

# 木瓜果皮中果胶的复合酶法提取工艺优化及 产品性质分析

韦云伊, 李敏敏, 杨媚媚, 许文婷, 朱 婧, 程 忠\*

(南宁学院机电与质量技术工程学院, 南宁 530200)

**摘要:** **目的** 优化木聚糖酶与纤维素酶组成的复合酶法提取木瓜果皮果胶工艺, 并对其产品性质进行初步分析。**方法** 以木瓜果皮为原料, 采用单因素实验分析单一酶用量、复合酶比例、复合酶量、料液比、pH、酶解温度和酶解时间因素对粗果胶得率的影响, 在单因素实验基础上设计正交实验获得最佳提取工艺参数。**结果** 优化得到的粗果胶最佳提取工艺为: 酶解温度为 60 °C、酶解时间为 3 h、料液比为 1:50 (g:mL)、复合酶量为 120 U/g, 最终粗果胶得率为 28.67%。在此条件下所得木瓜果皮粗果胶制品达到国家标准要求, 酯化度为 62.4%, 属于高酯果胶。**结论** 本研究首次使用复合酶对木瓜果皮中的粗果胶提取进行了工艺优化, 所建立的木瓜果皮果胶提取方法高效、环保。

**关键词:** 木瓜果皮; 粗果胶; 复合酶; 果胶提取

## Optimization of extraction process of pectin from papaya peel by complex enzymes and analysis of product properties

WEI Yun-Yi, LI Min-Min, YANG Mei-Mei, XU Wen-Ting, ZHU Jing, CHENG Zhong\*

(College of Mechatronic and Quality Technology Engineering, Nanning University, Nanning 530200, China)

**ABSTRACT: Objective** To optimize the extraction process of pectin from papaya peel by xylanase and cellulase, and analyze the properties of the product. **Methods** Papaya peel was used as raw material, the effects of single enzyme dosages, complex enzymes ratio, complex enzymes dosage, solid-liquid ratio, pH, enzymolysis temperature and enzymolysis time on the yields of crude pectin were analyzed by single factor experiment, the orthogonal experiment was designed to obtain the best extraction process parameters. **Results** The optimum extraction process of crude pectin was as follows: Enzymolysis temperature of 60 °C, enzymolysis time of 3 h, solid-liquid ratio of 1:50 (g:mL), complex enzymes dosage of 120 U/g, the final yield of crude pectin was 28.67%. Under these conditions, the crude pectin from papaya peel reached the national standard requirements, and the degree of esterification was 62.4%, belonging to high ester pectin. **Conclusion** The extraction process of crude pectin from papaya peel has been optimized by complex enzymes for the first time in this study, and the established method is efficient and environmentally friendly.

**KEY WORDS:** papaya peel; crude pectin; complex enzymes; pectin extraction

基金项目: 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2019KY0924)、南宁学院科研项目(2018XJ42)

Fund: Supported by the Young and Middle-aged Teachers' Basic Scientific Research Ability Improvement Project of Guangxi's Colleges and Universities (2019KY0924), and the Science Foundation of Nanning University (2018XJ42)

\*通信作者: 程忠, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品微生物酶资源开发与利用。E-mail: zhongchengnu@163.com

\*Corresponding author: CHENG Zhong, Ph.D, Associate Professor, College of Mechatronic and Quality Technology Engineering, Nanning University, No.8, Longting Road, Nanning 530200, China. E-mail: zhongchengnu@163.com

## 0 引言

果胶为广泛存在于植物细胞中的可溶性杂多糖,其分子结构主要由 *D*-(+)-半乳糖醛酸以  $\alpha$ -1,4 糖苷键相连形成主链,鼠李糖、半乳糖、木糖、海藻糖、乙酸和甲醇等作为侧链与主链相连构成<sup>[1]</sup>。果胶除具有较好的凝胶特性外,还具有促进人体胃肠蠕动、吸附重金属及清除各种生物毒素等生物学功能,因此被广泛应用于食品及制药行业<sup>[2]</sup>,目前全球果胶需求量为 4 万 t,并以每年 6% 的速度持续增长<sup>[3]</sup>。

木瓜 [*Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne] 属于热带、亚热带水果,因其具有较高的营养和药用价值而在我国南方各省被广泛种植,年产量约 80 万 t<sup>[4]</sup>。近几年,木瓜加工食品得到不断开发,但木瓜果皮一般被作为废弃物处理。木瓜中果胶含量高达 9.5%,果皮则更高<sup>[5-6]</sup>,将木瓜果皮中的果胶成分提取出来,不但能够提高木瓜皮的综合利用价值,还能多层次提高果胶提取的经济效益,为工业化生产果胶开辟一条新的途径。

