

# 黄粉虫粗多糖的提取工艺优化

伊思静, 张天宝, 郭继虎, 杜慧玲, 李咏铃

(山西农业大学文理学院, 山西太谷 030801)

**摘要:** 本文以黄粉虫脱脂虫粉为原料, 以蒸馏水为提取剂, 在超声波下, 从温度、功率、液料比和提取时间四个方面探究提取黄粉虫粗多糖的工艺条件。在单因素试验基础上, 以黄粉虫粗多糖得率为响应值, 采用响应面法优化黄粉虫粗多糖提取工艺。设计响应面试验结果表明, 在超声波提取下, 各因素对粗多糖得率的影响从大到小依次为: 液料比>超声功率>提取温度>提取时间。在试验范围内最佳提取工艺为液料比 25 mL/g、超声功率 300 W、提取温度 80 °C、提取时间 60 min, 此时黄粉虫粗多糖得率理论值为 2.10%, 实测值为 (2.12±0.04)%, 与模型预测值相符, 表明优化的黄粉虫粗多糖提取工艺合理。同时, 与相同条件下的水热提取法相比, 超声波的辅助提取的黄粉虫粗多糖得率得以提升。

**关键词:** 超声波; 响应面; 黄粉虫; 粗多糖

文章编号: 1673-9078(2020)08-194-201

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.8.0211

## Optimization of the Extraction Process of Crude Polysaccharides from *Tenebrio molitor*

YI Si-jing, ZHANG Tian-bao, GUO Ji-hu, DU Hui-ling, LI Yong-ling

(College of Arts and Sciences, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** In this paper, the extraction conditions of polysaccharides from *Tenebrio molitor* were studied by using the ultrasonic methods with *Tenebrio molitor* as raw material and distilled water as extractant. The extraction conditions of crude polysaccharides were studied from four aspects: temperature, power, liquid-material ratio and extraction time. On the basis of single factor test, the response surface methodology was used to optimize the crude polysaccharides yield of *Tenebrio molitor*. Under the condition of ultrasonic extraction, the results showed that the influence of each factor on the yield ranged from the largest to the least: the ratio of liquid to solid, the ultrasonic power, the extraction temperature, the extraction time. The optimal extraction condition of crude polysaccharides yield is the ratio of liquid to solid 25 mL/g, ultrasonic power 300 W, extraction temperature 60 °C, and extraction time 150 min. Under these conditions, crude polysaccharides yield of *Tenebrio molitor* is predicted as 2.10%. The measured crude polysaccharides yield reached (2.12±0.04)%, which was well matched with the model predicted yield, indicating that the optimized extraction process of crude polysaccharides from *Tenebrio molitor* was reasonable. At the same time, the yield of ultrasonically extracted crude polysaccharides from *Tenebrio molitor* was improved compared with the hydrothermal extraction method under the same conditions.

**Key words:** ultrasonic; response surface methodology; *Tenebrio molitor*; crude polysaccharides

引文格式:

伊思静,张天宝,郭继虎,等.黄粉虫粗多糖的提取工艺优化[J].现代食品科技,2020,36(8):194-201

YI Si-jing, ZHANG Tian-bao, GUO Ji-hu, et al. Optimization of the extraction process of crude polysaccharides from *Tenebrio molitor* [J].

Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 194-201

收稿日期: 2020-03-05

基金项目: 山西省重点研发计划项目(201703D221025-3); 山西省重点研发计划重点项目(201803D221011-11); 山西农业大学科研启动项目(2017YJ36); 山西省优秀博士来晋奖励项目(SXYBK201717)

作者简介: 伊思静(1990-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 稀土发光软材料, 活性天然产物的发现与合成

通讯作者: 张天宝(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 活性天然产物的发现与合成

黄粉虫,又名面包虫,属于鞘翅目、拟步甲科,是一种重要的资源昆虫<sup>[1]</sup>。黄粉虫便于人工饲养,其幼虫已经作为高蛋白活体饲料广泛用于鸟类、牛蛙等经济动物的饲养,经过加工可作为食用昆虫<sup>[1]</sup>。从营养学的角度分析,黄粉虫蛋白质、脂肪含量丰富并且含有多种氨基酸,随着社会的进步以及人们生活水平的逐渐提高,黄粉虫因具有丰富的营养物质而越来越受到广大消费者的青睐<sup>[2-5]</sup>。近年来,关于黄粉虫的利用和开发国内外科研工作者已进行了一定研究,包括黄粉虫的生物学特性、饲养管理、饲料利用等方面<sup>[3,4]</sup>。更值得关注的是,有研究发现黄粉虫中含有具有生物活性的抗氧化肽<sup>[2]</sup>、抗菌肽<sup>[6]</sup>和抗冻蛋白<sup>[7]</sup>,其可以对生物体内过量的游离基进行清除,抑制脂质氧化。

