

# 蒸汽闪爆结合碱溶酸沉法 提取高温花生粕中的蛋白质

章玉清,杨瑞金\*,张文斌,华 霄,赵 伟  
(江南大学食品学院,江苏无锡 214122)

**摘要:**以高温花生粕为研究对象,研究了蒸汽闪爆结合碱溶酸沉法提取花生蛋白质的工艺及其产品的功能性质。通过单因素实验和正交实验确定优化的工艺条件为:高温花生粕首先用0.3%的稀硫酸在60℃条件下搅拌浸泡2h;用清水洗去表面稀酸后沥干再进行蒸汽闪爆处理,条件为:爆破压力1.6MPa、维压时间5min;最后采用碱溶酸沉法提取蛋白质,条件为:温度60℃、pH9.5、料水比1:12(g/mL)、浸提时间为2h。在此工艺条件下,高温花生粕中蛋白质的提取率达到52.6%,比传统碱溶酸沉工艺提高了10.8%,且所得蛋白质产品的持水性、乳化性、起泡性和起泡稳定性有了显著提高,分别增强了67.1%、141.0%、131.3%和107.4%。蒸汽闪爆技术结合碱溶酸沉法适用于从高温花生粕中提取蛋白质,不仅可以提高蛋白质的提取率,而且能够改善产品的功能性质。

**关键词:**高温花生粕,花生蛋白,蒸汽闪爆,碱溶酸沉

## Extraction of protein from high-temperature peanut meal using combination process with steam flash-explosion, alkaline-extraction and acid-precipitation

ZHANG Yu-qing, YANG Rui-jin\*, ZHANG Wen-bin, HUA Xiao, ZHAO Wei

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** A combined process with steam flash-explosion, alkaline-extraction and acid-precipitation was used to extract protein from high-temperature peanut meal. Through single factor and orthogonal test, the optimum conditions were figured out. Firstly, the high-temperature peanut meal was soaked in 0.3% sulfuric acid solution at 60℃ for 2h, then drained it and washed with water to remove the acid solution remained in the surface of the meal. The pretreated meal was treated with steam flash-explosion at 1.6MPa for 5min. The protein in the steam flash-exploded meal was extracted by alkaline-extraction and acid-precipitation process. The optimal condition for alkaline-extraction was solid to water ratio: 1:12(g/mL), pH9.5, 60℃ and 2h. Under these conditions, the protein extraction rate reached 52.6%, which was 10.8% higher than conventional alkaline extraction and acid-precipitation process. The water holding capacity, emulsifying activity index, foaming capacity and foaming stability of the protein extracted using this combined process were significantly improved, which increased by 67.1%, 141.0%, 131.3% and 107.4% respectively. Results showed that the combined process with steam flash-explosion, alkaline-extraction and acid-precipitation was appropriate for extracting protein from high-temperature peanut meal, which could increase the protein extraction rate and also improve the functional properties.

**Key words:** high-temperature peanut meal; peanut protein; steam flash-explosion; alkaline-extraction and acid-precipitation

中图分类号: TS229

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2013)14-0278-06

花生是世界上重要的油料作物<sup>[1]</sup>。我国花生年产量达到了上百万吨,位居世界第一,其中有50%~60%的花生都用来榨油<sup>[2-3]</sup>。高温花生粕是花生油生产的主要副产品,蛋白质含量高达40%~50%,氨基酸种类

丰富,含有人体必需的八种氨基酸,因此,花生粕是一种很好的植物蛋白来源<sup>[4]</sup>。大部分花生油加工企业采用的制油方法为机械压榨法和有机溶剂浸出法<sup>[5]</sup>。由于经高温高压作用,蛋白质变性严重,导致花生粕的应用受到限制<sup>[6]</sup>。目前,国内外对高温花生粕的利用主要集中于饲料<sup>[7]</sup>、酿造食品原料<sup>[8]</sup>和酶法水解提取多肽<sup>[9]</sup>。近年来,我国开始重视从高温花生粕中提取蛋白质并加以利用。目前主要提取技术有:传统碱溶酸沉法或结合高速匀浆、超声等预处理<sup>[10-11]</sup>。碱溶酸

