

## 实验技术与方法

## 响应面优化建立大米镉提取技术研究

蔡文华, 苏祖俭, 胡曙光, 黄伟雄, 范建彬, 陈明  
(广东省疾病预防控制中心, 广东 广州 511430)

**摘要:**目的 通过响应面法优化大米中镉的提取条件, 建立大米中镉脱除工艺, 最终达到降低米制品原料大米中镉含量。方法 以镉提取率为指标筛选大米中镉脱除方法, 选择市售含镉大米为试验样品, 四种食品级有机弱酸作为提取剂, 以提取酸溶液浓度、提取时间、料液比和米粉粒度为自变量, 进行单因素提取研究, 同时结合响应面试验设计, 获得大米中镉脱除的最佳条件。结果 大米中镉脱除的最佳条件为乙酸浓度 4.2%, 提取时间 11 min、液料比 13:1 (mL/g) 和米粉粒度细于 50 目, 此条件下大米镉平均提取率为 98.67%。结论 该试验模型合理, 优化的提取方法切实可行, 通过采用优化后的最佳镉提取条件, 实现了脱除或降低原料米中镉, 为镉污染大米的镉去除研究提供了一种科学方法。

**关键词:**大米; 有机酸; 镉; 响应面法

中图分类号: R155 文献标识码: A 文章编号: 1004-8456(2022)03-0510-07

DOI: 10.13590/j.cjfh.2022.03.018

### The removal of cadmium from rice optimized by response surface methodology

CAI Wenhua, SU Zujian, HU Shuguang, HUANG Weixiong, FAN Jianbin, CHEN Ming  
(Guangdong Center for Disease Control and Prevention, Guangdong Guangzhou 511430, China)

**Abstract: Objective** To reduce the content of cadmium in rice, the method of cadmium removal from rice was established and the extraction conditions were optimized by response surface methodology. **Methods** The cadmium extraction rate was used as the index to screen the cadmium removal methods. Commercially available cadmium positive rice was chosen as the test sample and four kinds of food grade organic weak acids were chosen as extractants. The concentration of acid solution, extraction time, solid-liquid ratio and rice powder particle size were used as independent variables to carry out the single factor extraction. And the optimal conditions for removing cadmium from rice was obtained by response surface design. **Results** The optimal conditions for removing cadmium from rice were 4.2% acetic acid solution, 11 min extraction, liquid-to-material ratio 13:1 (mL/g), and at least 50 mesh for rice flour. Under these conditions, the average removal rate of cadmium in rice was 98.67%. **Conclusion** The experimental model is reasonable and the optimized extraction method is feasible. The removal or reduction of cadmium in raw rice is realized with optimal cadmium extraction conditions, which provides a scientific method for the research on cadmium removal from cadmium-contaminated rice.

**Key words:** Organic acid; rice; cadmium; response surface methodology

镉是人体非必需元素, 过度摄入镉会造成严重健康损害<sup>[1]</sup>, 世界卫生组织也将镉列为重点研究的食品污染物<sup>[2-3]</sup>。自 2001 年以来, 我国对大米中镉含量的监测发现: 成品米制食品中镉超标问题也不

容乐观。我国对大米中镉的制定的最大限量要求为 0.2 mg/kg<sup>[4]</sup>, 中国香港则规定大米镉限量标准为 0.1 mg/kg<sup>[5]</sup>, 国际食品法典委员会和日本规定大米镉限量标准为 0.4 mg/kg<sup>[6-7]</sup>。

由于大米脱镉加工法具有周期短、见效快等特点<sup>[8-11]</sup>, 如何对含镉大米进行脱镉加工提高利用率也成为近年的研究热点<sup>[12]</sup>。目前, 用于大米加工方法中的镉消减方法有物理法、化学法、生物法、复合法等<sup>[13]</sup>。其中化学法中的酸提取具有操作简单、快速高效等优点, 应用较为广泛<sup>[14, 15]</sup>。CARRASCO 等<sup>[16]</sup>发现用 5 mol/L 盐酸溶液对大部分金属元素都有较好提取效果。肖竹青等<sup>[17]</sup>用 0.5% 硝酸+0.1% 曲

收稿日期: 2021-09-17

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFC1601300); 食品安全国家标准制定、修订项目(spaq-2019-024, spaq-2019-025); 广东省医学科学技术研究基金(C2019048)

