

# 纤维素酶-超声辅助提取玉米须槲皮素工艺优化

田佳琦, 徐艳阳\*, 宋勃欣, 董亚, 王雅馨

(吉林大学食品科学与工程学院, 长春 130022)

**摘要:** **目的** 采用纤维素酶-超声法从玉米须中提取槲皮素, 得到最佳工艺, 为进一步开发玉米须资源提供依据。**方法** 以槲皮素得率为指标, 通过单因素试验, 研究乙醇体积分数、液料比、超声时间、超声功率及酶用量对槲皮素得率的影响, 利用正交法对影响槲皮素得率的上述 5 个因素进行优化。**结果** 最佳提取工艺参数为乙醇体积分数 50%、液料比 25:1(mL/g)、超声时间 40 min、超声功率 200 W、酶用量 0.014 mg。在此条件下, 通过 3 次验证实验, 测得槲皮素的得率为(0.374±0.023)%。**结论** 采用正交法优化纤维素酶-超声法提取玉米须槲皮素的工艺具有可行性。

**关键词:** 玉米须; 槲皮素; 超声波; 纤维素酶; 正交法

## Optimization on extraction process of quercetin in corn silk by cellulase and ultrasound

TIAN Jia-Qi, XU Yan-Yang\*, SONG Bo-Xin, DONG Ya, WANG Ya-Xin

(College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**ABSTRACT: Objective** The cellulase-ultrasonic synergistic extraction conditions of quercetin from corn silk were optimized to improve the utilization of corn silk. **Methods** On the basis of single-factor tests, the extraction of quercetin was investigated with response to five variables, including ethanol concentration, liquid/solid ratio, ultrasonic time, ultrasonic power and enzyme dosage using orthogonal method. **Results** The optimal cellulase-ultrasonic synergistic extraction conditions for quercetin from corn silk were as follows: ethanol concentration was 50%, liquid/solid ratio was 25:1 (mL/g), ultrasonic time was 40 min, ultrasonic power was 200 W, and enzyme dosage was 0.014 mg. The yield of quercetin was (0.374±0.023)% under these conditions. **Conclusion** It is feasible to use orthogonal method to optimize the cellulase-ultrasonic synergistic extraction of quercetin in corn silk.

**KEY WORDS:** corn silk; quercetin; ultrasound; cellulase; orthogonal method

## 1 引言

玉米须又叫玉米花丝, 是禾本科农作物玉米的雌花花柱, 在玉米籽粒的形成和生长过程中, 作为传粉受精的媒介和通道<sup>[1]</sup>。玉米须中含有多种活性成分, 如皂苷、植物甾醇、黄酮类物质、多糖、氨基酸、有机酸等。槲皮素

化学名为 3,5,7,3',4'-五羟基黄酮, 属于黄酮类化合物, 是玉米须中的重要活性物质。槲皮素具有保护心脑血管<sup>[2]</sup>、保护肝脏<sup>[3]</sup>、减缓高脂血症状<sup>[4]</sup>、抗氧化<sup>[5]</sup>、抗菌消炎<sup>[6]</sup>、抗多药耐药<sup>[7]</sup>、抗癌<sup>[8]</sup>、抗肿瘤<sup>[9]</sup>等多种生物活性作用, 是目前国内外研究的热点课题。我国玉米年产量 2.2 亿吨, 拥有丰富的玉米须资源。目前, 在玉米产区, 玉米须大部分被烧

基金项目: 吉林大学大学生创新创业训练项目 (2015450533)

**Fund:** Supported by the Project of Innovation and Entrepreneurship Training for Undergraduate Student in Jilin University (2015450533)

\*通讯作者: 徐艳阳, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: xuyy@jlu.edu.cn

\*Corresponding author: XU Yan-Yang, Ph.D., Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Jilin University, No.5333, Xi'an Road, Changchun 130062, China. E-mail: xuyy@jlu.edu.cn