收稿日期:2013-01-31 \* 通讯联系人

作者简介:章玉清(1989-),女,硕士研究生,研究方向:植物蛋白加工。

基金项目:国家863计划(2013AA102103);江苏省自然科学基金项目(SBK201240610)。

沉法蛋白质提取率低,高速匀浆处理能耗较大,超声处理则存在设备效率低、成本高等问题。蒸汽爆破技术是利用高压饱和水蒸汽对物料进行蒸煮,然后突然释放至常压而产生爆破效果<sup>[9]</sup>。该技术主要用于处理秸秆、林木等纤维素类原料,能够实现结构变化和组分分离,对提高酶解率和消化率有较好的应用价值<sup>[9-10]</sup>。该技术具有环保、低耗能等优点<sup>[11]</sup>。蒸汽闪爆技术是从传统的蒸汽爆破发展而来,释压过程由几十秒甚至几分钟降低到毫秒,从而迅速释放高密度能量来破坏物料结构<sup>[12]</sup>。目前,赵伟等<sup>[13]</sup>采用蒸汽闪爆处理羽毛,有效破坏了羽毛角蛋白的结构,显著提高了其在极性溶剂中的溶解度。张燕鹏等<sup>[14]</sup>将蒸汽闪爆应用于豆粕中大豆蛋白的提取,有效地提高了大豆蛋白的提取率。本研究结合蒸汽闪爆和碱溶酸沉工艺从高温花生粕中提取蛋白质,以期提高蛋白质的提取率和改善产品的功能性质。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

高温花生粕(蛋白质含量:42.99%,氮溶解指数:18.51%) 山东鲁花集团,是花生经过机械压榨法提油后所得的副产品;硫酸、盐酸、氢氧化钠等 均为分析纯。

Allegra25R型离心机 美国贝克曼库尔特有限公司;HJ-4型多头磁力加热搅拌器 江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司;MP-501A型超级恒温槽 上海一恒科技有限公司;BS 2202S型电子天平 多利斯科学仪器(北京)有限公司;X-12A型半自动凯氏定氮仪 上海晟声自动化分析仪器有限公司;FE20K型pH计 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;QBS-200B型汽爆工艺实验台(以下简称“蒸汽闪爆设备”,如图1所示) 河南鹤壁正道生物能源公司。

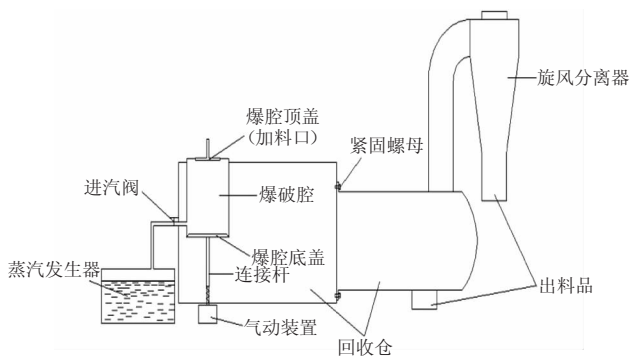


图1 蒸汽闪爆设备

Fig.1 Steam flash-explosion system

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 高温花生粕预处理工艺流程

1.2.1.1 稀酸浸泡预处理工艺 花生粕粉碎过80目,按1:3的料液比加入一定浓度的稀硫酸溶液,在60℃的温度下搅拌浸泡2h,用清水洗去浸泡后的花生粕表面剩余的酸,沥干。

1.2.1.2 蒸汽闪爆工艺 取1.5kg经过稀酸浸泡或未经稀酸预处理的花生粕置于蒸汽闪爆设备的爆破腔

中,开启进气阀使蒸汽进入爆破腔,达到预定压力后维压一定时间,然后启动气动装置,通过连接杆将爆破腔底盖迅速下拉,爆破腔在毫秒级时间内泄压至大气压力,物料中的水分闪蒸产生大量的蒸汽,由内而外对物料做功,产生爆破效果,并将物料喷至接收器中,收集物料。

1.2.2 花生蛋白质碱溶酸沉提取工艺 称取一定量的爆破花生粕,按一定的料液比加入蒸馏水,在一定温度下提取一定时间,并在不断搅拌的同时调节所需的pH。浸提后离心(10000×g/min)20min,收集上清液,然后进行二次浸提(相同条件下),合并两次上清液调pH至4.5,静置酸沉30min后离心(10000×g/min)20min,收集沉淀,用去离子水洗涤后调节pH至7.0,冷冻干燥得到花生蛋白粉,然后检测其蛋白质含量。

1.2.3 稀酸浸泡预处理对蒸汽闪爆效果的影响 花生粕按照1.2.1和1.2.2工艺提取蛋白质,其中碱溶酸沉条件为:温度60℃、pH9.5、料水比1:10、浸提时间2h。考察稀酸浸泡预处理对爆破后花生粕中蛋白质提取率和产品功能性质的影响。对照组为花生粕未经任何预处理直接进行传统碱溶酸沉法提取蛋白质。