作者简介: 蔡文华 女 副主任技师 研究方向为食品安全  
E-mail: 12212465@qq.com

通信作者: 苏祖俭 男 主管技师 研究方向为食品安全  
E-mail: 875789500@qq.com

拉通混合液提取大米粉的镉效率达到 102.5%。周明慧等<sup>[18]</sup>证明了硝酸浓度不低于 0.02% 时即可满足谷物样品中镉的充分提取。李海露等<sup>[19]</sup>证明 0.20%~0.50% 的酸溶液能完全提取稻米样品中镉。许艳霞等<sup>[20]</sup>利用 0.08 mol/L 的柠檬酸在 45 °C 条件下振摇浸提糙米粉,浸提时间为 53.09 min,糙米粉中镉的脱除率可达 94.28%。彭志兵等<sup>[21]</sup>将粒度为 40 目的大米粉放入乳酸浓度为 0.4% 的浸提液中,在 25 °C 条件下浸提 8 h,可去除大米中 85% 以上的镉。

本研究以有机酸中镉提取率(镉提出质量/大米粉镉质量)为指标,采用响应面分析法优化和筛选出原料大米中镉脱除方法,该方法所用试剂安全、操作简单、镉脱除快速且彻底。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要仪器与材料

NexION 350X 电感耦合等离子体质谱仪(美国铂金埃尔默公司),Ethos PRO 微波消解仪(意大利 Milestone 公司),GM200 刀式捣磨仪(德国 Retsch 公司),Multi Reax 振荡器(德国 Heidolph 公司),Z206A 离心机(德国 Hermle 公司)。

含镉大米(镉标准物质:GBW100348 大米粉、GBW(E)080684 大米粉,广东省售),镉单元素溶液标准物质:GBW08612(1 000±2 μg/mL,中国计量科学研究院),硝酸(德国默克,优级纯),冰乙酸(广州化学试剂厂,优级纯),柠檬酸(天津科密欧化学试剂有限公司,优级纯),乳酸(西安天茂化工有限公司,优级纯),DL-苹果酸(天津科密欧化学试剂有限公司,分析纯)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 大米预处理

含镉大米经刀式捣磨后分别过 20 目、40 目、60 目、

80 目筛,分别筛取粗于 20 目、20~40 目、40~60 目、60~80 目和细于 80 目的样品粉末置于密封袋内保存。

#### 1.2.2 大米中镉脱除方法的单因素实验研究

采用某含镉大米粉用有机弱酸浸泡,常温振摇提取法对大米粉中的镉进行提取,通过电感耦合等离子体质谱法测定提取液中镉浓度计算出的大米粉末镉提取含量,与该大米粉直接采用 GB 5009.268—2016 中电感耦合等离子体质谱法测定的镉含量相比较计算其提取率。

##### 1.2.2.1 提取剂酸溶液浓度的优化

分别选择冰乙酸、柠檬酸、乳酸、DL-苹果酸作为大米中镉的提取剂。分别采用不同浓度的酸溶液(表 1),以 10:1 (mL/g)的液料比对大米样品中的镉提取 30 min,提取后于 6 000 r/min 条件下离心 10 min,取上清液过滤,得到提取液,检测镉提取率。

##### 1.2.2.2 提取时间的优化

采用最佳浓度的酸溶液在常温振摇中以 10:1 (mL/g)的液料比分别对大米中镉提取不同时间(表 1),提取后于 6 000 r/min 条件下离心 10 min,取上清液过滤,得到提取液,检测镉提取率。

##### 1.2.2.3 液料比的优化

采用最佳浓度的酸溶液和提取时间在常温振摇中分别以不同液料比(表 1)对大米中镉进行提取,提取后于 6 000 r/min 条件下离心 10 min,取上清液过滤,得到提取液,检测镉提取率。

##### 1.2.2.4 大米粉粒度的优化

采用最佳浓度的酸溶液、提取时间和液料比在常温振摇中分别对不同粒度的大米粉(见表 1)中镉进行提取,提取后于 6 000 r/min 条件下离心 10 min,取上清液过滤,得到提取液,检测镉提取率。

表 1 单因素实验设计参数汇总

Table 1 Summary of single factor experimental design parameters

提取条件	具体数值								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
酸溶液浓度/%	0	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	8.0	10.0
时间/min	1	2	5	10	20	30	40		
液料比/(mL/g)	1:1	2:1	3:1	5:1	10:1	20:1	50:1		
大米粉粒度/目	<20	20~40	40~60	60~80	>80				

### 1.3 响应面试验设计

运用 Design-Expert 和 Box-Behnken Design(BBD)软件设计响应面试验。以提取酸溶液浓度、提取时间、料液比和米粉粒度为变量,并以此 4 个因素最佳取值的中心点和米粉的提取率为响应值,设计 4 因素 3 水平的响应面试验,试验设计的因素水