目前,传统的果胶提取方法主要是酸提取法,但该方法存在果胶得率低、质量差、污染环境等缺点<sup>[7-8]</sup>。生物酶法利用单一酶或复合酶通过降解植物细胞壁中的纤维素、半纤维素、蛋白质等生物大分子来释放并获得果胶成分,该方法因为具有高效、环保、所得果胶质量高等优点而被广泛关注<sup>[9-10]</sup>。刘艳等<sup>[11]</sup>报道了利用纤维素酶法提取火龙果皮果胶,在纤维素酶添加量 50%、料液比 1:60 (g:mL),提取时间 1.5 h、提取温度 55 °C 的条件下,火龙皮中果胶的得率可达到 29.25%,酯化度 24.58%,而酸法浸提 140 min 后火龙果皮的果胶得率仅有 2.6%<sup>[12]</sup>。王艳翠等<sup>[13]</sup>以纤维素酶、木聚糖酶和酸性蛋白酶所组成的复合酶酶解苹果渣提取果胶,获得最佳酶解条件,最终苹果渣中的果胶得率可达到 40.66%,比传统的酸提法提高了 51.49%,比单一酶法提取提高了 13.38%。由此可见,生物酶可显著提高从果皮中提取果胶的得率,而不同种类的酶协同作用的提取效果优于单一酶法。目前,文献已报道了离子交换法及微波法提取木瓜果皮中的果胶,其得率分别为 17.52% 和 20.0%<sup>[14-16]</sup>,但目前有关酶法提取木瓜果胶的研究仍未有报道。

本研究基于木瓜表皮所富含的纤维成分<sup>[15]</sup>,选取木聚糖酶、纤维素酶组成的复合酶充分降解其表皮细胞,提取木瓜果皮中的果胶,采用单因素实验和正交实验优化生物酶法提取果胶的工艺,以期获得高质量果胶,增加木瓜的综合利用价值,减少环境污染,为木瓜果皮果胶的工业化生产提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜木瓜 [*Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne] 购自南

宁市菜市场;木聚糖酶( $2 \times 10^5$  U/g)、纤维素酶( $5 \times 10^4$  U/g)、羧甲基纤维素钠盐(黏度为 800~1200)、山毛榉木聚糖(纯度 90%)、木糖(纯度 99%)及 *D*-(+)-半乳糖醛酸(纯度 97%)(北京索莱宝科技有限公司产品);聚半乳糖醛酸(纯度 85%,阿拉丁生化科技股份有限公司);其他试剂(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

K3 酶标仪(赛默飞世尔科技公司);S220 型 pH 计(梅特勒-托利多公司);UNIVERSAL 320R 型冷冻离心机(海蒂诗科学仪器公司);SUB Aqua Pro 型数显恒温水浴锅(格兰特仪器有限公司);DHG-9240 型电热恒温鼓风干燥箱(上海鸿都电子科技有限公司);SHZ-11 型循环水真空泵(上海贤德实验仪器有限公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 工艺流程及果胶提取过程

工艺流程:果皮→钝化(100 °C, 10 min)→烘干→粉碎→加缓冲溶液→预热→加酶→灭活(90 °C, 15 min)→离心→果胶提取液→乙醇沉淀→真空泵抽滤→烘干→果胶。

果胶提取过程:按照一定料液比(g:mL)将木瓜果皮粉搅拌溶解于缓冲液(0.1 mol 柠檬酸- $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , pH 3.0~7.0)中,混合液置于一定温度恒温水浴锅中预热 5 min,加入适量的酶反应一定时间,反应结束后于 90 °C 水浴锅中灭活 15 min,反应液离心(12000 r/min, 20 min)后取上清液,加入无水乙醇直至乙醇终浓度达到 54% 后,静置醇析 2 h,最后用真空泵抽滤除去乙醇后,将沉淀放入 60 °C 干燥箱干燥至恒重。

#### 1.3.2 酶活力测定

采用 3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)法<sup>[16]</sup>,以木糖、葡萄糖、*D*-(+)-半乳糖醛酸制作标准曲线;以山毛榉木聚糖、羧甲基纤维素钠盐、聚半乳糖醛酸为底物,在 pH 5.5 (0.1 mol 柠檬酸- $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ), 60 °C 条件下测定木聚糖酶、纤维素酶及果胶酶活力,反应体系参考 CHENG 等<sup>[17]</sup>方法;酶活力单位定义与国际通用定义一致:1 个酶活力单位(1 U)是指在特定条件下,在 1 min 内能释放 1  $\mu\text{mol}$  还原糖所需的酶量。

#### 1.3.3 果胶提取率计算

本研究中提取的粗果胶烘干并冷却后称量质量,计算其得率,按照公式(1)进行计算:

$$\text{果胶得率}/\% = \frac{\text{果胶重量}(\text{g})}{\text{木瓜果皮重量}(\text{g})} \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.3.4 单因素实验设计

在以上实验基础上,以果胶得率作为评价指标,分别考察单一酶用量、复合酶比例、复合酶总量、料液比、复合酶酶解 pH、复合酶酶解温度及复合酶酶解时间 7 个因素对果胶得率的影响。

(1)单一酶用量对果胶得率的影响: 固定 pH 6.0、料液比 1:40 (g:mL)、酶解温度 50 °C、反应 3 h 条件下, 分别设定单一酶用量为 0、20、40、60、80、100 U/g。

