

乳酸菌发酵对猕猴桃果渣可溶性膳食纤维制备和理化性质的影响

周元, 张船, 孙雪阳, 郑悦, 傅虹飞*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了提高乳酸菌发酵制备果蔬加工副产物可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 的得率, 该研究以“徐香”猕猴桃果渣为原料采取单因素试验和正交试验优化其制备工艺, 并与酸提法及酶提法制备的样品进行了比较。结果表明, 发酵法制备 SDF 的最佳工艺条件为: 料液比 1:20 (g/mL)、发酵时间 48 h、发酵温度 35 ℃、起始 pH 值 3.0、接种量 10% (发酵体系体积分数), 在该条件下猕猴桃果渣 SDF 的得率为 17.83%, 高于酸提法 (14.93%) 和酶提法 (15.69%)。理化性质分析表明, 发酵法制备的 SDF 持水力 (11.01 g/g)、溶胀力 (8.66 mL/g)、溶解率 (90.12%)、结合水能力 (15.46 g/g) 及亚硝酸盐吸附力 889.61 $\mu\text{g/g}$ (pH 值 2.0), 282.80 $\mu\text{g/g}$ (pH 值 7.0), 综合表现优于酸提法和酶提法制备的样品。上述研究结果表明, 猕猴桃果渣是优质的可溶性膳食纤维来源, 研究为猕猴桃加工副产物的高值化利用提供了理论依据。

关键词: 猕猴桃果渣; 乳酸菌发酵; 可溶性膳食纤维; 理化性质

文章编号: 1673-9078(2025)10-53-62

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1647

Influence of Lactic Acid Bacteria Fermentation on the Preparation and Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber from Kiwifruit Pomace

ZHOU Yuan, ZHANG Chuan, SUN Xueyang, ZHENG Yue, FU Hongfei*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to improve the yield of soluble dietary fiber (SDF) prepared from fruit and vegetable pomace by lactic acid bacteria fermentation, the "Xuxiang" kiwifruit pomace was used as the raw material in this research. Single-factor experiments and orthogonal experiments were conducted to optimize the preparation process, and the samples prepared by fermentation were compared with those prepared by the acid extraction and enzymatic assisted extraction. The results showed that the optimal process conditions for preparing SDF by fermentation were: material to liquid ratio, 1:20 (g/mL); fermentation time, 48 hours; fermentation temperature, 35 ℃; initial pH, 3.0; inoculum volume, 10% (volume fraction of fermentation system). Under these conditions, the yield of SDF from kiwifruit pomace was 17.83%, which was higher than those of the acid method (14.93%) and enzymatic method (15.69%). The analysis of physicochemical properties revealed that the SDF prepared by fermentation had a water holding capacity of 11.01 g/g, swelling capacity of 8.66 mL/g, solubility of 90.12%, water-binding capacity of 15.46 g/g, and nitrite adsorption capacities of 889.61 $\mu\text{g/g}$ at pH 2.0 and 282.80 $\mu\text{g/g}$ at pH 7.0, showing superior properties of this SDF compared to those of the

引文格式:

周元,张船,孙雪阳,等.乳酸菌发酵对猕猴桃果渣可溶性膳食纤维制备和理化性质的影响[J].现代食品科技,2025,41(10): 53-62.

ZHOU Yuan, ZHANG Chuan, SUN Xueyang, et al. Influence of lactic acid bacteria fermentation on the preparation and physicochemical properties of soluble dietary fiber from kiwifruit pomace [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 53-62.

收稿日期: 2024-11-05; 修回日期: 2024-12-13; 接受日期: 2024-12-23

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBNY-165)

作者简介: 周元 (1979-), 女, 博士, 高级实验师, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: yuan0114@163.com

通讯作者: 傅虹飞 (1983-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工, E-mail: fuhongfei@nwsuaf.edu.cn

SDF samples obtained by the acid and enzymatic methods. The above research results indicate that kiwifruit pomace is a high-quality source of soluble dietary fiber, and the research provides a theoretical basis for the high-value utilization of kiwifruit processing by-products.

Key words: kiwifruit pomace; lactic acid bacteria fermentation; soluble dietary fiber; physicochemical properties

膳食纤维根据其溶解性特点,分为可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fiber, SDF)与不溶性膳食纤维(Insoluble Dietary Fiber, IDF)^[1]。SDF主要包括果胶、半纤维素和低聚糖等,具有降低血脂、调节血糖、促进肠道健康等多种功能^[2]。IDF主要包括木质素、纤维素以及少量的半纤维素,尽管IDF不直接参与人体血液循环,但对肠道健康有显著影响,有润肠通便等作用^[3]。

膳食纤维主要来源包括水果、蔬菜、全谷物和豆类等,特别是果蔬加工的副产物如果渣和皮渣等,其膳食纤维含量相对丰富^[4]。猕猴桃,亦被称为奇异果,属于猕猴桃科猕猴桃属果实。在猕猴桃的加工产业链中,产生大量的皮渣和果渣等副产物,仅有小部分用于动物饲料和肥料生产等,总体利用程度不高,因此发掘利用猕猴桃果渣功能营养成分是猕猴桃深加工发展过程中亟需解决的关键问题之一。

猕猴桃果渣作为猕猴桃加工后的副产品,是潜在的膳食纤维来源^[5,6]。膳食纤维提取制备方法包括酸提法^[6]、碱提法^[7]、酶提法^[8]、发酵法等^[9]。发酵法具有过程温和、化学试剂使用少等优点,且有改善膳食纤维性质等效果^[10],采用的微生物包括绿色木霉^[11]、黑曲霉^[12]、乳酸菌^[13]等。有学者^[14]比较了不同方法制备的亚麻籽粕膳食纤维,发现亚麻籽粕膳食纤维经乳酸菌发酵改性后品质最优。四川腌菜中的膳食纤维经植物乳酸菌和乳酸链球菌混合菌种发酵后,其理化性质包括溶胀性、保水性、吸附重金属离子和胆酸盐等能力,以及对 α -淀粉酶的抑制力等均得到了提升^[15]。

因此,本文选用猕猴桃果渣为原料进行乳酸菌发酵法制备SDF,优化发酵工艺,测定单糖组成、分子量等,并将制备得到的SDF和IDF与酸提法或酶提法制备产物进行比较,比较因素包括持水力、溶胀力、溶解率、持油力和对亚硝酸盐的吸附能力等,为猕猴桃果渣膳食纤维的发酵法制备工艺优化提供依据,为优质膳食纤维的开发利用提供思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 原料与试剂