1.2.3.1 稀酸处理对蛋白质提取率的影响 将经0.6%稀硫酸浸泡和未经过稀酸浸泡的花生粕,分别在1.2、1.8MPa爆破压力下维压2min后提取蛋白质。

1.2.3.2 稀酸处理对蛋白质产品功能性质的影响 将1.2.3.1得到的蛋白质产品进行持水性、持油性、起泡性及起泡稳定性、乳化性及乳化稳定性的测定。

1.2.3.3 稀酸浓度对蛋白质提取率的影响 花生粕分别经0、0.5%、0.1%、0.3%、0.6%、0.9%浓度的稀硫酸浸泡后,在1.8MPa爆破压力下维压5min后提取蛋白质。

1.2.4 蒸汽闪爆处理条件的确定 花生粕按照1.2.1和1.2.2工艺,选取1.2.3.3确定的最佳浓度的稀酸浸泡花生粕,再经蒸汽闪爆处理后提取蛋白质,其中碱溶酸沉条件为:温度60℃、pH9.5、料水比1:10、浸提时间2h。研究爆破压力和维压时间对蛋白质提取率的影响。对照组为花生粕未经任何预处理直接进行传统碱溶酸沉法提取蛋白质。

1.2.4.1 爆破压力对蛋白质提取率的影响 设定维压时间5min,分别在1.2、1.4、1.6、1.8、2.0MPa条件下进行爆破处理后提取花生粕中蛋白质。

1.2.4.2 维压时间对蛋白质提取率的影响 选取1.2.4.1确定的最佳爆破压力,分别维压1、3、5、7、9min后提取花生粕中蛋白质。

1.2.5 碱溶酸沉提取条件优化 花生粕按照1.2.3.3、1.2.4.1、1.2.4.2确定的最佳稀酸浓度、爆破压力和维压时间进行稀酸浸泡和蒸汽闪爆处理后,碱溶酸沉提取蛋白质。

1.2.5.1 料水比对蛋白质提取率的影响 爆破花生粕在pH9.5,温度60℃,料水比分别是1:6、1:8、1:10、1:12、1:15的条件下提取2h。

1.2.5.2 pH对蛋白质提取率的影响 设定料水比1:12,提取温度60℃,爆破花生粕分别在pH8.5、9.0、

9.5、10.0、11.0的条件下提取2h。

1.2.5.3 温度对蛋白质提取率的影响 爆破花生粕按料水比1:12加入蒸馏水,维持pH9.5,分别于30、40、50、60、70℃下提取2h。

1.2.5.4 浸提时间对蛋白质提取率的影响 爆破花生粕在料水比1:12, pH9.5, 温度为60℃条件下分别提取0.5、1、2、3、4h。

1.2.5.5 正交实验 根据碱溶酸沉工艺的单因素实验结果,设计 $L_9(4^3)$ 正交实验,实验因子、水平及编码见表1。

表1 实验因素和水平表

水平	因素			
	A 料液比(g/mL)	B pH	C 温度(℃)	D 时间(h)
1	1:8	9	40	1
2	1:10	9.5	50	2
3	1:12	10	60	3

1.2.6 蛋白质含量的测定 采用凯氏定氮法。

1.2.7 蛋白质提取率计算

蛋白质提取率(%)=花生蛋白粉中蛋白质的质量(g)/原料中蛋白质的质量(g)×100

1.2.8 蛋白质功能性质的测定

1.2.8.1 持水性及持油性的测定 参照文献[2]中的方法测定。

1.2.8.2 起泡性及起泡稳定性、乳化性及乳化稳定性的测定 参照文献[15]中的方法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 稀酸浸泡预处理对蒸汽闪爆效果的影响

2.1.1 稀酸处理对蛋白质提取率的影响 稀酸处理对爆破效果的影响结果见图2。对照组中蛋白质的提取率只有41.8%。花生粕未经稀酸浸泡处理时,在1.2MPa、2min和1.8MPa、2min爆破条件下的提取率分别达到了44.3%、45.5%。说明爆破处理能够提高蛋白质提取率,但提高程度有限。经0.6%的稀硫酸浸泡处理后,蛋白质提取率分别提高至46.5%、50.2%。经差异显著性分析可知,在相同爆破条件下,未经酸泡处理与经过酸泡处理后蛋白质提取率之间差异显著( $p<0.05$ ),说明稀酸浸泡能够提高蒸汽闪爆的处理效果。原因可能是在爆破处理前进行稀硫酸浸泡能够使物料发生一定程度的润胀,更有利于爆破时水蒸汽的渗入,提高爆破处理效果;同时酸泡弱化