(2)复合酶比例对果胶得率的影响: 固定 pH 6.0、料液比 1:40 (g:mL)、酶解温度 50 °C、反应 3 h、复合酶总量为 120 U/g 条件下, 分别设定木聚糖酶与纤维素酶活力单位比例为 8:2、7:3、6:4、5:5、4:6、3:7、2:8。

(3)复合酶总量对果胶得率的影响: 固定 pH 6.0、料液比 1:40 (g:mL)、酶解温度 50 °C、反应 3 h、木聚糖酶与纤维素酶活力单位比例 4:6 条件下, 分别设定复合酶总量为 80、100、120、140、160、180 U/g。

(4)料液比对果胶得率的影响: 固定 pH 6.0、酶解温度 50 °C、反应 3 h、木聚糖酶与纤维素酶活力单位比例 4:6、复合酶总量为 140 U/g 条件下, 分别设定料液比为 1:10、1:20、1:30、1:40、1:50、1:60 (g:mL)。

(5)复合酶酶解 pH 对果胶得率的影响: 固定料液比 1:40 (g:mL)、酶解温度 50 °C、反应 3 h、木聚糖酶与纤维素酶活力单位比例 4:6、复合酶总量为 140 U/g、分别设定复合酶酶解 pH 为 3.0、4.0、5.0、6.0、7.0。

(6)复合酶酶解温度对果胶得率的影响: 固定 pH 6.0、料液比 1:40 (g:mL)、反应 3 h、木聚糖酶与纤维素酶活力单位比例 4:6、复合酶总量为 120 U/g 条件下, 分别设定复合酶酶解温度为 30、40、50、60、70、80 °C。

(7)复合酶酶解时间对果胶得率的影响: 固定 pH 6.0、料液比 1:40 (g:mL)、木聚糖酶与纤维素酶活力单位比例 4:6、复合酶总量为 140 U/g 条件下, 分别设定复合酶酶解时间为 1、2、3、4、5、6 h。

### 1.3.5 复合酶的正交实验设计

在复合酶单因素实验分析基础上, 以酶解温度(A)、酶解时间(B)、料液比(C)和复合酶总量(D)为考查因素, 以果胶得率作为评价指标, 进行  $L_9(3^4)$ 水平的正交实验, 优化果胶最佳提取工艺, 正交实验设计见表 1。

表 1 正交因素实验水平表

Table 1 Table of experimental levels of orthogonal factors

水平	因素			
	A 酶解温度 /°C	B 酶解时间/h	C 料液比 (g:mL)	D 复合酶总量 /(U/g)
1	50	2	1:30	120
2	60	3	1:40	140
3	70	4	1:50	160

### 1.3.6 果胶理化性质测定

干燥减重根据 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定; 二氧化硫根据 GB 5009.34—2016《食品安全国家标准 食品中二氧化硫的测定》中的总二氧化硫法测定; 酸不溶灰分、酯化度及总

半乳糖醛酸含量均根据 GB 25533—2010《食品安全国家标准 食品添加剂果胶》中的方法测定。

## 1.4 数据处理

本研究所有实验数据均重复 3 次。采用 IBM SPSS Statistics 26 和 Microsoft Excel 2007 进行正交实验分析和图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验

#### 2.1.1 单一酶用量对果胶得率的影响

单一酶用量对果胶得率的影响结果见图 1。不加酶时的果胶得率仅为 5.90%, 随着木聚糖酶和纤维素酶用量逐渐增加(0~60 U/g), 木瓜果皮果胶得率明显提高, 并在 60 U/g 时果胶得率最高(分别为 14.60%和 16.67%), 当高于此用量时, 果胶得率逐渐下降。木聚糖酶、纤维素酶生产菌在发酵产酶过程中往往会分泌多种细胞壁降解酶<sup>[18]</sup>, 本研究测得所使用的木聚糖酶及纤维素酶中均有果胶酶活力, 其活力单位数分别是 9.5 和 1.3 U/mg, 因此推测当酶量增加时, 反应体系中的果胶酶成分也逐渐增加, 从而造成木瓜果皮果胶成分被部分水解, 导致得率降低。而当按 4:6 的比例添加木聚糖酶与纤维素酶协同作用降解木瓜皮提取果胶时(参见图 2), 果胶的得率可达到 22.15%, 由此可知复合酶更有利于木瓜果皮果胶的提取。

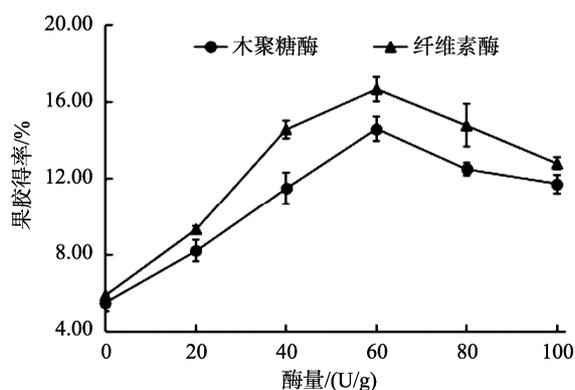
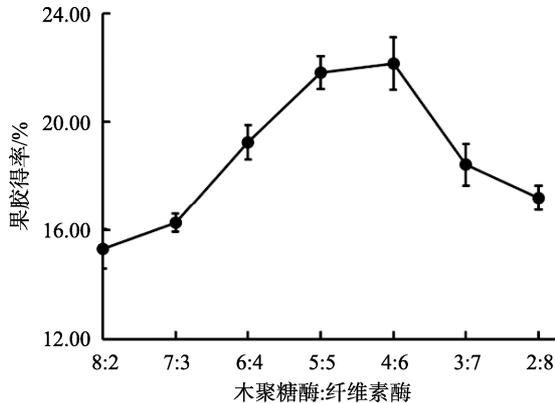