多糖是广泛存在于自然界的天然高分子化合物,与生物体维持自身机能的机制紧密相关,具有丰富的生物学活性,如造血、免疫调节和抗氧化等功能<sup>[8]</sup>,因而被广泛应用到食品和制药工业中<sup>[9-11]</sup>。研究发现,黄粉虫壳聚糖不仅可有效处理养殖废水<sup>[12,13]</sup>,而且对大肠杆菌具有很好的抑制作用<sup>[14]</sup>,可用于果蔬保鲜和消毒等方面。此外,黄粉虫多糖也同样具有一定的抗氧化作用,并且黄粉虫多糖的体外抗氧化能力也强于从黄粉虫体内提取的抗氧化肽,可作为潜在的天然抗氧化剂来源<sup>[15]</sup>。

动植物多糖的提取方法目前有水热法、超声波提取法、微波辅助提取法、酶辅助提取法和超临界萃取法等<sup>[16,17]</sup>。其中,超声波提取法操作简单,提取时间短,有效成分的得率高,成本低,因而被广泛应用到动植物多糖的提取中<sup>[18-20]</sup>。研究表明,超声波辅助提取所需温度低,可以有效保持多糖中的活性成分不被破坏,有效最小化对提取物的热损失,是理想的多糖活性物提取方式<sup>[21]</sup>。然而,目前对黄粉虫中多糖的提取还局限在传统的水热法研究,提取效率低,耗时长,得率也不是很高。因此,采用新的提取工艺来获得较高的提取效率和减少多糖活性成分的损失是十分必要的<sup>[22-24]</sup>。本实验采用的超声波提取法对黄粉虫粗多糖的提取进行了研究,并在单因素实验的基础上利用响应面法探讨了多因素对粗多糖得率的影响程度和实验可行条件下的最佳提取条件。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

过60目筛脱脂黄粉虫虫粉(山西农业大学农业废弃物生物转化技术中心提供,蛋白质含量69.96%,油脂含量1.43%,可溶性糖含量4.92%,灰分4.22%);

氢氧化钠(AR)、浓盐酸、3,5-二硝基水杨酸(AR)、葡萄糖(AR):国药集团化学试剂有限公司;其他试剂均为分析纯,实验所用水均为高纯水。

### 1.2 主要仪器设备

超声波清洗器(KM-300DE),昆山美美超声仪器有限公司;医用离心机(AXTD5A),盐城市安信实验有限公司;电子分析天平(Sartorius BS210S),北京赛多利斯天平有限公司;紫外-可见分光光度计(HP-8453E),上海天美科学仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 黄粉虫粗多糖的提取

称取5.0g虫粉于150mL锥形瓶中,按所需液料比加入相应体积的蒸馏水,在所需温度、功率和提取时间下进行超声波提取。因超声波仪器配置不能设置搅拌,故在超声波提取过程中没有搅拌步骤。第一次提取后,将锥形瓶中样品进行离心,收集上清液。将剩余固体加入相应体积的蒸馏水注入锥形瓶中,再次进行超声波提取。重复两次后,收集三次的提取液,即为粗多糖样品溶液。

#### 1.3.2 粗多糖含量的分析

多糖含量的分析采用DNS(3,5-二硝基水杨酸)比色法。用移液管移取50mL样品溶液于100mL容量瓶锥形瓶中,加入5mL6mol/L的浓盐酸,在90℃水浴中加热10min。冷却至室温后,加2~3滴酚酞试剂,然后转移到100mL容量瓶中,用6mol/L的氢氧化钠溶液中和,定容。取2mL定容后的样品溶液于25mL比色管中,加1mL蒸馏水,加1.5mL的DNS试剂,沸水浴中5min,然后迅速放入冷水中冷却至室温,定容到25mL,测得样品吸光度,代入葡萄糖标准曲线计算粗多糖含量。

虫粉中粗多糖的得率按下列公式计算:

$$\text{粗多糖总得率}/\% = \frac{\text{样品中粗多糖含量} \times \text{样品中溶液总体积}}{\text{称取虫粉的质量}} \times 100\%$$

