谢川, 于丽亚, 刘宇嘉, 等. 文冠果壳膳食纤维不同提取工艺优化及其理化性质比较 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 10−21. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050244

XIE Chuan, YU Liya, LIU Yujia, et al. Optimization of Different Extraction Processes and Comparative Analysis of Physicochemical Properties of Dietary Fiber from Husk of *Xanthoceras sorbifolium*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 10−21. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050244

·特邀主编专栏—地方特色食品:加工技术、感官品质、风味特性和营养健康（客座主编:易俊洁、和劲松、郭超凡）·

文冠果壳膳食纤维不同提取工艺优化及其理化性质比较

谢　川,于丽亚,刘宇嘉,于鑫越,张俏丽,卢　倩,段慧玲*
（山西农业大学食品科学与工程学院,山西晋中 030801）

摘　要:为实现木本油料加工副产物的高值化利用，以文冠果壳为原料，通过单因素实验结合响应面试验优化膳食纤维提取工艺，系统比较超声辅助碱法（Alkaline，Alk）与酶法（Enzymatically，E）提取可溶性膳食纤维（Soluble Dietary Fiber，SDF）与不溶性膳食纤维（Insoluble Dietary Fiber，IDF）的结构和功能特性。结果表明:超声辅助碱法最佳工艺条件为超声温度 61 ℃、超声时间 16 min、超声功率 210 W、NaOH 浓度 4.5%；超声辅助酶法最佳工艺为酶添加量 7.9%、超声温度 55 ℃、超声功率 210 W、pH6.7、超声时间 30 min。在此条件下，得率 E-IDF（63.71%±0.16%）>Alk-IDF（59.61%±0.16%）>Alk-SDF（13.17%±0.13%）>E-SDF（11.39%±0.14%）。扫描电镜显示 E-SDF 呈现典型疏松多孔结构，其余组分表面均存在明显褶皱；光谱分析证实四种组分均具有典型膳食纤维特征官能团。功能特性研究表明，Alk-IDF 持水力（12.16±0.05 g/g）与持油力（19.12±0.06 g/g）最佳，E-SDF 的膨胀力最高，达 4.98±0.10 mL/g；在 1 mg/mL 浓度下，E-SDF 还原力优于其他组分，为 0.45±0.01，而 Alk-SDF 则表现出最强的自由基清除能力，为 48.21%±1.02%。研究结果显示文冠果壳膳食纤维具有良好的理化性质，可为文冠果壳的高值化利用提供一定理论依据。

关键词:文冠果壳,膳食纤维,碱法,酶法,提取工艺,结构,理化性质,抗氧化
中图分类号:TS209　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002−0306(2026)06−0010−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050244
本文网刊:

Optimization of Different Extraction Processes and Comparative Analysis of Physicochemical Properties of Dietary Fiber from Husk of *Xanthoceras sorbifolium*

XIE Chuan，YU Liya，LIU Yujia，YU Xinyue，ZHANG Qiaoli，LU Qian，DUAN Huiling*
（College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China）

Abstract: The single-factor experiments were combined with response surface methodology to optimize the extraction process of dietary fiber from husk of *Xanthoceras sorbifolium*, so as to achieve high-value utilization of woody oil processing by-products. Furthermore, the structural and functional properties of soluble dietary fiber (SDF) and insoluble dietary fiber (IDF) extracted through ultrasound-assisted alkaline (Alk) and enzymatic (E) methods were systematically compared. The results indicated that the optimal parameters for the ultrasound-assisted alkaline method were set as follows: Ultrasound temperature 61 ℃, ultrasound time 16 min, ultrasound power 210 W, and NaOH concentration 4.5%. For the ultrasound-assisted enzymatic method, the optimal conditions were determined as enzyme addition 7.9%, ultrasound

收稿日期: 2025−05−26
基金项目: 山西省应用基础研究计划项目（20210302124510）;山西省高等学校大学生创新创业训练项目（S202410113067）;山西省高等学校科技创新项目（2021L152）;山西农业大学博士科研启动项目（2021BQ29）。
作者简介: 谢川（1999−）,男,硕士研究生,研究方向:农产品加工及贮藏,E-mail:xiechuan1845@163.com。
*** 通信作者:** 段慧玲（1986−）,女,博士,讲师,研究方向:农产品加工及贮藏,E-mail:duanhui_ling@126.com。

temperature 55 ℃, ultrasound power 210 W, pH6.7, and ultrasound time 30 min. Under these optimal conditions, the yields followed the order: E-IDF (63.71%±0.16%)>Alk-IDF (59.61%±0.16%)>Alk-SDF (13.17%±0.13%)>E-SDF (11.39%±0.14%). As revealed by scanning electron microscopy, E-SDF exhibited a typically loose and porous structure, while distinct wrinkles were observed on the surfaces of the other components. As confirmed by spectroscopic analyses, all four components possessed characteristic functional groups of dietary fiber. As demonstrated by functional property studies, Alk-IDF showed superior water-holding capacity (12.16±0.05 g/g) and oil-holding capacity (19.12±0.06 g/g), while E-SDF displayed the highest swelling capacity (4.98±0.10 mL/g). At a concentration of 1 mg/mL, the reducing power (0.45±0.01) of E-SDF was higher than that of other components, whereas the free radical scavenging capacity (48.21%±1.02%) of Alk-SDF was the strongest. Overall, husk of *Xanthoceras sorbifolium* dietary fiber possesses favorable physicochemical properties, which could provide a theoretical basis for its high-value utilization.

Key words: husk of *Xanthoceras sorbifolium*; dietary fiber; alkaline method; enzymatic method; extraction technology; structure; physicochemical properties; antioxidant activity

文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)属于无患子科，是我国北方特有的药食植株，每个部位都具有一定的药用和保健价值，可用于预防和治疗疾病[1]。文冠果壳是文冠果加工后的主要副产物之一，其重量约占果实的 27%[2]，通常作为废料处理，这对环境是一种污染，也造成了资源的浪费[3]。近年研究发现，文冠果壳具有较高的利用价值，其含有多种天然活性成分，如酚酸、多酚、黄酮、膳食纤维等[4]，具有抗炎、抗菌、抗氧化等特性[5−7]，其中的纤维素、半纤维素和木质素的总量约占文冠果壳的 82.1%[8]，是提取膳食纤维的理想原料。鉴于文冠果壳富含高比例膳食纤维组分，却常作为废弃物的现状，深入系统研究文冠果壳膳食纤维提取工艺及其理化性质，对于实现废弃资源的高值化利用、开发新型功能性食品原料及减轻环境负担具有重要意义。

膳食纤维是碳水化合物及其类似物的总和，它在小肠中能保持稳定不被消化、吸收，进入大肠后可发生不同程度的分解[9]。膳食纤维根据可溶性的不同主要分为两类：可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)。提取膳食纤维的方法有碱法提取、酶法提取等，其中碱法提取成本低，操作简单，但容易破坏膳食纤维的结构[10]。酶法对环境友好，提取的膳食纤维中杂质较少，但成本高且提取条件严格[11]。近年来，基于空化效应原理的超声波辅助提取技术，通过破坏植物细胞壁、裂解木质素与半纤维素的连接，促进膳食纤维的释放，该技术凭借显著提高膳食纤维提取效率，保持结构和分子特性不变等优点，已成为食品工业中植物活性成分提取的主流绿色技术[12]。

因此，本试验采用超声波辅助碱法和酶法两种方法制备文冠果壳 SDF 和 IDF，并对不同提取方法提取的文冠果壳 SDF 和 IDF 的结构、理化性质和抗氧化性进行比较分析，以期为木本油料加工废弃物的资源化利用提供理论支撑，实现膳食纤维原料的多样性拓展。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

新鲜的文冠果　文冠果基地提供；大豆油　购自美宜佳超市；氢氧化钠　天津市恒兴化学试剂制造有限公司；磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、三氯化铁、三氯乙酸、铁氰化钾、溴化钾　天津市天力化学试剂有限公司；无水乙醇　天津市富宇精细化工有限公司；木瓜蛋白酶(800 U/mg)、α-淀粉酶(50 U/mg)、糖化酶(100000 U/mg)　上海市源叶生物科技有限公司；2,2-二苯基-1-苦基肼(DPPH)　上海蓝季生物科技有限公司；抗坏血酸(V_C)　天津市风船化学试剂科技有限公司；以上试剂均为分析纯。

PR224ZH/E 电子天平　奥豪斯仪器(常州)有限公司；DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器　杭州旌斐仪器科技有限公司；HC-2518R 高速冷冻离心机　安徽中科中佳科学仪器有限公司；XL-30C 高速连续式超微粉碎机　广州市旭朗机械设备有限公司；GZX-9420-MBE 电热鼓风干燥箱　上海一恒科学仪器有限公司；SCIENTZ-30YD/A 真空冷冻干燥机、SBW25-12DTDN 超声波清洗机　宁波新芝生物科技股份有限公司；UV-1100 紫外可见分光光度计　上海美谱达仪器有限公司；捷克 TESCAN MIRA LMS 扫描电子显微镜　泰思肯(中国)有限公司；BRUKER TENSOR 27 傅里叶红外光谱仪　德国布鲁克(北京)科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　原料预处理　文冠果经清洗、剥壳后，获得果壳，随后将果壳切块后冷冻干燥预处理，采用超微粉碎进行粉碎(过 60 目标准筛)。得到的文冠果壳粉末置于密封袋中，−40 ℃ 保存待用。