“徐香”猕猴桃,陕西百恒有机果园;乳酸菌发酵粉(植物乳杆菌、嗜酸乳杆菌、鼠李糖乳杆菌),北京川秀国际贸易有限公司;MRS肉汤培养基、MRS培养

基,北京陆桥技术股份有限公司;氯化钠(AR)、无水乙醇(AR)、盐酸(AR)、氢氧化钠(AR)、蔗糖(AR)、冰醋酸(AR),广东光华科技股份有限公司;对氨基苯磺酸(AR)、盐酸萘乙二胺(AR),上海麦克林生化科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

WJS1221F型榨汁机,美的集团股份有限公司;JM-A2002型电子天平,诸暨市超泽衡器设备有限公司;FLBP-250型万能高速粉碎机,上海菲力博食品机械有限公司;YT-CJ-1N型超净工作台,北京亚泰科隆仪器技术有限公司;HH-S4型数显恒温水浴锅,江苏金怡仪器科技有限公司;MJX-150培养箱,中仪国科(北京)科技有限公司;UV-2000型分光光度计,尤尼柯(上海)仪器有限公司;SHA-BA水浴恒温振荡器,江苏盛蓝仪器制造有限公司;LC-20A高效液相色谱仪,日本岛津制作所;Vertex70型傅里叶红外光谱变换仪,德国布鲁克股份公司。

1.2 酸提法和酶提法制备猕猴桃果渣膳食纤维

1.2.1 猕猴桃果渣的制备

“徐香”猕猴桃鲜果去除病果和坏果,手工分离果皮和果肉,果肉经压榨后分别得到猕猴桃果汁和果渣,果渣45℃烘干24h,然后高速粉碎机粉碎,过60目筛后备用。猕猴桃果渣含水量为16.48%±0.11%。

1.2.2 酸提法制备果渣膳食纤维工艺

参考文献方法^[16]并稍作修改,进行酸提法制备SDF和IDF。工艺流程如下:

猕猴桃果渣→1:20加水→调pH值1.6→85℃水浴150min→冷却→调pH值7.0→离心取上清(沉淀记为IDF1)→醇沉→离心→干燥→SDF1

1.2.3 酶法制备果渣膳食纤维工艺

参考文献方法^[16]并稍作修改,进行酶法制备SDF和IDF。工艺流程如下:

猕猴桃果渣→1:20加水→调pH值6.0→加入耐高温 α -淀粉酶(20000U/mL)1.25mL→95℃水浴震荡1h→冷却→调pH值4.5→加入糖化酶(10000U/mL)5mL→60℃震荡30min→调pH值7.0→加入中性蛋白酶(10000U/mL)5mL→55℃酶解1h→沸水浴酶灭活15min→冷却→离心取上清(沉淀记为IDF2)→醇沉→离心→干燥→SDF2

1.3 发酵法制备猕猴桃果渣膳食纤维

1.3.1 发酵法制备果渣膳食纤维工艺

参考文献方法^[13]，采用发酵法制备 SDF 和 IDF。工艺流程如下：

猕猴桃果渣→调配→灭菌→接种→发酵→离心取上清（沉淀记为 IDF3）→醇沉→抽滤→干燥→ SDF3

称取 2.000 g 猕猴桃果渣，按设定的料液比加入蒸馏水，以及猕猴桃果渣质量 2% 的脱脂奶粉和白砂糖，于 121 ℃ 灭菌 15 min。按照接种量接入乳酸菌，按设定的发酵温度、发酵时间进行发酵，于不同时间点取样，8 000 r/min 离心 15 min，收集上清液。向上清液中加入 4 倍体积的无水乙醇，抽滤分离出沉淀，干燥至恒重后称重。SDF 得率（Yield）的计算如式（1）所示：

$$Y = \frac{W_1}{W_0} \times 100\%$$
(1)

式中：

Y——可溶性膳食纤维得率，%；

W₁——SDF 质量，g；

W₀——猕猴桃果渣的质量，g。

1.3.2 发酵菌种培养

将适量的乳酸菌粉接种至 MRS 肉汤培养基中，于 37 ℃ 的培养箱中进行培养，培养时间控制在 24-48 h。利用平板计数法对发酵种子液的活菌数进行测定，测得发酵活菌数处于 10⁹~10¹⁰ CFU/mL 的范围内。

1.3.3 单因素试验

1.3.3.1 料液比

取猕猴桃果渣 2.000 g，按料液比 1:10、1:15、1:20、1:25、1:30，发酵 48 h，37 ℃ 恒温，起始 pH 值为 4.0，接种量 10%（发酵体系体积分数），发酵培养后计算 SDF 得率。

1.3.3.2 发酵时间

取猕猴桃果渣 2.000 g，料液比 1:20，发酵时间分别为 24、36、48、60、72 h，37 ℃ 恒温，起始 pH 值为 4.0，接种量 10%，发酵培养后计算 SDF 得率。

1.3.3.3 发酵温度

取猕猴桃果渣 2.000 g，料液比 1:20，发酵 48 h，温度为 33、35、37、39、41 ℃，起始 pH 值为 4.0，接种量 10%，发酵培养计算 SDF 得率。

1.3.3.4 起始pH值

取猕猴桃果渣 2.000 g，料液比 1:20，发酵 48 h，37 ℃ 恒温，起始 pH 值为 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0，接种量 10%，发酵培养计算 SDF 得率。

1.3.3.5 接种量

取猕猴桃果渣 2.000 g，料液比 1:20，发酵 48 h，

37 ℃ 恒温，起始 pH 值 4.0，接种量 6%、8%、10%、12%、14%（发酵体系体积分数），发酵培养后计算 SDF 得率。

1.3.4 正交试验设计

表 1 正交实验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素				
	A 料液比 (g/mL)	B 接种量 /%	C 起始 pH 值	D 发酵 时间/h	E 发酵 温度/℃
1	1:15	8	3.0	36	35
2	1:20	10	4.0	48	37
3	1:25	12	5.0	60	39

在单因素试验的基础上，每个因素选取 3 个对 SDF 得率影响较大的水平，以 SDF 得率为指标，选取五因素三水平的 L₁₈（3⁵）正交试验进行工艺条件优化，因素水平见表 1。