图 1 单一酶用量对果胶得率影响(n=3)

Fig.1 Effects of single enzyme dosages on pectin yields (n=3)

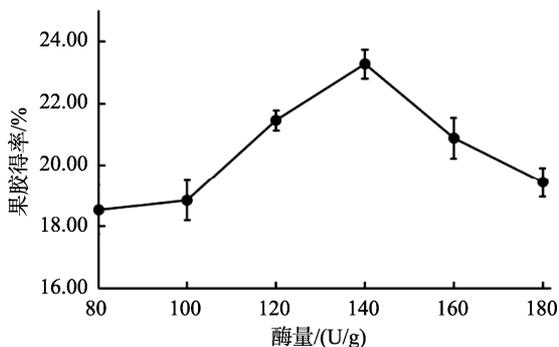
#### 2.1.2 复合酶比例对果胶得率的影响

由图 2 可知, 随着纤维素酶添加比例的提高, 果胶得率呈先增大后降低的趋势。当木聚糖酶与纤维素酶比例为 4:6 时, 木瓜果皮果胶得率达到最高(22.15%)。这可能是适当的木聚糖酶与纤维素酶量比例更能够充分破坏木瓜皮细胞的细胞壁结构<sup>[18]</sup>, 使得果胶更容易溶出, 从而提高了果胶得率。而当继续提高纤维素酶用量, 木聚糖酶和纤维素酶比例达到 3:7 和 2:8 时, 果胶得率开始下降, 其原因可能是木瓜果皮中木聚糖与纤维素含量不同, 因此对两种酶用量的比例要求不同。

图 2 复合酶比例对果胶得率影响( $n=3$ )Fig.2 Effects of complex enzyme ratios on pectin yields ( $n=3$ )

### 2.1.3 复合酶总量对果胶得率的影响

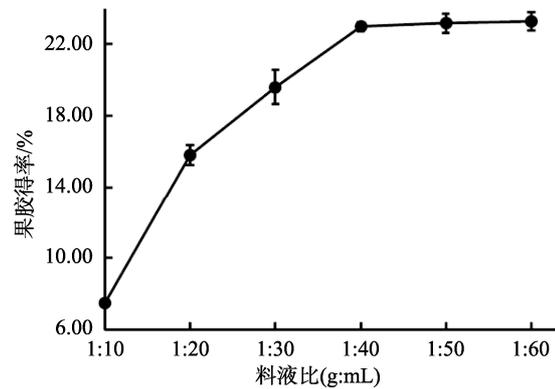
复合酶总量对果胶得率的影响结果见图 3, 当复合酶总量为 140 U/g 时的果胶得率达到最高(23.27%), 远高于不加酶时的果胶得率(图 1)。但随着复合酶总量不断提高, 果胶得率也开始明显下降, 其原因是当酶量增加时, 反应体系中的果胶酶成分也逐渐增加, 从而造成木瓜果皮果胶成分被部分水解, 导致得率降低。综上所述, 复合酶用量对果胶得率影响显著性高于酶比例对果胶得率的影响, 且考虑到复合酶用量与其他因素的交互作用, 综上, 本研究在木聚糖酶与纤维素酶活力单位比例为 4:6 条件下, 选择 120、140、160 U/g 3 个复合酶用量进行正交优化。

图 3 复合酶总量对果胶得率影响( $n=3$ )Fig.3 Effects of total amount of complex enzymes on pectin yields ( $n=3$ )

### 2.1.4 料液比对果胶得率的影响

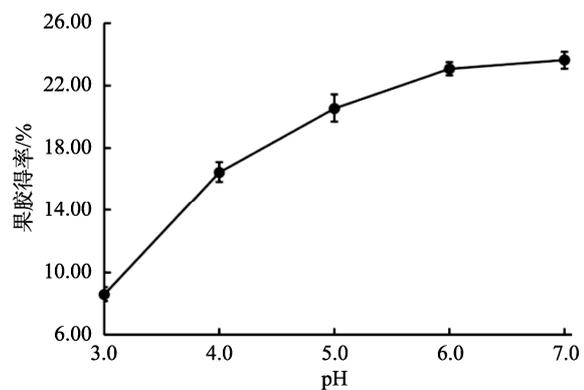
如图 4 所示, 料液比小于 1:40 (g:mL) 时, 果胶提取率与之呈现正相关, 而当料液比大于 1:40 (g:mL) 时, 果胶得率的变化趋于平缓。这主要是由于酶用量为一定值时, 缓冲液在细胞内的扩散速度与料液比成正比关系, 扩散越强, 提取率越高。但是当料液比增加大一定程度时, 会影响单位体积内的酶浓度, 进而影响酶对细胞壁的降解能力, 从而导致果胶提取率不再明显提升。另外, 也可能是由于当体系中料液比过高时, 随着体系中其他可溶物的增加进一