1.2.2　文冠果壳膳食纤维提取

1.2.2.1　超声辅助碱法　将 2 g 预处理后的文冠果壳粉置于锥形瓶内，加入一定浓度的 NaOH，在一定条件下超声提取一定时间，4500 r/min 离心 20 min，将沉淀物取出烘干，得到超声辅助碱法提取不溶性膳食纤维(Alkaline Extracted Insoluble Dietary Fiber, Alk-IDF)。

取出全部上清液，加入 4 倍体积的无水乙醇，摇匀，置于 4 ℃ 下沉淀 24 h，4500 r/min 离心 20 min，取沉淀物冻干，得到超声辅助碱法提取可溶性膳食

纤维(Alkaline Extracted Soluble Dietary Fiber, Alk-SDF)。

1.2.2.2 超声辅助酶法 将 2 g 预处理后的文冠果壳粉置于锥形瓶内,加入一定量比例为 1∶1∶1 的复合酶(糖化酶、木瓜蛋白酶、α-淀粉酶),按照 1∶20 的料液比加入特定 pH 的磷酸缓冲溶液,在一定条件下超声提取一定时间,100 ℃ 水浴灭酶 10 min,4500 r/min 离心 20 min,将沉淀物取出烘干,得到超声辅助酶法提取不溶性膳食纤维(Enzymatically Extracted Insoluble Dietary Fiber, E-IDF)。

取出全部上清液,加入 4 倍体积的无水乙醇,摇匀,置于 4 ℃ 下沉淀 24 h,4500 r/min 离心 20 min。取沉淀物冻干,得到超声辅助酶法提取可溶性膳食纤维(Enzymatically Extracted Soluble Dietary Fiber, E-SDF)。按照式(1)和式(2)分别计算出不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维得率。

$$\text{IDF得率}(\%) = \frac{m_1}{m} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

$$\text{SDF得率}(\%) = \frac{m_2}{m} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中:m 为文冠果壳粉末质量,g;m_1 为不溶性膳食纤维质量,g;m_2 为可溶性膳食纤维质量,g。

1.2.3 单因素实验

1.2.3.1 超声辅助碱法单因素实验 称取 2 g 文冠果壳粉样品,研究超声温度、超声时间、超声功率、NaOH 浓度对文冠果壳粉 Alk-SDF 得率的影响,改变超声功率(150、180、210、240、270 W)、超声温度(50、60、70、80、90 ℃)、超声时间(5、10、15、20、25 min)、NaOH 浓度(2%、3%、4%、5%、6%)中的任意一个因素时,其他因素以超声温度 60 ℃、超声时间 15 min、超声功率 210 W、NaOH 浓度 4% 为准。

1.2.3.2 超声辅助酶法单因素实验 称取 2 g 文冠果壳粉样品,研究复合酶的添加量、pH、超声温度、超声功率、超声时间对文冠果壳粉 E-SDF 得率的影响,改变超声功率(150、180、210、240、270 W)、超声温度(50、60、70、80、90 ℃)、超声时间(10、20、30、40、50 min)、pH(5.5、6.0、6.5、7.0、7.5)、复合酶的添加量(2%、4%、6%、8%、10%)中的任意一个因素时,其他因素以复合酶的添加量 6%、pH6.5、超声温度 60 ℃、超声功率 210 W、超声时间 30 min 为准。

1.2.4 响应面试验 根据超声辅助碱法单因素实验结果,将超声温度、超声时间、超声功率、NaOH 浓度 4 因素作为自变量,以文冠果壳 Alk-SDF 得率为响应值,对膳食纤维的提取条件做进一步优化。使用 Design-Expert 软件(13.0.1.0)进行 Box-Behnken 设计。以单因素优化实验中获得的最佳值为中心点 0,最大值和最小值分别编码为 1 和−1,各因子的水平设置及编码值见表 1。

根据超声辅助酶法单因素实验结果,选取对文冠果壳 E-SDF 得率影响程度较大的四个因素:酶的添加量、超声温度、超声功率、pH4 因素为自变量,以文冠果壳 SDF 得率为响应值,对膳食纤维的提取条件做进一步优化。使用 Design-Expert 软件(13.0.1.0)进行 Box-Behnken 设计。以单因素优化中获得的最佳值为中心点 0,最大值和最小值分别编码为 1 和-1。各因子的水平设置及编码值见表 2。

表 1 超声辅助碱法响应面中的因素和试验水平

Table 1 RSM factors and levels for ultrasound-assisted alkaline extraction

水平	因素			
	A: 超声温度(℃)	B: 超声时间(min)	C: 超声功率(W)	D: NaOH浓度(%)
−1	50	10	180	3
0	60	15	210	4
1	70	20	240	5

表 2 超声辅助酶法响应面中的因素和试验水平

Table 2 RSM factors and levels for ultrasound-assisted enzymatic extraction

水平	因素			
	A: 酶添加量(%)	B: 超声温度(℃)	C: 超声功率(W)	D: pH
-1	6	50	180	6.0
0	8	60	210	6.5
1	10	70	240	7.0

1.2.5 文冠果壳膳食纤维结构测定

1.2.5.1 紫外光谱测定 参考王洪欣[13]的方法并作适当修改。分别取 Alk-IDF、Alk-SDF、E-IDF、E-SDF 样品 20 mg,用蒸馏水稀释到 0.2 mg/mL,将样品置于紫外分光光度计中,采集样品在 200~800 nm 波长范围内的光谱图。

1.2.5.2 傅里叶红外光谱测定 参考刘东杰等[14]的方法并作适当修改。将 Alk-IDF、Alk-SDF、E-IDF、E-SDF 样品分别与 KBr 粉体以质量比为 1∶100 混合并研磨均匀,压片,将样品置于红外光谱仪中,采集样品在 4000~400 cm^{-1} 范围内的光谱图,分辨率为 2 nm。

1.2.5.3 扫描电镜测定 参考陈淇等[15]的方法并作适当修改。称取适量的 Alk-IDF、Alk-SDF、E-IDF、E-SDF 粉末,分别均匀涂布于导电胶后喷金,在 15 kV 工作电压下,分别在 500、2000、5000 倍条件下,置于扫描电子显微镜观察并记录样品的形貌。

1.2.6 文冠果壳膳食纤维理化特性测定

1.2.6.1 持水力测定 参考董玉玮等[16]的方法并作如下修改。分别准确称取 1 g 文冠果壳 SDF 和 IDF 置于 50 mL 离心管,加入 20 mL 的蒸馏水,在 37 ℃ 下使用磁力搅拌器以 800 r/min 搅拌 30 min 后,在 4000 r/min 的转速下离心 15 min,去除上清液后称重,将离心管放入 45 ℃ 烘箱中烘干,再次称重。

$$\text{持水力}(g/g) = \frac{M_1 - M_2}{M} \quad \text{式(3)}$$

式中：M 为加水前样品重量，g；M_1 为吸水后样品与离心管的总重量，g；M_2 为烘干后样品与离心管的总重量，g。

1.2.6.2　持油力测定　参考乔小全等[17]的方法并作如下修改。分别准确称取 1 g 文冠果壳 SDF 和 IDF 置于 50 mL 离心管，加入 20 mL 的豆油，在 4 ℃条件下放置 24 h，在 4000 r/min 的转速下 15 min，倾去上层油，用滤纸吸去多余油脂，称重。

$$持油力(g/g)=\frac{M_2-M_1}{M}$$　　式（4）

式中：M 为干燥样品重量，g；M_1 为干燥样品和离心管的总重量，g；M_2 为吸油后样品和离心管的总重量，g。

1.2.6.3　膨胀力测定　参考巫永华等[18]的方法并作如下修改。分别准确称取 1 g 文冠果壳 SDF 和 IDF 置于 10 mL 量筒中，用移液枪准确移取 8 mL 蒸馏水，记录此时体积。室温下静置 24 h，记录体积。

$$膨胀力(mL/g)=\frac{V_0-V_1}{M}$$　　式（5）

式中：M 为样品质量，g；V_0 为静置前的体积，mL；V_1 为静置后的体积，mL。

1.2.7　抗氧化性测定

1.2.7.1　还原力测定　参考赵巧丽等[19]中的方法并做适当修改。取不同浓度的文冠果壳 SDF 和 IDF 溶液各 2.5 mL，加入 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲溶液（pH6.6）和 1% 铁氰化钾溶液各 2.5 mL，50 ℃ 水浴 20 min，使用 2.5 mL10% 三氯乙酸终止反应，3000 r/min 离心 10 min，移取 2.5 mL 上清液，依次加入 2.5 mL 蒸馏水、2.5 mL0.1% 三氯化铁溶液，混匀后静置 10 min，以 V_C 为阳性对照组，于 700 nm 特征波长下测定反应体系的吸光度值。