1.4 理化性质分析

1.4.1 SDF单糖组成测定

参考文献方法^[16]，采用高效液相色谱法检测样品的单糖组成。取 0.01 g SDF 样品加入 2 mL 三氟乙酸（2 mol/L），100 ℃ 下水解 8 h，减压旋蒸去除三氟乙酸，用 1 mL 甲醇洗涤后加入 1 mL 蒸馏水中溶解。然后用 0.5 mol/L PMP-甲醇溶液和 0.3 mol/L NaOH 在 70 ℃ 下衍生 SDF 的水解液 1 h。室温冷却后，用 300 μL 0.3 mol/L HCl 和 1 mL 氯仿中和反应产物。4 800 r/min 离心 10 min，收集上清液，加入 1 mL 氯仿重复提取 3 次，合并上清液，0.22 μm 膜过滤后高效液相色谱法检测。进样体积为 20 μL；流动相 A、B 液分别为乙腈和 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液（pH 值 6.7），A:B=18:83；流量为 1 mL/min。

1.4.2 SDF分子量测定

参考文献方法^[16]，采用高效液相体积排阻色谱法测定 SDF1、SDF2 和 SDF3 的重均分子量（M_w）。流动相为 0.05 mol/L NaCl 溶液，以 0.6 mL/min 洗脱 60 min，柱温 40 ℃，进样量 20 μL。将 SDF 样品配制成水溶液（5 mg/mL），并通过 0.22 μm 膜过滤。制备右旋糖酐标准曲线，计算 SDF 的分子量。

1.4.3 SDF和IDF红外光谱测定

参考文献方法^[16]，将适量干燥的猕猴桃果渣 SDF 或 IDF 样品粉末与溴化钾粉末按质量比 1:100 混合均匀后进行压片，然后在 400~4 000 cm⁻¹ 的波数范围内测定红外光谱，从而对猕猴桃果渣 SDF 和 IDF 组分进行官能团分析。

1.4.4 水合能力

1.4.4.1 持水力测定

参考文献方法^[16]进行持水力(Water Holding Capacity, WHC)测定。准确称量 0.250 g 的 SDF、IDF 样品, 记为 m_0 , 装入已知质量为 m_1 的 50 mL 离心管, 向离心管中加入 5 mL 蒸馏水, 静置 12 h, 加入四倍体积的无水乙醇, 醇沉 4~5 h, 10 000 r/min 离心 10 min 去除上清液, 称量沉淀物和离心管重, 记为 m_2 。样品持水力计算为式(2):

$$B_1 = \frac{m_2 - m_1 - m_0}{m_0} \quad (2)$$

式中:

B_1 ——持水力(WHC), g/g;

m_0 ——样品质量, g;

m_1 ——离心管质量, g;

m_2 ——离心管与样品湿重之和, g。

1.4.4.2 溶胀力测定

参考文献方法^[16]进行 SDF 溶胀力(Swelling Capacity, SC)测定。准确称量 0.500 g 的 SDF、IDF 样品, 记为 m_0 , 测出样品初始体积记为 X_1 , 加入 10 mL 蒸馏水混匀, 静置 24 h, 加入四倍体积的无水乙醇, 醇沉 4~5 h, 再以 10 000 r/min 离心 10 min, 除去上清, 读出沉淀所占的体积记为 X_2 。溶胀力计算为式(3):

$$B_2 = \frac{X_2 - X_1}{m_0} \quad (3)$$

式中:

B_2 ——溶胀力(SC), mL/g;

X_1 ——样品膨胀前的体积, mL;

X_2 ——样品膨胀后的体积, mL;

m_0 ——样品质量, g。

1.4.4.3 溶解率测定

参考文献方法^[16]进行溶解率(Solubility)测定。称取 SDF 0.250 g 装入 50 mL 离心管, 加 20 mL 蒸馏水, 以 10 °C 为梯度, 分别将样品置于 30~90 °C 恒温水浴中, 震荡保温 0.5 h。2 500 r/min 离心 5 min 后取上清液, 倒入称量皿中, 105 °C 烘干至恒重。样品溶解率计算为式(4):

$$S = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

S ——溶解率, %;

m_1 ——称量皿质量, g;

m_2 ——烘干后称量皿质量, g;

m ——样品质量, g。

1.4.4.4 结合水能力测定

参考文献方法^[16]进行 SDF 结合水能力(Water Binding Capacity, WBC)测定。称取 0.500 g SDF、IDF 样品(M_0)至已知质量(M_1)离心管, 加 10 mL 蒸馏水混匀, 静置 24 h, 10 000 r/min 离心 10 min 去除上清液, 沉淀称重(M_2), 120 °C 干燥 2 h, 冷却称重(M_3)。结合水能力计算为式(5):

$$B_3 = \frac{M_2 - M_3}{M_0} \quad (5)$$

式中:

B_3 ——结合水能力(WBC), g/g;

M_0 ——样品质量, g;

M_2 ——干燥前离心管与样品质量, g;

M_3 ——干燥后离心管与样品质量, g。

考虑到 SDF 在水中溶解率大, 因此需要以 SDF 溶解率对结合水能力进行修正。修正后结合水能力计算为式(6):

$$B_4 = \frac{M_2 - M_3}{M_0 \times (1 - S)} \quad (6)$$

式中:

B_4 ——结合水能力(WBC), g/g;

M_0 ——样品质量, g;

M_3 ——干燥后离心管与样品质量, g;

S ——SDF 的溶解率, %。

1.4.5 持油力测定

参考文献方法^[16]进行 SDF 持油力(Oil Holding Capacity, OHC)测定。称取 0.500 g 的 SDF、IDF 样品(m)加入 4 g 豆油混匀, 37 °C 水浴 60 min, 10 000 r/min 离心 10 min, 除去豆油, 称取剩余沉淀重记为 m_1 , 持油力计算为式(7):

$$B_5 = \frac{m_1 - m}{m} \quad (7)$$

式中:

B_5 ——持油力(OHC), g/g;

m ——样品质量, g;

m_1 ——吸油后样品质量, g。

1.4.6 亚硝酸盐离子吸附能力测定

参考文献方法^[17]进行亚硝酸盐离子吸附能力(Nitrite Ion Adsorption Capacity, NIAC)测定。将 0.050 g SDF 或 IDF 样品与 25 mL 亚硝酸钠溶液(1 μg/g)混合, 调 pH 值至 7.0; 将 0.050 g SDF 或 IDF 样品与 100 mL 亚硝酸钠溶液(1 μg/g)混合, 调 pH 值至 2.0。然后将混合物于 37 °C、120 r/min 振荡 2 h, 室温下 4 000 r/min 离心 20 min。吸取 10 mL 上清液, 分别置

于 25 mL 带塞试管中,加入 4.5 mL 氯化铵缓冲溶液和 2.5 mL 冰乙酸后立即加入 5.0 mL 显色剂(10 g/L 对氨基苯磺酸和 1 g/L 盐酸萘乙二胺溶液等体积混合),用水稀释至 25 mL,混匀,在暗处放置 25 min,在 550 nm 波长处测定吸光度^[9]。按公式(8)计算。

$$D = \frac{M_2 - M_1}{M_0} \quad (8)$$

式中:

D —亚硝酸盐离子吸附能力(NIAC), $\mu\text{g/g}$;

M_1 —吸附后亚硝酸钠溶液中亚硝酸钠的残留质量, μg ;

M_2 —亚硝酸钠溶液中亚硝酸钠的初始质量, μg ;

M_0 —样品质量, g。

1.5 数据处理

结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示,作图采用 Origin Pro 2021 软件,单因素方差分析采用 SPSS Statistics 26.0 软件,显著性分析采用邓肯检验, $P < 0.05$ 表示差异达显著水平, $P < 0.01$ 表示差异达极显著水平。

2 结果与讨论

2.1 发酵法制备SDF单因素试验

2.1.1 料液比

由图 1 可知,当料液比在 1:10~1:25 (g/mL) 间时,随着装液量的增加, SDF 得率随之增加,当料液比达 1:25 (g/mL) 时 SDF 得率达到最大值,其后装液量的增加导致 SDF 呈现下降的趋势。其原因在于料液比过低时,发酵体系中菌体与原料不能充分接触,从而降低发酵效果^[18]。

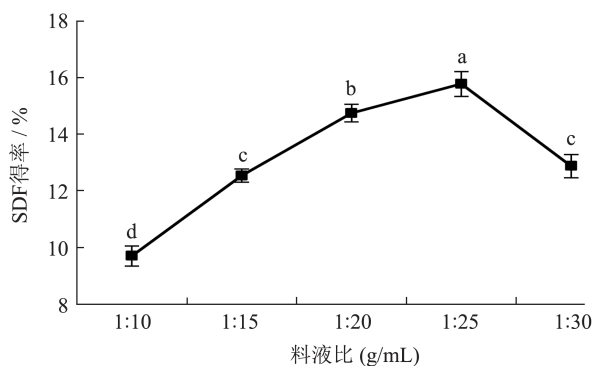


图 1 料液比对猕猴桃果渣可溶性膳食纤维得率的影响

Fig.1 Effects of solid-liquid ratio on the yield of soluble dietary fiber from kiwifruit pomace

注:上标注字母不同时,表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。图 2~5、7、8 同。

2.1.2 发酵时间

由图 2 可知,发酵 48 h 前,随着发酵时间延

长,猕猴桃果渣 SDF 得率呈现上升趋势,其可能的原因为果胶是 SDF 的主要成分,而其中的原果胶溶解性较差,若发酵时间不充分,原果胶不能充分溶出,致 SDF 得率较低^[19]。随着发酵时间的继续延长,原料中的营养成分逐渐减少,菌株生长繁殖速度下降,次级代谢产物逐渐增加,并消耗了部分 SDF^[10]。

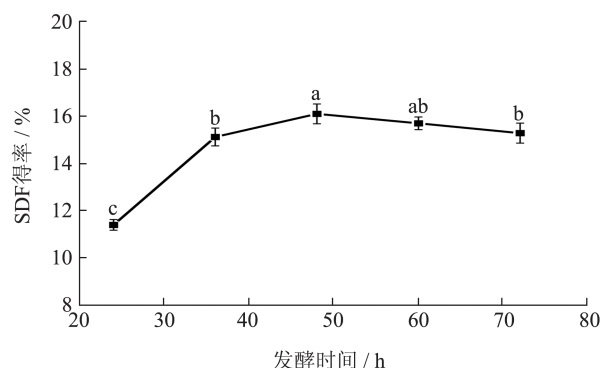


图 2 发酵时间对猕猴桃果渣可溶性膳食纤维产率的影响

Fig.2 Effects of fermentation time on the yield of soluble dietary fiber from kiwifruit pomace

2.1.3 发酵温度

由图 3 可知,温度低于 37 °C, SDF 得率随温度升高而增加,37 °C 时达到峰值;超过 37 °C 则开始降低。其原因可能为当发酵温度较低时,菌体生长代谢较为缓慢,不利于发酵活动的进行,随着发酵温度上升, SDF 得率提高,至最高值后下降^[19]。当发酵温度远离最适温度,温度过高会影响乳酸菌的生长以及酶的活性^[10],使 SDF 得率降低。

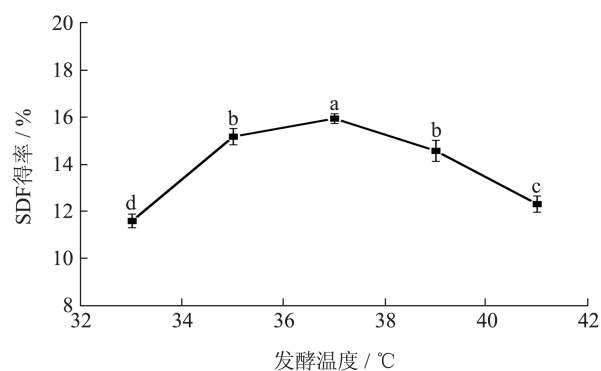


图 3 发酵温度对猕猴桃果渣可溶性膳食纤维产率的影响

Fig.3 Effects of fermentation temperature on the yield of soluble dietary fiber from kiwifruit pomace

2.1.4 起始pH值

由图 4 可知,在起始 pH 值为 3.0 或 4.0 时 SDF 得率无显著性差异 ($P > 0.05$),此时 SDF 得率达到最大

值。起始 pH 值 <3.0 时, SDF 的得率降低, 可能与乳酸菌的生长和繁殖受到抑制有关。相关文献表明, 发酵环境 pH 值过高或过低, 微生物菌群均不能很好地生长繁殖, pH 值越靠近菌种生长繁殖的适宜 pH 值, SDF 产率就越高^[10]。

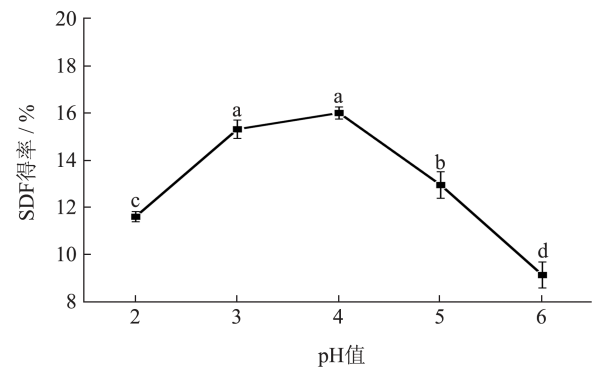


图 4 起始 pH 值对猕猴桃果渣可溶性膳食纤维得率的影响
Fig.4 Effect of initial pH value onthe yield of soluble dietary fiber from kiwifruit pomace