掉或扔掉,造成资源的极大浪费。因此,将玉米须作为原料提取槲皮素,可变废为宝,这对槲皮素在功能食品以及药品上的应用将有很大的推动作用。

目前,还没有关于玉米须中槲皮素提取的研究。王海燕等<sup>[10]</sup>采用响应面法优化超声提取桑叶槲皮素工艺,结果表明在最优条件下,槲皮素提取量为 11.13 mg/g。刘焱等<sup>[11]</sup>采用正交法优化超声提取金樱子槲皮素工艺,结果表明在最优条件下,槲皮素提取率为 2.735%。槲皮素属于黄酮类物质,因此可借鉴玉米须中黄酮的提取方法。玉米须黄酮提取常采用浸提法、酶法、微波提取法和超声波辅助提取法。浸提法、酶法耗时长,但酶法提取率较高<sup>[12,13]</sup>。微波提取法具有溶剂量少、萃取效率高、提取时间短等优点,但目前所进行的一些研究仅停留在对某些具体提取对象进行简单的工艺条件探索上<sup>[14]</sup>。超声波辅助提取法具有用时短、节省溶剂、减少高温对提取成分的影响等优点,但提取率仍有待提高<sup>[15,16]</sup>。超声波-酶法综合了超声提取和酶法提取的优点,不但能缩短提取时间,而且大大提高黄酮的提取率。如王丽霞等<sup>[17]</sup>采用正交法优化超声波辅助提取玉米须黄酮工艺,结果表明在最优条件下,黄酮得率可达到 0.301%。李侠等<sup>[18]</sup>采用响应面法优化超声波-双酶协同提取玉米须黄酮,结果表明在最优条件下,玉米须黄酮得率(0.86±0.02)%,较单一超声波提取有明显提高。因此,本文采用纤维素酶-超声法提取玉米须中槲皮素,并优化工艺,为进一步开发玉米须资源提供科学依据。

## 2 材料与方 法

### 2.1 材料、试剂与仪器

#### 2.1.1 材 料

玉米须,来自山东潍坊。经清洗、烘干、粉碎,过 60 目筛处理,备用。

#### 2.1.2 试 剂

纤维素酶(1800 U/mg,上海源叶生物科技有限公司);

醋酸钠(北京化工厂);醋酸、无水乙醇(均为分析纯,北京化工厂);蒸馏水;槲皮素标准品(纯度 99%,中国食品药品检定研究院)。

#### 2.1.3 主要仪器

101A-1ET 电热鼓风干燥箱(上海实验仪器厂有限公司);FW177 型中草药粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司);BSA124S 型电子分析天平(赛多利斯科学仪器(北京)责任有限公司);HH 数显恒温水浴锅(江苏金坛市金城国胜实验仪器厂);KQ-250DB 型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司);LD4-2A 型雷勃尔低速离心机(北京雷勃尔离心机有限公司);T6 新世纪紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限公司)。

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 槲皮素检测波长的选择和槲皮素标准曲线的绘制

通过对以 80%乙醇溶液为参比液,将槲皮素溶液在 200~600 nm 波长范围内扫描,得到其吸收光谱,其最大吸收波长分别位于 256 nm 和 374 nm 附近。结合前人的研究结果,本试验采用 374 nm 为测定波长,光谱扫描曲线见图 1。

准确称取槲皮素标准品 1.25 mg,用体积分数 60%乙醇溶解,移入 25 mL 容量瓶中,用体积分数 60%乙醇溶液定容(0.05 mg/mL),摇匀,在 374 nm 为测定波长下测定吸光度值。

### 2.2.2 玉米须中槲皮素得率的计算

准确吸取上清液 2 mL 于 25 mL 容量瓶中,用相应体积分数乙醇定容,在 374 nm 处测定吸光度  $A$ ,根据标准曲线线性回归方程计算出槲皮素质量浓度  $C$ ,再按公式 1 计算玉米须中槲皮素的得率。计算公式为:

$$G = \frac{C \times V_0 \times n}{W \times 10^6} \quad (1)$$

式中:  $G$  为槲皮素的得率,%;  $C$  为槲皮素的质量浓度,  $\mu\text{g/mL}$ ;  $V_0$  为样品提取液总体积, mL;  $n$  为测定时样品提取液的稀释倍数;  $W$  为样品重, g。