1.2.7.2　DPPH 自由基清除率测定　参考马凤等[20]的方法并做适当修改。取不同浓度的文冠果壳 SDF 和 IDF 溶液各 2.5 mL，加入 2.5 mL 用无水乙醇配制的 0.2 mmol/L DPPH 溶液，摇匀，避光反应 20 min，以 V_C 为阳性对照组，于 517 nm 特征波长下测定反应体系的吸光度值，计算 DPPH 清除率。

$$DPPH自由基清除率(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100$$　　式（6）

式中：A_1 为膳食纤维和 DPPH 溶液的吸光值；A_2 为膳食纤维和无水乙醇溶液的吸光值；A_0 为无水乙醇和 DPPH 溶液的吸光值。

1.3　数据处理

每组数据测量三次，用平均值±标准差表示。采用 Excel 2021 软件进行基础数据统计处理，用 Design Expert（13.0.1.0）软件构建响应面模型并完成实验参数优化，运用其 ANOVA 模块进行显著性检验，用 Origin（2024.10.1.0.178）软件绘图。用 SPSS Statistics（R27.0.1.0）对数据进行 Duncan 多重比较确定显著性差异，以 $P<0.05$ 作为显著性差异的判断依据。

2　结果与分析

2.1　超声辅助碱法提取文冠果壳 SDF

2.1.1　单因素实验分析　由图 1A 可知，在 210 W 时 Alk-SDF 得率达到最大，这可能是由于超声波功率的增加而引起空化效应，增加了细胞内部的传质

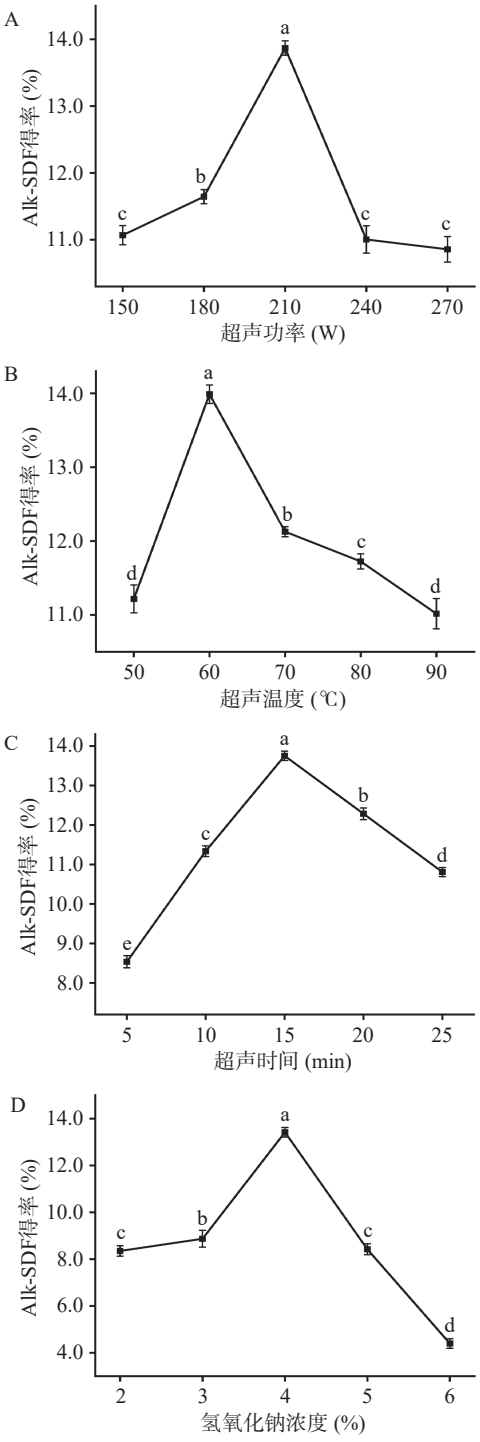


图 1　超声辅助碱法单因素实验结果

Fig.1　Results of single-factor experiment in ultrasound-assisted alkaline extraction

注：不同小写字母（a~e）表示有显著性差异（$P<0.05$），图 3 同。

阻力，导致细胞结构发生分解，从而提高了 Alk-SDF 得率[21]，但超声功率过高可能导致 Alk-SDF 发生化学分解。此外，过高的功率还可能产生空化气泡，这些气泡会削弱能量向细胞表面的传递[22]，导致 Alk-SDF 得率降低。因此选择超声功率为 180、210、240 W 进行后续响应面试验。

图 1B 反映了超声温度对 Alk-SDF 得率的影响。超声温度为 60 ℃ 时，Alk-SDF 得率最高，这是因为温度的升高促进了膳食纤维中部分氢键的断裂，加快了分子的运动和扩散，从而提高了 Alk-SDF 在溶液中的溶解度[23]。当温度超过 60 ℃ 后，超声波产生的空化效应会改变，降低了传质强度，同时高温促进了 Alk-SDF 的降解[24]，导致 Alk-SDF 得率降低。因此选择超声温度为 50、60、70 ℃ 进行后续响应面试验。

如图 1C 所示，当超声时间为 15 min 时，Alk-SDF 的得率最大。超声时间过短，提取不完全，随着超声时间的增加，细胞壁逐渐被破坏，促进了膳食纤维的释放[22]，超声时间过长，可能引起 Alk-SDF 结构发生改变，从而降低 Alk-SDF 得率[25]，因此选择超声时间为 10、15、20 min 进行后续响应面试验。

由图 1D 可以看出，Alk-SDF 得率在 NaOH 浓度达到 4% 时达到最大，这是因为 NaOH 可以促进膳食纤维的释放，使得 Alk-SDF 得率升高[26]，但 NaOH 的浓度过高会导致膳食纤维分解，无法醇沉淀，抑制了 Alk-SDF 的提取[27]，这与杨帆等[28] 研究超声-酶辅助碱法提取黑木耳膳食纤维的趋势一致，随着 NaOH 浓度增加呈先增后减。因此选择 NaOH 浓度为 3%、4%、5% 进行后续响应面试验。

2.1.2 响应面试验结果与分析 实验借助 Design Expert(13.0.1.0)软件设计四因素三水平的响应面试验，共 29 组试验，其中 5 组用于重复中心点试验，将 Alk-SDF 得率作为响应值，确定最佳工艺参数。试验方案及结果见表 3。

由表 4 可知，$P<0.0001$，说明该模型极显著，失拟项 P 值等于 0.0513>0.05，不显著，$R^2=0.9625$，线性关系较好，可以用于对 Alk-SDF 得率的优化。

Alk-SDF 得率回归方程为：

$$Y=-54.5996+0.711667A+1.12917B+0.265583C+4.26333D-0.00185AB+3.33333e\text{-}05AC-0.0115AD-0.00065BC-0.001BD-0.0055CD-0.0051875A^2-0.0272B^2-0.0005625C^2-0.27D^2$$

由表 4 可知，4 个因素对 Alk-SDF 的影响依次为 B>D>A>C，即超声时间>NaOH 浓度>超声温度>超声功率。

图 2 为超声功率和 NaOH 浓度两因素交互作用对文冠果壳 Alk-SDF 得率的影响。图形倾斜程度和等高线的形状可以直观比较交互作用。因此，通过响应面图可知，超声功率(C)和 NaOH 浓度(D)等高线相对椭圆，坡度较为陡峭，交互作用对得率的影响显著，与方差分析的结果一致。

表 3 超声辅助碱法响应面试验设计与结果

Table 3 RSM design and results of ultrasound-assisted alkaline extraction

实验号	A: 超声温度（℃）	B: 超声时间（min）	C: 超声功率（W）	D: NaOH浓度（%）	Alk-SDF得率（%）
1	50	10	210	4	11.31
2	70	10	210	4	11.94
3	50	20	210	4	12.26
5	60	15	180	3	11.91
6	60	15	240	3	12.51
7	60	15	180	5	12.68
8	60	15	240	5	12.62
9	50	15	210	3	11.69
10	70	15	210	3	12.44
11	50	15	210	5	12.52
12	70	15	210	5	12.81
13	60	10	180	4	11.76
14	60	20	180	4	12.41
15	60	10	240	4	11.72
16	60	20	240	4	11.98
17	50	15	180	4	12.12
18	70	15	180	4	12.48
19	50	15	240	4	11.99
20	70	15	240	4	12.39
21	60	10	210	3	11.79
22	60	20	210	3	12.43
23	60	10	210	5	12.22
24	60	20	210	5	12.84
25	60	15	210	4	13.28
26	60	15	210	4	13.18
27	60	15	210	4	13.26
28	60	15	210	4	13.11
29	60	15	210	4	13.22