2.1.5 接种量

由图 5 可知, 接种量为 6%~14% 时, 猕猴桃果渣 SDF 的得率会先提高后降低, 当接种量增至 10% 时, SDF 的得率达到峰值。推测是当接种量较低时, 乳酸菌的代谢产物量如酸和酶不足, 导致 SDF 得率较低。随着接种量的增加, 乳酸菌对底物进行充分利用, 使 SDF 得率增加。在接种量大于 10% 后, SDF 得率开始下降, 原因可能为活菌数高时, 菌体繁殖旺盛, 快速消耗底物营养, 导致后续发酵动力不足^[20]。文献认为^[10], 菌种繁殖量水平会随着菌种接种量的增加而提升, 进而增加纤维素酶水平, 提升 SDF 产率; 但是菌种大量繁殖将消耗大量营养物质, 产酸过多, 影响纤维素酶分泌, 此外, 发酵后期 SDF 可能会被菌种消耗利用, 因此菌种接种量过多时, SDF 产率不升反降。

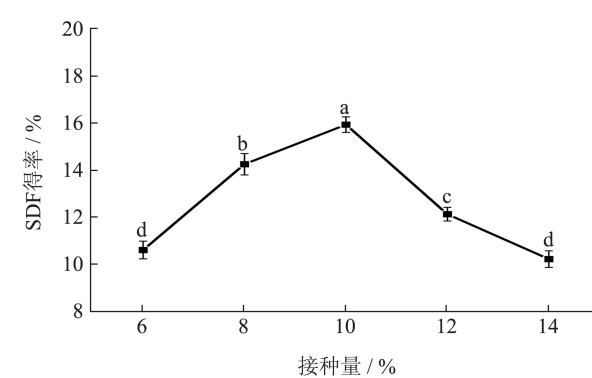


图 5 接种量对猕猴桃果渣可溶性膳食纤维得率的影响
Fig.5 Effect of inoculation amount on the yield of soluble dietary fiber fromkiwifruit pomace

2.2 发酵法制备SDF正交试验

通过对影响猕猴桃果渣 SDF 得率的各因素进行初步探索后, 选取料液比、接种量、起始 pH 值、发酵时间、发酵温度这五个因素, 并根据单因素试验结果选取三个较优水平进行正交实验, 优化猕猴桃果渣 SDF 的提取工艺, 因素水平见表 1。试验结果及直观分析见表 2。

表 2 正交试验结果分析表						
Table 2 The orthogonal experiment results						
试验号	因素					得率 / %
	A 料液比 (g/mL)	B 接种量 / %	C 起始 pH 值	D 发酵时间 / h	E 发酵温度 / °C	
1	1 (1:15)	1 (8)	1 (3.0)	1 (36)	1 (35)	13.60
2	2 (1:20)	1	2 (4.0)	2 (48)	2 (37)	15.27
3	3 (1:25)	1	3 (5.0)	3 (60)	3 (39)	10.73
4	1	2 (10)	1	2	2	11.74
5	2	2	2	3	3	13.96
6	3	2	3	1	1	10.50
7	1	3 (12)	2	1	3	12.17
8	2	3	3	2	1	13.89
9	3	3	1	3	2	15.43
10	1	1	3	3	2	11.25
11	2	1	1	1	3	14.49
12	3	1	2	2	1	17.47
13	1	2	2	3	1	14.84
14	2	2	3	1	2	15.89
15	3	2	1	2	3	17.36
16	1	3	3	2	3	8.49
17	2	3	1	3	1	16.08
18	3	3	2	1	2	12.57
K ₁	72.09	82.81	88.70	79.23	86.39	
K ₂	89.59	84.30	86.28	84.22	82.16	
K ₃	84.06	78.63	70.76	82.30	77.19	
k ₁	12.02	13.80	14.78	13.20	14.40	
k ₂	14.93	14.05	14.38	14.04	13.69	
k ₃	14.01	13.11	11.79	13.72	12.87	
R	2.92	0.94	2.99	0.83	1.53	

由表 2 极差分析可知, 各因素对猕猴桃果渣 SDF 得率的影响的主次顺序为 C>A>E>B>D, 即起始 pH 值>料液比>发酵温度>接种量>发酵时间, 最佳工艺条件为 A₂B₂C₁D₂E₁, 即料液比 1:20 (g/mL)、接种量 10%、pH 值 3.0、发酵时间 48 h、发酵温度 35 °C。表 3 方差分析结果表明, 料液比及起始 pH 值对猕猴桃果渣 SDF 得率影响极显著 (P<0.01)。采用优化后

的工艺参数进行验证试验，猕猴桃果渣 SDF 的得率为 17.83%。猕猴桃果渣 SDF 得率高于文献报道的蓝莓果渣^[13]、柑橘果渣^[17]。

表 3 方差分析结果

Table 3 Variance analysis of orthogonal experiments					
因素	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性
A	52.278	2	26.139	8.34	**
B	5.523	2	2.762	0.881	
C	69.79	2	34.895	11.134	**
D	4.06	2	2.03	0.648	
E	17.531	2	8.766	2.797	
误差	78.353	25	3.134		

由表 4 可知，酸提法制备的 SDF1 的得率（14.93%）和酶提法制备的 SDF2 的得率（15.69%），均显著低于发酵法（ $P<0.05$ ）；酸提法制备的 IDF1 的得率（32.78%）和酶提法制备的 IDF2 的得率是（35.15%），均显著高于发酵法（ $P<0.05$ ）。经鼠李糖乳杆菌发酵后的沙田柚果粉中 IDF 含量显著降低^[21]，SDF 含量则显著升高，推测鼠李糖乳杆菌在发酵过程中产生的纤维素酶将 IDF 的糖苷键断裂生成小分子多糖，提高了 SDF 的含量。此外，乳酸菌在发酵过程中产生的有机酸可以使纤维素类大分子的糖苷键断裂，降低其聚合度，生成可溶性多糖^[22]。

表 4 三种方法制备的猕猴桃果渣SDF和IDF得率

Table 4 The yields of SDF and IDF from kiwifruit pomace prepared by three methods		
得率/%	SDF	IDF
酸提法	14.93 ± 0.39 ^c	32.78 ± 0.36 ^b
酶提法	15.69 ± 0.24 ^b	35.15 ± 0.38 ^a
发酵法	17.83 ± 0.17 ^a	31.42 ± 0.28 ^c

