

# 欧李果渣不溶性膳食纤维提取工艺研究 及其理化性质分析

高红芳, 侯清娥, 杨玉娜, 蒋 宝

(渭南职业技术学院, 陕西 渭南 714026)

**摘要:** 采用碱法从欧李果渣中提取不溶性膳食纤维 (insoluble dietary fiber, IDF)。以 IDF 提取率为指标, 在单因素试验结果的基础上, 通过响应面试验对 IDF 的提取工艺进行优化, 并分析其微观结构和理化性质。结果表明, 最佳工艺参数为: NaOH 浓度 2.06%, 液料比 20 mL : 1 g, 碱解时间 98 min, 碱解温度 60 °C, IDF 提取率为 51.71%。与欧李果渣相比, IDF 的持水力、持油力和水膨胀性分别提高了 46.51%, 56.86%, 26.71%。IDF 化学组成具有典型膳食纤维特性, 其表面呈粗糙、疏松、多孔性结构。因此, 欧李果渣可作为优质膳食纤维的良好来源, 研究结果为欧李果渣 IDF 的开发应用提供了数据支撑。

**关键词:** 欧李果渣; 不溶性膳食纤维; 碱法; 响应面法; 理化性质

中图分类号: S661 文献标识码: A 文章编号: 0488-5368(2026)02-0035-07

## Extraction Process of Insoluble Dietary Fiber from *Prunus humilis* Pomace and Analysis of Its Physicochemical Properties

GAO Hongfang, HOU Qing'e, YANG Yuna, JIANG Bao

(Weinan Vocational and Technical College, Weinan, Shaanxi 714026, China)

**Abstract:** Insoluble dietary fiber (IDF) was extracted from *Prunus humilis* pomace via alkaline extraction. Using IDF extraction yield as the response variable, the extraction process was optimized based on single-factor experiments combined with response surface methodology, and the microstructure and physicochemical properties of the extracted IDF were analyzed. The results showed that the optimal extraction conditions were: NaOH concentration 2.06%, liquid-to-solid ratio of 20 mL : 1 g, alkaline hydrolysis time 98 min, and at 60 °C, yielding an IDF extraction rate of 51.71%. Compared with the pomace, the water-holding capacity, oil-holding capacity, and water-swelling capacity of the IDF increased by 46.51%, 56.86%, and 26.71%, respectively. The chemical composition of the IDF exhibited typical dietary fiber characteristics, and its surface was rough, loose, and porous. These results indicate that *Prunus humilis* pomace is a valuable source of high-quality dietary fiber and provide supporting data for the development and application of IDF from this material.

**Key words:** *Prunus humilis* pomace; Insoluble dietary fiber; Alkaline extraction; Response surface methodology; Physicochemical properties

欧李 [*Cerasus humilis* (Bge.) Sok] 是我国特有的一种野生果树, 其果实香气浓郁, 颜色诱人, 营养价值较高, 不仅维生素和蛋白质含量丰富, 其 VC、VB、VE 含量远高于葡萄、草莓、苹果等常见水果。

同时, 还含有原花青素、白藜芦醇等多种酚类物质<sup>[1]</sup>。欧李除了鲜食之外, 其果实主要用于果汁、果脯等深加工领域, 近年来, 随着大众对欧李认识的加深及科研的投入, 欧李的应用已经扩展到了医

收稿日期: 2024-08-28 修回日期: 2024-09-25

基金项目: 渭南市科技计划项目 (2024ZDYFJH-754); 渭南职业技术学院青年科技创新团队项目 (WZYQNKJTD202302); 渭南职业技术学院校级科研计划项目 (WZYZZ202501)。

第一作者简介: 高红芳 (1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏。

疗、保健等多领域,从欧李果实中提取神经酸,能修复受损的大脑神经纤维,并使神经细胞再生,增强人体免疫力<sup>[2]</sup>。欧李果实中的凝集素对藻类、酵母菌及细菌都具有较好的凝集效果<sup>[3]</sup>。但随着欧李果实的开发和使用,产生了大量的果渣,这些果渣被当成废弃物处理,导致了资源浪费和环境污染,研究表明,欧李果渣中含有丰富的花青素、膳食纤维等化合物<sup>[4]</sup>。因此,从欧李果渣中提取膳食纤维,确保废弃物欧李果渣丢弃之前被尽可能多的再利用,符合循环经济理念<sup>[5]</sup>。