表 4 超声辅助碱法响应面试验方差分析

Table 4 RSM analysis of variance for ultrasound-assisted alkaline extraction

项目	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	7.41	14	0.5293	25.68	<0.0001	**
A	0.6030	1	0.6030	29.25	<0.0001	**
B	1.14	1	1.14	55.35	<0.0001	**
C	0.0019	1	0.0019	0.0910	0.7674	
D	0.7105	1	0.7105	34.47	<0.0001	**
AB	0.0342	1	0.0342	1.66	0.2184	
AC	0.0004	1	0.0004	0.0194	0.8912	
AD	0.0529	1	0.0529	2.57	0.1315	
BC	0.0380	1	0.0380	1.84	0.1959	
BD	0.0001	1	0.0001	0.0049	0.9455	
CD	0.1089	1	0.1089	5.28	0.0375	*
A^2	1.75	1	1.75	84.68	<0.0001	**
B^2	3.00	1	3.00	145.51	<0.0001	**
C^2	1.66	1	1.66	80.65	<0.0001	**
D^2	0.4729	1	0.4729	22.94	0.0003	**
残差	0.2886	14	0.0206			
失拟项	0.2702	10	0.0270	5.87	0.0513	
纯误差	0.0184	4	0.0046			
总和	7.70	28				
$R^2=0.9625$, $R^2_{adj}=0.9250$						

注：“*”表示显著差异($P<0.05$)，“**”表示显著极差异($P<0.01$)，表6同。

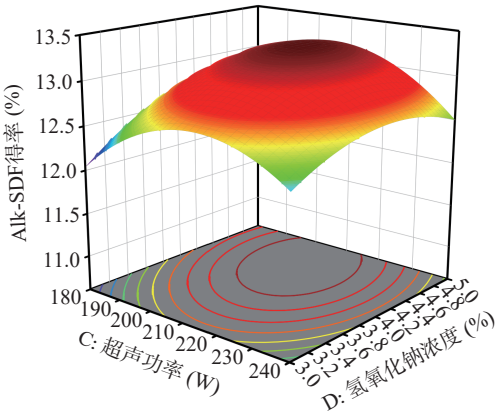


图 2　超声功率-NaOH 浓度交互作用的三维响应面图

Fig.2　3D response surface plot of the interaction between ultrasound power and NaOH concentration

2.1.3　工艺优化与验证试验　确定最佳工艺参数为：超声温度 61.45 ℃、超声时间 16.11 min、超声功率 206.83 W、NaOH 浓度 4.45%，预测文冠果壳 Alk-SDF 得率为 13.32%。为方便操作，将工艺条件调整为超声温度 61 ℃、超声时间 16 min、超声功率 210 W、NaOH 浓度 4.5%，得到实际文冠果壳 Alk-SDF 得率为 13.17%±0.13%，结果与预测值相差不大，说明该模型准确度良好。按照最适条件进行试验，Alk-IDF 得率为 59.61%±0.16%。

2.2　超声辅助酶法提取文冠果壳 SDF

2.2.1　单因素实验结果　由图 3A 可知，当超声功率达到 210 W 时，E-SDF 得率达到最大，这可能是超声处理导致文冠果壳细胞壁破裂，促进了文冠果壳中活性成分的扩散、溶出[29]，进而提高了 E-SDF 的得率。功率超过 210 W 后，高强度的超声处理可能会破坏文冠果壳 E-SDF 的内部结构，使其体系糊化，从而导致其得率下降[28]。因此选择超声功率为 180、210、240 W 进行后续响应面试验。

由图 3B 反映了超声温度对 E-SDF 得率的影响，E-SDF 得率在超声温度 60 ℃ 时达到最高，这是因为复合酶活力随着温度升高而增加，提高了酶解效率，使得 E-SDF 得率升高。超声温度低于或超过 60 ℃，可能因为复合酶活性降低，导致酶解效率变低，降低了 E-SDF 的得率[30]。因此选择超声温度为 50、60、70 ℃ 进行后续响应面试验。

由图 3C 所示，当超声时间为 30 min 时，E-SDF 得率达到最大，这说明提取时间太短，会导致提取过程不彻底，但随着超声时间增加，溶出大量的果胶、低聚糖，E-SDF 得率上升。提取时间太长，高强度超声产生的空化、机械剪切等效应，会破坏文冠果壳 E-SDF 结构，导致 E-SDF 得率下降[31]。这与王萌等[32] 研究超声辅助酶法提取麦麸可溶性膳食纤维的趋势一致，随着超声时间增加，可溶性膳食纤维得率先增后减。因此选择超声时间为 20、30、40 min 进行后续响应面试验。

由图 3D 可知，pH 为 6.5 时，E-SDF 得率最大，这是因为酶在最适 pH 下，酶促反应速率最大，当 pH 低于或超过 6.5 时，可能因为复合酶的活性下降，导致 E-SDF 得率逐渐下降。这与王天等[33] 研究超声辅助酶法提取藜麦可溶性膳食纤维的趋势一致，随着 pH 增加，可溶性膳食纤维得率先增后减。因此选择 pH 为 6、6.5、7 进行后续响应面试验。

由图 3E 可以看出，当酶添加量为 8% 时，E-SDF 的得率最大，这是因为催化反应速度与酶添加量成正比，当酶添加量较少，会导致提取不完全，而过

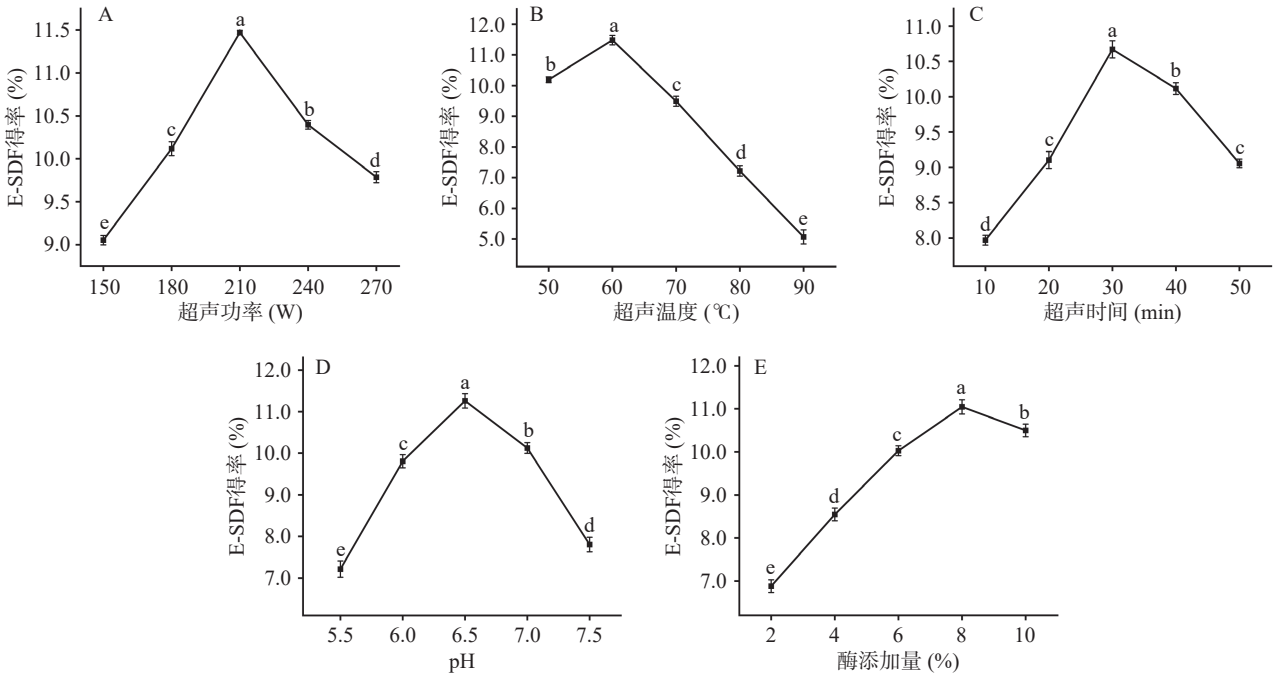


图 3　超声辅助酶法单因素实验结果

Fig.3　Results of single-factor experiment in ultrasound-assisted enzymatic extraction

量复合酶使得 E-SDF 裂解成小分子低聚糖甚至单糖而溶于乙醇，在醇沉过程中无法析出[34]，导致 E-SDF 得率下降。因此选择酶添加量为 6%、8%、10%进行后续响应面试验。

2.2.2 响应面试验结果与分析 实验借助 Design Expert (13.0.1.0)软件设计四因素三水平的响应面试验，共 29 组试验，其中 5 组用于重复中心点试验，将 E-SDF 得率作为试验响应值，确定最佳工艺参数。试验方案及结果见表 5。

