

# 鱿鱼酶解鲜味汁Cd<sup>2+</sup>脱除工艺研究

王成<sup>1</sup>, 皎皎<sup>1</sup>, 赵艳芳<sup>2</sup>, 王奥云<sup>1</sup>, 李银平<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1\*</sup>

(1. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266003;

2. 国家水产品质量监督检验中心, 山东青岛 266071)

**摘要:**以鱿鱼酶解鲜味汁为研究对象, 利用碳羟基磷灰石(CHAP)脱除其中的重金属Cd<sup>2+</sup>, 以脱镉率作为衡量该工艺的指标。分别研究了CHAP的用量、pH、温度3个单因素对脱除的影响, 并在此基础上应用中心组合设计(CCD)原理和响应面分析法(RSM), 研究各个变量及其交互作用对脱除率的影响, 同时模拟构建了三元二次回归方程的预测模型。结果表明, 在固液比为1:0.5(w/v)的条件下, 脱除重金属Cd<sup>2+</sup>的最佳工艺参数为: CHAP用量32.5g/L、pH取5.4、温度为50.0℃。在该工艺参数下, 鲜味汁中的重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率达93.1%, 使产品重金属Cd<sup>2+</sup>含量符合食品安全的限量标准。

**关键词:** 鱿鱼鲜味汁, 碳羟基磷灰石, 脱除率, 响应面分析法

## Study on technology of removing Cd<sup>2+</sup> in squid sauce

WANG Cheng<sup>1</sup>, JIAO Jiao<sup>1</sup>, ZHAO Yan-fang<sup>2</sup>, WANG Ao-yun<sup>1</sup>, LI Yin-ping<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. The National Center for Quality Supervision and Test of Aquatic Products, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The carbonate hydroxyapatite(CHAP) was used to remove cadmium in squid sauce and removal rate was the measure indicator. Effects of the CHAP usage, pH, and temperature on the removal rate were studied. Optimum levels of variables were further determined by using central composite design(CCD). According to responses from the experimental designs, effects of each variable were calculated and the interactions between them were determined. The highest removal rate was obtained in the condition of material to liquid ratio 1:0.5 (w/v), CHAP 32.5g/L, pH5.4, and temperature 50.0℃. The removal rate was enhanced to 93.1% after the optimization procedure. After cadmium removal, the content of cadmium in squid sauce reached the standard of food safety requirements.

**Key words:** squid sauce; carbonate hydroxyapatite; cadmium desorption rate; response surface methodology

中图分类号: TS225.2

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2014)02-0251-05

我国鱿鱼年捕获量达50~60万吨<sup>[1]</sup>。在加工过程中占鱿鱼体重15%~20%的内脏<sup>[2]</sup>因含水量和含油量高, 使得微生物迅速繁殖、油烧酸败加速<sup>[3]</sup>, 且重金属含量超标, 难以有效利用。目前, 鱿鱼内脏一般直接做成低廉的鱿鱼粉、鱿鱼膏等饲料诱食剂和营养补充剂<sup>[4]</sup>。然而, 鱿鱼内脏富集大量重金属元素, 尤其镉元素严重超标, 使用过程中极易造成水体和土壤的污染, 并且通过食物链最终将重金属富集到人体<sup>[5]</sup>。因此消除重金属的直接和间接危害, 具有一定的环保价值和食品安全意义。

有关重金属的脱除方法, 徐莹等<sup>[6]</sup>研究了鲁氏酵母对水溶液中Cd<sup>2+</sup>的脱除。郭赣林等<sup>[7]</sup>研究了浒苔对重金属Cd<sup>2+</sup>的生物吸附。鲁婷婷等<sup>[8]</sup>研究了鱿鱼墨黑色素对重金属的吸附。郑伟等<sup>[9]</sup>研究了碳羟基磷灰石(CHAP)对废水中Cd<sup>2+</sup>的吸附, 研究表明在适宜条件下利用CHAP通过物理吸附重金属Cd<sup>2+</sup>, 其脱除率高