了蛋白质和其他物质之间的缔合程度和强度,易于爆破<sup>[9]</sup>。

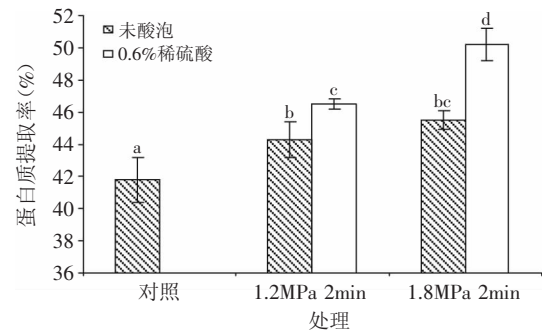


图2 稀酸处理对蛋白质提取率的影响

Fig.2 Effect of acid-pressoaking on protein extraction rate

注:不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

2.1.2 稀酸处理对蛋白质产品功能性质的影响 稀酸处理对蛋白质产品功能性质的影响结果如表2所示。经过稀酸浸泡预处理后,所得蛋白质产品的持水性、持油性、起泡性和起泡稳定性均有一定程度的增强。在1.8MPa、2min的闪爆条件下,稀酸浸泡预处理导致蛋白质产品的乳化性和乳化稳定性略有下降。综合分析,稀酸浸泡工艺整体上改善了蛋白质产品的功能性质。

2.1.3 稀酸浓度对蛋白质提取率的影响 稀酸浓度对花生蛋白质提取率的影响见图3。如图3所示,在一定条件下,蛋白质提取率随着酸浓度的提高而增加,超过0.3%的酸度后提取率开始下降。因此选取稀酸浓度为0.3%。

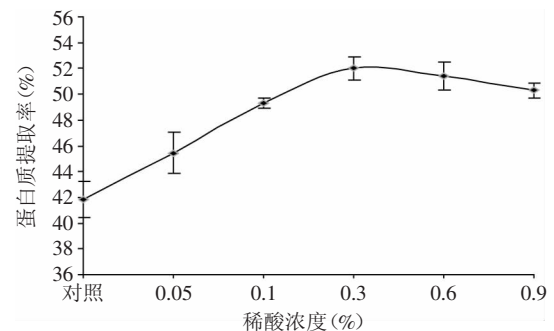


图3 稀酸浓度对蛋白质提取率的影响

Fig.3 Effect of acid-pressoaking concentration on protein extraction rate

表2 稀酸处理对蛋白质功能性质的影响

Table 2 Effect of acid-pressoakin on functional properties of peanut protein

功能性质	对照	未酸泡1.2MPa 2min	0.6%稀硫酸1.2MPa 2min	未酸泡1.8MPa 2min	0.6%稀硫酸1.8MPa 2min
持水性(g/g)	2.28±0.10 <sup>a</sup>	2.39±0.12 <sup>ab</sup>	2.52±0.08 <sup>bc</sup>	2.58±0.10 <sup>c</sup>	2.93±0.06 <sup>d</sup>
持油性(mL/g)	5.02±0.10 <sup>a</sup>	5.30±0.09 <sup>b</sup>	5.88±0.06 <sup>d</sup>	5.59±0.11 <sup>c</sup>	6.16±0.12 <sup>e</sup>
起泡性(%)	16.0±0.0 <sup>a</sup>	32.5±1.8 <sup>b</sup>	40.0±0.0 <sup>d</sup>	34.5±1.3 <sup>b</sup>	37.0±1.0 <sup>c</sup>
起泡稳定性(%)	34.0±2.7 <sup>a</sup>	56.3±4.8 <sup>b</sup>	59.1±1.9 <sup>b</sup>	58.8±4.4 <sup>b</sup>	66.7±1.4 <sup>c</sup>
乳化性(m <sup>2</sup> /g)	99.81±4.92 <sup>a</sup>	134.13±10.03 <sup>c</sup>	150.66±2.89 <sup>d</sup>	131.62±10.02 <sup>c</sup>	116.85±3.48 <sup>b</sup>
乳化稳定性(min)	44.82±2.24 <sup>a</sup>	39.67±1.70 <sup>a</sup>	64.72±4.85 <sup>c</sup>	63.95±3.56 <sup>c</sup>	52.11±3.59 <sup>b</sup>