2.3 SDF单糖组成及分子量分析

2.3.1 SDF单糖组成

由表 5 可知，SDF1（酸提法）和 SDF3（发酵法）均由 13 种单糖组成，较 SDF2（酶提法）少了甘露糖醛酸。SDF1 主要由葡萄糖（55.16%）、半乳糖醛酸（27.77%）和半乳糖（5.19%）组成；SDF2 主要由半乳糖醛酸（32.40%）、葡萄糖（28.71%）、半乳糖（9.82%）；SDF3 主要由葡萄糖（57.18%）、半乳糖醛酸（18.15%）和半乳糖（11.49%）组成。

研究表明，葡萄糖主要来源于纤维素^[6]，SDF1 和 SDF3 中葡萄糖含量较高，这可能是酸处理和微生物发酵促进了纤维素的水解，而酶处理较为温和，纤维素的降解程度较低。果胶是一种复杂的多糖，其主链

由 D-半乳糖醛酸通过 α -1,4 糖苷键连接而成，同时含有中性糖的侧链，在水解过程中，果胶可分解为阿拉伯糖和半乳糖，这表明它可能构成了 SDF 样品的主要成分^[17]。在利用酸提法、酶提法和发酵法提取的样品中，木糖和阿拉伯糖这两种半纤维素来源单糖均被检测到，表明猕猴桃果渣中可溶性膳食纤维可能部分为半纤维素。SDF 的组成差异决定了理化性质差异^[16]，后续 SDF 理化性质的测定结果也表明三者存在较大差异。

表 5 猕猴桃果渣可溶性膳食纤维单糖组成摩尔百分比

Table 5 Monosaccharide molar percentage of soluble dietary fiber from kiwifruit pomace			
摩尔百分比/%	SDF1	SDF2	SDF3
古洛糖醛酸	0.17	0.18	0.15
甘露糖	1.96	7.49	1.48
核糖	0.038	0.089	0.044
葡萄糖醛酸	0.099	0.15	0.75
氨基半乳糖	0.36	0.42	0.29
半乳糖	5.19	9.82	11.49
岩藻糖	0.15	1.41	0.69
甘露糖醛酸	0.00	0.083	0.00
氨基葡萄糖	0.96	1.51	0.82
鼠李糖	3.84	8.42	4.00
半乳糖醛酸	27.77	32.40	18.15
葡萄糖	55.16	28.71	57.18
木糖	2.58	2.11	1.03
阿拉伯糖	1.73	7.23	3.93

2.3.2 SDF分子量

可溶性膳食纤维的分子量呈现出多分散性，主要原因是由不同分子量组成的混合物，一般采用重均分子量来描述^[23]。由表 6 可知，酸提法制备的 SDF1 的重均分子量最小，发酵法制备的 SDF3 重均分子量居中，二者小于酶法制备的 SDF2 重均分子量，与酶法制备的凉茶草渣可溶性膳食纤维^[24]等的分子量大于酸提法结果一致。

表 6 猕猴桃果渣可溶性膳食纤维重均分子量

Table 6 Average molecular weight of soluble dietary fiber from kiwifruit pomace			
样品	SDF1	SDF2	SDF3
M_w (Da)	140 310	160 010	145 597

2.4 SDF和IDF组成分析

如图 6 所示，在 4 000 至 400 cm^{-1} 的波数范围内三种方法制备的 SDF 均展现出了多糖的典型特征吸收峰。所有 SDF 和 IDF 样品均存在 3 390 cm^{-1} 处的宽峰

是 O-H 的伸缩振动, O-H 主要来自 IDF 中的纤维素和半纤维素以及 SDF 中的果胶^[25]。2 929 cm⁻¹ 处的小峰由 SDF 或 IDF 甲基以及亚甲基的饱和 C-H 的伸缩振动引起^[26], 是多糖的典型特征, 但 SDF 在这个波段的峰相对较弱, IDF 峰强度较高, 与 IDF 含有更多的阿拉伯糖、木聚糖等半纤维素有关^[27]。

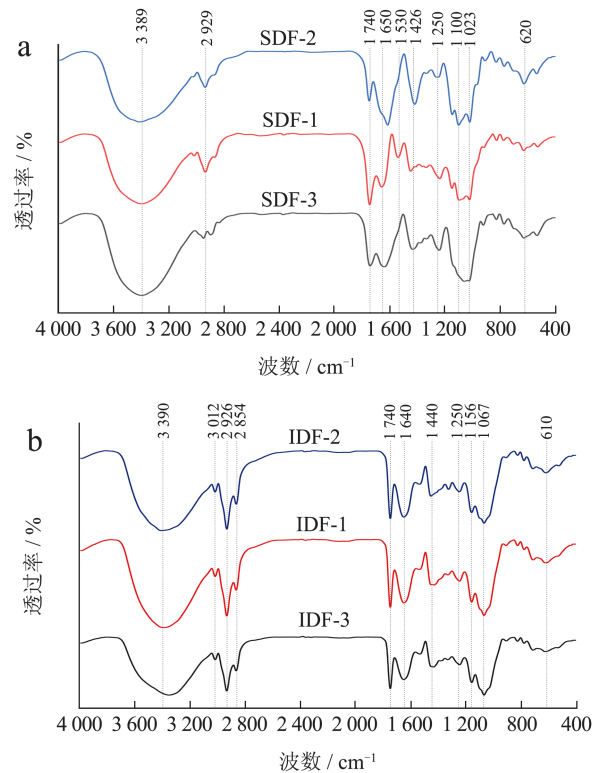


图 6 猕猴桃果渣 SDF 与 IDF 傅里叶变换红外光谱图谱
Fig.6 FT-IR spectra of SDF and IDF from kiwifruit pomace
注: (a) SDF ; (b) IDF。

与 IDF 样品相比, SDF 样品在红外光谱的 1 740 cm⁻¹ 和 1 650 cm⁻¹ 波段的吸收峰强度较为显著, 与羰基 (存在于 -COOH 和 -COOR 中) 在波数 1 740 cm⁻¹ 处呈现出的伸缩振动有关, 可用于识别果胶类多糖特征; 游离的 -COOH 基团在波数约 1 650 cm⁻¹ 处表现出非对称的伸缩振动峰, 这同样是果胶类多糖的特征性表现之一^[28]。