表 5 超声辅助酶法响应面方案设计与结果

Table 5 RSM design and results for ultrasound-assisted enzymatic extraction

实验号	A: 酶的添加量 (%)	B: 超声温度 (℃)	C: 超声功率 (W)	D: pH	E-SDF得率 (%)
1	6	50	210	6.5	11.37
2	10	50	210	6.5	10.67
3	6	70	210	6.5	10.46
4	10	70	210	6.5	10.87
5	8	60	180	6	6.46
6	8	60	240	6	7.35
7	8	60	180	7	10.39
8	8	60	240	7	9.87
9	6	60	210	6	6.88
10	10	60	210	6	7.44
11	6	60	210	7	10.21
12	10	60	210	7	10.61
13	8	50	180	6.5	10.91
14	8	70	180	6.5	10.77
15	8	50	240	6.5	10.79
16	8	70	240	6.5	10.45
17	6	60	180	6.5	10.28
18	10	60	180	6.5	11.13
19	6	60	240	6.5	10.65
20	10	60	240	6.5	10.37
21	8	50	210	6	6.92
22	8	70	210	6	6.88
23	8	50	210	7	10.74
24	8	70	210	7	9.91
25	8	60	210	6.5	11.44
26	8	60	210	6.5	11.31
27	8	60	210	6.5	11.17
28	8	60	210	6.5	11.12
29	8	60	210	6.5	11.29

由表 6 可知，P<0.0001，说明该模型极显著，失拟项 P 值等于 0.1696>0.05，不显著，R^2=0.9930，线性关系较好，可以用于对 E-SDF 得率的优化。

表 6 超声辅助酶法响应面试验方差分析

Table 6 RSM analysis of variance for ultrasound-assisted enzymatic extraction

项目	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	71.18	14	5.08	142.10	<0.0001	**
A	0.1281	1	0.1281	3.58	0.0793	
B	0.3536	1	0.3536	9.88	0.0072	**
C	0.0176	1	0.0176	0.4928	0.4942	
D	32.67	1	32.67	913.08	<0.0001	**
AB	0.3080	1	0.3080	8.61	0.0109	*
AC	0.3192	1	0.3192	8.92	0.0098	**
AD	0.0064	1	0.0064	0.1789	0.6788	
BC	0.0100	1	0.0100	0.2795	0.6053	
BD	0.1560	1	0.1560	4.36	0.0555	
CD	0.4970	1	0.4970	13.89	0.0023	**
A^2	0.2543	1	0.2543	7.11	0.0184	*
B^2	0.3226	1	0.3226	9.02	0.0095	**
C^2	0.9765	1	0.9765	27.29	0.0001	**
D^2	36.07	1	36.07	1007.99	<0.0001	**
残差	0.5009	14	0.0358			
失拟项	0.4376	10	0.0438	2.76	0.1696	
净误差	0.0633	4	0.0158			
总误差	71.68	28				

R^2=0.9930, R^2_{adj}=0.9860

E-SDF 得率回归方程为：

$$Y=-490.922+1.25992A+0.431183B+0.380206C+133.541D+0.013875AB-0.00470833AC-0.04AD-0.000166667BC-0.0395BD-0.0235CD-0.0495A^2-0.00223B^2-0.000431111C^2-9.432D^2$$

FA=3.58，FB=9.88，FC=0.4928，FD=913.08，因此 4 个因素对 E-SDF 的影响依次为 D>B>A>C，即 pH>超声温度>酶添加量>超声功率。

图 4 为酶添加量、超声温度、超声功率、pH 各因素两两交互作用对文冠果壳 E-SDF 得率的影响。图形倾斜程度和等高线的形状可以直观比较交互作用。因此，通过响应面图 4a~图 4c 可知，酶添加量(A)与超声温度(B)、酶添加量(A)与超声功率(C)、超声功率(C)与 pH(D)的等高线相对椭圆，坡度较为陡峭，交互作用对得率的影响显著，与方差分析结果一致。

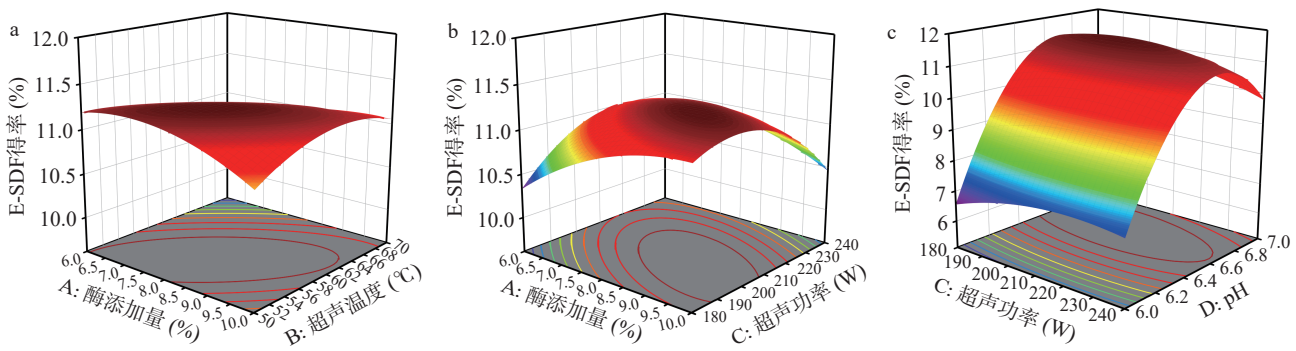


图 4 各因素交互作用的三维响应面图

Fig.4 3D response surface plot of the interactions among various factors

2.2.3　工艺优化与验证试验　确定最佳工艺参数为：酶添加量 7.86%、超声温度 54.19 ℃、超声功率 205.10 W、pH6.69，预测文冠果壳 E-SDF 得率为 11.63%。为方便操作，将工艺条件调整为酶添加量 7.9%、超声温度 55 ℃、超声功率 210 W、pH6.7。得到实际文冠果壳 E-SDF 得率为 11.39%±0.14%，结果接近预测值，说明该模型准确度良好。按照最适条件进行试验，E-IDF 得率为 63.71%±0.16%。

2.3　提取方式对文冠果壳 SDF 结构性质的影响

2.3.1　紫外光谱分析　紫外分析光谱又称为电子跃迁光谱，可根据出峰波长来判断样品中是否含有微量杂质。为了分析文冠果壳 SDF 和 IDF 中是否含有大分子物质，对文冠果壳 SDF 和 IDF 样品溶液在 200~800 nm 范围进行紫外光谱分析。由图 5 所示，4 种膳食纤维的波长在 200 nm 处达到最大值，表明文冠果壳膳食纤维中含有大量多糖类物质。E-SDF、Alk-SDF 和 Alk-IDF 在 280 nm 附近有弱吸收峰，说明可能含有少量的水溶性蛋白[35]。所有样品溶液在 260 nm 处都没有出现特征吸收峰，表明该文冠果壳膳食纤维中不存在核糖核酸[14]，这与李国强等[36] 研究的枸杞多糖情况类似。

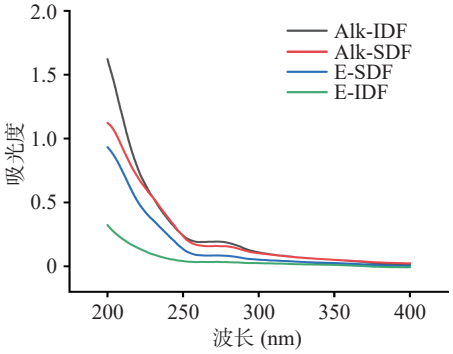


图 5　Alk-IDF、Alk-SDF、E-IDF、E-SDF 的紫外光谱

Fig.5　UV spectra of Alk-IDF, Alk-SDF, E-IDF and E-SDF

2.3.2　傅里叶红外光谱分析　如图 6 所示，E-SDF、E-IDF、Alk-SDF 和 Alk-IDF 4 种膳食纤维在 4000~400 cm^{-1} 范围的 FTIR 光谱均具有膳食纤维的特征吸收峰。在 3399 cm^{-1} 处的吸收峰是由于果胶或半纤维素 O-H 的伸缩振动[37]。在 2931 cm^{-1} 处的吸收峰主要来自亚甲基和羰基甲基的 C-H 的不对称拉伸和弯曲振动[38]。在 1611 cm^{-1} 处的吸收峰可能是由于 C=O 键伸缩振动，表明该 SDF 和 IDF 可能含有糖醛酸相关结构[39]。在 1200~900 cm^{-1} 处的强吸收带是碳水化合物的特征，红外光谱在此范围内含有多个吸收峰，为吡喃环的伸缩振动，说明文冠果膳食纤维中可能含有吡喃糖[40]。在 1015 cm^{-1} 处出现了很强的吸收峰，这可能与 C-O 拉伸振动有关，可能是由伯醇结构或糖环中的 C-O-H 和 C-O-C 结构产生的[41]，表明文冠果壳膳食纤维中可能含有葡萄糖[42]。