平及编码值见表 2。

### 1.4 统计学分析

采用 Excel 2019 进行数据录入,采用 SPSS 21.0 进行统计分析,以 3 次平行实验的均值为使用数据;采用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系,通过对回归方程分析得出最佳条

表2 因素水平编码表  
Table 2 Factor level coding table

因素		水平		
		-1	0	1
A	乙酸浓度/%	1	5	9
B	时间/min	5	10	15
C	液料比/(mL/g)	5	10	15
D	大米粉粒度/目	20	40	60

件参数,以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 单因素实验确定主要影响因素

#### 2.1.1 提取剂酸溶液浓度对镉提取的影响

采用 GB 5009.268—2016 食品中多元素的测定中电感耦合等离子体质谱法测定所选大米的镉含量为  $(0.209 \pm 0.008) \text{ mg/kg}$ 。由图 1 可知,不同种类的有机弱酸使镉提取率达到最高值的拐点浓度分别是:乙酸为 5.0%,柠檬酸为 1.0%,乳酸和 DL-苹果酸均为 2.0%。在拐点浓度之后的各酸度对应的镉提取率无明显差异。

对于选择乙酸、柠檬酸、乳酸和 DL-苹果酸作为提取剂对大米粉中镉进行提取的最佳提取条件中,除了提取酸溶液浓度存在差异外,其余条件均基本一致。而在这四种有机弱酸中,乙酸使用最为广泛且成本最低,此外,乙酸与水互溶容易洗脱,沸点低易挥发,后续容易通过加热除去。因此,本研究选择了乙酸作为大米粉中镉提取的最佳提取剂,选择 1%、5%、9% 作为优化水平。

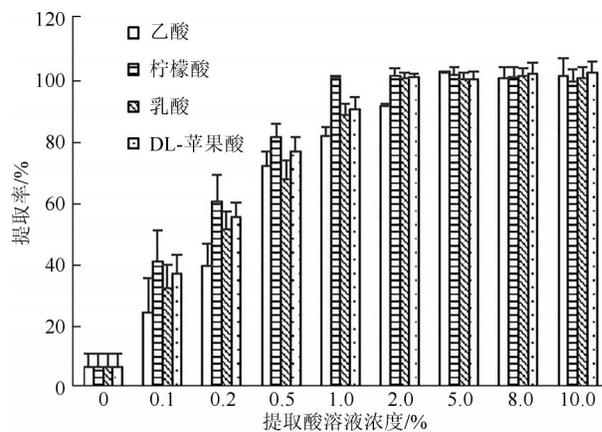


图1 提取剂酸溶液浓度对镉提取的影响

Figure 1 Effects of the concentration of the extracted acid solution on the extraction of cadmium

#### 2.1.2 提取时间对镉提取的影响

由图 2 可知,当提取时间达到 10 min 时,大米中镉基本提取完全,且各种酸溶液在最佳浓度条件下,提取完全的时间基本一致。10 min 后,镉的提取率基本稳定但精密度变差。因此选择 5、10、15 min 作为优化水平。

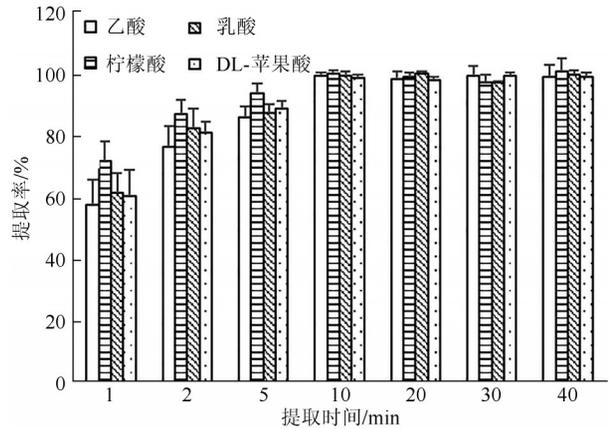


图2 提取时间对镉提取的影响

Figure 2 Effects of extraction time on cadmium extraction

#### 2.1.3 液料比对镉提取的影响

由图 3 可知,当液料比达到 10:1 (mL/g) 时,大米中镉基本提取完全,且各种酸溶液在最佳浓度和提取时间条件下,最佳的提取液料比基本一致。当液料比大于 10:1 后,各种液料比下镉的提取率无显著差异,但液料比过大将导致处理成本加大且效率降低。因此选择 5、10、15 (mL/g) 作为优化水平。

