

# 含酶反胶束萃取花生蛋白传质机理的研究

杨趁仙<sup>1</sup>, 陈复生<sup>1</sup>, 刘昆仑<sup>1</sup>, 布冠好<sup>1</sup>, 徐卫河<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001) (2. 河南工业大学化学化工学院, 河南郑州 450001)

**摘要:** 本文研究了含酶反胶束萃取花生蛋白的传质过程, 分析了反胶束萃取花生蛋白的传质步骤并选取模型, 考察了搅拌速率、萃取温度、花生颗粒粒径、固液比和酶与底物浓度比 ([E]/[S]) 等因素对萃取速率的影响。结果显示: 提高萃取温度、减小花生颗粒粒径、增加固液比均有利于提高花生蛋白的萃取率, 酶与底物浓度比为 40000 U/g 时萃取效果最佳, 改变搅拌速率对萃取结果影响不大。结合阿伦尼乌斯方程计算得出花生蛋白萃取过程的表观活化能是 9.64 kJ/mol, 综合结果判定萃取过程的控制步骤为花生蛋白从颗粒内部扩散至颗粒表面的内扩散控制, 属于一级反应, 建立宏观传质模型, 通过模型验证得出模型与实际萃取过程较为吻合, 试验结果对含酶反胶束萃取花生蛋白传质过程提供了重要的理论依据。

**关键词:** 反胶束; 花生蛋白; 传质; 酶

文章编号: 1673-9078(2014)9-60-66

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.09.011

## Mass Transfer Process of Peanut Protein Extracted by Enzyme-containing Reverse Micelles

YANG Chen-Xian<sup>1</sup>, CHEN Fu-sheng<sup>1</sup>, LIU Kun-lun<sup>1</sup>, BU Guan-hao<sup>1</sup>, XU Wei-he<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

(2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** This study evaluated the mass transfer process of peanut protein extracted by reverse micelles containing enzyme by using a corresponding model. The effects of stirring speed, extraction temperature, peanut particle size, solid-liquid ratio, and ratio of enzyme to substrate ([E]/[S]) on the extraction rate were examined. The results showed that the extraction rate increased with higher temperature, reduced particle size, and increased the solid-liquid ratio. The optimum extraction efficiency was achieved at an [E]/[S] ratio of 40,000 U/g, while changing the stirring speed had little effect on the extraction. Based on the Arrhenius equation, the apparent activation energy for the extraction of peanut protein was calculated as 9.64 kJ/mol. The results suggest that the rate-determining step in the extraction process probably was the internal diffusion control of the protein from the interior to the surface of the particle, which belongs to a first-order reaction. A macroscopic mass transfer model of peanut protein extracted by enzyme-containing reverse micelles was established, which, after model validation, agreed well with the actual extraction process. Thus, this study provides an important theoretical basis for the mass transfer process of peanut protein extracted by reverse enzyme-containing micelles.

**Key words:** reverse micelles; peanut proteins; mass transfer; enzyme

反胶束体系是表面活性剂超过临界胶束浓度时在有机溶剂中自发形成的、热力学稳定的纳米聚集体。体系中, 表面活性剂的非极性尾部与有机溶剂接触, 极性头部向内形成纳米级的极性内核, 此内核可增溶

收稿日期: 2014-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21176058、31171790、21376064、31201293); 国家 863 计划 (2013AA102208); 郑州市创新型科技人才队伍建设工程 (1STTPZ2C); 河南工业大学博士基金项目 (2010BS014)

作者简介: 杨趁仙 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品资源开发与利用

通讯作者: 陈复生 (1963-), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向: 食品资源开发与利用

水称为“水池”。因反胶束的“水池”对蛋白质具有良好的增溶效果, 因此反胶束技术成为分离和纯化蛋白质的一种重要方法, 如目前反胶束已广泛应用于大豆蛋白<sup>[1]</sup>、花生蛋白<sup>[2]</sup>、小麦胚芽蛋白<sup>[3]</sup>、玉米胚芽蛋白<sup>[4]</sup>等各种植物蛋白的提取研究中, 而且与传统的蛋白提取方法相比, 反胶束萃取技术得到的蛋白质不仅得率高, 而且蛋白结构、性质等方面也表现出显著优势。