注:同行不同的字母表示差异显著 $p<0.05$ 。

## 2.2 蒸汽闪爆处理条件的选取

2.2.1 爆破压力对蛋白质提取率的影响 爆破压力对花生粕中蛋白质提取率的影响结果见图4。由图4可知,花生粕经过蒸汽闪爆处理之后在一定程度上提高了蛋白质的提取率,且随着爆破压力的提高,蛋白质提取率呈逐渐增加的趋势。原因可能是爆破后花生粕组织结构遭到破坏,细胞破裂,增加了提取液和蛋白质的接触面积,同时爆破打断了花生蛋白与其他大分子物质之间的化学键,更有利于蛋白质的提取。其中在1.6MPa之前蛋白提取率增加趋势明显,而后随爆破压力的增加蛋白提取率没有显著提高。因此选取爆破压力为1.6MPa。

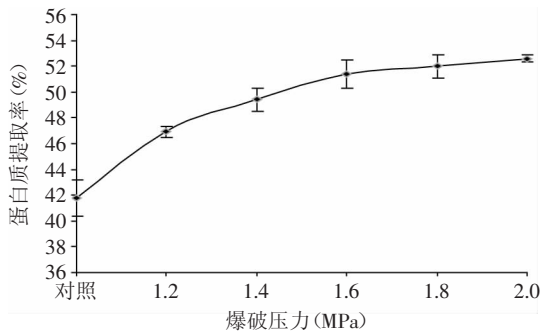


图4 爆破压力对蛋白质提取率的影响

Fig.4 Effect of explosion pressure on protein extraction rate

2.2.2 维压时间对蛋白质提取率的影响 维压时间对花生粕中蛋白质提取率的影响结果见图5。从图5可知,随着维压时间的增加,蛋白质提取率逐渐提高,5min以后蛋白提取率差异均不显著。原因可能是随着压力维持时间的增加,进入到物料中的水蒸汽逐渐增多,在爆破瞬间释压时,能够释放出更大的能量作用于物料,从而使爆破效果更佳<sup>[6]</sup>。但是压力维持时间过长,进入到物料中的水蒸汽达到饱和后,不会有明显提高的爆破效果。因此选取维压时间为5min。

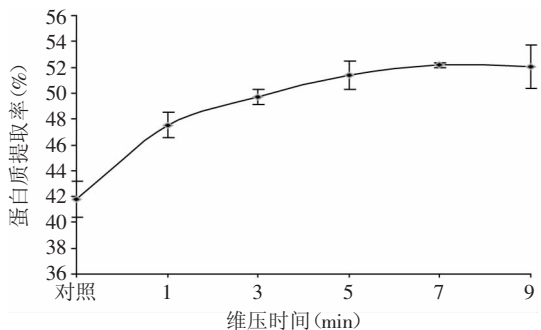


图5 维压时间对蛋白质提取率的影响

Fig.5 Effect of processing time on protein extraction rate

## 2.3 碱溶酸沉提取条件优化

2.3.1 料水比对蛋白质提取率的影响 料水比对蛋白质提取率的影响结果如图6所示,随着料水比的不断提高,蛋白质提取率呈上升趋势,说明增加浸提液有利于蛋白质的提取。当料液比超过1:12时,蛋白质提取率增加有限。而且随着料液比的增大,花生粕中

的可溶性杂质也会相应的溶出,导致提取的花生蛋白质纯度下降,且耗水量和排污量也会增大<sup>[3]</sup>。因此,不宜选择过高的料液比。综合考虑,料液比选择在1:8~1:12为宜。

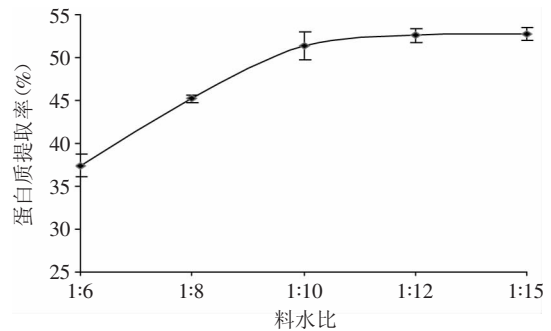


图6 料水比对蛋白质提取率的影响

Fig.6 Effect of solid-liquid ratio on protein extraction rate

2.3.2 pH对蛋白质提取率的影响 pH对蛋白质提取率的影响结果如图7所示,随pH的升高蛋白质提取率逐渐增大。花生蛋白中90%为碱溶性蛋白,随着碱性的增强,蛋白溶解度越大<sup>[3]</sup>。但碱性太强所提取的蛋白质颜色较深,而且蛋白质在pH过高时会引起“脱赖反应”,使有用的氨基酸转变成有毒的化合物,同时也会影响产品风味<sup>[7]</sup>。综上,pH选取在9~10进行正交实验。