### 1.4 单因素试验的设计

称取5.0g虫粉5份分别置于锥形瓶中,在液料比为20mL/g,功率为300W,提取温度为80℃,提取时间为30min的基本条件下对虫粉进行3次提取,保持其他条件不变,设置液料比(10、15、20、25、30mL/g)、提取温度(50、60、70、80℃)、提取时间(60、90、120、150、180min)和超声功率(180、210、240、270、300W)等不同水平,以黄粉虫粗多糖得率为指标考查提取工艺。

由于超声时间过长会引起提取温度的上升,且当试验温度在 50 ℃ 以下时,这一因素引起的试验温度提升较为明显,因此选择基本提取时间为 30 min 进行单因素试验讨论,并选择最低提取温度为 50 ℃。同

时,在试验过程中每隔十分钟即测定一次提取温度,通过外力的干扰以进一步保证提取温度的准确性。

## 1.5 响应面试验的设计

表 1 响应面试验因素与水平表

水平	因素			
	A 液料比/(mL/g)	B 提取时间/min	C 提取功率/W	D 提取温度/℃
-1	10	60	180	50
0	20	120	240	65
1	30	180	300	80

过 60 目筛脱脂黄粉虫虫粉(山西农业大学农业废弃物生物转化技术中心提供,蛋白质含量 69.96%,油脂含量 1.43%,可溶性糖含量 4.92%,灰分 4.22%);氢氧化钠 (AR)、浓盐酸、3,5-二硝基水杨酸 (AR)、葡萄糖 (AR): 国药集团化学试剂有限公司;其他试剂均为分析纯,实验所用水均为高纯水。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验结果

#### 2.1.1 液料比对粗多糖得率的影响

选择固定提取温度为 80 ℃、超声功率为 300 W、提取时间为 30 min 的条件下,在 10~30 mL/g 的液料比范围内,对黄粉虫脱脂虫粉进行粗多糖提取,结果见图 1。

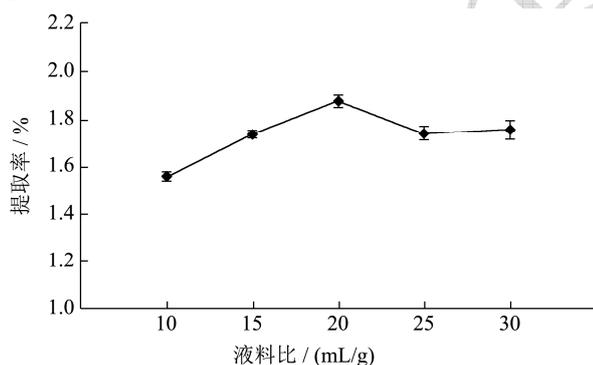


图 1 液料比对粗多糖得率的影响

Fig.1 Effect of liquid-solid ratio on the yield of crude polysaccharides

由图 1 可知,当液料比小于等于 20 mL/g 时,得率随液料比的增加而递增。这是由于溶剂不断增多,有利于黄粉虫粗多糖的溶出和扩散。当液料比为 25 mL/g 时,得率不再继续增加,反而有所减少。这可能是由于随着溶剂继续增多,黄粉虫粗多糖在巨大的空化作用下开始水解,导致其含量降低<sup>[25]</sup>。在试验范围内,液料比为 20 mL/g 可获得最高的粗多糖得率。

#### 2.1.2 温度对粗多糖得率的影响

选择固定提取液料比为 20 mL/g、超声功率为 300 W、提取时间为 30 min 的条件下,在 50~80 ℃ 的温度范围内,对黄粉虫脱脂虫粉进行粗多糖提取,提取结果见图 2。