利用反胶束萃取蛋白的过程是一个较为复杂的传质过程, 其萃取主要受外界机械力、温度、原料粒度、萃取时间等诸多因素的影响。目前, 对反胶束萃取过程的传质特性研究主要集中在液-液萃取过程, 如氨基酸、酶、抗生素、牛血清蛋白<sup>[5-9]</sup>等。而对反胶束

体系直接萃取固体原料的固-液萃取过程研究较少,赵俊廷等<sup>[10]</sup>研究了反胶束对文冠果种仁蛋白的前萃传质过程,得到萃取过程的缩核反应模型方程,并提出前萃过程主要是受扩散控制的。本文主要以全脂花生粉为原料,分析了反胶束萃取花生蛋白的传质步骤并选取合适的萃取模型,考察了搅拌速率、萃取温度、原料粒径、酶与底物浓度比([E]/[S])等因素对花生蛋白萃取率的影响,探讨了反胶束萃取过程的传质特性,并建立含酶反胶束直接萃取全脂花生粉的固-液萃取传质模型并对模型,试验结果将对实践提供重要的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

全脂花生粉,河南帝鑫食品有限公司;碱性蛋白酶 Alcalase 2.4 L,诺维信(中国)生物技术有限公司;丁二酸二异辛酯磺酸钠(AOT),上海海曲化工有限公司;异辛烷,分析纯,天津市博迪化工有限公司;卡尔-费休,天津市科密欧化学试剂开发中心。

分析天平:BS210S型,德国Sartorius公司;自动水分测定仪:ZSD-2J型,上海安亭电子仪器厂;全自动凯氏定氮仪:KJELTEC 2300型,瑞典福斯特卡托公司;高速冷冻离心机:GL-20C型,上海安亭科学仪器有限公司;pH计:pH211型,意大利HANNA公司;移液枪:Eppendorf公司;六联电动搅拌器:JJ-6型,常州普天仪器制造有限公司;数显恒温水浴锅:HH-6型,常州普天仪器制造有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 原料成分测定

全脂花生粉中蛋白质含量的测定采用国家标准GB/T 5009.5-2010;水分含量的测定采用国家标准GB/T 5009.3-2010;粗脂肪含量的测定采用国家标准GB/T 5009.6-2003。

#### 1.2.2 含酶反胶束体系的制备

准确称取1.2 g AOT置于100 mL锥形瓶中,加入20 mL异辛烷,配制质量浓度为0.06 g/mL的反胶束体系,放入振荡器震荡至AOT完全溶解,加入pH为7.3 KCl浓度为0.2 mol/L的 $\text{KH}_2\text{PO}_4\text{-Na}_2\text{HPO}_4$ 缓冲溶液(0.02~0.2 mL/mL),震荡至溶液透明,静置过夜使体系稳定。在AOT反胶束体系中加入适量的诺维信碱性蛋白酶Alcalase 2.4 L,调整[E]/[S]为20000 U/g、30000 U/g、40000 U/g、50000 U/g,震荡使酶充分溶于反胶束的“水池”中。

#### 1.2.3 含酶反胶束前萃花生蛋白的方法

根据不同的萃取条件,在1.2.2配制的含酶反胶束溶液中,加入不同粒度、不同浓度的花生粉,在搅拌器下搅拌并用水浴控制萃取温度,搅拌萃取一定时间后,4000 r/min转速下离心10 min,取上清液,根据1.2.1对前萃液中的蛋白质含量进行测定。