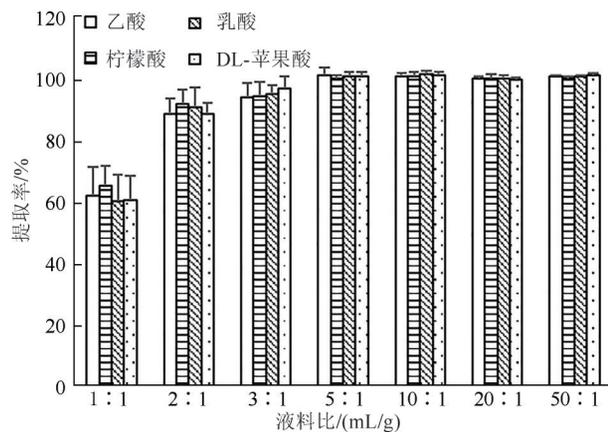


图3 液料比对镉提取的影响

Figure 3 Effects of liquid-to-material ratio on cadmium extraction

#### 2.1.4 大米粉粒度对镉提取的影响

由图 4 可知,当大米粉粒度细于 40 目时,大米中镉基本提取完全,且各种酸溶液在最佳浓度、提取时间和液料比条件下,最佳的大米粉粒度基本一致。当大米粉粒度细于 40 目后,各种大米粉粒度下镉的提取率无显著性差异,但大米粉过细将导致处理成本加大且后续分离困难增大。因此选择 20、40、60 目作为优化水平。

### 2.2 响应面模型的建立与分析

根据单因素实验结果,通过 Design-Expert 12.0.3.0 软件,以提取率(Y)为指标,对酸溶液浓度(A)、提取时间(B)、液料比(C)和米粉粒度(D)进

行 4 因素 3 水平的响应面优化实验,结果如表 3 所示。

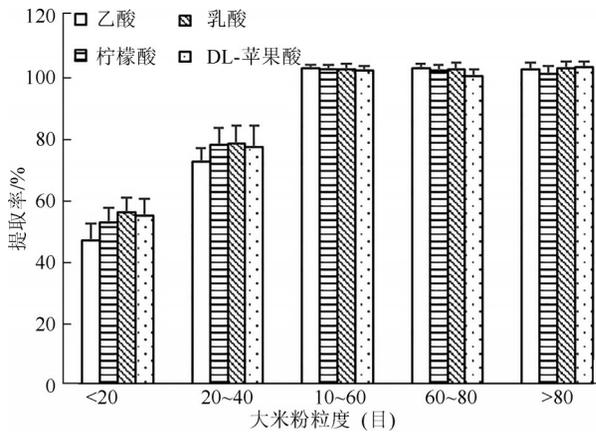


图 4 大米粉粒度对镉提取的影响

Figure 4 Effects of rice flour particle size on cadmium extraction

表 3 响应面优化实验设计及结果

Table 3 Experimental design and results of response surface optimization

实验号	A	B	C	D	Y:提取率/%
1	1	0	0	1	98.67
2	0	0	1	-1	66.67
3	1	1	0	0	98.69
4	0	0	0	0	98.94
5	0	0	-1	-1	58.22
6	0	1	0	-1	66.53
7	-1	0	-1	0	75.40
8	0	0	0	0	98.94
9	-1	0	0	-1	56.94
10	0	0	0	0	98.94
11	1	0	1	0	98.9
12	0	1	1	0	100.87
13	1	-1	0	0	81.47
14	-1	1	0	0	86.15
15	0	1	-1	0	88.1
16	0	-1	-1	0	72.73
17	-1	0	1	0	86.33
18	0	-1	1	0	83.27
19	1	0	-1	0	86.37
20	1	0	0	-1	65.22
21	-1	-1	0	0	71.12
22	0	1	0	1	100.65
23	0	-1	0	1	83.09
24	0	0	-1	1	88.09
25	0	0	0	0	98.94
26	0	0	0	0	98.94
27	0	0	1	1	100.85
28	0	-1	0	-1	54.92
29	-1	0	0	1	86.13

2.3 回归方程的建立及显著性分析

对表 3 的试验结果数据进行二次多元回归分析,得到以提取率(Y)为响应值的响应面模型方程: $Y=96.87+5.52A+7.59B+5.35C+15.50D+0.68AB+0.10AC+1.11AD+0.18BC+1.97BD+1.43CD-6.93A^2-7.37B^2-5.09C^2-14.74D^2$ 。方差分析结果见表 4。从表 4 可知,二次多元回归模型项极显著( $P<0.0001$ ),表明