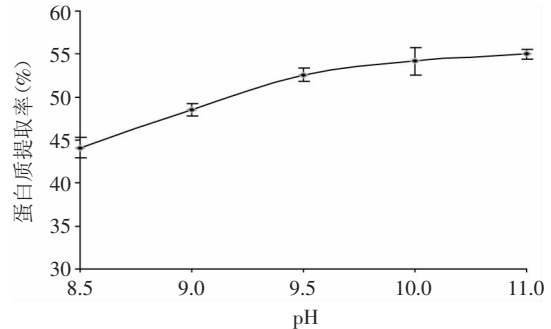


图7 pH对蛋白质提取率的影响

Fig.7 Effect of pH on protein extraction rate

2.3.3 温度对蛋白质提取率的影响 温度对蛋白质提取率的影响结果见图8,在温度达到60℃之前,蛋白质提取率随着温度的升高而增加,超过60℃后蛋

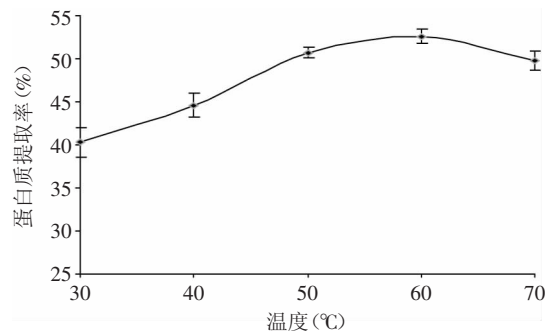


图8 温度对蛋白质提取率的影响

Fig.8 Effect of temperature on protein extraction rate

白质提取率开始下降,其原因可能是温度升高使蛋白变性从而导致溶解度下降<sup>[9]</sup>。考虑到70℃时温度过高容易导致蛋白质产品功能性下降,因此选择温度范围为40~60℃。

2.3.4 浸提时间对蛋白质提取率的影响 浸提时间对蛋白质提取率的影响结果如图9所示,当浸提时间小于2h时,随着提取时间的增加蛋白质提取率逐渐提高。但浸提时间达到2h后,蛋白质溶解达到平衡。随着时间的延长,所需能耗较大,但提取率却没有明显的增加趋势。在浸提时间达到4h时,虽然能获得较高的蛋白质提取率,但在实际生产中可能会出现能耗成本投入较大、生产周期较长等问题。因此,综合考虑,故选择时间范围为1~3h。

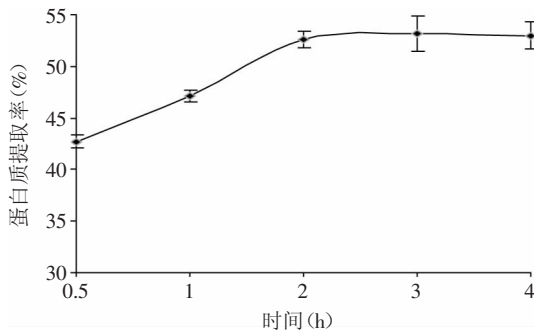


图9 浸提时间对蛋白质提取率的影响

Fig.9 Effect of soaking time on protein extraction rate

2.3.5 碱溶酸沉正交优化实验 正交实验结果见表3。通过极差分析可知,各因素对蛋白质提取率的影响顺序为:A>C>B>D。确定碱提最佳条件为A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>2</sub>,即料水比为1:12,pH9.5,温度60℃,浸提时间为2h。按上述工艺条件提取蒸汽闪爆后花生粕中的蛋白质,提取率为52.6%,与传统碱溶酸沉法相比,蛋白质提取率提高了10.8%。

表3 正交实验结果及极差分析

Table 3 The results and analysis of orthogonal test

实验号	A	B	C	D	蛋白质提取率 (%)
1	1	1	1	1	37.32
2	1	2	2	2	45.55
3	1	3	3	3	46.83
4	2	1	2	3	49.27
5	2	2	3	1	51.46
6	2	3	1	2	47.63
7	3	1	3	2	52.87
8	3	2	1	3	49.46
9	3	3	2	1	51.72
k <sub>1</sub>	43.23	46.49	44.80	46.83	
k <sub>2</sub>	49.45	48.82	48.85	48.68	
k <sub>3</sub>	51.35	48.73	50.39	48.52	
R	8.12	2.34	5.58	1.69	