步阻碍了复合酶与纤维素、半纤维素的结合及纤维组织中果胶的释放。因此最终选择料液比为 1:30、1:40、1:50 (g:mL) 进行正交优化实验。

图 4 料液比对果胶得率影响( $n=3$ )Fig.4 Effects of solid-liquid ratios on pectin yields ( $n=3$ )

### 2.1.5 酶解 pH 对果胶得率的影响

在确定以上最佳提取因素后, 测定复合酶在不同 pH 条件下(3.0、4.0、5.0、6.0、7.0)的果胶提取效果。如图 5 所示, pH 对果胶的提取得率有影响, 当 pH 为 3.0 时, 果胶得率仅有 8.59%, 随着 pH 升高, 果胶得率也逐渐升高。而当 pH 大于 6.0 后, 果胶得率的提高较为缓慢, 峰值为 23.62%。这是因为目前报道的大多数木聚糖酶、纤维素酶的最适作用 pH 在中性至弱酸区间<sup>[19-21]</sup>, 这也说明酶解反应需要在合适的 pH 下才能高效进行。另外, 当 pH 为 7.0 时, 由于过多的单糖被释放出来, 导致后处理时出现美拉德反应, 使得果胶颜色发生褐变<sup>[22]</sup>, 因此最终选定 pH 6.0 为最适酶解进行正交优化实验。

图 5 酶解 pH 对果胶得率影响( $n=3$ )Fig.5 Effects of enzymatic hydrolysis pH on pectin yields ( $n=3$ )

### 2.1.6 酶解温度对果胶得率的影响

如图 6 所示, 当温度范围在 30~60 °C 范围时, 随着酶解温度的升高, 果胶得率也不断提高, 并在 60 °C 达到最高值(26.09%), 但继续升高酶解温度, 果胶得率显著下降。酶作为蛋白质在低温条件下具有较好的稳定性, 但活性较低, 较高

的温度有助于物质扩散而提高反应效率, 但当温度过高时酶会发生变性, 导致酶活性会下降或丧失, 从而降低果胶得率。故本研究确定最佳酶解温度为 60 °C, 其与目前报道的大多数木聚糖酶、纤维素酶的最适酶解温度范围相符<sup>[19-21]</sup>。最终选择 50、60、70 °C 3 个温度进行正交优化实验。

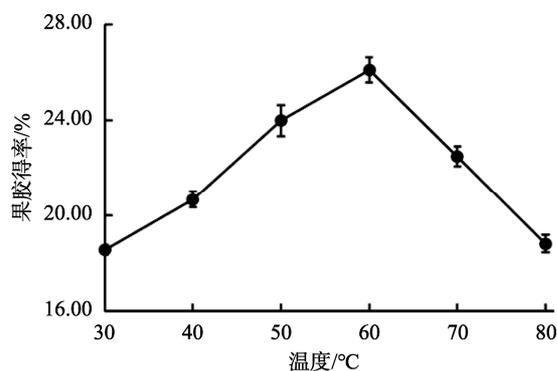


图 6 酶解温度对果胶得率影响(n=3)

Fig.6 Effects of enzymatic hydrolysis temperatures on pectin yields (n=3)

纤维素成分充分降解, 从而促进果胶的释放, 而当酶解 3 h 后果胶已基本完全溶解出来, 继续延长酶解时间, 会造成部分果胶降解, 同时酶解时间过长也会造成反应体系中的木聚糖酶及纤维素酶的稳定性变差。因此本研究选定复合酶解时间 2、3、4 h 进行正交优化。

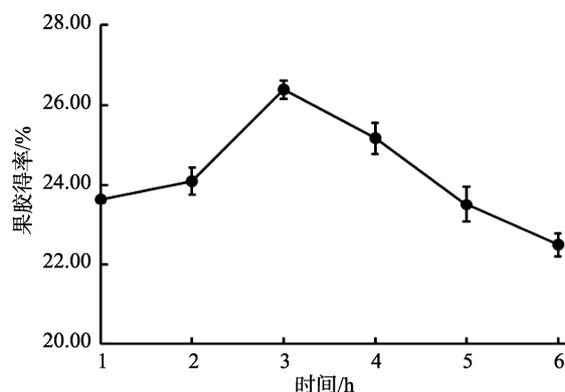


图 7 酶解时间对果胶得率影响(n=3)

Fig.7 Effects of enzymatic hydrolysis time on pectin yields (n=3)