膳食纤维是指不能被人体小肠消化吸收且对人体具有健康意义的多糖类物质,其中水不溶性膳食纤维 (insoluble dietary, IDF) 是一类不溶于水且难以被人体消化道酶分解的膳食纤维,主要成分包括纤维素、半纤维素及木质素等<sup>[6]</sup>。随着国内外学者对 IDF 研究的不断深入,人们对 IDF 功能的了解也越来越全面, IDF 具有很好的持水力和溶胀性,添加至食品中可改善产品的加工特性、感官品质及稳定性<sup>[7]</sup>。另外, IDF 具有促进肠道蠕动,调节肠道微生物群;调节体内血糖血脂;有效降低血液中胆固醇浓度等多种生理功能<sup>[8]</sup>。

从不同原料中提取 IDF 已受到广泛关注<sup>[9,10]</sup>,提取 IDF 的方法很多,包括酶法、酸法和碱法等。碱液分离制备 IDF 时,能水解果渣中的蛋白质、皂化脂肪,从而获得高纯度的膳食纤维<sup>[11]</sup>。本研究采用碱法提取欧李果渣中的膳食纤维,通过响应面法对欧李果渣提取膳食纤维的工艺进行优化,分析产品的特性、化学组成以及组织结构,旨在为欧李果渣资源的综合利用提供技术支持和理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

欧李,采摘于陕西省澄城县高原之星果业生产农民专业合作社种植基地;NaOH(分析纯),上海琳帝化工有限公司;无水乙醇,天津市红岩化学试剂厂;大豆油,长寿花食品股份有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

多功能粉碎机,浙江红景天工贸有限公司;TS-1000 型电热鼓风干燥箱,海门市其林贝尔仪器制造有限公司;HHW-2KV-660 水浴锅,上海南荣实验室设备有限公司;80-2 型离心机,上海坤诚科学仪器有限公司;S4800 型场发射扫描电镜,日本 hitachi 公司;VECTOR-22 型傅里叶红外光谱仪,德国 Bruker 公司。

### 1.3 方 法

1.3.1 欧李果渣 IDF 膳食纤维提取工艺 挑选果粒完整的欧李果实,并去梗除杂,用榨汁机打碎,过滤,用纱布分离果渣和果汁。参考文献<sup>[12]</sup>的方法,为除去果渣中的游离糖,将果渣于室温下在 95% 乙醇中浸泡 24 h,抽滤,滤渣平铺于托盘中放置 50℃ 鼓风干燥箱中恒温烘干 24 h,粉碎机磨粉,过 100 目筛,得到欧李果渣粉。

称取欧李果渣粉 1g,精密称定,置烧杯中,按照料液比加入适量的氢氧化钠溶液,在一定温度下碱水解相应时间,碱解完成后,抽滤,滤渣洗涤至中性,放入 50℃ 的烘箱中,干燥 24 h,即可得到 IDF。根据公式(1)计算 IDF 提取率。

$$\text{IDF 提取率}(\%) = \frac{\text{换取 IDF 质量}(\text{g})}{\text{样品质量}(\text{g})} \times 100 \quad (1)$$

1.3.2 试验设计 分为 2 种。

(1) 单因素试验。以 IDF 提取率为考察指标,分别探讨 NaOH 浓度(0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%)、液料比(15 mL :1 g、20 mL :1 g、25 mL :1 g、30 mL :1 g、35 mL :1 g)、碱解时间(40 min、60 min、80 min、100 min、120 min)、碱解温度(40℃、50℃、60℃、70℃、80℃)4 个因素对 IDF 提取率的影响。

(2) 响应面设计。基于单因素试验结果,选取液料比(mL :g)、NaOH 浓度(%)、提取时间(min)、提取温度(℃)4 个因素为自变量,以 IDF 提取率为响应值,利用 Design-Expert11 软件进行试验设计及分析数据。试验设计因素水平及编码见表 1。

表 1 响应面试验因素水平设计

水平	因素			
	A(NaOH 浓度)/%	B(液料比)	C(碱解时间)/min	D(碱解温度)/℃
-1	1.5	15 :1	80	50
0	2	20 :1	100	60
1	2.5	25 :1	120	70

### 1.4 欧李果渣 IDF 特性测定

1.4.1 持水力测试<sup>[13]</sup> 称取干燥样品 1.0 g ( $m_1$ )放入盛有 25 mL 蒸馏水的离心管中,浸泡 24 h,以 4 000 r/min 离心 20 min,去掉上清液,将游离的水分用滤纸吸干,称量样品的湿质量( $m_2$ ),按照公式(2)计算 IDF 持水力。

$$\text{持水力}(\text{g/g}) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (2)$$