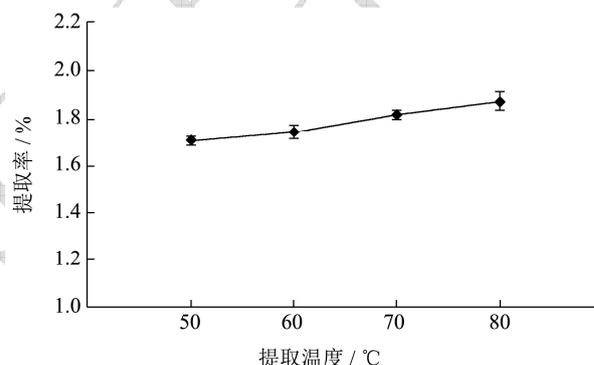


图 2 提取温度对粗多糖得率的影响

Fig.2 Effect of extraction temperature on the yield of crude polysaccharides

由图 2 可知,在试验所选提取温度范围内,随着提取温度的升高,粗多糖得率也在增加。这是因为升高温度促使溶剂分子扩散运动速度加快,从而提高了黄粉虫粗多糖的析出速率和得率<sup>[26]</sup>,这一实验结论与水热法提取黄粉虫粗多糖时随温度变化的趋势一致<sup>[15]</sup>。其中,提取温度从 60 ℃ 升到 70 ℃ 时,得率增加幅度最大,提取温度从 50 ℃ 升到 60 ℃ 与 70 ℃ 升到 80 ℃ 的得率增加幅度相对较小。研究表明水热法提取粗多糖的最佳温度在 90 ℃<sup>[15]</sup>,由于仪器温度设置限制,样品温度难以在 80 ℃ 以上维持稳定,并且过高温也易导致提取物的热损伤,因此在试验可行范围内,最佳提取温度为 80 ℃。

#### 2.1.3 提取时间对粗多糖得率的影响

选择固定提取温度为 80 ℃、超声功率为 300 W、提取液料比为 20 mL/g 的条件下,在 60~180 min 的时间范围内,对黄粉虫脱脂虫粉进行粗多糖提取,提取结果见图 3。

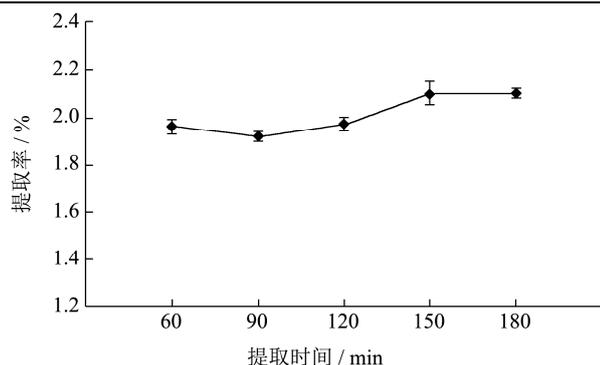


图3 提取时间对粗多糖得率的影响

Fig.3 Effect of extraction time on the yield of crude polysaccharides

由图3可知,提取时间在60 min到120 min的范围内,随着提取时间的增加,粗多糖得率变化不明显。从120 min到150 min的时间递增范围内,粗多糖得率提高幅度较大,并在150 min后不再发生明显变化。在试验范围内,提取时间为180 min的粗多糖得率与150 min的得率相等,为最佳提取时间。

#### 2.1.4 超声功率对粗多糖得率的影响

选择固定提取温度为80℃、提取时间为30 min、提取液料比为20 mL/g的条件下,在180~300 W的超声功率范围内,对黄粉虫脱脂虫粉进行粗多糖提取,提取结果见图4。

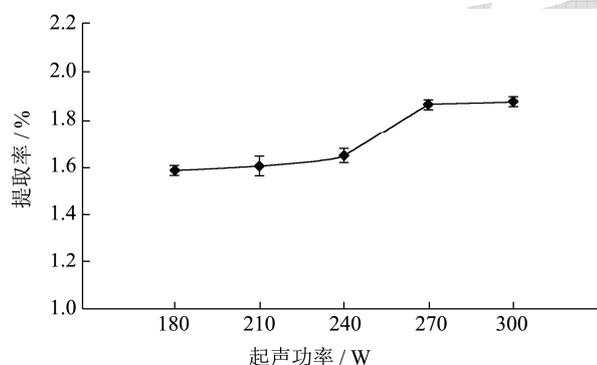


图4 超声功率对粗多糖得率的影响

Fig.4 Effect of ultrasound power on the yield of crude polysaccharides

由图4可知,在试验所选超声功率范围内,随着超声功率的增加,粗多糖得率总体呈升高趋势。当超声功率从180 W增加到240 W时,粗多糖得率随功率的增加而提高的幅度较小。这可能是由于较低超声功率下,不足以使细胞破碎,而当超声功率从240 W升高到270 W时,细胞破碎程度增大,细胞内粗多糖物质得以向溶剂中扩散,粗多糖得率显著升高。随后,

得率随着超声功率增加趋于稳定,不再增加。因此,在仪器可行范围内,超声功率在270~300 W时粗多糖得率最高。关志强等<sup>[18]</sup>采用超声波辅助提取海藻糖的研究表明,在超声功率低于400 W时,随着超声功率的增加,海藻糖的提取浓度随之增加,与本实验超声波功率对多糖提取的影响趋势是一致的。