在红外光谱分析中, 位于 1 250 cm⁻¹ 附近的吸收峰主要归因于半纤维素分子中 sp² 杂化碳原子与氧原子之间的伸缩振动, 以及木质素分子中碳氧键的伸缩振动。这一特征峰在所有测试样品的光谱中均有出现; 半纤维素的主链由吡喃糖构成, 其特征性的吸收峰通常位于 1 067 cm⁻¹ 附近, 这一峰值是由糖苷键中的 C-O-C 非对称振动引起的^[17]。在对 SDF 和 IDF 样品的红外光谱分析中, 该处的吸收峰较强, 表明两种样品中均含有半纤维素成分^[17]。通过分析, 推测制备得到

的 IDF 主要由纤维素、半纤维素和木质素组成, SDF 则以果胶、木质素和半纤维素为主要成分。

2.5 SDF和IDF理化性质分析

2.5.1 水合能力

由表 7 可以看出, SDF1 的持水力 (11.01 g/g) 和 SDF3 的持水力 (10.99 g/g) 无显著差异 ($P>0.05$), 但显著大于 SDF2 ($P<0.05$), 而 IDF 的持水力能力顺序为 IDF1 > IDF2 > IDF3。SDF 的持水力是 IDF 的 1.22~2.39 倍, 与柑橘皮渣膳食纤维表现类似^[23]。

SDF1 和 SDF3 表现出较大的溶胀力, 显著高于 SDF2 ($P<0.05$)。对于 IDF 的溶胀力而言, 发酵法有利于 IDF 溶胀力的提高。三种方法制备所得 SDF 的溶解率间也存在显著差异 ($P<0.05$), 经发酵法制备的 SDF 的溶解率显著大于其余两种制备方法。在结合水能力大小比较中, 三种 SDF 的结合水能力间存在显著差异 ($P<0.05$), SDF3 的结合水能力达到了 15.46 g/g, 而 IDF 间结合水能力无显著差异 ($P>0.05$)。

SDF 的持水力、溶胀力、溶解率以及结合水的能力均优于 IDF ($P<0.05$)。其原因在于 SDF 分子结构中有更多的亲水性基团如羟基等, 能够与水分子形成氢键, 从而使 SDF 表现出较好的水合能力。化学成分、表面积、孔隙率和粘度等也会影响膳食纤维的水合性质, SDF 结晶度较低, 有利于水分子渗透, 并且结构松散, 有利于截留水分子^[23]。

表 7 猕猴桃果渣SDF与IDF水合能力
Table 7 The hydration capacity of the SDF and IDF from kiwifruit pomace

样品	持水力 (g/g)	溶胀力 (mL/g)	溶解率 /%	结合水能力 (g/g)
SDF1	11.01 ± 0.07 ^a	10.32 ± 0.27 ^a	70.61 ± 0.59 ^a	7.04 ± 1.33 ^c
SDF2	6.46 ± 0.17 ^b	2.58 ± 0.11 ^{cd}	79.41 ± 0.83 ^b	11.80 ± 1.17 ^b
SDF3	10.99 ± 0.09 ^a	8.66 ± 0.11 ^b	90.12 ± 1.12 ^c	15.46 ± 2.10 ^a
IDF1	5.55 ± 0.07 ^c	1.28 ± 0.09 ^c	—	3.02 ± 0.08 ^d
IDF2	5.28 ± 0.11 ^d	2.37 ± 0.15 ^d	—	2.66 ± 0.22 ^d
IDF3	4.59 ± 0.18 ^e	2.66 ± 0.12 ^c	—	3.71 ± 0.08 ^d

注: 表中同一列数据后字母完全不同时, 表明样品间有显著差异 ($P<0.05$)。

2.5.2 持油力

由图 7 可以看出 SDF1 的持油力 (3.02 g/g)、SDF3 的持油力 (3.23 g/g) 显著高于 SDF2 的持油力 ($P<0.05$)。SDF3 与 IDF3 的持油力无显著性差异 ($P>0.05$)。SDF3 的持油力低于文献报道的橘皮 SDF 的持油力 (4.08 g/g) 和柚渣 SDF 的持油力

(3.38 g/g)^[17], 高于蓝莓果渣 SDF 的持油力 (2.41 g/g)^[13]。高持油力的膳食纤维可以使高脂肪的食物更加稳定, 并影响肠道消化过程中的脂肪吸收程度^[24]。

2.5.3 吸附亚硝酸盐离子能力

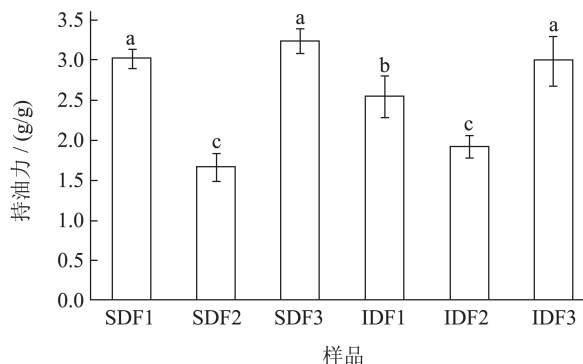


图7 猕猴桃果渣 SDF 与 IDF 持油力

Fig.7 The oil holding capacity of the SDF and IDF from kiwifruit pomace

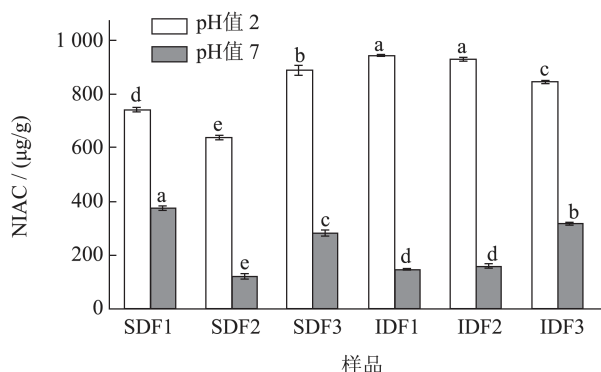


图8 猕猴桃果渣 SDF 和 IDF 亚硝酸盐吸附能力

Fig.8 The nitrite adsorption capacity of the SDF and IDF from kiwifruit pomace

如图8所示, 在 pH 值 2.0 时, IDF1 (947.92 μg/g) 和 IDF2 (926.77 μg/g) 对亚硝酸盐的吸附能力无显著差异 ($P>0.05$), 其次为 SDF3 (889.61 μg/g)。在 pH 值 7.0 条件下, SDF1 的吸附能力最强 (375.66 μg/g), IDF3 (319.66 μg/g) 次之, 其次为 SDF3 (282.80 μg/g)。因此, 在模拟胃液环境 (pH 值 2.0 的酸性条件) 下, 猕猴桃果渣膳食纤维的亚硝酸根离子吸附能力显著优于模拟肠道环境 (pH 值 7.0 的中性条件)。这归因于在酸性条件下, 膳食纤维结构中特定的活性基团如糖醛酸、酚酸和氨基酸等能够更有效地对亚硝酸根离子 (NO_2^-) 产生强烈的吸附作用^[17]。发酵法制备的蓝莓果渣 SDF 对亚硝酸盐的吸附能力 (50.39 μg/g, pH 值 7.0) 弱于 SDF3^[13]。此外, 猕猴桃果渣 IDF3 表现出较好的亚硝酸盐吸附能力, 优于橘皮 IDF (232.05 μg/g, pH 值 7.0), 柚渣 IDF (306.77 μg/g, pH 值 7.0)^[17], 对于降