达96.5%。该方法相比其他方法, 具有成本低、效果好的优势<sup>[10]</sup>。然而目前报道的生物吸附或物理螯合方法均是对富含重金属的水体或标准溶液进行吸附脱除。

在鱿鱼内脏高值利用方面, 刘政坤等<sup>[11]</sup>已对鱿鱼油提取工艺进行研究。但是, 该工艺在获得多不饱和和脂肪酸的鱿鱼油后, 剩余近80%的下层酶解鲜味汁, 同样因富含重金属Cd<sup>2+</sup>而无法合理利用, 造成蛋白资源浪费。基于上述情况, 本研究提出利用CHAP法脱除鱿鱼酶解鲜味汁重金属Cd<sup>2+</sup>。通过对CHAP的用量、pH、温度的探究及最佳工艺参数的探讨, 为后续特征性风味产品的开发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜鱿鱼内脏、废弃蛋壳 山东荣成泰祥集团, 将其用组织捣碎机匀浆处理, 于-18℃冻藏, 每次使用前取出放入4℃冷藏箱过夜解冻; 动物蛋白酶 购于南宁庞博生物工程有限公司, 酶活力30000U/g; 盐酸、磷酸、高氯酸、硝酸、氢氧化钾、氢氧化钙、氯化铵、尿素等 均为分析纯。

收稿日期: 2013-06-19 \* 通讯联系人

作者简介: 王成(1991-), 男, 本科在读, 研究方向: 水产品加工。

基金项目: 山东海洋营养研究院院士工作站基金(2010B0112)。

TDL-5-A离心机 上海安亭科学仪器厂;PHS-2精密酸度计 上海伟业仪器厂;HHS电热恒温水浴摇床 上海博迅实业有限公司医疗设备厂;AD-6自动电子天平 北京赛多利斯仪器系统有限公司;PEAA-700原子吸收分光光度计 美国PE公司。

## 1.2 实验方法

1.2.1 鲑鱼酶解鲜味汁的制备 取一定量的鲑鱼内脏,按1:0.5的料液比加入水,混合均匀后加入0.5mol/L氢氧化钠稀碱液调pH至中性,添加适量动物蛋白酶,适宜温度下酶解一段时间后,趁热离心(5000r/min, 10min),离心后分为三层,其中上层为澄清透明的橙红色鱼油,中间层为未酶解的胶状物成分,下层为富含低分子量寡肽和氨基酸的水相,分离下层得鲑鱼酶解鲜味汁备用。

1.2.2 CHAP的合成 将废弃蛋壳用蒸馏水洗涤至中性,烘干粉碎后,过30目筛,按摩尔质量比为1:1的比例加入到 $H_3PO_4$ 溶液中,在40℃的温度下反应2~3h,过滤去除不溶物,按照1:1的摩尔质量比添加尿素和 $Ca(OH)_2$ 粉末,用KOH调节pH至11,在50~60℃条件下热处理24h,反应产物经冷却后,用1%的 $NH_4Cl$ 洗涤至中性,在60℃下干燥并粉碎得到CHAP粉末<sup>[12]</sup>。

1.2.3 脱除工艺最优参数的确定 在单因素实验时,以鲜味汁中重金属 $Cd^{2+}$ 的原始含量为基准,与脱除工艺处理后的鲜味汁中重金属 $Cd^{2+}$ 含量作对照,依次改变鲜味汁中CHAP加入量(0、2.5、5、10、20、40、60、80、120、160g/L)、pH(2、3、4、5、6、7、8、9)和温度(25、30、35、40、45、50℃),以脱除率作为衡量该工艺的评价指标进行研究和分析,并确定三因素五水平的最佳参数进行响应面分析。实验设计中的水平及编码表见表1。