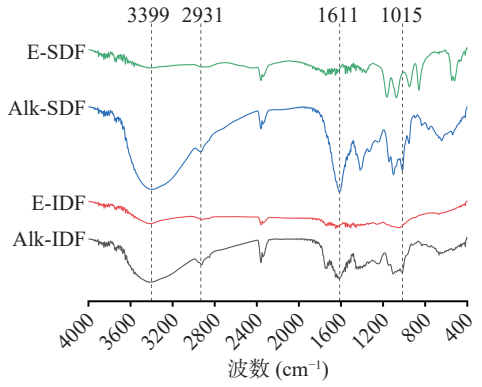


图 6　E-SDF、E-IDF、Alk-SDF、Alk-IDF 的傅里叶红外光谱

Fig.6　FTIR spectra of E-SDF, E-IDF, Alk-SDF, and Alk-IDF

2.3.3　扫描电镜分析　不同提取方式的膳食纤维的微观结构往往会存在差异，进而影响其功能特性。如图 7 所示，4 种膳食纤维的微观结构差异明显。E-SDF 放大 500 倍时，呈絮状层叠结构，形状表现为“棉花糖状”；当放大 2000 和 5000 倍时，E-SDF 呈现蓬松多孔的结构，这种结构使其在吸附水分子后易于膨胀，然而缺少精细的网络支撑，其结构在外力作用下相对脆弱，持水能力受到限制，这与曹煜等[43] 研究的超声辅助酶法提取的大白菜外叶可溶性膳食纤维的结构类似。观察 E-IDF、Alk-IDF 和 Alk-SDF 微观结构，当放大 500 倍时，可以观察到 E-IDF、Alk-IDF 和 Alk-SDF 均呈现褶皱状态；当放大 2000 倍和 5000 倍时，可以清晰地观察到 E-IDF 结构较为致密，使其难以截留小分子物质，Alk-SDF 虽然有较大的孔洞，但是表面光滑，能截留小分子的量相对较少，而 Alk-IDF 有明显褶皱和断层孔洞，这种结构特征使得 Alk-IDF 凹凸不平，不仅让 Alk-IDF 具有更大的比表面积，而且暴露出更多的亲水性位点和非极性基团[27]，使其通过氢键等分子间作用力，更易吸附并保留水和油脂等小分子。

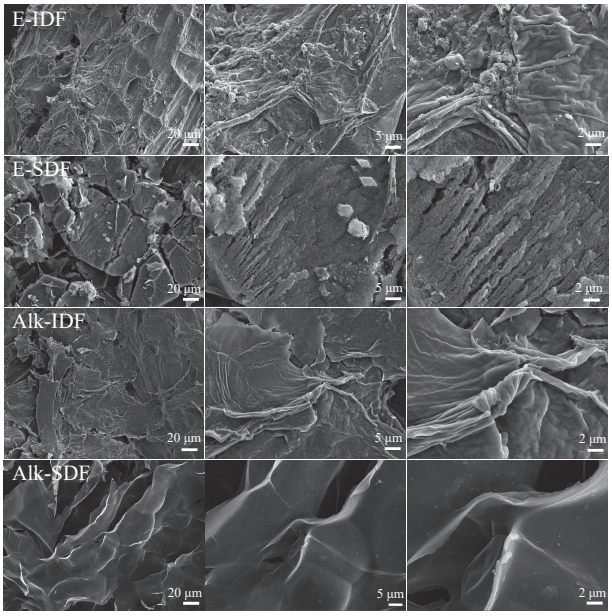


图 7　E-IDF、E-SDF、Alk-IDF、Alk-SDF 扫描电子显微镜图（500×，2000×，5000×）

Fig.7　SEM images of E-IDF, E-SDF, Alk-IDF, and Alk-SDF (500×, 2000×, 5000×)

2.4 提取方式对文冠果壳膳食纤维理化性质的影响

Alk-IDF、Alk-SDF、E-IDF、E-SDF 4 种膳食纤维的理化性质如表 7 所示。Alk-IDF 的持水力和持油力分别为 12.16±0.05 g/g 和 19.12±0.06 g/g，显著高于其他膳食纤维(P<0.05)，这可能是超声与碱处理通过剧烈破坏 Alk-IDF 的表面结构并增加其空隙，增强了对脂肪的吸附能力[44]，同时该处理使纤维分子氢键断裂、亲水基团如羟基等暴露，从而提升了表面亲水性[45]。尽管 Alk-SDF 有较多的亲水和亲油基团，但可能比表面积是影响膳食纤维持水力和持油力更为重要的原因[46]，这与扫描电镜分析的结果是一致的，Alk-IDF 表面褶皱多孔，大大增强了其持水和持油能力。膨胀力也是评价膳食纤维生理功能的重要指标[11]，对比 4 种膳食纤维，E-SDF 的膨胀力最大，为 4.98±0.10 mL/g，显著高于其他膳食纤维(P<0.05)，这是因为该膳食纤维的结构更加疏松，其吸水后膨胀的体积更大[47]。以上结果表明，膳食纤维的种类和提取方式对膳食纤维的结构有着较大的影响，导致其理化性质也有着较大的区别。

表 7 文冠果壳膳食纤维的理化性质

Table 7 Physicochemical properties of dietary fiber from *Xanthoceras sorbifolium* husk

样品	持水力(g/g)	持油力(g/g)	膨胀力(mL/g)
Alk-IDF	12.16±0.05^{a}	19.12±0.06^{a}	4.51±0.09^{b}
Alk-SDF	11.14±0.06^{b}	10.13±0.07^{b}	3.56±0.04^{c}
E-IDF	3.44±0.06^{c}	4.43±0.08^{c}	3.11±0.05^{d}
E-SDF	2.56±0.05^{d}	4.06±0.06^{d}	4.98±0.10^{a}

注：同一列不同小写字母(a~d)表示有显著性差异(P< 0.05)。

2.5 提取方式对文冠果壳膳食纤维抗氧化性的影响

2.5.1 还原力分析结果 还原力可以用于评价抗氧化物质抗氧化活性。抗氧化剂通过供电子体特征实现自由基清除效应，吸光度与还原力呈正相关[48]。图 8 为文冠果壳 E-SDF、E-IDF、Alk-SDF、Alk-IDF 的还原力检测结果，4 种膳食纤维的还原力均低于 V_C 组，且还原力随着文冠果壳膳食纤维质量浓度的增加而增加。当样品质量浓度在 0.2~0.7 mg/mL 范围内，Alk-SDF 还原力高于 E-SDF。邢颖等[49] 研究提取方法对荷叶多糖 DPPH 自由基清除能力的影响，发现碱法提取荷叶多糖的还原力高于酶法提取，本实验结果与之一致。当样品质量浓度大于 0.8 mg/mL 时，E-SDF 还原力高于其他膳食纤维，总体各组分的还原力差距较小。

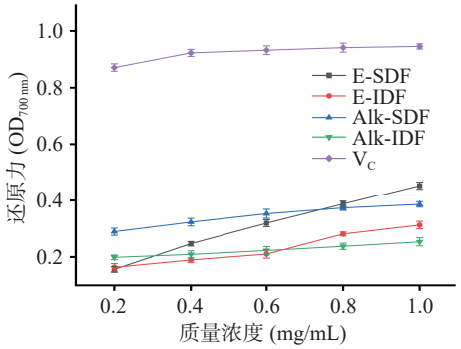


图 8 膳食纤维还原力测定结果

Fig.8 Determination results of reductive capacity in dietary fiber

2.5.2 DPPH 自由基清除率分析结果 DPPH 法是目前最常用的自由基清除测定方法之一[50]。常用于评价抗氧化物质的抗氧化能力。样品与 DPPH 自由基结合褪色，导致吸光值下降，因此可以通过检测反应体系在 517 nm 波长下的吸光度值来间接反映样品的抗氧化能力[51]。如图 9 所示，文冠果壳 4 种膳食纤维都具有 DPPH 自由基清除效果，且弱于 V_C 组，有明显的量效关系，自由基清除率随着样品质量浓度的增加，呈现上升趋势。在相同质量浓度下，SDF 的清除效果要高于 IDF。当浓度在 0.2~1.0 mg/mL 时，超声辅助碱法提取的同种文冠果壳膳食纤维的清除能力高于超声辅助酶法提取。这一差异可能源于两种方法作用机制的差异：超声辅助酶法仅能特异性水解特定类型的糖苷键，而超声辅助碱法能更广泛地裂解多种糖苷键。因此，超声辅助碱法能导致更多还原性末端基团的暴露，从而赋予其提取的膳食纤维更强的自由基清除活性。Geng 等[52] 研究提取方法对牛肝菌多糖 DPPH 自由基清除能力的影响，发现样品质量浓度在 0~4.0 mg/mL 范围内，碱法提取的牛肝菌多糖 DPPH 自由基清除能力高于酶法提取，本实验结果与之一致。