#### 1.2.4 不同条件对花生蛋白萃取率影响规律研究方法

按1.2.3配制的反胶束溶液对花生蛋白进行萃取。搅拌速率为变量时,控制萃取温度为30 °C,[E]/[S]为40000 U/g,固液比为0.015 g/mL,花生粒径为0.45 mm,考察搅拌速率分别为0 r/min、150 r/min、300 r/min;当温度为变量时,控制花生粉加入量为0.015 g/mL,花生粒径为0.45 mm,搅拌速率为70 r/min条件下考察温度在30 °C、35 °C、40 °C、45 °C、50 °C时花生蛋白的萃取率变化情况;用分样筛将全脂花生粉筛分为过20目( $r_0=0.9$  mm)、30目( $r_0=0.6$  mm)、40目( $r_0=0.45$  mm)、50目( $r_0=0.355$  mm)的均匀花生颗粒,考察花生粒径对萃取过程的影响规律,萃取过程中控制温度为30 °C,搅拌速率为70 r/min,[E]/[S]为40000 U/g,固液比为0.015 g/mL;控制萃取温度为30 °C,搅拌速率为70 r/min,全脂花生粉过40目筛,酶与底物浓度比为40000 U/g,分别考察固液比为0.0100 g/mL、0.0125 g/mL、0.0150 g/mL、0.0175 g/mL、0.0200 g/mL时,对不同时刻花生蛋白的萃取率影响;[E]/[S]分别为20000 U/g、30000 U/g、40000 U/g、50000 U/g时,控制萃取温度为30 °C,搅拌速率为70 r/min,全脂花生粉过40目筛,并以不加酶时的反胶束体系作为对照,研究不同[E]/[S]对花生蛋白萃取率的影响规律。

#### 1.2.5 前萃传质过程分析及模型选取

在含酶的AOT/异辛烷反胶束体系萃取全脂花生粉的过程主要包括以下5个步骤:(I)含酶反胶束的外扩散:含酶反胶束从有机相穿过花生颗粒外表面的液体膜,扩散至固体外表面;(II)含酶反胶束的内扩散:反胶束穿过已反应的花生颗粒区域,扩散至固液反应界面;(III)界面反应:反胶束在花生颗粒内部反应界面上增溶花生蛋白;(IV)花生蛋白内扩散:增溶到反胶束体系的花生蛋白穿过已反应固体区域向固体颗粒表面扩散;(V)花生蛋白外扩散:含有花生蛋白的反胶束穿过流体膜由花生颗粒表面向有机相扩散。

此固-液萃取反应过程与有固态产物层生成的浸出反应缩核模型<sup>[11]</sup>类似,参考此模型推导萃取速率方程时,假设:花生颗粒为均匀的球体,密度不变,反

应过程中浓度与扩散系数不变；花生蛋白的萃取速率受控制步决定；蛋白扩散过程为分子扩散，扩散过程可以用 Fick 定律表示；萃取过程是不可逆扩散过程。

一级固-液反应收缩核模型表达式如下：

$$\frac{\delta}{3D_l}x + \frac{r_0}{2D_s}\left[1 - \frac{2}{3}x - (1-x)^{\frac{2}{3}}\right] + \frac{1}{k_r}J\left[1 - (1-x)^{\frac{1}{3}}\right] = \frac{bC_{A0}}{a\rho_B r_0}t \quad (1)$$

式中： $t$ 为反应时间 (min)； $x$ 为花生蛋白的萃取率； $a$ 、 $b$ 为化学计量常数； $\delta$ 为反应区厚度 (cm)； $\rho_B$ 为固体反应物密度 (g/cm<sup>3</sup>)； $r_0$ 为固体粒子半径 (cm)； $C_{A0}$ 为流体本体浓度 (g/cm<sup>3</sup>)； $D_l$ 为液态反应物通过液体边界层的有效扩散系数 (cm<sup>2</sup>/min)； $k_r$ 为界面化学反应速率常数 (cm<sup>2</sup>/s)； $D_s$ 为液态反应物通过固体产物层的有效扩散系数 (cm<sup>2</sup>/min)。

反应过程中对反应速率方程进行简化讨论：

(1) 当总萃取速率由固态物质层的内扩散速率控制时，方程式可简化为：

$$1 + 2(1-x) - 3(1-x)^{\frac{2}{3}} = \frac{6bD_s C_{A0}}{a\rho_B r_0^2}t \quad (2)$$

(2) 当总反应速率受到边界层的外扩散控制时，方程式可简化为：

$$x = \frac{3bD_l C_{A0}}{a\delta\rho_B r_0}t \quad (3)$$

(3) 当总反应速率由界面化学反应控制时，方程可简化为：

$$1 - (1-x)^{\frac{1}{3}} = \frac{bk_r C_{A0}}{a\rho_B r_0}t \quad (4)$$

### 1.2.6 数据分析

本试验采用 Microsoft Excel 软件计算、分析和绘图，萃取花生蛋白的试验均重复三次，计算平均值和标准偏差，图中用误差线体现。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原料成分测定结果