1.4.2 持油力测试<sup>[14]</sup> 称取干燥样品 0.5 g ( $m_1$ ),置于 15 mL 离心管中,加入 5 mL 大豆油,充分摇匀混合,室温静置 5 h 后,4 000 r/min 离心 20 min,去掉上层清液,用滤纸吸干游离的油,称质量 ( $m_2$ )按公式(3)计算持油力。

$$\text{持油力}(g/g) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (3)$$

1.4.3 溶胀性测试<sup>[15]</sup> 称取干燥样品 0.25 g ( $m$ ),将样品放入 10 mL 量筒中,轻轻振荡以保持表面平整,记录膳食纤维干品的体积( $V_1$ )。然后,准确加入 5 mL 蒸馏水,充分振荡均匀后,用保鲜膜封口,静置 24 h 后再读取量筒的体积( $V_2$ ),按照公式(4)计算溶胀性。

$$\text{溶胀性}(mL/g) = \frac{V_2 - V_1}{m} \quad (4)$$

## 1.5 欧李果渣 IDF 结构表征

1.5.1 红外光谱分析 用傅里叶红外光谱法将样品与 KBr 按照 1:100 的比例研磨均匀,压片,用红外光谱仪扫描,扫描范围 4 000~400  $cm^{-1}$ 。

1.5.2 超微结构分析 取少量已干燥的样品,置于粘贴有导电双面胶的载样台上并确保其稳固。随后在真空环境中对样品进行金膜喷涂处理。随后,将样品连同载样台一同置入扫描电镜的样品室内进行图像采集。

## 1.6 数据处理

单因素试验用 SPSS 进行 ANOVA 单因素方差分析,采用 origin8.5 分析作图。响应面优化试验数据用 Design - Expert11 软件进行分析处理和绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

2.1.1 NaOH 浓度对 IDF 提取率的影响 如图 1 所示,在碱浓度从 0.5% 增至 1% 的过程中,IDF 的提取率呈现下降趋势。这可能是因为较低的碱液浓度导致欧李果渣未能充分水解,使得 IDF 的提取不完全<sup>[16]</sup>。随着碱浓度增至 2%,碱溶性物质逐渐被分解,促使更多的 IDF 从欧李果渣粉中释放,从而提高了提取率。当碱液浓度达到 2% 时,提取率达到峰值为 59.30%。进一步增加碱液浓度,IDF 提取率下降,这可能是碱浓度过高破坏膳食纤维间的氢键,进而使 IDF 降解成较小的可溶性分子<sup>[17]</sup>。因此,选取 NaOH 提取浓度为 1.5%、2%、2.5% 进行响应面优化试验。

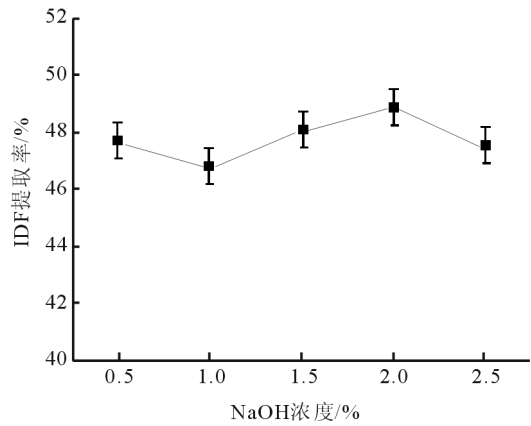


图 1 NaOH 浓度对欧李果渣 IDF 提取率的影响

2.1.2 液料比对 IDF 提取率的影响 如图 2 所示,IDF 的提取率随着液料比的增加呈现先升后降的趋势。在液料比达到 20:1 mL/g 的情况下,提取率实现最大化,达到了 61.50%。这种现象的产生主要是因为,随着料液比的提高,反应底物与 NaOH 溶液之间的接触面积扩大,从而促进了 IDF 提取率的生长。然而,当液料比超出 20 mL:1 g 之后,由于提取液量过多导致底物浓度降低,这实际上是一种稀释效应,进而引起反应速率减缓,结果使得 IDF 的提取率出现下降<sup>[18]</sup>。因此,初步确定提取液料比为 15 mL:1 g、20 mL:1 g、25 mL:1 g 进行响应面优化试验。