表1 响应面实验因素水平编码表

Table 1 Factors and levels of response surface experiments

因素	水平				
	-1.68	-1	0	1	1.68
A pH	3.32	4	5	6	6.68
B CHAP的用量(g/L)	0	7.5	20	32.5	41.02
C 温度(℃)	23.18	30	40	50	56.82

1.2.4 CHAP脱除重金属 $Cd^{2+}$  在常温常压下,取制备好的鲜味汁20mL,置于50mL的小锥形瓶中,加入一定量的CHAP吸附剂,充分混匀后调pH到设定值,放入一定温度的恒温水浴摇床中振荡60min。将溶液离心,取上清液用于重金属 $Cd^{2+}$ 含量的测定。

1.2.5 重金属 $Cd^{2+}$ 的检测 重金属 $Cd^{2+}$ 含量的测定参照GB/T 500915-2003,向样品液中分别加入10mL  $HNO_3$ 浸泡4h,在约150℃温度下加热消化,待消化稳定、大量 $NO_2$ 气体冒尽后,加入2.5mL高氯酸,在200℃继续消化至产生大量高氯酸白烟、溶液澄清无色,室温冷却后,用去离子水定容至100mL,使用原子吸收分光光度计(PEAA 600)测定镉含量。

1.2.6 重金属 $Cd^{2+}$ 脱除率计算

$$\text{脱除率}(\%) = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100$$

式中: $C_1$ 为CHAP脱除前鲜味汁重金属 $Cd^{2+}$ 浓度; $C_2$ 为CHAP脱除后鲜味汁重金属 $Cd^{2+}$ 浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素实验结果与分析

2.1.1 CHAP加入量对脱除重金属 $Cd^{2+}$ 的影响 重金属 $Cd^{2+}$ 脱除过程中控制体系pH为5,温度为40℃,设置不同CHAP加入量,实验结果如图1所示。随着CHAP加入量的增加,重金属 $Cd^{2+}$ 脱除率显著增大,当CHAP加入量达到40g/L后趋于平缓。Elliot等<sup>[13]</sup>的研究表明,随着CHAP加入量的增加,吸附剂的表面积及活性吸附位点随之增加,从而使得脱除率显著增大;但是随着溶液中 $Cd^{2+}$ 的浓度的降低,CHAP与其接触机会减小,从而使得继续提高CHAP的加入量对重金属 $Cd^{2+}$ 脱除率影响不显著。综合考虑决定选取7.5、20.0、32.5g/L的CHAP加入量继续对 $Cd^{2+}$ 脱除工艺做响应面分析以确定最佳的CHAP加入量。

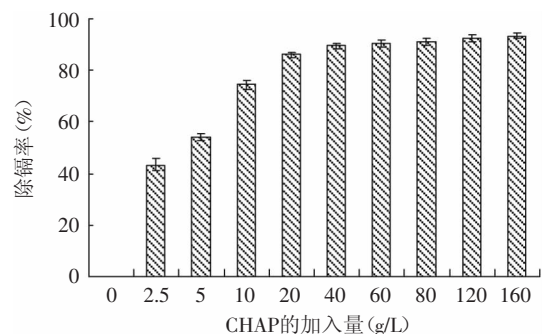


图1 CHAP加入量对脱除重金属 $Cd^{2+}$ 的影响

Fig.1 Effect of CHAP content on  $Cd^{2+}$  removal rate

2.1.2 pH对CHAP脱除重金属 $Cd^{2+}$ 的影响 重金属 $Cd^{2+}$ 脱除过程中控制体系温度为40℃,CHAP加入量为40g/L,设置不同pH梯度,实验结果如图2所示。pH在2、3时,脱除率不到15%,脱 $Cd^{2+}$ 效果不明显。Nilce等<sup>[14]</sup>研究表明,在低pH条件下,CHAP部分溶解,吸附剂表面积减小,从而影响脱 $Cd^{2+}$ 效果;同时,溶液中 $H^+$ 浓度大, $H^+$ 会占据CHAP表面活性位点,跟 $Cd^{2+}$ 形成较强的竞争吸附<sup>[15]</sup>,不利于 $Cd^{2+}$ 的去除。当pH大于3时,重金属 $Cd^{2+}$ 脱除率大幅上升,pH为5时,脱除效果达到最佳;当pH大于5时,CHAP对 $Cd^{2+}$ 的脱除效果开始