## 2.2 响应面实验结果与分析

根据软件设计因素进行响应面实验,结果见表2。利用软件Design expert 10.0.4,以黄粉虫粗多糖得率为响应值进行分析,经过回归拟合后得出各影响因素对响应值的影响的多元回归方程为:

$$Y=1.82+0.19A+0.0083B+0.10C+0.063D+0.013AB+0.022AC+0.027AD+0.012BC-0.042BD-0.070CD-0.013A^2+0.0068B^2+0.021C^2+0.011D^2$$

对黄粉虫粗多糖得率进行方差分析、方程显著性检验、系数显著性检验进行分析,结果见表3。

由表3可知,回归模型具有极低的 $p$ 值( $p=0.0044<0.0001$ ),说明模型显著性较好。其中, $A$ (液料比)和 $C$ (超声功率)的 $p$ 值小于0.01,对响应值影响极显著, $D$ (提取温度)的 $p$ 值小于0.05,对响应值影响显著,其余交互不显著。回归方程的可信度分析表明,失拟项 $p$ 值大于0.05,对响应值无显著影响,而决定系数( $R^2$ )为0.8153,表明此模型能反映81.53%的响应面值的变化,拟合度较好,校正决定系数(adj- $R^2$ )为0.7306,说明黄粉虫粗多糖得率总变异中大约73.06%是由独立变量决定的,回归方程和试验所得数据之间存在一定契合度。根据 $F$ 值可判断四因素对得率的影响程度从大到小依次为:液料比( $A$ )>超声功率( $C$ )>温度( $D$ )>提取时间( $B$ )。

图5为各因素的响应面分析和等高线图,表示多个变量对粗多糖得率的交互影响。从图中可以看出,随着液料比和提取时间的增加,粗多糖的得率呈现出先升高后降低的趋势,且液料比的变化趋势比提取时间大,说明液料比对粗多糖得率的影响更显著。而随着超声功率和提取温度的增加,粗多糖得率一直呈现上升趋势,这与单因素实验的结果相吻合。结合回归模型分析得出,当黄粉虫脱脂虫粉质量为5.0 g时,超声波提取黄粉虫粗多糖的最佳工艺条件为:液料比25.60 mL/g,提取时间62.78 min,超声功率299 W,提取温度77.44℃。在此条件下,预测黄粉虫粗多糖得率为2.10%。

表2 响应面试验设计及结果

Table 2 Response surface design arrangement and experimental results

编号	液料比/(mL/g)	时间/min	功率/W	温度/°C	得率/%
1	30	120	300	80	2.01
2	30	120	240	50	1.93
3	20	120	180	50	1.55
4	20	180	180	65	1.60
5	20	120	240	65	1.74
6	10	120	240	80	1.74
7	20	180	240	80	1.85
8	10	180	240	65	1.69
9	20	60	240	80	1.94
10	20	120	240	65	1.89
11	30	180	240	65	2.12
12	30	120	180	65	2.00
13	10	120	180	65	1.62
14	20	60	180	65	1.80
15	30	120	300	65	2.09
16	30	120	240	80	1.99
17	20	120	240	65	1.74
18	10	120	240	50	1.57
19	20	180	300	65	1.90
20	20	120	240	65	1.79
21	10	120	300	65	1.62
22	20	60	240	50	1.75
23	20	120	300	50	1.99
24	20	120	240	65	1.93
25	20	180	240	50	1.83
26	20	120	180	80	1.85
27	10	60	240	65	1.53
28	20	60	300	65	2.05
29	30	60	240	65	1.91

表3 拟合模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance of the fitted model

方差来源	平方和	自由度	均值	F值	p值	显著性
模型	0.64	14	0.046	4.41	0.0044	**
A	0.43	1	0.43	41.19	<0.0001	**
B	0.0000083	1	0.0000083	0.00080	0.98	
C	0.13	1	0.13	12.29	0.0003	**
D	0.048	1	0.048	4.62	0.050	*
AB	0.00063	1	0.00063	0.060	0.81	
AC	0.0020	1	0.0020	0.19	0.67	
AD	0.0030	1	0.0030	0.29	0.60	
BC	0.00063	1	0.00063	0.060	0.81	

转下页

接上页						
BD	0.0072	1	0.0072	0.70	0.42	
CD	0.020	1	0.020	1.88	0.20	
A <sup>2</sup>	0.0011	1	0.0011	0.11	0.75	
B <sup>2</sup>	0.00030	1	0.00030	0.029	0.87	
C <sup>2</sup>	0.0027	1	0.0027	0.26	0.62	
D <sup>2</sup>	0.00073	1	0.00073	0.070	0.80	
残差	0.15	14	0.010			
失拟项	0.12	10	0.0011	1.50	0.40	
纯误差	0.031	4	0.0077			
总和	0.79	28				