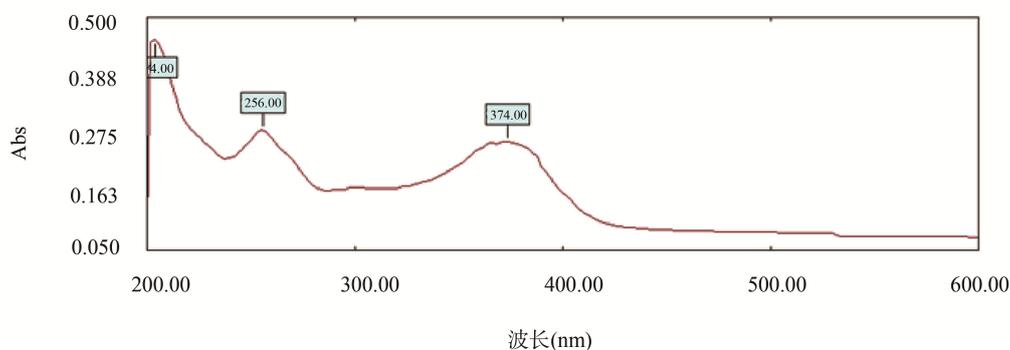


图 1 光谱扫描曲线图

Fig. 1 Curve of spectral scanning

## 2.3 单因素试验设计

### 2.3.1 乙醇体积分数对玉米须中槲皮素得率的影响

精确称取5份0.1 g玉米须粉末,加入1 mL pH为4.8的醋酸缓冲溶液,加入纤维素酶0.01 mg,在50℃下酶解40 min,90℃下灭活10 min。分别加入2.5 mL体积分数为40%、50%、60%、70%、80%乙醇,在功率为200 W、温度为60℃的超声清洗器中提取40 min。

### 2.3.2 液料比对玉米须中槲皮素得率的影响

精确称取5份0.1 g玉米须粉末,加入1 mL pH为4.8的醋酸缓冲溶液,加入0.01 mg纤维素酶,在50℃下酶解40 min,90℃下灭活10 min。分别加入1.5、2、2.5、3、3.5 mL体积分数为60%乙醇,在功率为200 W、温度为60℃的超声清洗器中提取40 min。

### 2.3.3 超声时间对玉米须中槲皮素得率的影响

精确称取5份0.1 g玉米须粉末,加入1 mL pH为4.8的醋酸缓冲溶液,加入0.01 mg纤维素酶,在50℃下酶解40 min,90℃下灭活10 min。加入2.5 mL体积分数为60%乙醇,在功率为200 W、温度为60℃的超声清洗器中分别提取30、40、50、60、70 min。

### 2.3.4 超声功率对玉米须中槲皮素得率的影响

精确称取5份0.1 g玉米须粉末,加入1 mL pH为4.8的醋酸缓冲溶液,加入0.01 mg纤维素酶,在50℃下酶解40 min,90℃下灭活10 min。加入2.5 mL体积分数为60%乙醇,分别在功率为150、175、200、225、250 W,温度为60℃的超声清洗器中提取40 min。

### 2.3.5 酶用量对玉米须中槲皮素得率的影响

精确称取5份0.1 g玉米须粉末,加入1 mL pH为4.8的醋酸缓冲溶液,分别加入0.010、0.012、0.014、0.016、0.018 mg的纤维素酶,在50℃下酶解40 min,90℃下灭活10 min。加入2.5 mL体积分数为60%乙醇,在功率为200 W、温度为60℃的超声清洗器中提取40 min。

## 2.4 正交优化试验设计

综合考虑单因素试验结果,选取乙醇体积分数、液料比、超声时间、超声功率、酶用量5个因素,对各因素和水平进行组合,选择L16(4<sup>5</sup>)正交表,正交试验因素与水平见表1。

## 2.5 数据处理与分析

每次试验重复3次,采用Excel 2013、SPSS 20.0软件

对试验结果进行统计分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 槲皮素标准曲线的绘制

标准曲线方程为 $Y=52.92X+0.129$ , $r^2=0.9994$ ,吸光度与槲皮素标准溶液浓度在0.002~0.014 mg/mL范围内线性关系良好,见图2。