低亚硝酸盐对健康的潜在威胁如 N-亚硝胺的生成十分有益^[29]。

3 结论

采用乳酸菌发酵制取猕猴桃果渣可溶性膳食纤维的最佳工艺条件为: 料液比 1:20 (g/mL)、发酵时间 48 h、发酵温度 35 °C、起始 pH 值 3.0、接种量 10% (发酵体系体积分数)。在该条件下, 猕猴桃果渣可溶性膳食纤维的得率可达 17.83%; 其单糖组成包括: 葡萄糖 (57.18%)、半乳糖醛酸 (18.15%) 和半乳糖 (11.49%) 等, 重均分子量为 145 597 Da, 以果胶、木质素和半纤维素为主要成分。发酵法 SDF 表现出良好的理化特性: 拥有持水力 (10.99 g/g)、溶胀力 (8.66 mL/g)、溶解率 (90.12%)、结合水能力 (15.46 g/g) 及亚硝酸盐吸附力 (889.61 μg/g (pH 值 2.0), 282.80 μg/g (pH 值 7.0)), 综合表现优于与酸提法 SDF 和酶提法 SDF。综上所述, 猕猴桃果渣是优质的膳食纤维来源, 发酵法制备的猕猴桃果渣可溶性膳食纤维具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 丁莎莎. 油橄榄果渣膳食纤维的制备、特性及改性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [2] SOLIMAN G A. Dietary fiber, atherosclerosis, and cardiovascular disease [J]. *Nutrients*, 2019, 11(5): 1155.
- [3] 杨烁, 赵秀杰, 蔡勇建, 等. 六种膳食纤维的功能特性及其在面包中的应用[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(6): 189-197.
- [4] 张瑜, 方向红. 水果皮渣中膳食纤维提取及应用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(22): 7-9.
- [5] YULIARTI O, GOH K K T, MATIA MERINO L, et al. Extraction and characterisation of pomace pectin from gold kiwifruit (*Actinidia chinensis*) [J]. *Food Chemistry*, 2015, 187: 290-296.
- [6] WANG K, LI M, WANG Y, et al. Effects of extraction methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber extracted from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106162.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 闵钟慢, 高路, 高育哲, 等. 黑曲霉发酵法制备米糠粕可溶性膳食纤维工艺优化及其理化分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(2): 112-118.
- [10] 王丽, 康晶晶. 发酵技术在膳食纤维改性中的应用[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(6): 400-409.
- [11] 刘云. 微生物发酵法提取柑桔皮渣膳食纤维的工艺及其理化特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [12] 王晓颖, 黄荣冰, 谭诗颖, 等. 黑曲霉发酵法制备柚子皮可溶性膳食纤维的研究[J]. *轻工科技*, 2021, 37(12): 15-17, 38.
- [13] 杜斌, 冯军, 李苗苗, 等. 发酵法制取蓝莓果渣可溶性膳食纤维工

- 艺优化及其特性分析[J].食品研究与开发,2020,41(9):118-123.
- [14] 李可.亚麻籽粕膳食纤维的提取工艺研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
- [15] LI W H, JIN Q, WU Q Y, et al. Effect of a hybrid process, high hydrostatic pressure treatment combined with mixed strain fermentation, on the quality of the dietary fibre in pickled vegetables [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 55(6): 2650-2659.
- [16] 权娣红,杨华峰,邹积赞,等.酿酒葡萄皮水溶性膳食纤维的化学组成和乳化稳定性[J].现代食品科技,2021,37(9):93-101.
- [17] 陈贵婷,石凯欣,张珮珮,等.不同品种柑橘皮渣膳食纤维构效关系比较[J].食品科学,2023,44(17):20-28.
- [18] 周笑犁,谢国芳,何劲,等.发酵法制备刺梨果渣可溶膳食纤维的工艺优化[J].食品工业科技,2018,39(1):102-106.
- [19] 肖盾,牛广财,朱丹,等.发酵法制取沙果渣可溶性膳食纤维的研究[J].中国酿造,2010,3:166-170.
- [20] 张智,闫建英,冯丽荣,等.响应面法优化发酵蔗渣制备膳食纤维工艺及结构特性分析[J].食品工业科技,2022,43(17):176-184.
- [21] 叶佳敏,张名位,卢琦,等.乳酸菌半固态发酵对沙田柚果粉苦味及活性成分的影响[J].中国农业科学,2024,57(13):2662-2673.
- [22] 卢琦.沙田柚不同组织部位中黄酮和膳食纤维的组成及其全果粉的制备[D].天津:天津科技大学,2022.
- [23] 王磊,石可歆,廖晨,等.改性花生可溶性膳食纤维功能及结构特性研究[J].食品工业,2018,39(4):204-208.
- [24] YANG C R, SI J Y, CHEN Y, et al. Physicochemical structure and functional properties of soluble dietary fibers obtained by different modification methods from *Mesona chinensis* Benth. residue [J]. Food Research International, 2022, 157: 111489.
- [25] 胡予,张攀,陈信,等.不同月份豆腐柴叶果胶理化性质差异研究[J].食品工业科技,2020,41(1):38-43,49.
- [26] ZHANG Y J, WU L R, ZHANG F S, et al. Sucrose ester alleviates the agglomeration behavior of bamboo shoot dietary fiber treated via high pressure homogenization: Influence on physicochemical, rheological, and structural properties [J]. Food Chemistry, 2023, 413: 135609.
- [27] CHE H, XIONG M, BAI T M, et al. Comparative study on the structure, physicochemical, and functional properties of dietary fiber extracts from quinoa and wheat [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111816.
- [28] LI S, HU N N, ZHU J Y, et al. Influence of modification methods on physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from corn bran [J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100298.
- [29] SANG J Q, LI L, WEN J, et al. Evaluation of the structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber extracted from Newhall Navel Orange by-products [J]. Foods, 2021, 10(11): 2772.