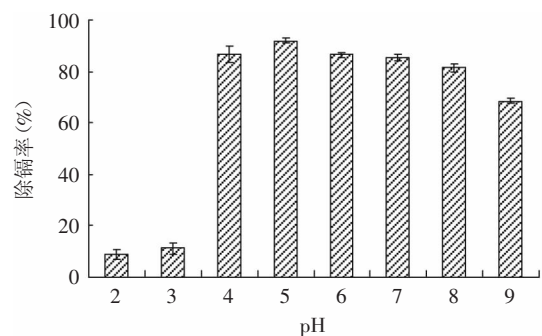


图2 pH对CHAP脱除重金属 $Cd^{2+}$ 的影响

Fig.2 Effect of pH value on  $Cd^{2+}$  removal rate

减弱。唐文清等<sup>[16]</sup>的研究表明重金属的脱除率与CHAP溶出的钙离子浓度呈正相关,随着pH的升高,溶出的钙离子浓度降低,溶解-沉淀作用脱除Cd<sup>2+</sup>的能力减弱;此外碱性条件下出现部分氢氧化物沉淀,改变了脱除吸附机理,从而抑制CHAP对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除的效果。综合考虑决定选取pH为4、5、6继续对Cd<sup>2+</sup>脱除工艺做响应面分析以确定最佳的pH取值。

2.1.3 反应温度对CHAP脱除重金属Cd<sup>2+</sup>的影响 重金属Cd<sup>2+</sup>脱除过程中控制体系pH为5,CHAP加入量为40g/L,设置不同的反应温度,实验结果如图3所示。在25~40℃的温度范围内,随着体系温度的升高,Cd<sup>2+</sup>的脱除率逐渐增加。这说明在该温度范围内,温度有利于CHAP对重金属Cd<sup>2+</sup>的吸附,CHAP对重金属Cd<sup>2+</sup>的脱除与温度呈正相关。当体系温度超过40℃时,Cd<sup>2+</sup>的脱除率基本保持不变,CHAP对重金属Cd<sup>2+</sup>的脱除基本达到平衡状态。同时表明Cd<sup>2+</sup>与CHAP吸附位点形成的结合对高温不敏感,高温条件并未造成Cd<sup>2+</sup>与CHAP间的解析。综合考虑决定选取反应温度为30.0、40.0、50.0℃继续对Cd<sup>2+</sup>脱除工艺做响应面分析以确定最佳的反应温度。

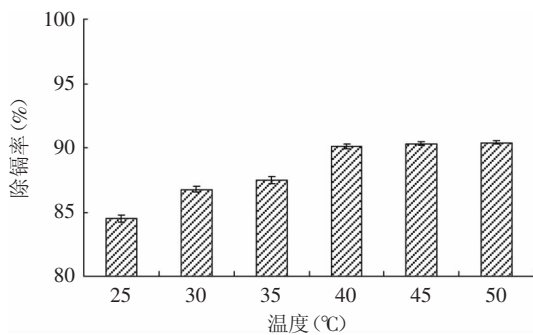


图3 反应温度对CHAP脱除重金属Cd<sup>2+</sup>的影响  
Fig.3 Effect of temperature on Cd<sup>2+</sup> removal rate

## 2.2 响应面分析法(RSM)对脱除条件的优化

2.2.1 响应面分析方案、实验结果及方差分析 根据Design-Expert软件中的中心组合设计(CCD)原理,综合分析单因素实验,选取对鲜味汁中重金属Cd<sup>2+</sup>的脱除率影响显著的3个因素(pH、CHAP的用量、温度),以重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率(Y)为响应值设计了3因素5水平的响应面分析实验。