注: \*\*表示  $p < 0.01$  极显著, \*表示  $p < 0.05$ , 显著。

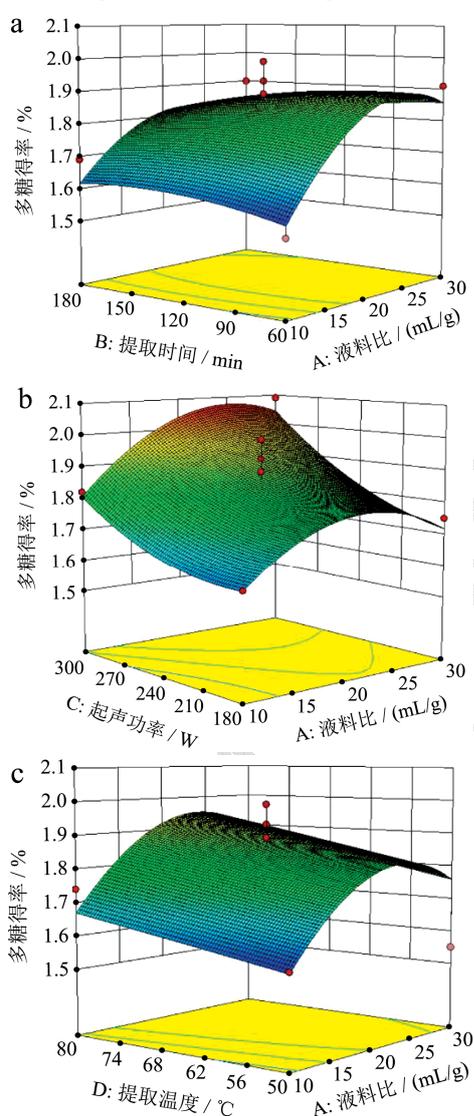


图5 提取时间和液料比交互影响曲面图

Fig.5 Mutual domino effect bent surface mapping of extraction time and liquid-solid ratio

### 2.3 试验验证

根据实际情况, 将最佳工艺条件调整为液料比 25

mL/g、超声功率 300 W、提取温度 80 °C 和提取时间 60 min。在该条件下进行 3 次试验验证, 验证试验的黄粉虫粗多糖得率为 2.08%、2.13%、2.15%, 平均得率为 2.12%, 样本的标准偏差为 0.04%, 方差为 0.0013%。验证试验的平均得率与理论得率基本一致, 表明回归模型与实际情况拟合较好, 可以有效反映各因素对黄粉虫粗多糖提取的影响。为比较超声辅助提取和水热法提取黄粉虫多糖两者方法的差异, 在超声波辅助提取的最佳工艺条件下 (液料比 25 mL/g、提取温度 80 °C 和提取时间 60 min), 对黄粉虫虫粉进行水热提取三次, 计算其多糖得率为 1.45%。因此, 试验结果表明, 与水热浸提法提取黄粉虫粗多糖, 同等液料比、温度和时间条件下, 超声波提取法能获得更高的粗多糖得率。与此同时, 与水热法提取黄粉虫多糖的最佳实验相比, 超声波辅助提取的最佳提取时间大大缩短 (水热法最佳提取时间为 158 min<sup>[15]</sup>), 可有效避免因长时间加热引起多糖活性成分的破坏。

### 3 结论

本次试验以黄粉虫脱脂虫粉为研究对象, 采用单因素试验和响应面试验, 并通过 Design expert 10.0.4 软件分析, 在超声波提取下, 各因素对黄粉虫粗多糖得率影响程度为: 液料比 > 超声功率 > 提取温度 > 提取时间。得到超声波提取黄粉虫粗多糖的最佳工艺条件为: 液料比 25 mL/g、超声功率 300 W、提取温度 80 °C、提取时间 60 min。在最佳提取工艺条件下, 黄粉虫粗多糖得率可达 2.12%, 并进行了试验验证, 验证结果显示在试验范围内理论模型得出的黄粉虫多糖提取的模型是可行的, 试验所得的优化工艺也为提取黄粉虫粗多糖提供了理论依据。同时, 通过对比验证, 同等提取工艺条件下, 超声波提取法比水热提取法可获得更高的提取效率。