2.1.7 酶解时间对果胶得率的影响

如图 7 所示, 随着酶解时间的延长, 木瓜果皮果胶得率先增加后降低。当酶解时间为 3 h 时, 果胶得率最高可达 26.38%; 当酶解时间超过 3 h, 果胶得率持续下降。这是因为适当的酶解时间有助于复合酶将细胞壁中的木聚糖及纤

2.2 正交实验

在单因素实验基础上, 以木瓜果皮果胶得率为指标, 选择酶解温度、酶解时间、料液比及复合酶总量进行四因素三水平的  $L_9(3^4)$  正交实验, 结果如表 2 所示。

表 2 正交实验结果  
Table 2 Orthogonal test results

实验号	A 酶解温度/°C	B 酶解时间/h	C 料液比(g:mL)	D 复合酶总量/(U/g)	果胶提取得率/%			总和	平均值
1	1 (50)	1 (2)	1 (1:30)	1 (120)	23.27	22.65	21.69	67.61	22.54
2	1 (50)	2 (3)	2 (1:40)	2 (140)	24.30	24.50	24.64	73.44	24.48
3	1 (50)	3 (4)	3 (1:50)	3 (160)	25.25	25.08	25.70	76.03	25.34
4	2 (60)	1 (2)	2 (1:40)	3 (160)	25.76	25.78	25.68	77.22	25.74
5	2 (60)	2 (3)	3 (1:50)	1 (120)	28.78	28.43	28.80	86.01	28.67
6	2 (60)	3 (4)	1 (1:30)	2 (140)	24.74	24.89	24.41	74.04	24.68
7	3 (70)	1 (2)	3 (1:50)	2 (140)	25.25	25.30	24.63	75.18	25.06
8	3 (70)	2 (3)	1 (1:30)	3 (160)	22.88	22.80	22.17	67.85	22.62
9	3 (70)	3 (4)	2 (1:40)	1 (120)	24.46	23.98	23.40	71.84	23.95
$K_{1j}$	72.36	73.34	69.84	75.16					
$K_{2j}$	79.09	75.77	74.17	74.22					
$K_{3j}$	71.63	73.97	79.07	73.70					
$k_1$	24.12	24.45	23.28	25.12					
$k_2$	26.36	25.26	24.72	24.74					
$k_3$	23.88	24.66	26.36	24.57					
R	2.48	0.81	3.08	0.55					
最佳方案	$A_2$	$B_2$	$C_3$	$D_1$					

由正交实验结果可知(如表 2),以果胶得率为指标,各因素影响大小依次为  $C>A>B>D$ ,即料液比>酶解温度>酶解时间>复合酶总量,最佳提取工艺为  $A_2B_2C_3D_1$ ,即当酶解温度为 60 °C、酶解时间 3 h、料液比为 1:50 (g:mL)、复合酶量为 120 U/g 时木瓜果皮果胶得率最高(28.67%)。由表 3 的方差分析结果可知,酶解温度和料液比对木瓜皮中果胶的提取有极显著影响,酶解时间对木瓜皮的果胶提取有显著影响。

表 3 方差分析表  
Table 3 Analysis of variance

变异来源	自由度	平方和	均方	F	P	显著性
A	2	33.862	16.9311	105.51	0.000	**
B	2	3.178	1.5890	9.90	0.001	*
C	2	42.744	21.3718	133.18	0.000	**
D	2	1.085	0.5423	3.38	0.057	
误差	18	2.888	0.1605			
合计	26	83.757				

注:

### 2.3 果胶产品性质分析结果

如表 4 所示,采用优化工艺所得的木瓜果皮粗果胶的理化测定结果显示:干燥减重、二氧化硫含量、酸不溶灰分含量、总半乳糖醛酸含量均符合 GB 25533—2010 对果胶的要求。本研究的木瓜粗果胶的酯化度为 62.4%,属于高酯果胶,该类果胶可广泛应用于糖果及乳制品生产工业中<sup>[23]</sup>,有助于提高糖果凝胶性及稳定性、改善酸奶制品风味,而有研究表明,使用生物酶法提取工艺获得的果胶的酯化度高于其他传统方法<sup>[24]</sup>。

表 4 果胶理化指标测定结果

Table 4 Determination results of physical and chemical indexes of pectin

项目	国家标准	木瓜果皮果胶
干燥减重/%	≤12	7.8±0.3
二氧化硫/(mg/kg)	≤50	14.6±1.2
酸不溶灰分含量/%	≤1	0.5±0.09
总半乳糖醛酸含量/%	≥65	70.3±3.8
酯化度/%	-	62.4±2.1