由Design-Expert软件进行实验设计和结果分析,具体响应面实验设计与结果见表2,对表1中的实验结果进行回归分析,得到重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率(Y)对pH(A)、CHAP的用量(B)和温度(C)的三元二次回归方程 $Y=0.79+0.13A+0.19B+0.047C-0.024AB-0.033AC+0.026BC-0.11A^2-0.10B^2-0.022C^2$ 。

对回归方程进行方差分析和显著性检验结果如表2所示。从表2可知,回归项中 $p < 0.01$ ,说明所选择模型极为显著,表明该二次回归模型能够显著拟合pH、CHAP的用量和温度对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率的影响,该模型能够代替实验真实点对实验结果进行分析。回归模型的决定系数( $R^2_{Adj}$ )为0.8966,说明该模型能够解释89.7%的响应值变化,因此该模型能很好

的解释重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率的变化,并能够对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率进行预测。方差分析结果表明:一次项A、B,二次项A<sup>2</sup>、B<sup>2</sup>对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率具有极显著影响,C、C<sup>2</sup>、交互项BC、AC对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率具有较显著影响。由此可见,各具体实验因素对响应值的影响不是简单的线性关系。各因素的F值可以反映出各因素对实验指标的重要性,F值越大,表明对实验指标的影响越大,即重要性越大。从方差分析表可知: $F_A=16.69, F_B=32.41, F_C=2.05$ ,即各因素对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率的影响程度大小顺序为:B>A>C。

表2 实验设计及响应值

Table 2 Experimental design and response value

实验号	A	B	C	Y 脱除率 (%)	
				真实值	预测值
1	-1	-1	-1	30.1	25.9
2	-1	1	-1	66.0	59.6
3	1	-1	-1	60.3	56.1
4	1	1	-1	80.1	81.2
5	-1	-1	1	36.2	33.6
6	-1	1	1	52.3	51.8
7	1	-1	1	70.1	73.3
8	1	1	1	82.1	86.1
9	0	-1.68	0	21.2	24.1
10	0	1.68	0	70.2	69.5
11	-1.68	0	0	16.1	19.2
12	1.68	0	0	86.1	82.9
13	0	0	-1.68	61.2	65.1
14	0	0	1.68	83.1	80.6
15	0	0	0	76.2	79.1
16	0	0	0	71.1	81.2
17	0	0	0	78.2	79.1
18	0	0	0	79.1	78.6
19	0	0	0	75.1	78.3
20	0	0	0	76.2	79.6

2.2.2 响应面分析 利用Design-Expert软件对表3的实验数据进行三元二次回归拟合分析,所得响应面如图4所示。各因素及其交互作用对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率的影响结果可通过该图直观地反映出来。

响应面图显示了其中一个因素位于中心水平时,其余两个因素的交互作用对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率影响。坐标面上等高线的形状可以反映两因素间交互作用的强弱,圆形表示两因素间交互作用较弱,椭圆形则表示交互作用较强<sup>[17-18]</sup>。由图4可知,pH和温度的交互作用、CHAP的用量和温度的交互作用对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率具有较显著影响。就单因素而言,CHAP的用量对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率影响最显著,表现为响应曲面的坡度较陡和等高线较密集;pH对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率影响次之,温度对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率影响最小,表现为响应曲面的坡度较缓和等高线较稀疏。