## 参考文献

- [1] 陈晓鸣,冯颖.资源昆虫学概论[M].北京:科学出版社,2009:161  
CHEN Xiao-ming, FENG Ying. The Insects an Outline of Resource Entomology [M]. Beijing: Science Press, 2009: 161
- [2] 张莉莎,张建新,欧晓锋,等.黄粉虫抗氧化活性肽的分离纯化研究[J].食品科学,2009,22:165-168  
ZHANG Li-sha, ZHANG Jian-xin, OU Xiao-feng, et al. Separation and purification of antioxidant peptides from yellow mealworm [J]. Food Science, 2009, 22: 165-168
- [3] 朱琳,王向誉,聂磊,等.黄粉虫的主要功能成分及其应用研究进展[J].安徽农业科学,2018,46(3):10-12,14  
ZHU Lin, WANG Xiang-yu, NIE Lei, et al. Research progress on the main functional components and application of *Tenebrio molitor* [J]. J. Anhui Agric Sci, 2018, 46(3): 10-12, 14
- [4] Klunder H C, Wolkers-Rooijackers J, Korpela J M, et al. Microbiological aspects of processing and storage of *Edible insects* [J]. Food Control, 2012, 26(2): 628-631
- [5] Yi L, Lakemond C M M, Sagis L M C, et al. Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species [J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3341-3348
- [6] Moon H J, Lee S Y, Kurata S, et al. Purification and molecular cloning of cDNA for an inducible antibacterial protein from larvae of the coleopteran, *Tenebrio molitor* [J]. The Journal of Biochemistry, 1994, 116(1): 53-58
- [7] Qin W, Walker V K. *Tenebrio molitor* antifreeze protein gene identification and regulation [J]. Gene, 2006, 367: 142-149
- [8] Wang Y, Su Y, Wang W, et al. The advances of polysaccharide-based aerogels: preparation and potential application [J]. Carbohydrate Polymers, 2019: 226
- [9] 杨玲,胡睿智,夏嗣廷,等.植物多糖的功能性研究进展及其在动物生产中的应用[J].动物营养学报,2019,6:1-10  
YANG Ling, HU Rui-zhi, XIA Si-ting; et al. Plant polysaccharide: research progress of biological function and its application in animal production [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 6: 1-10
- [10] 张磊,王锦旭,杨贤庆,等.海洋动物多糖的研究进展[J].食品工业,2018,39(1):211-215  
ZHANG Lei, WANG Jin-xu, YANG Xian-qing, et al. Research progress of marine animal polysaccharides [J]. Food Industry, 2018, 39(1): 211-215
- [11] Ferreira A R V, Alves V D, Coelho I M. Polysaccharide-based membranes in food packaging applications [J]. Membranes, 2016, 6(2): 22
- [12] 熊晓莉,陈小蓉,邵承斌,等.黄粉虫壳聚糖处理养殖废水[J].环境工程学报,2016,10(3):1475-1479  
XIONG Xiao-li, CHEN Xiao-rong, SHAO Cheng-bin, et al. Treatment of breeding wastewater by chitosan from *Tenebrio molitor* [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(3): 1475-1479
- [13] 马瑞仙,姜婕,穆天鸽,等.黄粉虫壳聚糖对鱼塘养殖水治疗效果分析[J].畜牧兽医学(电子版),2019,11:1-3  
MA Rui-xian, JIANG Jie, MU Tian-ge, et al. Effects of the treatment of breeding wastewater by chitosan from *Tenebrio molitor* [J]. Graziery Veterinary Sciences (Electronic Version), 2019, 11: 1-3
- [14] Liu X, Ren J, Zhu Y, et al. The preservation effect of ascorbic acid and calcium chloride modified chitosan coating on fresh-cut apples at room temperature [J]. Colloid Surface A, 2016, 502: 102-106
- [15] 何钊,冯颖,孙龙,等.黄粉虫多糖响应面法提取及抗氧化活性[J].食品与生物技术学报,2011,30(5):641-647  
HE Zhao, FENG Ying, SUN Long, et al. Optimization of extraction process by using response surface methodology and antioxidant activity of polysaccharide from yellow mealworm [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2011, 30(5): 641-647
- [16] 李瑶佳.植物多糖提取方法研究进展[J].现代农业科技,2019,1:222-223  
LI Yao-jia. Research progress on extraction methods of plant polysaccharides [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019, 1: 222-223
- [17] 阚永军,施萍萍,蒋畅,等.不同提取方法对太子参多糖含量的影响[J].中国民族民间医药,2019,28(14):41-43  
KAN Yong-jun, SHI Ping-ping, JIANG Chang, et al. Effects of different extraction methods on content of polysaccharide from *Pseudostellaria heterophylla* [J]. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy, 2019, 28(14): 41-43
- [18] 任婷婷,关志强,李敏.超声波辅助渗透海藻糖提高冷冻干燥罗非鱼片品质的工艺优化[J].食品工业科技,2018,39(17):199-205  
REN Ting-ting, GUAN Zhi-qiang, LI Min. Optimization of ultrasonic-assisted infiltration of trehalose to improve the quality of freeze-dried tilapia fillets [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(17): 199-205
- [19] 陈金娥,刘慧,赵志刚,等.响应面法优化超声波提取三七根多糖工艺研究[J].中国农业科技导报,2018,20(4):138-146  
CHEN Jin-e, LIU Hui, ZHAO Zhi-gang, et al. Optimization