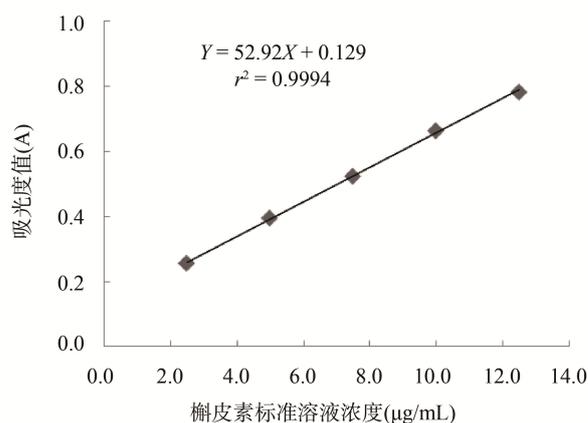


图2 槲皮素的标准曲线

Fig. 2 The standard curve of quercetin

### 3.2 单因素试验结果

#### 3.2.1 乙醇体积分数对玉米须中槲皮素得率的影响

考察不同体积分数乙醇对玉米须中槲皮素得率的影响,试验结果见图3。

通过方差分析可知,乙醇体积分数对玉米须槲皮素得率影响极显著( $P<0.01$ )。由图3可知,槲皮素的得率在乙醇体积分数50%时最大。乙醇体积分数低于50%时,槲皮素的得率随着乙醇体积分数的升高而增大,而乙醇体积分数高于50%时槲皮素的得率随着乙醇体积分数的升高而降低,且乙醇体积分数高于60%时对槲皮素的得率影响不显著( $P>0.05$ )。分析原因是乙醇体积分数较高时会造成玉米须细胞中其他溶于醇的杂质、亲脂性强的成分、色素等溶出量增加,影响槲皮素的得率。考虑到提取效果,可选用体积分数为50%乙醇。

表1 因素与水平表  
Table 1 Levels of factors

水平	因素				
	A 乙醇体积分数/%	B 液料比/(mL/g)	C 超声时间/min	D 超声功率/W	E 酶用量/mg
1	40	20:1	40	175	0.012
2	50	25:1	50	200	0.014
3	60	30:1	60	225	0.016
4	70	35:1	70	250	0.018

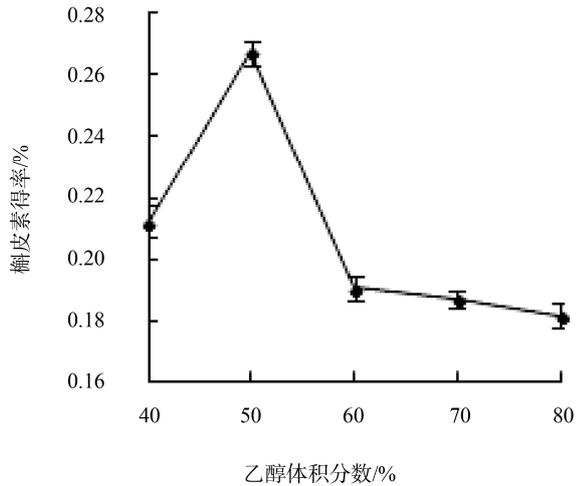


图3 乙醇体积分数对槲皮素得率的影响( $n=3$ )

Fig. 3 Effects of ethanol concentration on quercetin yield ( $n=3$ )

### 3.2.2 液料比对玉米须中槲皮素得率的影响

考察不同液料比对玉米须中槲皮素得率的影响, 试验结果见图4。

通过方差分析可知, 液料比对玉米须槲皮素得率影响极显著( $P<0.01$ )。由图4可知, 随着液料比的增加, 槲皮素的得率增加, 液料比为 25:1 (mL/g)时, 槲皮素的得率达到最大值, 继续增加液料比, 槲皮素得率下降。液料比的增加, 可使玉米须粉末与提取溶剂充分接触, 有利于槲皮素浸出, 但液料比达到 25:1 (mL/g)时, 槲皮素基本提取完全。因此, 从提取效果、减少溶剂用量等方面综合考虑, 液料比为 25:1 (mL/g)比较合适。