2.2.3 最优工艺条件的预测及验证 运用Design-Expert软件对实验数据进行优化预测,得到最佳的脱

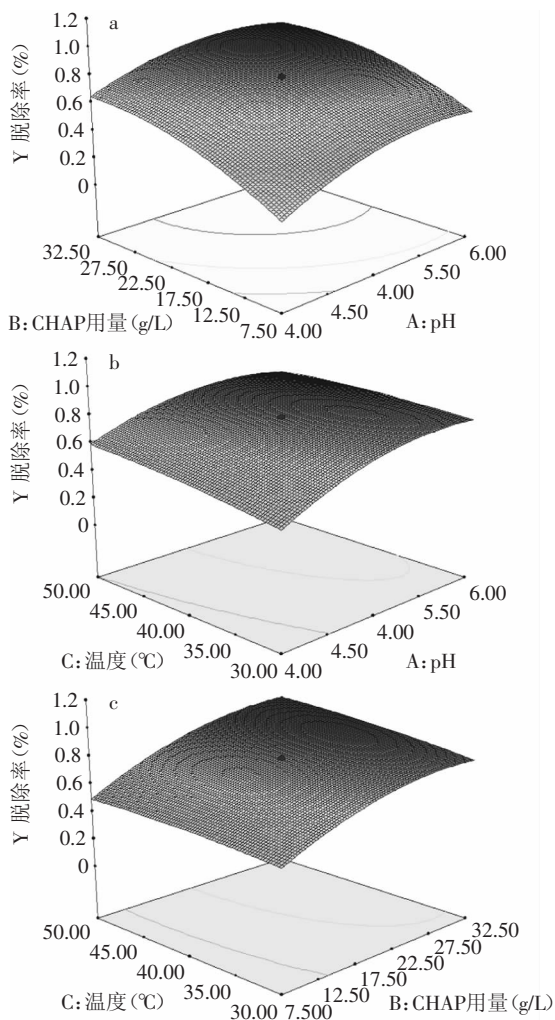


表3 方差分析

Table 3 Analysis of standard deviation

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	p值	显著性
模型	1.08	9	0.12	8.09	0.00015	**
A	0.25	1	0.25	16.69	0.0022	**
B	0.48	1	0.48	32.41	0.0002	**
C	0.030	1	0.030	2.05	0.01827	*
AB	4.748E-003	1	4.748E-003	0.32	0.05833	
AC	8.705E-003	1	8.705E-003	0.59	0.04605	*
BC	5.330E-003	1	5.330E-003	0.36	0.04615	*
A <sup>2</sup>	0.19	1	0.19	12.54	0.0054	**
B <sup>2</sup>	0.14	1	0.14	9.80	0.00107	**
C <sup>2</sup>	6.667E-003	1	6.667E-003	0.45	0.03170	*
残差	0.15	10	0.015			
失拟项	0.15	5	0.030			
纯误差	0.000	5	0.000			
总和	1.22	19				

注:\*差异性显著( $p < 0.05$ );\*\*差异性极显著( $p < 0.01$ )。

图4 各因素对Cd<sup>2+</sup>脱除率影响的响应面图Fig.4 Response surface graphs of reaction factors on Cd<sup>2+</sup> removal rate

除Cd<sup>2+</sup>的工艺参数为:CHAP的用量32.5g/L、pH取5.4、温度为50.0℃,在此条件下预测重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率为93.7%。在此工艺参数下对模型的预测参数进行验

证,得到重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率为93.1%,与预测值的相对误差为0.6%,说明采用RSM优化得到的脱除重金属Cd<sup>2+</sup>的工艺参数可靠,与模型预测值非常接近。

### 2.3 脱除前后重金属Cd<sup>2+</sup>含量的对比

脱除前后重金属Cd<sup>2+</sup>含量和一些机构对水产品中重金属Cd<sup>2+</sup>限量标准如表4所示。鱿鱼鲜味汁中原始的重金属Cd<sup>2+</sup>含量为4.66mg/kg,高于上述重金属Cd<sup>2+</sup>限量标准,存在着潜在的食品安全隐患。通过最佳工艺参数下脱除工艺的处理,重金属Cd<sup>2+</sup>的含量降至0.32mg/kg,低于权威的CAC标准中重金属Cd<sup>2+</sup>限量规定的1.0mg/kg,效果显著,且符合食品质量安全标准,说明该工艺具有广阔的应用前景。