全脂花生粉的主要成分测定结果如表 1。

表 1 全脂花生粉的主要成分及质量分数

Table 1 The main components of whole peanut powder			
样品	水分/%	蛋白质/%	粗脂肪(干基)/%
全脂花生粉	3.41±0.01	27.37±0.20	46.32±0.24

### 2.2 搅拌速率对花生蛋白萃取过程的影响规律研究

搅拌速率对花生蛋白萃取过程的影响规律如图 1 所示，由图可见，随着搅拌时间的增加，花生蛋白的萃取率迅速增加，且在 0~10 min 内蛋白的增溶速度最

快，萃取 10 min 以后，蛋白的萃取率逐渐趋于平衡，这说明含酶反胶束萃取花生蛋白的传质过程主要集中在萃取的前 10 min 内。花生蛋白萃取率迅速增加，一方面是由于搅拌作用可以加速花生蛋白和包裹蛋白质的反胶束在有机溶剂中的扩散，增加反胶束与花生颗粒的接触，增加传质面积，从而提高萃取率；另一方面是搅拌可以产生对流，增强“空胶束”对反应界面层的冲击作用，使蛋白易于进入反胶束内。此外，随着搅拌速率的增加，蛋白的萃取率并无显著差异，说明反胶束萃取花生蛋白固体颗粒传质过程中受外扩散影响较小。

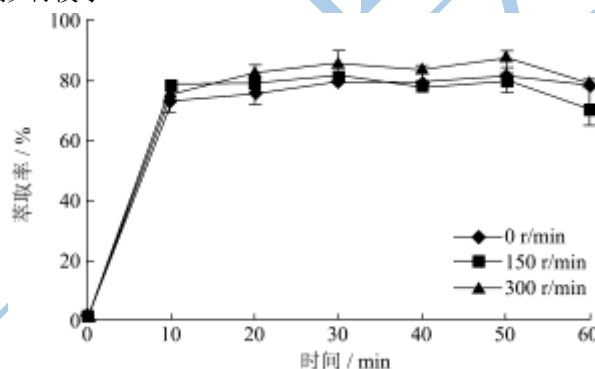


图 1 不同搅拌速率对花生蛋白萃取率的影响

Fig.1 Effect of different stirring rate on extraction yield of peanut protein

### 2.3 萃取温度对花生蛋白萃取过程的影响规律研究

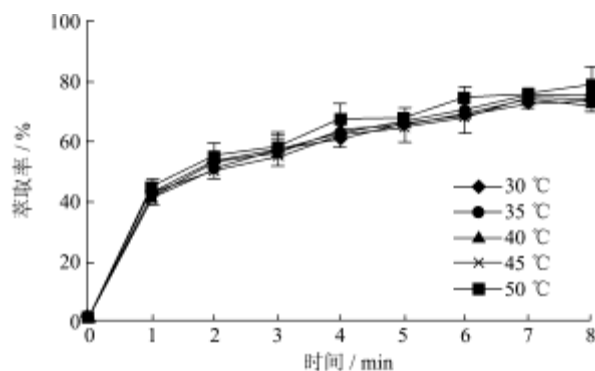


图 2 温度对花生蛋白萃取率的影响

Fig.2 Effect of temperature on the extraction yield of peanut protein

温度对反胶束萃取花生蛋白的传质过程有着重要影响。图 2 表示的为不同温度下花生蛋白萃取率随时间变化的结果，由图可知，在同一萃取时间，温度越高花生蛋白的萃取率越高，主要原因：一是温度对反胶束体系的影响，温度升高可加快内部分子运动速率，使反胶束体系黏度减小，扩散系数增大，花生蛋白更



易进入反胶束内, 提高传质速率; 二是温度对花生蛋白的影响, 高温会使蛋白失去活性, 因此萃取温度不宜过高。

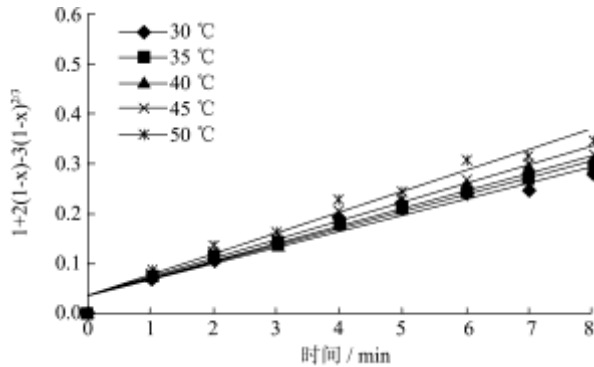


图3 不同温度下  $1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$  与时间  $t$  的关系