## 3 结果与讨论

传统的果胶酸法提取存在产量低、质量差、耗时长和污染环境等缺点,酶法尤其是复合酶法提取果胶具有产量

高、质量好、能耗低和无污染等优势<sup>[6]</sup>。其中,马红恩等<sup>[25]</sup>使用复合酶分段提取柚子皮粗果胶,其得率(29.9%)高于沈锐等<sup>[26]</sup>的酸提取法(21.31%);侯玉婷等<sup>[27]</sup>使用响应面优化酶法提取山楂果胶,其得率(16.8%)高于刘晓莉等<sup>[28]</sup>的传统酸法(4.7%),并且提取的果胶多糖具有明显的体外抗氧化和抗糖化活性。另外, MARAN 等<sup>[29]</sup>利用番木瓜皮提取果胶,在微波功率 512 W、pH 1.8 时果胶得率仅有 25.41%。顾焰波等<sup>[30]</sup>在树脂用量为 5%、浸提液 pH 1.5、浸提温度为 80 °C、提取时间为 117.3 min 时,离子交换树脂法提取木瓜皮中果胶得率也仅达到 17.47%。本研究对复合酶法提取木瓜果皮果胶的方法进行研究,最终得到当酶解温度为 60 °C、酶解时间为 3 h、料液比为 1:50 (g:mL)、复合酶量为 120 U/g,粗果胶得率可达 28.67%。该方法较微波法及离子交换法相比,反应条件更为温和,能耗及成本更低,所得粗果胶的主要指标均达到国家标准要求,且属于高酯果胶,为酶法提取木瓜果皮果胶工艺的广泛应用奠定了基础。

综上所述,本研究为木瓜果皮中绿色果胶的开发提供了理论参考依据,并对推进木瓜加工废弃物的综合利用、提高木瓜的附加值、避免资源浪费、降低环境污染风险和增加农民收入具有重要意义。

### 参考文献

- [1] MOHNEN D. Pectin structure and biosynthesis [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2008, 11(3): 266–277.
- [2] TYAGI V, SHARMA P, MALVIYA R. Pectins and their role in food and pharmaceutical industry: A review [J]. *J Chronother Drug Deliv*, 2015, 6(3): 65–77.
- [3] SUNDARRAJ AA, RANGANATHAN TV. A review-Pectin from agro and industrial waste [J]. *Int J Appl Environ Sci*, 2017, 12(10): 1777–1801.
- [4] 邝瑞彬, 魏岳荣, 杨护, 等. 番木瓜米酒酿造工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(18): 63–67.  
KUANG RB, WEI YR, YANG H, *et al.* Research on brewing technology of papaya rice wine [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(18): 63–67.
- [5] DZOGBEFIA VP, DJOKOTO DK. Combined effects of enzyme dosage and reaction time on papaya juice extraction with the aid of pectic enzymes-A preliminary report [J]. *J Food Biochem*, 2006, 30(1): 117–122.
- [6] 杨明, 刘晓辉, 何培仪. 微波法提取番木瓜果皮果胶工艺研究[J]. *农产品加工*, 2012, (8): 73–75.  
YANG M, LIU XH, HE PY, *et al.* Extracting pectin with microwave from papaya peel [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2012, (8): 73–75.
- [7] 王承福, 陆廷祥, 张廷磊, 等. 果胶提取, 生物活性及食品应用的研究进展[J]. *广东化工*, 2021, 48(16): 46–48.  
WANG CF, LU TX, ZHANG YL, *et al.* The research of pectin extraction, biological activity and food application [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2021, 48(16): 46–48.
- [8] 何子杨, 张士凯, 王雨心, 等. 果胶提取技术及功能应用研究进展[J]. *饮料工业*, 2021, 24(2): 73–80.  
HE ZY, ZHANG SK, WANG YX, *et al.* Research progress of pectin extraction technology and functional application [J]. *Beverage Ind*, 2021,