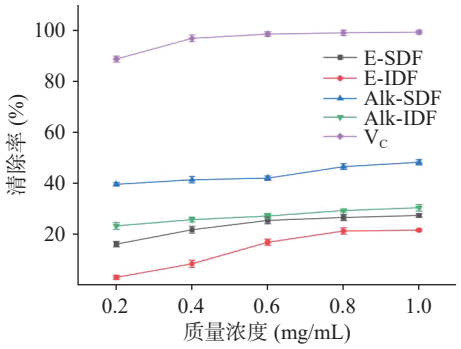


图 9 膳食纤维对 DPPH 自由基清除能力测定结果

Fig.9 Determination results of DPPH free radical scavenging capacity in dietary fiber

3 结论

本文探究了不同提取方式对文冠果壳膳食纤维得率、结构和功能特性的影响，研究结果表明：超声辅助碱法的最佳工艺条件为超声温度 61 ℃、超声时间 16 min、超声功率 210 W、NaOH 浓度 4.5%，超声辅助酶法的最佳工艺为酶添加量 7.9%、超声温度 55 ℃、超声功率 210 W、pH6.7、超声时间 30 min。在此工艺条件下，超声辅助碱法提取的 SDF 含量(13.17%±0.13%)高于超声辅助酶法，超声辅助酶法提取的 IDF 含量更高，为 63.71%±0.16%。在结构方面，不同方法提取的膳食纤维在微观结构上存在较大

差异，导致膳食纤维的理化性质显著不同，Alk-IDF 的持水力和持油力分别为 12.16±0.05 g/g 和 19.12±0.06 g/g，显著优于其他膳食纤维（P<0.05），E-SDF 的膨胀力（4.98±0.10 mL/g）最佳，样品质量浓度为 1 mg/mL 时，E-SDF 有较好的还原力，Alk-SDF 有较高的 DPPH 自由基清除能力。这表明超声辅助碱法更利于提取高含量的 SDF，而超声辅助酶法则在获取高品质 IDF 方面更具优势，说明文冠果壳膳食纤维具有良好的理化性质，是一种优质的膳食纤维来源。这不仅为木本油料加工废弃物的资源化利用提供了应用价值，也拓展了膳食纤维原料的多样性。本研究仍存在一些未深入探讨的问题，未来可对文冠果壳膳食纤维在体内外的功能活性及其相互作用机理方向进行进一步探究。

© 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］ ZANG E, QIU B, CHEN N, et al. *Xanthoceras sorbifolium* bunge: A review on botany, phytochemistry, pharmacology, and applications[J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 708549.

［2］ 张雪春, 刘江, 吴鑫, 等. 响应面法优化提取文冠果壳中多酚类物质及其体外抗氧化能力分析[J]. 中国油脂, 2018, 43(5): 117−122. ［ZHANG X C, LIU J, WU X, et al. Response surface methodology optimizing extraction and *in vitro* antioxidant activity of *Xanthoceras sorbifolia* polyphenols[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(5): 117−122.］

［3］ 陈燕勤, 王雪莉, 宋世方, 等. 磷酸活化文冠果果壳生物炭及其对亚甲基蓝的吸附性能[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 1−8. ［CHEN Yanqin, WANG Xueli, SONG Shifang, et al. Phosphoric acid activated *Xanthoceras* sorbifolia shell biochar and its adsorption performance for methylene blue[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 1−8.］

［4］ CHEN Xianqiang, LEI Zilun, CAO Jun, et al. Traditional uses, phytochemistry, pharmacology and current uses of underutilized *Xanthoceras sorbifolium* bunge: A review[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2022, 283: 114747.

［5］ CUI Wenjin, LI Ruihong, CHEN Xiaolan, et al. A review on triterpenoid and triterpenoid saponins from *Xanthoceras sorbifolium* Bung[J]. Carbohydrate Research, 2024, 539: 109120.

［6］ 王志玲, 张家兴, 王晓瞳, 等. 文冠果果壳提取物对植物病原菌的抑菌活性[J]. 山西农业大学学报（自然科学版）, 2020, 40(1): 51−58. ［WANG Zhiling, ZHANG Jiaxing, WANG Xiaotong, et al. Antibacterial activity of *Xanthoceras* sorbifolia shell extract against plant pathogens[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 51−58.］

［7］ 刘荣徽, 魏媛, 刘超, 等. 文冠果壳中总皂苷和总黄酮的抗氧化活性[J]. 中国油脂, 2024, 49(12): 120−123. ［LIU Ronghui, WEI Yuan, LIU Chao, et al. Antioxidant activities of total saponins and total flavonoids in *Xanthoceras* sorbifolia bunge shell[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(12): 120−123.］

［8］ WANG Hongyu, YAO Xudan, SUI Guoxin, et al. Properties of *Xanthoceras sorbifolia* husk fibers with chemical treatment for applications in polymer composites[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31(2): 164−170.

［9］ HE Yang, WANG Bixiang, WEN Liankui, et al. Effects of dietary fiber on human health[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(1): 1−10.

［10］ 刘金阁, 滕聪, 黎素玲, 等. 不同方式提取的绿豆膳食纤维理化性质比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 188−197. ［LIU Jinge, TENG Cong, LI Suling, et al. Comparison of physical and chemical properties of mung bean dietary fiber extracted by different methods[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(9): 188−197.］

［11］ 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. Study on ultrasonic-assisted enzymatic preparation and functional characteristics of dietary fiber from *Hippophae rhamnoides* pomace[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(9): 149−159.］

［12］ VILKHU K, MAWSON R, SIMONS L, et al. Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry: A review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(2): 161−169.

［13］ 王洪欣. 铜藻膳食纤维的提取、性质及可食用膜的制备[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020. ［WANG Hongxin. Extraction, properties and preparation of edible film of dietary fiber from *Sargassum horneri*[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2020.］

［14］ 刘东杰, 周心雨, 王锋, 等. 麻竹笋壳不溶性膳食纤维理化特性及其体外酵解对肠道微生物的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(24): 23−29,45. ［LIU Dongjie, ZHOU Xinyu, WANG Feng, et al. Physicochemical properties of insoluble dietary fiber from bamboo shoot shell and its effect on intestinal microorganisms by *in vitro* fermentation[J]. Food Research and Development, 2023, 44(24): 23−29,45.］

［15］ 陈淇, 程婷, 肖更生, 等. 榴莲壳和龙眼壳活性炭的制备、表征及其吸附性能研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(15): 46−54. ［CHEN Qi, CHENG Ting, XIAO Gengsheng, et al. Preparation, characterization and adsorption performance of activated carbon from durian shell and Longan shell[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(15): 46−54.］

［16］ 董玉玮, 苗敬芝, 邵福燕. 超声波辅助碱法提取大蒜可溶性膳食纤维及理化特性分析[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(10): 9−15. ［DONG Y W, MIAO J Z, SHAO F Y. Ultrasonic-assisted alkaline extraction of soluble dietary fiber from garlic and analysis of its physicochemical properties[J]. China Food Additives, 2023, 34(10): 9−15.］

［17］ 乔小全, 任广跃, 段续, 等. 超微粉碎辅助提取黑豆皮水溶性膳食纤维及其特性研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(11): 92−98. ［QIAO X Q, REN G Y, DUAN X, et al. Study on ultrafine grinding-assisted extraction of water-soluble dietary fiber from black bean hull and its properties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(11): 92−98,104.］

［18］ 巫永华, 刘梦虎, 孙悦, 等. 超声微波辅助酶法提取黑豆皮水溶性膳食纤维及理化特性分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 8−14. ［WU Yonghua, LIU Menghu, SUN Yue, et al. Ultrasonic-microwave-assisted enzymatic extraction of water-soluble dietary fiber from black bean skin and analysis of its physical and chemical characteristics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 8−14.］