表4 重金属Cd<sup>2+</sup>含量指标

Table 4 Indicators of cadmium in squid sauce

项目	重金属Cd <sup>2+</sup> 含量(mg/kg)
处理前	4.66
处理后	0.32
CAC标准	1.0
NY5073-2006	1.0(头足类)
GB2762-2012	2.0(头足类)

### 3 结论

在单因素实验基础上,用响应面法对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除工艺进行优化,建立了CHAP的用量、pH和温度对重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率的三元二次回归方程模型。经验证,该数学模型可靠,可以用于重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率的预测。结合单因素实验和响应面优化模型确定最佳脱除Cd<sup>2+</sup>的工艺参数为:CHAP用量32.5g/L、pH5.4和温度50.0℃,重金属Cd<sup>2+</sup>脱除率为93.1%,与模型预测值非常接近。该工艺不仅使鱿鱼鲜味汁中重金属Cd<sup>2+</sup>的含量达到食品质量安全标准,同时符合零污染、低耗能、高收益的环境友好型的要求,具有广阔的开发利用前景。

(下转第258页)

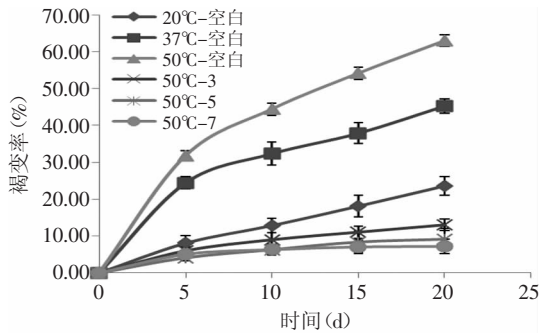


图3 木瓜果脯不同温度下储藏期间的褐变率变化,

Fig.3 The rate of the non-enzymatic browning under different temperature storage of the papaya candied fruit

注:其中空白表示无添加护色剂,3、5和7与表1中的护色剂成分相一致。

手段。

通过对生产工艺条件的优化研究可知,真空渗糖法和100%白砂糖的糖液组成有利于木瓜果脯的护色,能够更好地抑制其非酶褐变,因此更适宜用于工业生产上。在护色剂的使用上,0.10%  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ +0.10%异抗坏血酸钠+0.30%柠檬酸的护色效果最优,对非酶褐变的抑制效果最明显,在此护色液条件下,木瓜果脯能够保持合乎蜜饯标准要求的正常的色泽和气味,无异味、无霉变、无杂质。

通过对不同储藏条件的影响研究中发现,真空包装的褐变程度较低,储藏温度越高,非酶褐变程度越厉害。因此,进行脱气包装,适当降低储藏温度,有利于抑制非酶褐变,保持木瓜果脯的原有色泽。

## 参考文献

- [1] 王蕊. 木瓜的营养保健功能及其产品的开发研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(1): 125-127.
- [2] 韩立敏. 木瓜的营养保健功能及其开发利用[J]. 广东农业科学, 2009(9): 138-139.
- [3] 丁华. 果脯蜜饯市场如何做大做强[J]. 农产品加工, 2011(7): 40-41.
- [4] Marisa Rattanathanalerk, Naphaporn Chiewchan, Walaiporn Srichumpoung. Effect of thermal processing on the quality loss of pineapple juice[J]. Journal of Food Engineering, 2005(66): 259-265.
- [5] Avila, M L B, Silva C L M. Modeling kinetics of thermal degradation of color in peach puree[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 39(2): 161-166.
- [6] 罗先群, 王新广, 谢绍康, 等. 低糖鲜木瓜果脯的研制[J]. 食品工业科技, 1999, 20(6): 31-32.
- [7] 李基洪, 陈奇. 果脯蜜饯生产工艺与配方[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- [8] 王中凤. 低糖芒果脯加工工艺[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(10): 86-87.
- [9] 韩舜愈, 盛文军, 祝霞. 水果制品加工工艺与配方[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [10] 黎继烈, 陈永安, 唐松元, 等. 板栗产品的褐变及护色方法研究[J]. 林业科技通讯, 2001(10): 10-12.
- [11] 卜晓英, 张敏. 低糖木瓜脯加工工艺研究[J]. 中国野生植物资源, 2002, 21(3): 39-40.
- [12] 杨金英, 王剑平. 甘薯果脯护色的实验研究[J]. 农机化研究, 2004(1): 177-179.