Fig.3  $1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$  vs.  $t$  at different temperatures

本文采用尝试法判断传质过程的控制步。将不同温度和时间的蛋白萃取率带入缩核模型的内扩散控制方程  $y=1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$  和界面反应控制方程  $y=1-(1-x)^{1/3}$  中, 得到不同条件下的  $x-t$  的关系图, 结果如图3和图4。由图4可知, 不同温度下界面反应

控制方程处理拟合得到的方程线性不好 ( $R^2 < 0.90$ ) 且截距在 0.1 左右, 直线不过原点, 而经内扩散控制模型处理拟合后得到的结果 (图3) 直线线性较好 ( $R^2 > 0.95$ ), 基本过原点, 因此可以初步判定含酶反胶束萃取花生蛋白过程的控制步为内扩散控制。

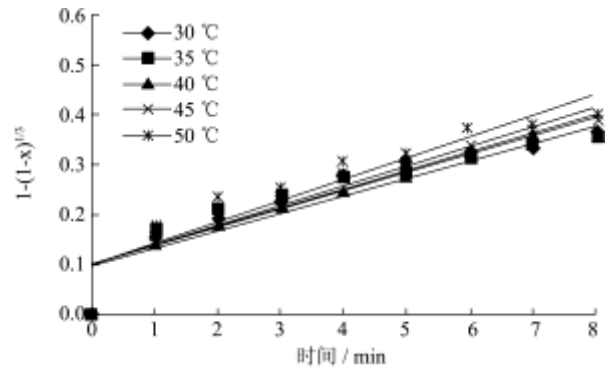


图4 不同温度下  $1-(1-x)^{1/3}$  与时间  $t$  的关系

Fig.4  $1-(1-x)^{1/3}$  vs.  $t$  at different temperatures

表2中的  $K_1$ 、 $K_2$  分别为不同温度下图3、图4中直线对应的斜率, 即不同温度下花生蛋白萃取速率常数。

表2 不同温度时的萃取速率常数

Table 2 Reaction rate constant of different temperatures

控制步骤	T/K	303	308	313	318	323
$1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3} = K_1 t$	$K_1$	0.0328	0.0346	0.0360	0.0377	0.0423
$1-(1-x)^{1/3} = K_2 t$	$K_2$	0.0361	0.0371	0.0381	0.0385	0.0424

根据阿伦尼乌斯方程求解花生蛋白萃取的表现活化能, 公式如下:

$$K = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (5)$$

其中:  $A$  表示频率因子;  $E$  表示反应的活化能,  $\text{kJ/mol}$ ;  $R$  表示气体常数  $8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;  $T$  表示热力学温度,  $\text{K}$ 。

对式5两边求对数得到:

$$\ln K = \ln A - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

对  $\ln K \sim 1/T$  关系作图 (如图5), 内扩散控制模型拟合程度好 ( $R^2 > 0.90$ ), 直线方程为  $y = -1159.5x + 0.3969$ , 因此可计算出其表现活化能是  $9.64 \text{ kJ/mol}$  (内扩散控制的表现活化能一般为  $8 \sim 20 \text{ kJ/mol}$ ); 而界面反应控制模型方程拟合度不高, 经计算其表现活化能为  $6.06 \text{ kJ/mol}$ , 界面反应控制的表现活化能通常为  $42 \sim 420 \text{ kJ/mol}$ , 实际反应与界面反应控制步骤要求不符, 因此含酶反胶束萃取花生蛋白的过程受内扩散控制影响。