- 24(2): 73–80.
- [9] SANDARANI M. A review: Different extraction techniques of pectin [J]. *J Pharmacog Nat Prod*, 2017, 3(3): 1–5.
- [10] 张雪娇, 成昭, 苗延青, 等. 微波辅助酶法从橙皮中提取果胶的实验研究[J]. *应用化工*, 2021, 50(2): 412–414, 418.  
ZHANG XJ, CHENG Z, MIAO YQ, *et al.* Extraction of pectin from orange peel using active enzyme assisted with microwave [J]. *Appl Chem Ind*, 2021, 50(2): 412–414, 418.
- [11] 刘艳, 谭妃, 李定金, 等. 火龙果皮果胶的酶法提取及其理化性质研究[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(6): 109–114.  
LIU Y, TAN F, LI DJ, *et al.* Study on enzymatic extraction and physicochemical properties of pectin from dragon fruit peel [J]. *Storage Process*, 2020, 20(6): 109–114.
- [12] 余杰, 王晓红, 刘丽, 等. 酸法提取火龙果果皮中果胶 [J]. *赤峰学院学报(自然科学版)*, 2020, 36(5): 24–26.  
YU J, WANG XH, LIU L, *et al.* Extraction of pectin from pitaya peel by acid method [J]. *J Chifeng Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 36(5): 24–26.
- [13] 王艳翠, 卢韵朵, 史吉平, 等. 复合酶法提取苹果渣中的果胶及产品性质分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2019, 38(5): 30–36.  
WANG YC, LU YD, SHI JP, *et al.* Extraction of pectin from apple pomace by complex enzymes and analysis of product properties [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2019, 38(5): 30–36.
- [14] 顾焰波, 刘显明, 褚倩, 等. 离子交换法提取木瓜果皮果胶工艺研究[J]. *食品工业*, 2013, 34(12): 19–21.  
GU YB, LIU XM, ZHUO Q, *et al.* Study on the extraction of pectin from papaya peel with the method of ion-exchange [J]. *J Food Ind*, 2013, 34(12): 19–21.
- [15] 秦召. 木瓜果细胞壁组分分离, 结构表征和应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
QIN Z. Fractionation, structural characterization and application of cell wall components in Chinese quince fruits [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [16] MILLER GL. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar [J]. *Anal Chem*, 1959, 31(3): 426–428.
- [17] CHENG Z, CHEN D, WANG QY, *et al.* Identification of an acidic endo-polygalacturonase from *Penicillium oxalicum* CZ1028 and its broad use in major tropical and subtropical fruit juices production [J]. *J Biosci Bioeng*, 2017, 123(6): 665–672.
- [18] CHENG Z, XIAN L, CHEN D, *et al.* Development of an innovative process for high-temperature fruit juice extraction using a novel thermophilic endo-polygalacturonase from *Penicillium oxalicum* [J]. *Front Microbiol*, 2020, 11: 1200.
- [19] MANDAL A. Review on microbial xylanases and their applications [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2015, 4(3): 178–187.
- [20] 朱年青, 夏文静, 勇强. 里氏木霉纤维素酶分离纯化及酶学性质[J]. *生物加工过程*, 2010, 8(3): 40–43.  
ZHU NQ, XIA WJ, YONG Q. Purification and characterization of cellulase from *Trichoderma reesei* [J]. *Chin J Bioproc Eng*, 2010, 8(3): 40–43.
- [21] 陶毅明, 马素娟, 邹小兵, 等. 灰绿曲霉产纤维素酶的研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2010, 49(3): 391–395.  
TAO YM, MA SJ, WU XB, *et al.* Study on cellulase production by *Aspergillus cinerea* [J]. *J Xiamen Univ (Nat Sci)*, 2010, 49(3): 391–395.
- [22] 李卫林. 欧柑橘果皮果胶提取工艺条件研究[J]. *轻工学报*, 2012, 27(4): 44–47.  
LI WL. Research on the technology conditions pectin extraction from *Citrus suavisina* Hort. et Tanaka peel [J]. *J Light Ind*, 2012, 27(4): 44–47.
- [23] 刘敬然, 华霄, 谭婧, 等. 超高甲氧基果胶在食品乳液中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(2): 277–283.  
LIU JR, HUA X, TAN J, *et al.* Application of ultrahigh methoxylated pectin in food emulsion [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(2): 277–283.
- [24] 任秋慧, 卢韵朵, 廖鲜艳, 等. 酸法提取苹果渣中的果胶及其性质分析[J]. *中国酿造*, 2018, 37(1): 86–91.  
REN QH, LU YD, LIAO XL, *et al.* Extraction of pectin from apple pomace by acid and analysis of its property [J]. *China Brew*, 2018, 37(1): 86–91.
- [25] 马红恩, 邓天发, 白先放, 等. 酶法提取柚子果皮果胶的研究[J]. *食品与药品*, 2013, 15(1): 30–33.  
MA HEN, DENG TF, BAI XF, *et al.* Study on enzymatic extraction of pectin in shaddock peel [J]. *Food Drug*, 2013, 15(1): 30–33.
- [26] 沈锐, 李磊, 谢青松, 等. 柚子皮中果胶的提取工艺优化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(13): 3327–3334.  
SHEN R, LI L, XIE QS, *et al.* Optimization of the extraction process of pectin from shaddock peel [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(13): 3327–3334.
- [27] 侯玉婷, 张鑫雨, 苏金芳, 等. 响应面优化酶法辅助提取山楂果胶及其体外抗氧化和抗糖化活性[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(22): 180–186.  
HOU YT, ZHANG XY, SU JF, *et al.* Optimization of enzymatic-assisted extraction of haw pectin by response surface methodology and its anti-oxidation/glycation activities *in vitro* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(22): 180–186.
- [28] 刘晓莉, 姜少娟. 山楂果胶提取工艺的研究[J]. *黑龙江农业科学*, 2014, (10): 107–112.  
LIU XL, JIANG SJ. Study on extraction technology of hawthorn pectin [J]. *Heilongjiang Agric Sci*, 2014, (10): 107–112.
- [29] MARAN JP, PRAKASH KA. Process variables influence on microwave assisted extraction of pectin from waste *Carcia papaya* L. peel [J]. *Int J Biol Macromol*, 2015, 73: 202–206.
- [30] 顾焰波, 江冰. 离子交换法提取木瓜皮中果胶的动力学研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(5): 186–190.  
GU YB, JIANG B. Kinetics study on extraction of pectin from papaya peel by ionexchange method [J]. *China Cond*, 2020, 45(5): 186–190.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

## 作者简介



韦云伊, 硕士, 讲师, 主要研究方向为天然产物提取。

E-mail: 236721391@qq.com



程忠, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品微生物酶资源开发与利用。

E-mail: zhongchengnu@163.com