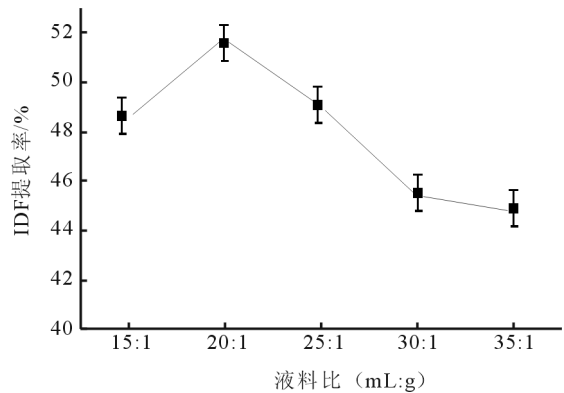


图 2 液料比对欧李果渣 IDF 提取率的影响

2.1.3 碱解时间对 IDF 提取率的影响 如图 3 所示,碱解时间对 IDF 提取率有明显影响。在碱解时间为 40 min 时,由于时间相对较短,导致果胶等可溶性膳食纤维未能完全溶解于水中,因此其提取率相较于 60 min 时的碱解略有优势。当碱解时间从 60 min 延长至 100 min 时,IDF 的提取率随之提高,这可能是因为随着时间的延长,碱性条件下可溶性成分逐渐被分解,从而促使更多的 IDF 从欧李果渣粉中释放出来。碱解时间超过 100 min, IDF 提取率显著下降,这可能是由于纤维素和半纤维素在长

时间碱性环境下发生大量水解反应所致。基于这些发现,为了优化提取效果,选择 80 min、100 min、120 min 作为最佳的碱解时间进行响应面优化试验是合理的。

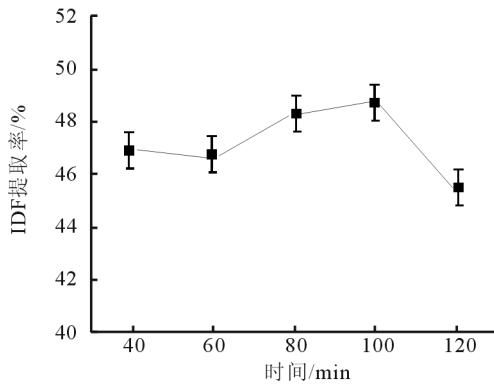


图3 碱解时间对欧李果渣 IDF 提取率的影响

2.1.4 碱解温度对 IDF 提取率的影响 如图 4 所示,随着碱解温度的升高,IDF 的提取率呈现下降的趋势,这一现象与鲜诗敏<sup>[19]</sup>的研究结果相吻合。在较低温度下,提取率较高,这可能是由于在该温度条件下,非膳食纤维类物质并未完全碱解。随着温度的进一步升高,这些非膳食纤维类物质逐渐被完全碱解,导致 IDF 提取率降低。温度为 60℃~70℃时,IDF 在碱液中溶出达到平衡,提取率趋于平缓。当温度上升至到 80℃时,纤维素和半纤维素之间的氢键破坏,使 IDF 降解,提取率迅速下降。综合考虑,虽然温度较低时,提取率较高,但会导致碱解不完全。因此,选择碱解温度为 50℃、60℃、70℃进行响应面优化试验。

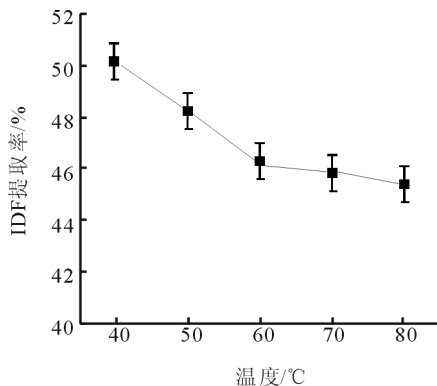


图4 碱解温度对欧李果渣 IDF 提取率的影响

## 2.2 响应面优化

2.2.1 回归模型建立与讨论 以 NaOH 浓度(A)、液料比(B)、碱解时间(C)、碱解温度(D)为变量,以 IDF 提取率为响应值,进行 4 因素 3 水平的响应面试验分析,结果如表 2 和表 3 所示。将表 2 数据用 Design-Expert11 软件进行二次线性回归拟合,得到回归方程为:

$$Y = 52.50 + 1.11A + 0.16B - 0.21C - 0.59D + 0.25AB - 0.13AC + 0.85AD + 0.45BC - 0.037BD - 0.67CD - 4.43A^2 - 1.58B^2 - 0.93C^2 - 1.34D^2$$

由表 3 方差分析可知,欧李果渣 IDF 提取试验模型极显著( $P < 0.0001$ ),失拟项( $p = 0.1057$ )不显著,说明模型可靠,试验误差是由系统误差引起的。试验模型  $R^2$  为 0.9396,说明该模型拟合效果良好。