## 2.4 蛋白质产品的功能性分析

按蒸汽闪爆结合碱溶酸沉法的最佳工艺提取花

生粕中的蛋白质,所得蛋白产品的功能性质与传统的碱溶酸沉法进行对比,结果如表4所示。由表4可知,经过蒸汽闪爆处理后,所得蛋白质产品的功能性质有了较大改善,尤其是在持水性、乳化性、起泡性和起泡稳定性方面显著优于传统碱溶酸沉法所得蛋白质产品,分别增强了67.1%、141.0%、131.3%和107.4%。

表4 蛋白质产品的功能性质对照

Table 4 The comparison of peanut protein functional properties

功能性质	对照	0.3%稀硫酸1.6MPa 5min
持水性(g/g)	2.28	3.81
持油性(mL/g)	5.02	5.88
起泡性(%)	16.0	37.0
起泡稳定性(%)	34.0	70.5
乳化性(m <sup>2</sup> /g)	99.81	240.53
乳化稳定性(min)	44.82	50.75

## 3 结论

经研究发现蒸汽闪爆技术结合碱溶酸沉法适用于从高温花生粕中提取蛋白质。在最佳工艺条件下,高温花生粕中蛋白质的提取率达到52.6%,与传统碱溶酸沉法相比,蛋白质提取率提高了10.8%,且蛋白质产品的持水性、乳化性、起泡性和起泡稳定性显著提高,分别增强了67.1%、141.0%、131.3%和107.4%。

碱溶酸沉提取蛋白质工艺具有易操作、成本低的特点,适用于工业化生产<sup>[9]</sup>。同时,爆破处理所需时间短,低耗能且环保,提取率提高显著,因此,本研究对于高温花生粕中蛋白质的提取以及应用具有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] Su GW, Ren JY, Yang B, *et al.* Comparison of hydrolysis characteristics on defatted peanut meal proteins between a protease extract from *Aspergillus oryzae* and commercial proteases [J]. *Food Chemistry*, 2011, 126: 1306-1311.
- [2] Wu HW, Wang Q, Ma TZ, *et al.* Comparative studies on the functional properties of various protein concentrate preparations of peanut protein [J]. *Food Research International*, 2009, 42: 343-348.
- [3] 高云中. 花生粕蛋白的提取及性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [4] 刘玉兰, 魏金霞, 赵焕丽. 高温花生饼粕生产醇洗浓缩蛋白工艺条件的研究[J]. *中国油脂*, 2010, 35(9): 36-39.
- [5] 柳杰, 张晖, 王立, 等. 花生粕固态发酵生产高蛋白饲料菌种的筛选[J]. *油料蛋白*, 2010, 35(6): 16-18.
- [6] 庄桂, 韦梅生, 朱光州, 等. 发酵植物蛋白制取鲜味剂基料的研究[J]. *郑州工程学院学报*, 2004, 25(4): 12-15.
- [7] Zheng L, Su GW, Ren JY, *et al.* Isolation and characterization of an oxygen radical absorbance activity peptide from defatted peanut meal hydrolysate and its antioxidant properties [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60: 5431-5437.
- [8] 高丽霄, 刘冬, 徐怀德, 等. 高温花生粕中花生蛋白提取工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(5): 273-276.
- [9] 陈洪章. 蒸汽爆破技术原理及应用[M]. 北京: 化工工业出版社, 2004.

(下转第286页)

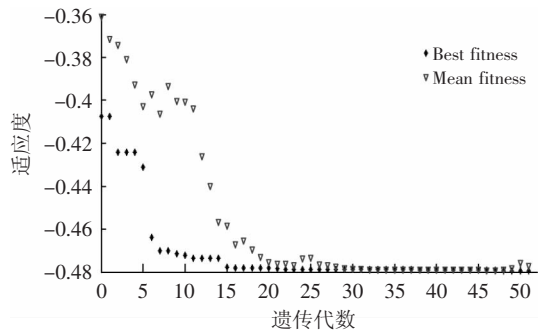


图6 GA优化中遗传代数对拟合度的影响

Fig.6 Evolution of the best and average fitness over the 51 generations in the GA

要求的。最终得到石吊兰素最大提取率为2.395mg/g。此时,对应的石吊兰素提取条件为:乙醇浓度84%,提取2.8h,固液比1:17,提取2次。按照该条件进行5次验证实验,得到提取液中石吊兰素含量为2.35mg/g,与预测值误差为1.88%。与盛卫国等<sup>[7]</sup>优化的提取工艺相比,提取次数减少,提取时间有所延长,石吊兰素的提取量显著提高。可见,相比于正交优化法,ANN-GA优化的模型拟合度更好,具有更好的优化能力。

### 3 结论

在单因素实验的基础上,采用ANN-GA法优化了石吊兰中石吊兰素的提取条件,不仅最大程度上提高了石吊兰素的提取率,同时也降低了能耗和成本。目前为止,关于石吊兰素提取优化的报道还很少,本文为石吊兰素在工业上的应用提供了研究基础,具有很广阔的应用前景。

(上接第277页)

江苏环境科技,2005,18(3):33-35.

