* shells as bio-adsorbents for copper ion removal[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 112−123.

[36] FAN Fangyu, SU Jingcheng, LI Han. *In vitro* lipid lowering effect of mixed carboxymethyl dietary fiber from *Rosa sterilis* pomace[J]. Starch - Stä rke, 2023, 75(11-12): 2200230.

[37] ZHU Yu, CHU Jiaxi, LU Zhaoxin, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber from foxtail millet (*Setaria italic*) bran[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 456−461.