试验误差小,模型具有统计学意义;失拟项的  $P$  值为  $0.8717>0.05$ ,表明失拟项不显著,该模型可以比较客观良好地反应各个因素与因素变量之间的关系;模型的决定系数  $R^2=0.9992$ ,校正决定系数  $R^2_{Adj}=0.9984$ ,预期决定系数  $R^2_{Pre}=0.9962$ ,表明该模型拟合程度好,此模型中因素变量的 99.84% 的变化源于所选变量。模型中变异系数  $C.V.\%=0.7143\%<15\%$ ,表明该模型离散程度小。综上所述,本研究所建模型能很好的预测大米镉去除的最优方案。

此外,由表 4 的方差分析  $F$  值可知,4 个影响因素对大米镉去除的影响大小为  $D$ (大米粉粒度) $>B$ (时间) $>A$ (乙酸浓度) $>C$ (液料比)。由各一次项对应的  $P$  值可知,各因素均对大米镉去除具有极显著影响( $P<0.0001$ );由各二次项对应的  $P$  值可知,4 个因素均对大米镉去除具有极显著影响( $P<0.0001$ );在交互项中, $AC$  和  $BC$  的  $P$  值 $>0.05$ ,说明  $AC$  和  $BC$  两因素之间交互作用对大米镉去除的影响不显著, $AB$  和  $AD$  的  $P$  值均 $<0.05$ 但 $>0.01$ ,说明  $AB$  和  $AD$  两因素之间交互作用对大米镉去除的影响显著, $BD$  和  $CD$  的  $P$  值均 $<0.01$ ,说明  $AB$  和  $AD$  两因素之间交互作用对大米镉去除的影响极显著。

表 4 回归模型显著性检验及方差分析

Table 4 Significance test and analysis of variance of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	5 953.23	14	425.23	1 217.33	<0.000 1	**
A	365.09	1	365.09	1 045.17	<0.000 1	**
B	690.84	1	690.84	1 977.71	<0.000 1	**
C	343.15	1	343.15	982.35	<0.000 1	**
D	2 883.93	1	2 883.93	8 255.98	<0.000 1	**
AB	1.86	1	1.86	5.33	0.036 7	*
AC	0.042	1	0.042	0.120 3	0.733 9	—
AD	4.95	1	4.95	14.17	0.002 1	*
BC	0.129 6	1	0.129 6	0.371	0.552 2	—
BD	15.6	1	15.6	44.67	<0.000 1	**
CD	8.18	1	8.18	23.42	0.000 3	**
A <sup>2</sup>	311.65	1	311.65	892.17	<0.000 1	**
B <sup>2</sup>	352.47	1	352.47	1 009.03	<0.000 1	**
C <sup>2</sup>	168.15	1	168.15	481.38	<0.000 1	**
D <sup>2</sup>	1 409.11	1	1 409.11	4 033.94	<0.000 1	**
残差	4.89	14	0.349 3			
失拟项	2.54	10	0.253 9	0.431 7	0.871 7	
纯误差	2.35	4	0.588			
总和	5 958.12	28				
R <sup>2</sup>	0.999 2					
R <sup>2</sup> <sub>Adj</sub>	0.998 4					
R <sup>2</sup> <sub>Pre</sub>	0.996 2					
变异系数 (C.V.%)	0.714 3					

注:\*\*代表极显著;\*代表显著;—代表不显著

2.4 响应面分析

为进一步评价  $A$  与  $B$ 、 $A$  与  $D$ 、 $B$  与  $D$ 、 $C$  与  $D$  之间交互作用对大米中镉去除的影响并确定各因素的

最佳水平范围,本研究采用 Design-Expert 12. 0. 3. 0 软件绘制响应面图和等高线图,结果见图 5~7。

图 5 为液料比 10:1 (mL/g)和 大米粉粒度 细于 40 目时,乙酸浓度与提取时间的交互作用对大米镉

去除的影响,由图 5 可以看出,在提取时间一定时,大米镉提取率随酸溶液浓度增加先增大然后趋于平缓;在乙酸浓度一定时,大米镉提取率随提取时间增加先增大然后趋于平缓。