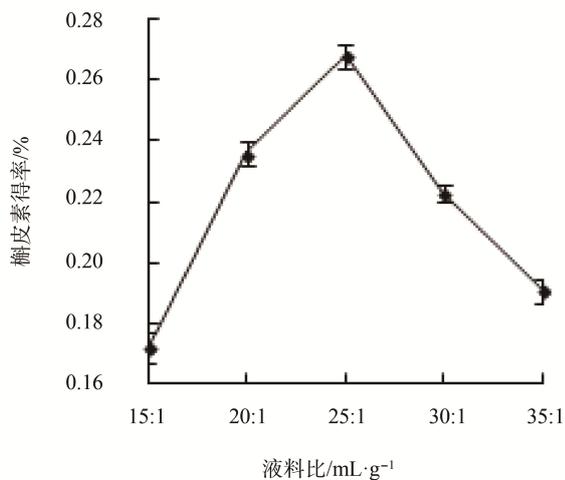


图4 液料比对槲皮素得率的影响( $n=3$ )

Fig. 4 Effects of liquid/solid ratio on quercetin yield ( $n=3$ )

### 3.2.3 超声时间对玉米须中槲皮素得率的影响

考察不同超声时间对玉米须中槲皮素得率的影响, 试验结果见图5。

通过方差分析可知, 超声时间对玉米须槲皮素得率影响极显著( $P<0.01$ )。由图5可知, 随着超声时间的增加, 槲皮素的得率增加, 在 60 min 时槲皮素的得率达到最大并趋于稳定, 且超声时间大于 60 min 对槲皮素得率的影响不显著( $P>0.05$ )。分析原因是超声具有较强的机械效应, 有利于破坏玉米须的细胞壁使槲皮素浸出, 并在 60 min 时槲皮素浸出完全。从节约时间和能量的角度, 选取超声时间 60 min 比较合适。

### 3.2.4 超声功率对玉米须中槲皮素得率的影响

考察不同超声功率对玉米须中槲皮素得率的影响, 试验结果见图6。

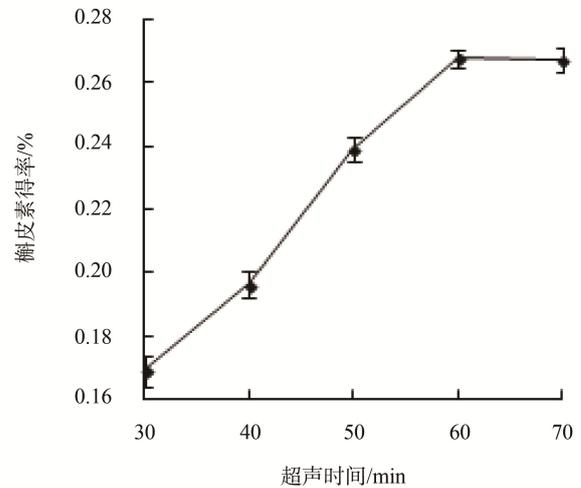


图5 超声时间对槲皮素得率的影响( $n=3$ )

Fig. 5 Effects of ultrasonic time on quercetin yield ( $n=3$ )

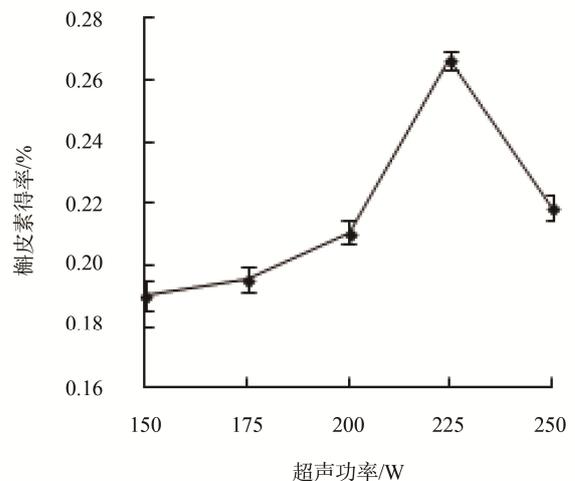


图6 超声功率对槲皮素得率的影响( $n=3$ )

Fig. 6 Effects of ultrasonic power on quercetin yield ( $n=3$ )

通过方差分析可知, 超声功率对玉米须槲皮素得率影响极显著( $P<0.01$ )。由图 6 可知, 超声功率在 225 W 时槲皮素得率达到最大值。小于 225 W 时, 随着超声功率的增大, 槲皮素的得率增加。大于 225 W 时, 随着超声功率的增大, 槲皮素得率下降。分析原因是槲皮素属于多羟基类化合物, 提高超声功率有利于槲皮素浸出, 但较高的功率会产生自由基, 对槲皮素分子的活性有一定破坏作用, 造成槲皮素得率降低<sup>[17]</sup>。因此, 考虑提取效果, 选择超声功率 225 W 比较适宜。