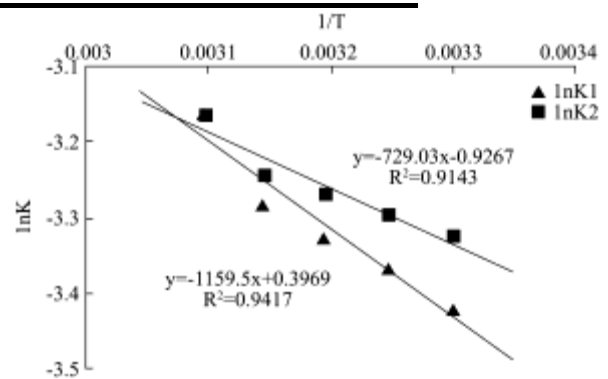


图5  $\ln K$  与  $1/T$  的关系图

Fig.5 Relationship between  $\ln K$  and  $1/T$

## 2.4 花生粒径对萃取过程的影响规律研究

图6为不同粒度和时间下花生蛋白萃取率的结果。随着花生粒径的减小, 蛋白萃取率显著增加, 一方面是由于减小固体颗粒粒径可以增大其与反胶束和有机溶剂接触的比表面积, 使传质速率增大; 另一方面, 减小粒径可以缩短花生蛋白在花生颗粒内部的传

质距离,大大减小了蛋白受到的内扩散阻力,提高传质速率。

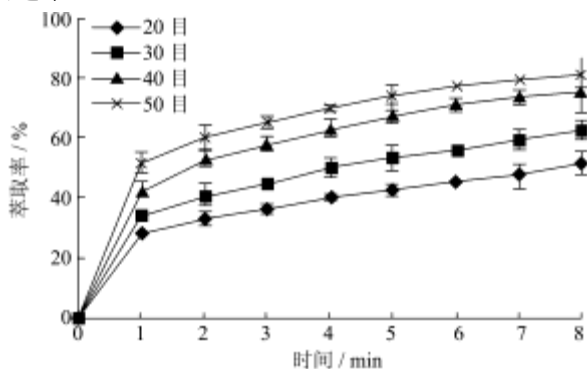


图6 不同粒度对花生蛋白萃取率的影响

Fig.6 Effect of different particle size on the extraction yield of peanut protein

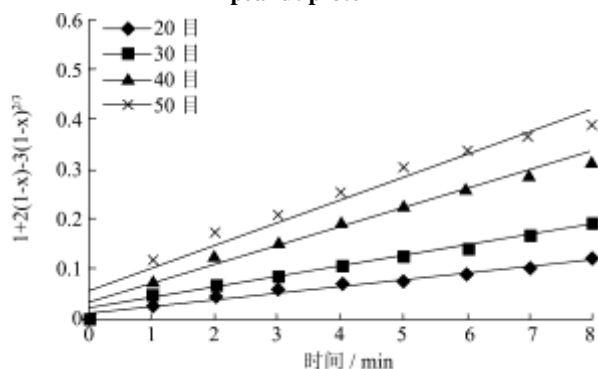


图7 不同粒度下  $1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$  与时间  $t$  的关系

Fig.7  $1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$  vs.  $t$  at different particle size

表3 不同粒径下的萃取速率常数

Table 3 Reaction rate constant of different particle size

$r_0/\text{mm}$	0.9000	0.6000	0.4500	0.3550
K	0.0130	0.0218	0.0378	0.0451

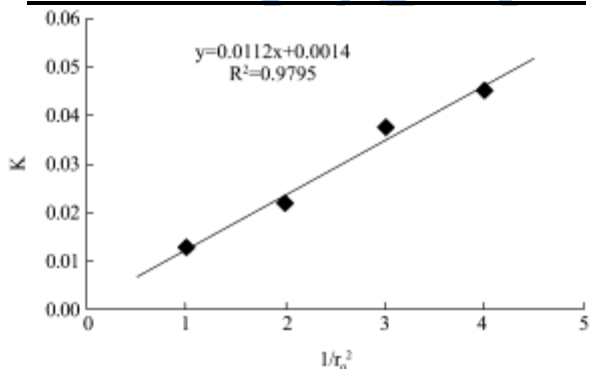


图8 不同粒径下速率常数  $K$  与  $1/r_0^2$  的关系

Fig.8 Relationship between  $K$  and  $1/r_0^2$  at different particle size

将不同粒度花生蛋白的萃取率带入内扩散控制方程  $y=1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$ , 得到其与时间  $t$  的关系图(如图7), 直线拟合度高, 线性较好 ( $R^2 > 0.95$ ), 且基本过原点, 符合内扩散控制模型。表3为不同粒径时对应直线的斜率  $K$  (即萃取速率常数)。图8表明萃取速