从回归方差分析可以看出一次项 A 对 IDF 提取率有极显著影响( $P < 0.01$ ),一次项 D 对 IDF 提取率有显著影响( $P < 0.05$ ),二次项  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$  对提取率影响极显著( $P < 0.01$ )。由 F 值大小可知,各因素对 IDF 提取率影响大小的顺序为:A(碱液浓度)>D(提取温度)>C(提取时间)>B(液料比)。

表2 IDF 响应曲面分析

试验序号	A	B	C	D	Y (提取率)/%
1	0	-1	-1	0	50.3
2	0	0	0	0	51.58
3	-1	0	1	0	45.12
4	1	0	0	1	45.40
5	1	1	0	0	48.60
6	1	-1	0	0	47.76
7	-1	0	0	1	43.20
8	0	1	0	-1	48.61
9	0	1	0	1	46.03
10	0	-1	0	1	46.30
11	0	0	1	-1	48.82
12	0	0	0	0	52.60
13	0	1	1	0	50.80
14	0	1	-1	0	50.2
15	0	-1	0	-1	48.73
16	-1	1	0	0	45.20
17	1	0	-1	0	48.71
18	0	0	-1	1	49.86
19	0	0	-1	-1	48.08
20	0	-1	1	0	49.11
21	0	0	0	0	52.90
22	-1	0	0	-1	46.39
23	1	0	1	0	48.10
24	-1	0	-1	0	45.21
25	1	0	0	-1	45.20
26	0	0	1	1	47.92
27	-1	-1	0	0	45.35
28	0	0	0	0	52.89
29	0	0	0	0	52.53