### 3.2.5 酶用量对玉米须中槲皮素得率的影响

考察不同酶用量对玉米须中槲皮素得率的影响, 试验结果见图 7。

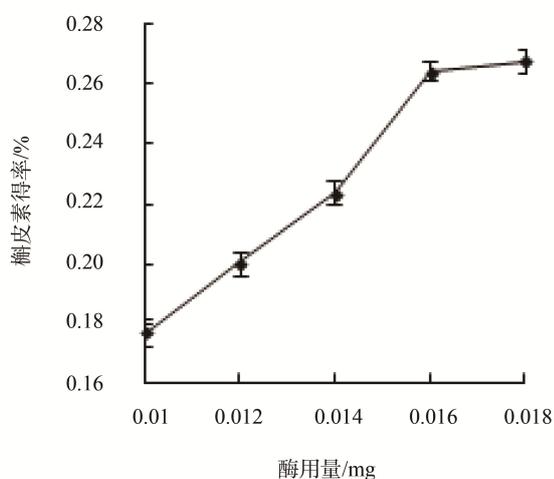


图 7 酶用量对槲皮素得率的影响( $n=3$ )

Fig. 7 Effects of enzyme dosage on quercetin yield ( $n=3$ )

通过方差分析可知, 酶用量对玉米须槲皮素得率影

响极显著( $P<0.01$ )。由图 7 可知, 随着酶用量的增多, 槲皮素的得率增加, 在酶用量为 0.016 mg 时槲皮素得率达到最大, 之后趋于稳定, 酶用量对得率的影响不显著( $P>0.05$ )。纤维素酶起到破坏玉米须细胞细胞壁的作用, 能够加快槲皮素的浸出。酶的用量越多, 使越多的底物被结合, 增大了槲皮素的得率。纤维素酶达到一定量, 底物被结合完全, 因此槲皮素的量不再增加。综合考虑经济因素, 选择酶用量 0.016 mg。

### 3.3 正交法优化与分析

#### 3.3.1 极差分析

为得到超声-纤维素酶法提取玉米须中槲皮素的最佳工艺条件, 以槲皮素得率为指标进行正交试验, 结果见表 2、3。

由表 2 极差分析可知, 5 个因素对玉米须中槲皮素的提取效果影响的主次顺序是超声时间>液料比>超声功率>酶用量>乙醇体积分数, 即超声时间的变化对玉米须中槲皮素得率的影响最大, 乙醇体积分数对玉米须中槲皮素得率的影响最小, 最优水平组合为  $A_2B_2C_1D_2E_2$ , 即在液料比为 25:1(mL/g)、超声时间为 40 min、酶用量为 0.014 mg、超声功率为 200 W、乙醇体积分数为 50%的条件下, 得率最大。

#### 3.3.2 方差分析

方差分析结果见表 3。

由表 3 方差分析可知影响槲皮素得率的 5 个因素的  $F$  值都达到极显著性水平, 说明不同因素对玉米须中槲皮素提取效果的差异极显著。槲皮素得率误差限为 0.017%。因此, 最优组合的槲皮素得率真值在 0.361%~0.395%之间, 置信度为 95%, 按乙醇体积分数为 50%, 液料比为 25:1 (mL/g)、超声时间为 40 min、超声功率为 200 W、酶用量为 0.014 mg 的条件进行验证试验, 测得槲皮素得率为 (0.374±0.023)%。因此, 采用正交法优化纤维素酶-超声法提取玉米须中的槲皮素具有可行性。

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment

试验号	因素					槲皮素得率/%		
	A	B	C	D	E	I	II	III
1	1	1	1	1	1	0.289	0.286	0.292
2	1	2	2	2	2	0.346	0.348	0.339
3	1	3	3	3	3	0.184	0.192	0.204
4	1	4	4	4	4	0.137	0.148	0.139
5	2	1	2	3	4	0.255	0.243	0.255
6	2	2	1	4	3	0.286	0.279	0.282
7	2	3	4	1	2	0.193	0.191	0.185
8	2	4	3	2	1	0.247	0.289	0.257
9	3	1	3	4	2	0.255	0.238	0.211