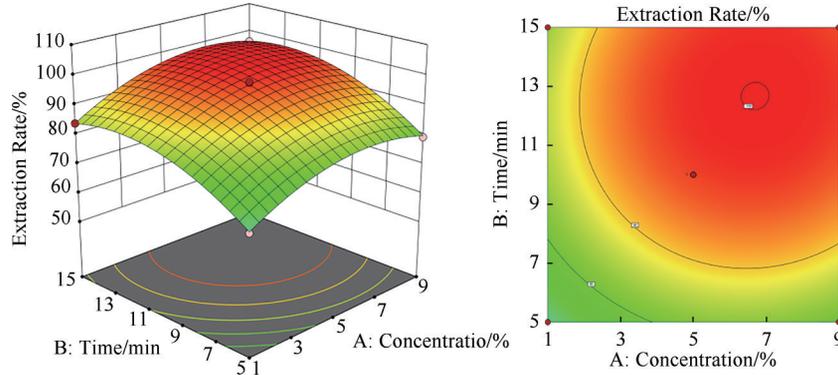


图 5 乙酸浓度与提取时间的交互作用

Figure 5 The interaction between acetic acid concentration and extraction time

图 6 为液料比 10:1 (mL/g)和提取时间 10 min 时,乙酸浓度与大米粉粒度的交互作用对大米镉去除的影响,由图 6 可以看出,在大米粉粒度一定时,大米镉提取率随乙酸浓度增大先增大然后趋于平

缓;在乙酸浓度一定时,大米镉提取率随大米粉粒度增大先增大然后趋于平缓。等高线密集且响应面坡度陡峭,表明乙酸浓度与大米粉粒度的交互作用显著。

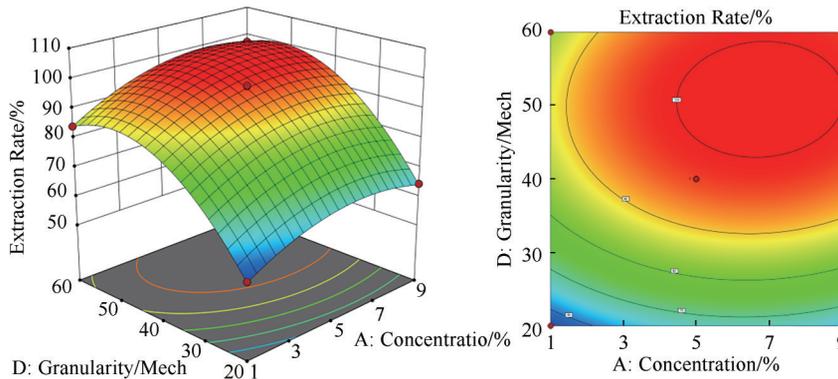


图 6 酸溶液浓度与大米粉粒度的交互作用

Figure 6 The interaction between the acetic acid concentration and the particle size of rice flour

图 7 为乙酸浓度 5% 和液料比 10:1 (mL/g) 时,提取时间与大米粉粒度的交互作用对大米镉去除的影响,由图 7 可以看出,在提取时间一定时,大米镉提取率随大米粉粒度增大先增大然后下降;在大米粉粒度一定时,大米镉提取率随提取时间增加先增大然后趋于平缓。等高线密集,且接近椭圆形,响应面坡度较陡峭,表明提取时间与大米粉粒度的交互作用极显著。

缓。等高线密集,且接近椭圆形,响应面坡度较陡峭,表明液料比与大米粉粒度的交互作用极显著。

### 2.5 最佳条件的确定及验证试验

图 8 为乙酸浓度 5% 和提取时间 10 min 时,液料比与大米粉粒度的交互作用对大米镉去除的影响,由图 8 可以看出,在液料比一定时,大米镉提取率随大米粉粒度增加先增大然后下降;在大米粉粒度一定时,大米镉提取率随液料比增大先增大然后趋于平

根据所得到的回归模型,求解二次多元回归方程,预测得到大米中镉的最优去除方法为乙酸浓度 4. 219%, 提取时间 10. 701 min、液料比 12. 751: 1(mL/g)和 大米粉粒度 细于 49. 007 目;预测大米镉提取率可达 102. 20%。结合实际情况将方法最佳条件修改为:乙酸浓度 4. 2%, 提取时间 11 min、液料比 13:1(mL/g)和 大米粉粒度 细于 50 目,并在此条件下进行 7 次验证试验,结果大米镉平均提取率为 98. 67%±1. 31%,实际值与理论值 102. 20% 的误差为 3. 46%,证明了该试验模型合理,优化的提取