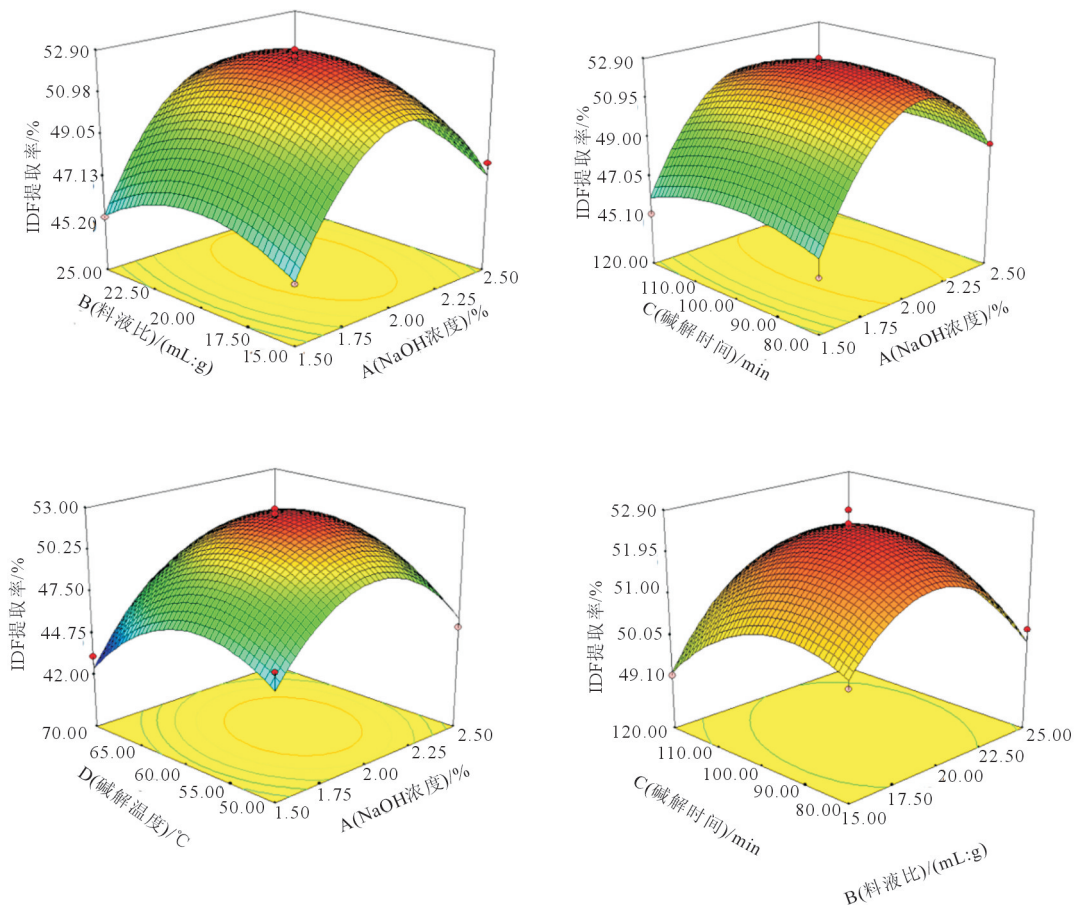
表3 二次响应面回归模型方差分析

平方和	自由度	均方	F 值	P	显著性
201.50	14	13.59	15.55	0.000 1	* *
14.74	1	14.74	16.87	0.001 1	* *
0.30	1	0.30	0.34	0.568 8	
0.52	1	0.52	0.59	0.454 7	
4.22	1	4.22	4.83	0.045 2	*
0.25	1	0.25	0.28	0.604 8	
0.068	1	0.068	0.077	0.785 0	
2.87	1	2.87	3.29	0.091 3	
0.80	1	0.80	0.92	0.354 6	
0.0056	1	0.0056	0.006 4	0.937 2	
1.80	1	1.80	2.25	0.173 7	
127.20	1	127.20	145.55	0.000 1	* *
16.29	1	16.29	18.64	0.000 7	* *
5.61	1	5.61	6.41	0.023 9	* *
63.99	1	63.99	73.22	0.000 1	* *
12.23	14	0.87			
11.07	10	1.11	3.79	0.105 7	
1.17	4	0.29			
202.43	28				

注: $p < 0.01$  表示极显著,用 \*\* 表示;  $0.01 < p < 0.05$  表示显著,用 \* 表示。

2.2.2 交互效应分析 通过响应面及等高线的形状来考察各因素对 IDF 提取率的影响程度,交互作用的曲面坡度越大,其影响程度越高。根据回归方程做出响应面分析图,如图 5 所示,CD 曲面拱形明

显更陡峭,等高线为椭圆形且相对稀疏,其次是 BD,说明碱解温度与碱解时间交互作用最显著,其次显著的是液料比和碱解温度。



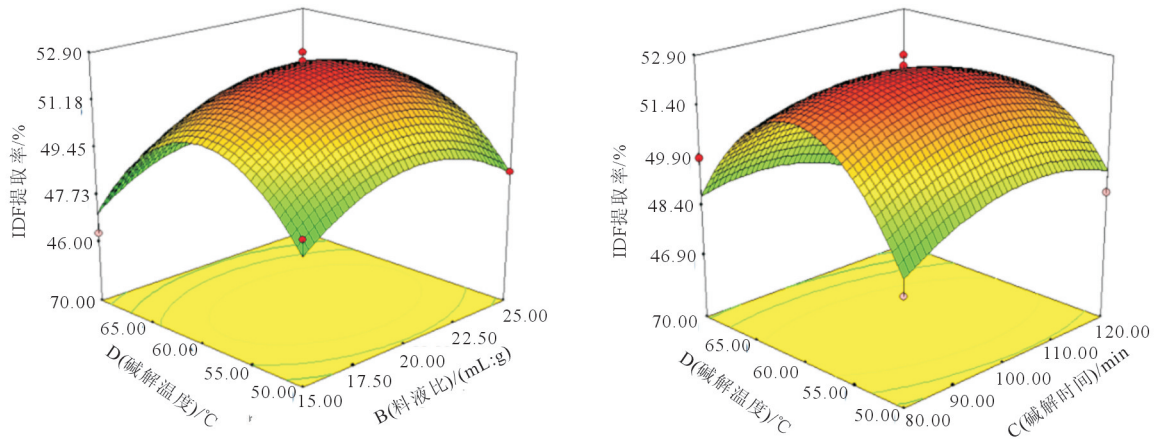


图 5 各因素交互作用对 IDF 提取率影响的响应面图

2.2.3 最佳方案确定与验证 根据 Design-Expert11 软件对试验结果进行分析处理,得到最佳方案:NaOH 浓度为 2.06%、液料比 20.24 mL :1 g、碱解时间 98.32 min、碱解温度 59.31 °C,此条件下 IDF 提取率理论值为 52.60%。考虑到试验的可行性,实际操作中采用 NaOH 浓度为 2.06%,液料比 20 mL :1 g,碱解时间 98 min,碱解温度 60 °C,按照此条件重复试验,IDF 的提取率为 51.71%,与理论值接近,表明该响应面模型对于 IDF 提取率有较好的预测能力。