- of ultrasound-assisted extraction of *Panax notoginseng* root polysaccharides using response surface methodology [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(4): 138-146
- [20] 胡斌杰,陈金锋,王宫南.超声波法与传统热水法提取灵芝多糖的比较研究[J].食品工业科技,2007,2:190-192  
HU Bin-jie, CHEN Jin-feng, WANG Gong-nan. Comparative study on extraction of *Ganoderma lucidum* polysaccharide by ultrasonic and traditional hot water method [J]. Science and Technology of Food Industry, 2007, 2: 190-192
- [21] 张文,张丽芬,陈复生,等.超声波提取多糖技术的研究进展[J].粮食与油脂,2018,31(9):10-13  
ZHANG Wen, ZHANG Li-fen, CHEN Fu-sheng, et al. Advances in ultrasonic extraction of polysaccharides [J]. Cereals & Oils, 2018, 31(9): 10-13
- [22] Yin X, You Q, Jiang Z, et al. Optimization for ultrasonic-microwave synergistic extraction of polysaccharides from *Cornus officinalis* and characterization of polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 83: 226-232
- [23] 范巧宁,赵珮,高晓梅,等.不同提取方法对槐米多糖抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2014,35(21):273-277  
FAN Qiao-ning, ZHAO Pei, GAO Xiao-mei, et al. The effect of antioxidant activity on the polysaccharides from *Flos sophora* with the different extraction ways [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(21): 273-277
- [24] 刘艳艳.超声波辅助提取霍山石斛多糖及其对多糖理化性质和抗氧化活性的影响[D].芜湖:安徽工程大学,2016  
LIU Yam-yan. Extraction of polysaccharides from *Dendrobium huoshanense* by ultrasonic wave and its effect on the physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2016
- [25] 黄仁贵.零余子多糖的分离鉴定及生物活性研究[D].长沙:中南林业科技大学,2017  
HUANG Ren-gui. Study on isolation, identification and biological activity of polysaccharides derived from bulbils [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017
- [26] 杨翠娴.龙眼多糖的提取、分离纯化及初步结构分析[D].厦门:厦门大学,2007  
YANG Cui-xian. Extraction, separation and preliminary structure analysis of polysaccharide from longan fruit [D]. Xiamen: Xiamen University, 2007

---

(上接第 316 页)

- [22] 商敬敏,牟京霞,孟庆山,等.桑椹酒发酵过程中有机酸含量的变化[J].食品工业科技,2012,33(4):241-242,247  
SHANG Jing-min, MOU Jing-xia, MENG Qing-shan, et al. Change of organic acid content in mulberry wine fermentation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(4): 241-242, 247
- [23] 刘晓艳,白卫东,蒋爱民,等.荔枝果酒加工过程中有机酸的变化研究[J].中国酿造,2011,11:65-69  
LIU Xiao-yan, BAI Wei-dong, JIANG Ai-min, et al. Study on the change of organic acids in litchi fruit wine processing [J]. Chinese Brewing, 2011, 11: 65-69
- [24] 裴婷婷,兰彦平,周连第,等.果酒中高级醇形成及其控制[J].酿酒科技,2011,3:24-26.  
PEI Ting-ting, LAN Yan-ping, ZHOU Lian-di, et al. Formation and control of higher alcohols in fruit wine [J]. Brewing Technology, 2011, 3: 24-26
- [25] 张春阳,陈洁珍,吴洁芳,等.果酒成分研究进展[J].中国酿造,2014,33(10):6-9  
ZHANG Chun-yang, CHEN Jie-zhen, WU Jie-fang, et al. Research progress of fruit wine ingredients [J]. Chinese Brewing, 2014, 33(10): 6-9
- [26] 张薇薇,张秀玲.基于主成分分析和聚类分析的苹果香气成分比较及品种分类研究[J].食品工业科技,2018,39(17):217-224  
ZHANG Wei-wei, ZHANG Xiu-ling. Comparative on apple aroma components and variety classification study based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(17): 217-224