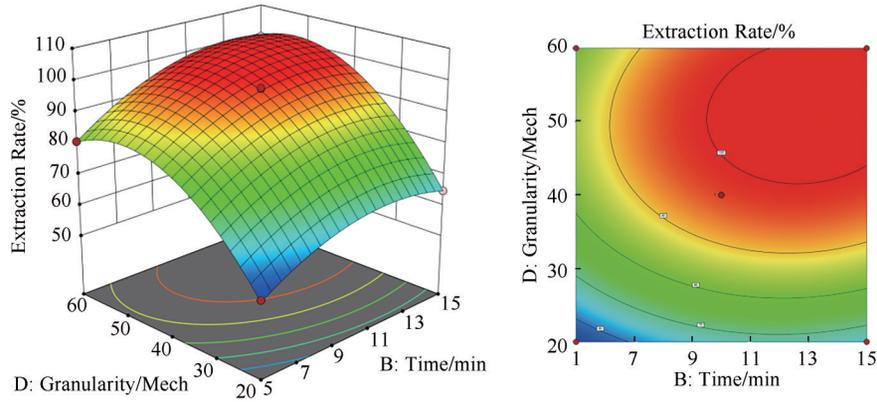


图7 提取时间与大米粉粒度的交互作用

Figure 7 Interaction between extraction time and grain size of rice flour

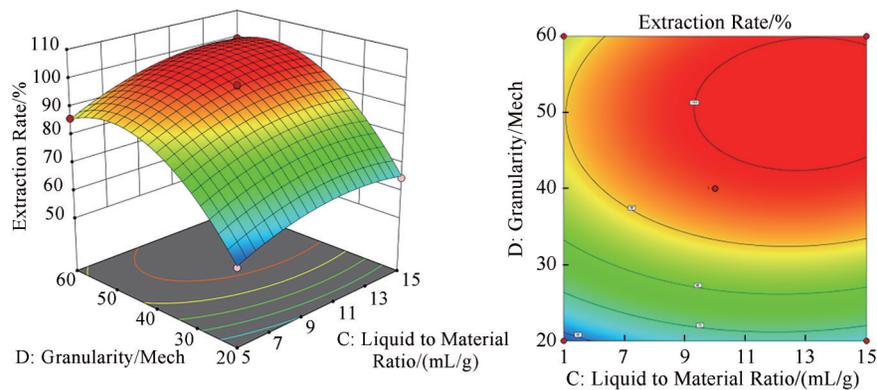


图8 液料比与大米粉粒度的交互作用

Figure 8 The interaction between the liquid-to-material ratio and the particle size of rice flour

方法切实可行,适用于大米中镉的去除。

### 3 结论

本研究采用常用食品级乙酸浸泡法提取建立一种高效、经济、安全的脱除大米粉中镉的方法,通过单因素试验,考察提取酸溶液浓度、提取时间、料液比和米粉粒度对大米镉提取率的影响,并运用响应面法分析设计提取工艺,提高了提取效率,为原料大米粉中镉的快速脱除提供了科学方法。

### 参考文献

[1] 邓新,温璐璐,迟鑫姝. 镉对人体健康危害及防治研究进展[J]. 中国医疗前沿, 2010, 5(10): 4-5.  
DENG X, WEN L L, CHI X S. Cadmium hazards to human health and the prevention and treatment research New[J]. National Medical Frontiers of China, 2010, 5(10): 4-5.

[2] CHEN C J, CHUANG Y C, YOU S L, et al. A retrospective study on malignant neoplasms of bladder, lung and liver in Blackfoot disease endemic area in Taiwan[J]. British Journal of Cancer, 1986, 53(3): 399-405.

[3] ROBERTS L C, HUG S J, RUETTIMANN T, et al. Arsenic removal with iron (II) and iron (III) in waters with high silicate and phosphate concentrations [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(1): 307-315.

[4] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
National Health and Family Planning Commission, National Food and Drug Administration. National Food Safety Standard Limits of Contaminants in Food: GB 2762—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[5] 香港特别行政区政府食物环境卫生署. 食物掺杂(金属杂质含量)规例[S]. 香港特别行政区: 食品安全中心, 2020.  
The Department of Health of the Government of the Hong Kong Special Administrative Region of the People's Republic of China. Food adulteration (metallic impurities) regulation [S]. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region of the People's Republic of China: Centre for Food Safety, 2020.

[6] 杨卫民, 徐广超, 季澜洋, 等. CAC、欧盟、美国与中国粮食中重金属限量标准的差异分析[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(1): 16-19.  
YANG W M, XU G C, JI L Y, et al. Variation analysis of cereals heavy metals limit standards of CAC, EU, USA, and China[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(1): 16-19.