### 2.3 红外光谱测定结果

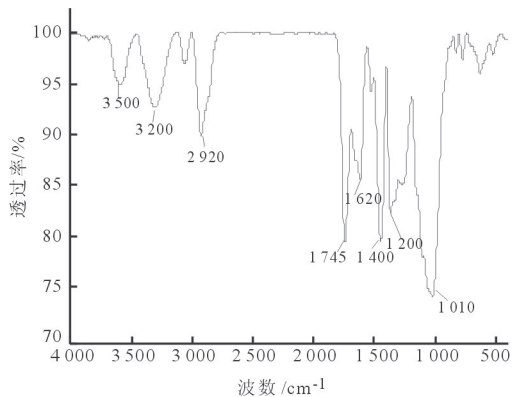
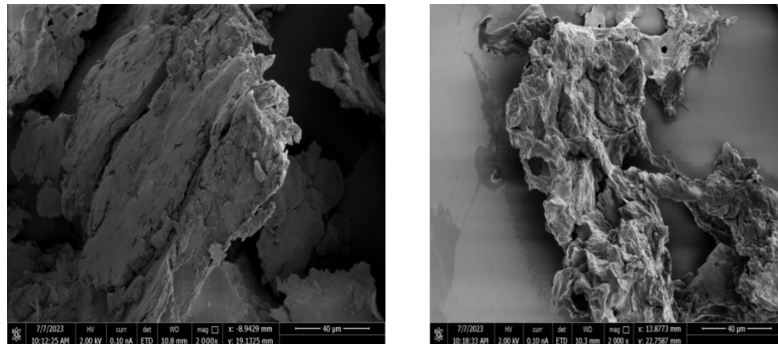


图 6 IDF 傅里叶变换红外光谱图

欧李果渣 IDF 的红外光谱如图 6 所示,在 3 200~3 600  $\text{cm}^{-1}$  出现强而宽的吸收峰,代表了半纤维素和纤维素中-OH 的伸缩振动,表明欧李果渣膳食纤维具有明显的多糖特征吸收峰。2 920  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰对应于多糖中甲基和亚甲基的-C-H 拉伸振动。1 745  $\text{cm}^{-1}$  的特征吸收峰为半纤维素中羧酸 C=O 的伸缩振动,是半纤维素的特征吸收峰。1 650  $\text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰为羧基-COOH 的特征峰,表明样品中存在糖醛酸<sup>[20]</sup>。此外,C-H 的变角振动吸收峰在 1 200~1 400  $\text{cm}^{-1}$  范围内出现,为糖类的特征吸收峰<sup>[21]</sup>。在 1 010  $\text{cm}^{-1}$  处的峰则是由于 C-O-C 键的 C-O 伸缩振动,表明欧李果渣纤维中含有木聚糖半纤维素<sup>[22]</sup>。

### 2.4 表面结构观察结果

用扫描电子显微镜对欧李果渣果渣和欧李果渣膳食纤维的表面形貌进行观察,如图 7 所示,欧李果渣表面结构较为光滑紧密,没有空隙和孔洞。而经过提取后,IDF 表面呈现不规则的疏松结构,内部孔隙较大,说明 IDF 中不含淀粉等杂质<sup>[23]</sup>。这与李琦等<sup>[24]</sup>用扫描电镜观察到的韭菜 IDF 的微观结构相似,这种孔洞结构有可能会提高膳食纤维的比表面积,提高 IDF 的持水力和溶胀力。



a-欧李果渣原料( $\times 2000$ )

b-欧李果渣 IDF( $\times 2000$ )

图 7 欧李果渣和 IDF 扫描电子显微镜图

## 2.5 理化性能分析

如图8所示,与欧李果渣相比,欧李IDF在持水力、持油力和水膨胀力方面分别提升了46.51%、56.86%和26.71%。这种提升主要源于碱水解后结构的变化,导致表面形成大量孔洞,增加了比表面积,使得亲水和亲油的功能基团得以显露,从而增强了样品对水分子和油分子的渗透与吸收能力<sup>[25]</sup>。扫描电子显微镜的分析结果也支持了这一发现。持水力和膨胀力的增强能够在肠道中增加粪便体积,促进肠道蠕动,而持油力的提升则有助于膳食纤维吸附脂肪和胆固醇等物质<sup>[26]</sup>。