续表 2

试验号	因素					槲皮素得率/%		
	A	B	C	D	E	I	II	III
10	3	2	4	3	1	0.229	0.199	0.240
11	3	3	1	2	4	0.308	0.339	0.289
12	3	4	2	1	3	0.140	0.178	0.155
13	4	1	4	2	3	0.153	0.186	0.201
14	4	2	3	1	4	0.254	0.233	0.245
15	4	3	2	4	1	0.226	0.218	0.221
16	4	4	1	3	2	0.209	0.215	0.211
$K_1$	0.227	0.239	0.274	0.220	0.250			
$K_2$	0.247	0.273	0.244	0.275	0.245			
$K_3$	0.232	0.229	0.234	0.220	0.203			
$K_4$	0.214	0.194	0.184	0.220	0.237			
$R$	0.033	0.079	0.090	0.055	0.047			

表 3 方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis

方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	$F$ 比	显著性水平
乙醇体积分	0.007	3	0.002	11.635	0.01**
液料比	0.039	3	0.013	60.255	0.01**
超声时间	0.051	3	0.017	79.387	0.01**
超声功率	0.027	3	0.009	42.949	0.01**
酶用量	0.016	3	0.005	24.578	0.01**
误差	0.007	32	0.00022		
总和	2.769	47			

 $F_{0.05}(3,32)=2.92$   $F_{0.01}(3,32)=4.51$ 

注: \*\*表示有极显著的影响, \*表示有显著影响

## 4 结 论

通过对乙醇体积分、液料比、超声时间、超声功率、酶用量进行单因素和正交试验研究, 确定影响玉米须中槲皮素得率的主次因素顺序为超声时间>液料比>超声功率>酶用量>乙醇体积分。最佳工艺条件参数是: 液料比 25:1 (mL/g)、超声时间 40 min、酶用量 0.014 mg、超声功率 200 W、乙醇体积分 50%。在该条件下槲皮素得率为 (0.374±0.023)%。本研究优化的纤维素酶-超声提取法可以为玉米须资源的开发利用提供依据。

## 参考文献

- [1] 汤鲁宏, 丁霖霖, 尤丽芬, 等. 玉米须生物活性成分的初步研究—玉米须多糖及其免疫增强作用[J]. 无锡轻工业大学学报, 1995, 14(4): 319-324.  
Tang LH, Ding XL, You LF, *et al.* Bio-active substances from corn silk corn silk poly- saccharide and its immunological enhancing function [J]. J Wuxi Univ Light Ind, 1995, 14(4): 319-324.
- [2] Machha A, Francis IA, Ali MM, *et al.* Direct effects of quercetin on impaired reactivity of spontaneously hypertensive rat aortae: comparative study with ascorbic acid [J]. Clin Exp Pharm Physiol. 2006, 33(4): 345-350.
- [3] Pavanato A, Tunon MJ, Campos S, *et al.* Effects of quercetin on liver damage in rats with carbon tetrachloride-included cirrhosis [J]. Digest Dis Sci, 2003, 48(4): 824-829
- [4] Chiemi K, Edson LS, Mayumi OK, *et al.* Attenuation of lipid peroxidation and hyperlipidemia by quercetin glucoside in the aorta of high cholesterol-fed rabbit [J]. Free Radic Res, 2005, 39(2): 185-194.
- [5] Choi YJ, Kang JS, Park JH, *et al.* Polyphenolic flavonoids differ in their Antiapoptotic efficacy in hydrogen peroxide treated human vascular endothelial cells [J]. J Nutr, 2003, 133(4): 985-991.
- [6] 刘淑兰, 翟少伟, 陈伟龙. 槲皮素的生理功能及其应用前景[J]. 广东饲料, 2010, 19(7): 25-27.  
Liu SL, Zhai SW, Chen WL. Physiological functions and application prospects of quercetin [J]. Guangdong Feed, 2010, 19(7): 25-27.