［19］ 赵巧丽, 刘玉革, 林丽静, 等. 芒果皮渣多糖提取工艺优化及

其抗氧化活性研究[J]. 保鲜与加工, 2019(1): 102−110. [ZHAO Qiaoli, LIU Yuge, LIN Lijing, et al. Optimization of extraction technique of polysaccharides from mango pomace and its antioxidant activities evaluation[J]. Storage and Process, 2019(1): 102−110.]
[20] 马凤, 张振宇, 陈启苗, 等. 梨渣可溶性膳食纤维提取工艺优化及功能特性分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 229−238. [MA Feng, ZHANG Zhenyu, CHEN Qimiao, et al. Optimization of extraction technology and functional characteristics analysis of soluble dietary fiber from pear pomace[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(3): 229−238.]
[21] ESCLAPEZ M D, GARCÍA-PÉREZ J V, MULET A, et al. Ultrasound-assisted extraction of natural products[J]. Food Engineering Reviews, 2011, 3(2): 108−120.
[22] MARTINEZ-SOLANO K C, GARCIA-CARRERA N A, TEJADA-ORTIGOZA V, et al. Ultrasound application for the extraction and modification of fiber-rich by-products[J]. Food Engineering Reviews, 2021, 13(3): 524−543.
[23] PRAKASH MARAN J, MANIKANDAN S, THIRUGNANASAMBANDHAM K, et al. Box–Behnken design based statistical modeling for ultrasound-assisted extraction of corn silk polysaccharide[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(1): 604−611.
[24] IBRAHIM M S, NADEEM M, KHALID W, et al. Optimization of ultrasound assisted extraction and characterization of functional properties of dietary fiber from oat cultivar S2000[J]. LWT, 2024, 197: 115875.
[25] YU Panling, YU Changxia, CHEN Mingjie, et al. Box-behnken design for optimizing ultrasonic-assisted enzymatic extraction of soluble dietary fiber from *Pleurotus* citrinopilestus[J]. Horticulturae, 2023, 9(12): 1322.
[26] KUMARI T, DAS A B, DEKA S C. Impact of extraction methods on functional properties and extraction kinetic of insoluble dietary fiber from green pea peels: A comparative analysis[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(4): e16476.
[27] 关红艳, 杨梦昕, 宗宝, 等. 响应面法优化超声辅助碱法提取莴笋皮中的膳食纤维[J]. 食品安全导刊, 2023(24): 130−135. [GUAN Hongyan, YANG Mengxin, ZONG Bao, et al. Optimization of ultrasonic-assisted alkaline extraction of dietary fiber from lettuce peel by response surface methodology[J]. China Food Safety Magazine, 2023(24): 130−135.]
[28] 杨帆, 孙孝帆, 李德海, 等. 超声-酶辅助碱法提取黑木耳膳食纤维及对糖尿病小鼠的降血糖作用[J]. 精细化工, 2024, 41(8): 1754−1764,1847. [YANG Fan, SUN Xiaofan, LI Dehai, et al. Ultrasound-enzyme-assisted alkali method for extracting dietary fiber from Auricularia auricula and its hypoglycemic effect on diabetic mice[J]. Fine Chemicals, 2024, 41(8): 1754−1764,1847.]
[29] CHEMAT F, ZILL-E-HUMA, KHAN M K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 813−835.
[30] 杜京京, 朱倩, 郭家刚, 等. 纤维素酶/木聚糖酶复合酶解竹笋粉的工艺优化及其功能特性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(10): 148−154. [DU Jingjing, ZHU Qian, GUO Jiagang, et al. Process optimization and functional characterization of bamboo shoot powder modified by composite cellulase/xylanase hydrolysis[J]. Food Research and Development, 2025, 46(10): 148−154.]
[31] 赵文亮, 陈从雯, 熊玲, 等. 超声辅助发酵制备麦麸可溶性膳食纤维的工艺优化及结构功能研究[J/OL]. 中国食品学报, 1−15[2026-01-05]. https://link.cnki.net/urlid/11.4528.TS.20250612.1553.014. [ZHAO W L, CHEN C W, XIONG L, et al. Optimisation of ultrasound-assisted fermentation process and study on structure and functional properties of soluble dietary fibre from wheat bran[J/OL]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 1−15[2026-01-05]. https://link.cnki.net/urlid/11.4528.TS.20250612.1553.014.]
[32] 王萌, 刘泉, 郑喜群, 等. 高温蒸煮联合超声复合酶法改性麦麸膳食纤维工艺优化及体外益生活性[J/OL]. 食品工业科技, 1−16[2026-01-05]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025020204. [WANG M, LIU Q, ZHENG X Q, et al. Modification of wheat bran dietary fiber using high-temperature steaming coupled with an ultrasound-assisted compound enzymatic method: process optimization and effects on *in vitro* probiotic activity[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−16[2026-01-05]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025020204.]
[33] 王天, 江含秀, 路丽妮, 等. 藜麦可溶性膳食纤维提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(2): 137−146. [WANG Tian, JIANG Hanxiu, LU Lini, et al. Optimization of extraction process of quinoa soluble dietary fiber and its antioxidant activity[J]. China Food Additives, 2022, 33(2): 137−146.]
[34] 宋云禹. 毛葱膳食纤维改性工艺优化及其结构与性质的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018. [SONG Yunyu. Optimization of modification process and research on structure and property of the tillering onion dietary fiber[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.]
[35] 王兆为. 发酵-超声联合提取豆渣可溶性膳食纤维及其性质研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2022. [WANG Z W. Study on soluble dietary fiber and properties of soybean residue extracted by combined fermentation and ultrasound[D]. Shenyang: Liaoning University, 2022.]
[36] 李国强, 王倩楠, 乔亚俊, 等. 枸杞多糖对狭小空间应激引发肠道炎症的干预作用[J/OL]. 天然产物研究与开发, 1−12[2026-01-05]. https://link.cnki.net/urlid/51.1335.Q.20250410.1019.004. [LI G Q, WANG Q N, QIAO Y J, et al. Intervention effect of Lycium barbarum polysaccharides on intestinal inflammation induced by confined space stress[J/OL]. Natural Product Research and Development, 1−12[2026-01-05]. https://link.cnki.net/urlid/51.1335.Q.20250410.1019.004.]
[37] YAN Jingkun, WU Lixia, CAI Wudan, et al. Subcritical water extraction-based methods affect the physicochemical and functional properties of soluble dietary fibers from wheat bran[J]. Food Chemistry, 2019, 298: 124987.
[38] DONG Yufan, LI Qin, ZHAO Yihe, et al. Effects of ultrasonic assisted high-temperature cooking method on the physicochemical structure characteristics and *in vitro* antioxidant capacities of dietary fiber from *Dendrocalamus brandisii* Munro shoots[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 97: 106462.
[39] WANG Xiaoyin, YIN Junyi, NIE Shaoping, et al. Isolation, purification and physicochemical properties of polysaccharide from fruiting body of *Hericium erinaceus* and its effect on colonic health of mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 1310−1319.
[40] DUAN Zhen, ZHANG Yang, ZHU Caiping, et al. Structural characterization of phosphorylated *Pleurotus ostreatus* polysaccharide and its hepatoprotective effect on carbon tetrachloride-induced liver injury in mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 533−547.
[41] 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.
[42] GUO Yiting, LIU Wan, WU Bengang, et al. Modification of garlic skin dietary fiber with twin-screw extrusion process and *in vivo* evaluation of Pb binding[J]. Food Chemistry, 2018, 268: 550−557.
[43] 曹煜, 周茜, 张家琦, 等. 大白菜外叶可溶性膳食纤维结构表征及体外活性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 91−103. [CAO Y, ZHOU Q, ZHANG J Q, et al. Structure and *in vitro* activity characterization of soluble dietary fiber from the outer leaves of Chinese cabbage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 91−103.]
[44] 王鑫, 课净璇, 王亚斌, 等. 提取方法对黄精渣水不溶性膳食纤维结构和功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 187−195. [WANG Xin, KE Jingxuan, WANG Yabin, et al. Effects of extraction methods on structural and functional properties of water-insoluble dietary fiber from polygonatum sibiricum residue [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 187−195.]
[45] 王楠, 宋昕凌, 马彪, 等. 酶法结合化学改性对油棕粕膳食纤维理化性质与降血糖活性的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1−14 [2026-01-05]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025050200. [WANG N, SONG X L, MA B, et al. Effects of enzymolysis combined with chemical modification on physicochemical properties and hypoglycemic activity of oil palm kernel expeller dietary fiber[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−14[2026-01-05]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025050200.]
[46] HASSAN Z, IMRAN M, AHMAD M H, et al. Ultrasound-assisted modification of insoluble dietary fiber from *Chia* (*Salvia hispanica* L.) seeds[J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021(1): 5035299.
[47] 李杨, 胡森, 孙禹凡, 等. 提取方式对大豆膳食纤维理化及功能特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 18−24. [LI Yang, HU Miao, SUN Yufan, et al. Effect of different extraction methods on physicochemical and functional properties of soybean dietary fiber[J]. Food Science, 2018, 39(21): 18−24.]
[48] GUPTA S, PRAKASH J. Studies on Indian green leafy vegetables for their antioxidant activity[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2009, 64(1): 39−45.
[49] 邢颖, 景艳芳. 提取方法对荷叶多糖得率及抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 166−169,175. [XING Ying, JING Yanfang. Effect of extraction methods on yield and antioxidant activity of *Lotus* leaf polysaccharide[J]. Food & Machinery, 2020, 36(6): 166−169,175.]
[50] 李依娜, 余元善, 胡腾根, 等. 荔枝果渣不溶性膳食纤维的结构、体外抗氧化及降血糖活性评价[J]. 中国食品学报, 2023, 23(10): 195−205. [LI Yina, YU Yuanshan, HU Tenggen, et al. Evaluation of the structure, *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activity of insoluble dietary fiber from litchi pomace[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(10): 195−205.]
[51] 刘玉婷, 李井雷. 多糖体外抗氧化活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 214−219. [LIU Yuting, LI Jinglei. Advances in research on antioxidant activity of polysaccharides *in vitro*[J]. Food Research and Development, 2019, 40(6): 214−219.]
[52] GENG Xueran, GUO Dongdong, WU Bin, et al. Effects of different extraction methods on the physico-chemical characteristics and biological activities of polysaccharides from *Clitocybe squamulosa*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259(Pt 2): 129234.