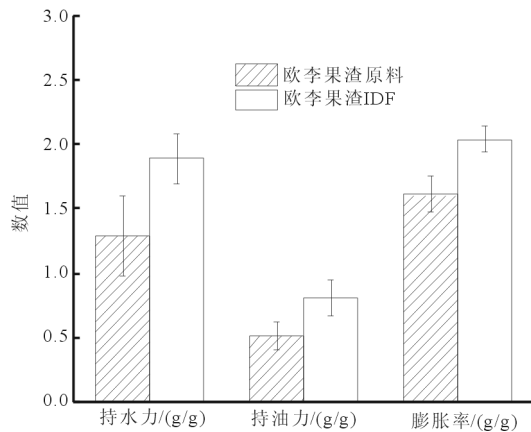


图8 欧李果渣和IDF理化性质分析结果

## 3 结论

本研究以欧李果渣为原料提取IDF,通过单因素试验,利用DesignExpert11软件进行响应面分析,得到碱法提取欧李果渣IDF最佳工艺条件为:NaOH浓度为2.06%,液料比20 mL:1 g,碱解时间98 min,碱解温度60℃,欧李果渣膳食纤维提取率为51.71%。其持水力为1.89 g/g、持油力为0.8 g/g、膨胀率为2.04 mL/g。表明碱处理后IDF的结构发生变化,使其具有更优良的性质,可作为IDF新产品开发的基础。本研究利用碱法提取欧李果渣IDF膳食纤维,其工艺简便,实际操作性强,可为欧李果渣的深加工提供参考。

### 参考文献:

[1] 张士凯,郝良卿,张启月,等. 欧李开发及利用的研究进展[J]. 食品工业科技,2020,41(4):361-367.  
 [2] 刘俊英,张虎成,危晴,等. 欧李果脂脂肪酸GC-MS检测及其营养分析[J]. 食品研究与开发,2012,33(9):119-123.  
 [3] 韩红艳,冀爱青,陈林晶,等. 欧李凝集素对微藻,细菌和酵母凝集作用分析[J]. 生物医学,2017,7(2):25-30.  
 [4] 张晓冰,张羽师,王雨,等. 欧李果渣原花青素提取工艺优化及其体外抗氧化和降糖活性评价[J]. 食品工

业科技,2024,45(1):178-184.  
 [5] NETO R T, SANTOS S A O, OLIVEIRA J, *et al.* Impact of eutectic solvents utilization in the microwave assisted extraction of proanthocyanidins from grape pomace[J]. Molecule, 2022(246):27010246.  
 [6] 李妍,马金魁,容敏靖. 超声辅助碱法提取五花茶渣中水不溶性膳食纤维[J]. 现代食品,2021(13):72-75.  
 [7] WANG C C, YANG Z, XING J J, *et al.* Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the rheological properties of dough [J]. Food Hydrocolloids, 2021,121(12).  
 [8] 周新,唐世英,杨贺祺,等. 不溶性膳食纤维的提取、表征及改性研究进展[J]. 食品工业科技,2021,42(3):359-366.  
 [9] GE Q, HANG Q L, LU C H, *et al.* Structure, physicochemical, and in vitro functional properties of insoluble dietary fiber from bamboo culm: a potential functional ingredient[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022(46):16426.  
 [10] FENG X, CHEN H, LIANG Y, *et al.* Effects of electron beam irradiation treatment on the structural and functional properties of okara insoluble dietary fiber[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2023, 103(1):195-204.  
 [11] MENG X, LIU F, XIAO Y, *et al.* Alterations in physicochemical and functional properties of buckwheat straw insoluble dietary fiber by alkaline hydrogen peroxide treatment[J]. Food Chemistry: X, 2019(30):100029.  
 [12] 秦续缘,于寒松,程志强. 黑果腺肋花楸不溶性膳食纤维化学提取工艺及其理化特性的研究[J]. 中国食品添加剂,2022,33(9):34-40.  
 [13] 汪文君,周宁,韩东晶,等. 改性对柿子渣不溶性膳食纤维的理化特性和结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(6):221-226.  
 [14] TANG C, YANG J, ZHANG F, *et al.* Insight into the physicochemical, structural, and invitro hypoglycemic properties of bamboo shoot dietary fibre: comparison of physical modification methods[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(8):4998-5010.  
 [15] MARCIN A K, SABINA K, JAROSLAW W, *et al.* Physicochemical properties of dietary fibers extracted from gluten-free sources: quinoa (Chenopodium quinoa), amaranth (Amaranthus caudatus) and millet (Panicum miliaceum) [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85(12):321-330.  
 [16] DESEO M A, ELKINS A, ROCHFORD S, *et al.* Antioxidant activity and polyphenol composition of sugarcane molasses extract [J]. Food Chemistry, 2020(314):126180.