[11] 霍汉镇. 现代制糖化学与工艺学[M]. 北京:化学工业出版社,2008:87-106.

[12] LELAND MV, GWEN M Z. Effect of aqueous phase properties on clay particle Zeta potential and electro-osmotic permeability: implications for electro-kinetic soil remediation process[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 55: 1-22.

(上接第282页)

版社,2007:15-16.

[10] Wang K, Jiang JX, Xu F, *et al.* Influence of steaming pressure on steam explosion[J]. Polymer Science, 2010, 116: 1617-1625.

[11] Chen GZ, Chen HZ. Extraction and deglycosylation of flavonoids from sumac fruits using steam explosion[J]. Food Chemistry, 2011, 126: 1934-1938.

[12] Yu ZD, Zhang BL, Yu FQ, *et al.* A real explosion: The requirement of steam explosion pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2012, 12: 335-341.

[13] Zhao W, Yang RJ, Zhang YQ, *et al.* Sustainable and practical utilization of feather keratin by an innovative

### 参考文献

- [1] 吴永平,高智席,周光明. HPLC-CL测定吊石苣苔中石吊兰素的含量[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2007,32(3):48-51.
- [2] Chen JW, Zhu ZQ, Hu TX, *et al.* Structure activity relationship of natural flavonoids in hydroxyl radical scavenging effects[J]. Acta Pharmacologica Sinica, 2002, 23(7): 667-672.
- [3] 周法兴,傅林莉,姜平川,等. 吊石苣苔属植物化学成分的研究[J]. 中国中药杂志,1992,17(7):418-420.
- [4] 王绍云,邹勇,曹晖,等. 石吊兰素的研究进展[J]. 凯里学院学报,2008,26(6):47-49.
- [5] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [6] Lu HL, Yang FC, Lin HY, *et al.* Artificial neural network to predict the growth of the indigenous *Acidithiobacillus thiooxidans* [J]. Chem Eng J, 2008, 137(2): 231-237.
- [7] 盛卫国,熊阳,徐莲英. 正交设计优选石吊兰中石吊兰素的提取工艺[J]. 中药材,2008,11(31):1751-1753.
- [8] Guo WL, Zhang YB, Lu Jiahui, *et al.* Optimization of fermentation medium for nisin production from *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* using response surface methodology (RSM) combined with artificial neural network-genetic algorithm (ANN-GA) [J]. AFR J Biotechnol, 2010, 9(38): 6264-6272.
- [9] Sivapathasekaran C, Mukherjee S, Ray A, *et al.* Artificial neural network modeling and genetic algorithm based medium optimization for the improved production of marine biosurfactant [J]. Bioresour. Technol, 2010, 101(8): 2884-2887.
- [10] Masters T. Practical Neural Network Recipes in C++ [M]. Boston: Academic Press, 1993.
- [13] 天津大学物理化学教研室. 物理化学(下) [M]. 北京:高等教育出版社,2001,12:319-321.
- [14] 张轶,杨大林,韩杰,等. 磁性壳聚糖微球吸附马铃薯淀粉废水中蛋白的应用研究[J]. 食品工业科技,2010,31(9):251-253.
- [15] 李利军,李青松,刘柳,等. 基于壳聚糖 $\gamma$ -聚谷氨酸的协同絮凝法对赤砂糖回溶糖浆的澄清脱色研究[J]. 食品工业科技,2013,34(1):206-210.
- physicochemical pretreatment: high density steam flash-explosion [J]. Green Chemistry, 2012, 14: 3352-3360.
- [14] Zhang YP, Yang RJ, Zhao W, *et al.* Application of high density steam flash-explosion in protein extraction of soybean meal [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 116(2): 430-435.
- [15] Liu Y, Zhao GL, Zhao MM, *et al.* Improvement of functional properties of peanut isolate by conjugation with dextran through Maillard reaction [J]. Food Chemistry, 2012, 131: 901-906.
- [16] 原义涛,陈洪章. 蒸汽爆破技术在麻黄碱提取中的应用[J]. 中国药科大学学报,2005,36(5):414-416.
- [17] 迟玉杰. 大豆蛋白质加工新技术 [M]. 北京:科学出版社,2008:116-117.