(上接第254页)

## 参考文献

- [1] 石迪, 郝剑君, 杨小克, 等. 微碱条件生物酶法提取鱿鱼油工艺研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(2): 277-281.
- [2] 王建中, 吕玉英, 徐正琪. 鱿鱼内脏的综合利用研究[J]. 中国海洋药物, 1999, 69(1): 55-59.
- [3] 杨小克, 李晓琳, 步营, 等. 高酸值鱿鱼油的精制工艺分析[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 279-281.
- [4] 马永钧, 秦乾安, 陈小娥, 等. 鱿鱼加工副产物综合利用研究进展[J]. 渔业现代化, 2008, 35(4): 62-65.
- [5] 刘春娥, 林洪, 曹立民. 鱿鱼内脏蛋白质酶解工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2004, 25(6): 83-86.
- [6] 徐莹, 刘嫡, 李春生, 等. 鲁氏酵母脱除水溶液中 $\text{Cd}^{2+}$ 的研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(5): 54-56.
- [7] 郭贛林, 朱明, 徐军田, 等. 浒苔对重金属 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 的生物吸附及其生理反应[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(6): 850-857.
- [8] 鲁婷婷, 林琳, 褚梦思, 等. 鱿鱼墨黑色素对 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 吸附的影响[J]. 浙江海洋学院学报, 2011, 31(1): 40-43.
- [9] 郑伟, 李小明, 曾光明, 等. 碳羟磷灰石(CHAP)对废水中 $\text{Cd}^{2+}$ 的吸附研究[J]. 环境科学学报, 2006, 6(11): 1851-1854.
- [10] 廖德祥, 蔡宏辉, 钟琼. 碳羟磷灰石(CHAP)吸附废水中锰离子的动力学研究[J]. 中国锰业, 2012, 30(1): 23-25.
- [11] 刘政坤, 杨小克, 江晓路, 等. 鱿鱼内脏油的提取研究[J].

中国油脂, 2011, 36(9): 9-13.

- [12] 张昱, 李小明, 郑伟, 等. 碳羟磷灰石对废水中 $\text{Zn}^{2+}$ 的去除及机理探讨[J]. 工业用水与废水, 2008, 39(4): 69-72.
- [13] Elliott HA, Huang Cb. Adsorption characteristics of some  $\text{Cu}(\text{II})$  complexes on aluminosilicates[J]. Water Res, 1981, 15(7): 849-855.
- [14] Nilce CC, Reinaldo C, Rossi AM, et al. Cadmium uptake by hydroxyapatite synthesized in different conditions and submitted to thermal treatment[J]. Environ Sci Technol, 2002, 36(7): 1630-1635.
- [15] Hui K, Chao C, Kot SC. Removal of mixed heavy metal ions in wastewater by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash[J]. J Hazard Mater, 2005, 127(1-3): 89-101.
- [16] 唐文清, 曾荣英, 高帅, 等. 碳羟磷灰石对废水中铅离子吸附研究[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(2): 35-38.
- [17] Hui X, Lan S, Ya S, et al. Optimization of cultivation conditions for extracellular polysaccharide and mycelium biomass by *Morchella esculenta* As51620[J]. Biochem Eng J, 2008, 39(1): 66-73.
- [18] 万俊, 蒋爱民, 曲直, 等. 响应面法优化Camembert干酪加工工艺[J]. 现代食品科技, 2012, 28(7): 840-844.