[7] 郭建安. 含镉大米曾引发日本“痛痛病”[J]. 质量探索, 2013, 10(6): 41-42.  
GUO J N. Cadmium-containing rice once caused Japan's "Tai-Tai disease"[J]. Quality Exploration, 2013, 10(6): 41-42.

- [8] 王青云, 任嘉瑜, 林亲录, 等. 大米脱镉加工技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 332-334, 341.  
WANG Q Y, REN J Y, LIN Q L, et al. Research progress in the process technology of removal of cadmium from rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(9): 332-334, 341.
- [9] 张丽娜, 解万翠, 杨锡洪, 等. 微生物法脱除重金属技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 356-359, 365.  
ZHANG L N, XIE W C, YANG X H, et al. Research progress in the removal of heavy metals via microbial method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(24): 356-359, 365.
- [10] 倪小英, 覃世民, 梅广, 等. 稻米重金属污染及其治理研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2014(8): 7-10.  
NI X Y, QIN S M, MEI G, et al. Research progress of heavy metal pollution of rice and its control[J]. Cereal & Feed Industry, 2014(8): 7-10.
- [11] 傅亚平, 吴卫国. 大米中重金属污染及其脱除技术研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2015(11): 22-26.  
FU Y P, WU W G. Advance on pollution of heavy metals in rice and its removal technology[J]. Cereal & Feed Industry, 2015(11): 22-26.
- [12] CHO Y A, KIM J, WOO H D, et al. Dietary cadmium intake and the risk of cancer: A meta-analysis[J]. PLoS One, 2013, 8(9): e75087.
- [13] 雷婉莹, 刘惠惠, 李静, 等. 大米及其加工产品中镉的消减方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(9): 1998-2003.  
LEI W Y, LIU H H, LI J, et al. Advance on reduction method of cadmium in rice and rice processing products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(9): 1998-2003.
- [14] 王金贵, 吕家珑, 李宗仁. 小分子有机酸对六种典型土壤中镉吸附-解吸的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1501-1507.  
WANG J G, LV J L, LI Z R. Effect of low molecular weight organic acids on the adsorption-desorption of Cd in six types of soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(6): 1501-1507.
- [15] 许艳霞, 倪小英, 陈志军, 等. 稻谷中镉的消减技术研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2017, 42(5): 29-31.  
XU Y X, NI X Y, CHEN Z J, et al. Research progress on the reduction technology of cadmium in rice[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2017, 42(5): 29-31.
- [16] CARRASCO L, VASSILEVA E. Determination of methylmercury in marine biota samples: Method validation[J]. Talanta, 2014, 122: 106-114.
- [17] 肖竹青, 袁丽红, 张华, 等. 直接提取进样石墨炉原子吸收法测定大米中的镉含量[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(1): 61-63.  
XIAO Z Q, YUAN L H, ZHANG H, et al. Determination of cadmium content in rice by direct dilution injection graphite furnace atomic absorption spectrometry[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(1): 61-63.
- [18] 周明慧, 张洁琼, 高树林, 等. 稀酸温和提取-火焰原子荧光光谱法快速测定谷物中镉的含量[J]. 分析试验室, 2018, 37(12): 1389-1392.  
ZHOU M H, ZHANG J Q, GAO S L, et al. Rapid detection of Cd in cereals using diluted acid extraction coupled with flame atomic fluorescence spectrometer[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2018, 37(12): 1389-1392.
- [19] 李海露, 唐友云, 杨茜, 等. 稀酸浸提稻米和秸秆中镉元素提取效率与浸提因子关系探究[J]. 湖南农业科学, 2018(5): 89-91.  
LI H L, TANG Y Y, YANG Q, et al. Relationship between extraction efficiency and extraction factors of cadmium in dilute acid leaching rice and straw[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018(5): 89-91.
- [20] 许艳霞, 倪小英, 袁毅, 等. 溶剂浸提技术消减稻米中镉含量[J]. 粮食科技与经济, 2015, 40(5): 36-39.  
XU Y X, NI X Y, YUAN Y, et al. Solvent extraction technology to reduce cadmium content in rice[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2015, 40(5): 36-39.
- [21] 彭志兵, 莫逆, 杨学文. 乳酸浸提去除大米粉中镉的研究[J]. 粮食科技与经济, 2016, 41(5): 39-42.  
PENG Z B, MO N, YANG X W. Study on the removal of cadmium in rice by lactic acid leaching[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2016, 41(5): 39-42.