- [7] Chen C, Zhou J, Ji C Y. Quercetin: a potential drug to reverse multidrug resistance [J]. *Life Sci*, 2010, 87(11/12): 333–338.
- [8] Moon YJ, Wang X, Morris ME. Dietary flavonoids: effects on xenobiotic and carcinogen Metabolism [J]. *Toxicol Vitro*, 2006, 20(2): 187–210.
- [9] 罗玲, 吴凯男. 槲皮素的癌化学预防作用研究进展[J]. *中草药*, 2001, 32(4): 378–379.  
Luo L, Wu KN. Advances in research of quercetin on cancer chemoprophylaxis Chinese [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2001, 32(4): 378–379.
- [10] 王海燕, 李睿, 曾秀, 等. 响应面优化超声波提取桑叶槲皮素工艺[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 56–62.  
Wang HY, Li R, Zeng X, *et al.* Optimization of ultrasound-assisted extraction of quercetin from mulberry leaves by response surface methodology [J]. *Food Sci*, 2014, 35(22): 56–62.
- [11] 刘焱, 付玉, 李丽, 等. 金樱子槲皮素提取工艺的优化[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(22): 2563–2565.  
Liu Y, Fu Y, Li L, *et al.* Optimization of extraction technology of quercetin from *Rosa laevigata* [J]. *Hubei Agri Sci*, 2012, 51(22): 2563–2565.
- [12] 朱丹, 袁芳, 孟坤, 等. 黄酮类化合物的研究进展[J]. *中华中医药杂志*, 2007, 22(6): 387–389.  
Zhu D, Yuan F, Meng K, *et al.* Research progress of flavanoid [J]. *Chin J Tradit Chin Med Pharm*, 2007, 22(6): 387–389.
- [13] 王宁, 徐艳, 韩笑非. 酶法提取玉米须中黄酮工艺研究试验[J]. *辽宁中医杂志*, 2009, 36(6): 994–996.  
Wang N, Xu Y, Han XF. Studies on extraction of total flavonoids from corn silk with cellulase [J]. *Liaoning J Tradit Chin Med*, 2009, 36(6): 994–996.
- [14] 刘璐, 付明哲, 王侠, 等. 植物黄酮类化合物提取及测定方法研究进展[J]. *动物医学进展*, 2011, 32(6): 151–155.  
Liu L, Fu MZ, Wang X, *et al.* Progress on extraction and determination methods of plant flavonoids [J]. *Prog Vet Med*, 2011, 32(6): 151–155.
- [15] 毕良武, 赵振东, Vnatoru Mircea, 等. 超声波技术在生物质资源加工领域的应用研究进展[J]. *林产化学与工业*, 2007, 27(Z1): 138–142.  
Bi LW, Zhao ZD, Vnatoru M, *et al.* Research Progress of Application of Ultrasonic Technology to Biomass Resources Processing [J]. *Chem Ind Forest Prod*, 2007, 27(Z1): 138–142.
- [16] 黎继烈, 张慧, 曾超珍, 等. 超声辅助提取金橘柠檬苦素工艺研究[J]. *中国食品报*, 2009, 9(4): 96–102.  
Li JL, Zhang H, Zeng CZ, *et al.* Study on ultrasonic extraction technology of limonin from the kumquat [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2009, 9(4): 96–102.
- [17] 王丽霞, 刘坤. 超声波辅助提取玉米须黄酮的工艺[J]. *北方园艺*, 2014(6): 137–139.  
Wang LX, Liu K. Extraction technology on flavonoids from corn silk by ultrasonic-assisted [J]. *North Horticul*, 2014(6): 137–139.
- [18] 李侠, 马艳梅, 孙慧娟, 等. 超声波-双酶法协同提取玉米须黄酮工艺的优化[J]. *西北农林科技大学学报*, 2014, 42(4): 221–227.  
Li X, Ma YM, Sun HJ, *et al.* Optimization of ultrasonic-double enzymatic synergistic extraction of flavonoids from corn silk [J]. *J Northwest A&F Univ*, 2014, 42(4): 221–227.
- [19] 唐浩国. 黄酮类化合物研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
Tang HG. *Flavonoid institute* [M]. Beijing: Science Press, 2009.

(责任编辑: 金延秋)

### 作者简介



田佳琦, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: 2992840850@qq.com



徐艳阳, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: xuyy@jlu.edu.cn