率常数  $K$  与  $1/r_0^2$  呈正比, 符合内扩散控制模型。

## 2.5 固液比对萃取过程的影响规律研究

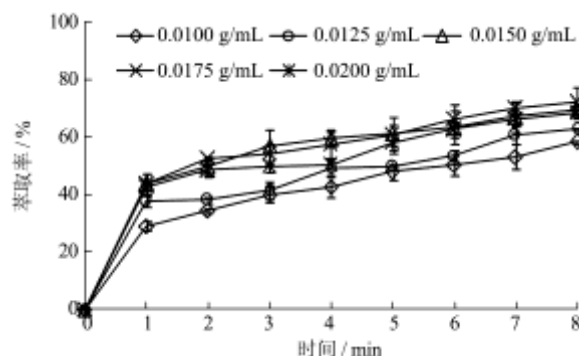


图9 固液比对花生蛋白萃取率的影响

Fig.9 Effect of solid/liquid ratio on the extraction yield of peanut protein

图9为改变固液比时对花生蛋白萃取率的影响规律。由图可知, 固液比越大, 萃取率越高, 这是因为有机相中有效组分浓度增加, 提高萃取率。但继续增加花生粉的添加量(0.0200 g/mL), 会造成蛋白在进入反胶束“水池”时产生竞争, 增加空间位阻, 降低萃取率。因此传质试验研究中固液比范围选择0.0100~0.0175 g/mL。由结果可知, 固液比为0.0175 g/mL时萃取率最佳。

表4 不同固液比下的萃取速率常数

Table 4 Reaction rate constant of different solid-liquid ratio

$M/(\text{g/mL})$	0.0100	0.0125	0.0150	0.0175
K	0.0181	0.0217	0.0274	0.0310

表4中列出不同固液比时的萃取速率常数, 假设固液比对花生蛋白萃取过程速率的影响可表示为:

$$K = kM^n \quad (7)$$

其中,  $M$  代表固液比 (g/mL);  $n$  为表观反应级数。上式两边取对数可得:

$$\ln K = \ln k + n \ln M \quad (8)$$

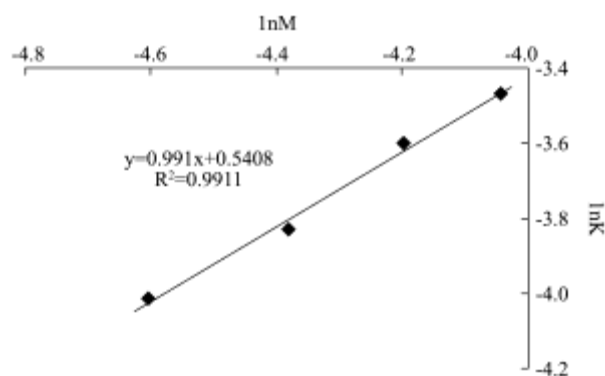


图10 不同固液比下  $\ln K \sim \ln M$  的关系

Fig.10 Relationship between  $\ln K$  and  $\ln M$  at different solid-liquid ratios

图 10 为 lnK 与 lnM 的关系图, 其中拟合直线斜率为 0.991, 即该萃取过程可视为一级反应。

### 2.6 酶与底物浓度比对萃取过程的影响规律

研究

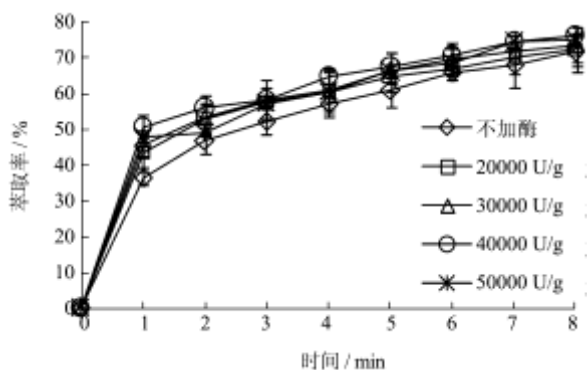


图 11 [E]/[S]对花生蛋白萃取率的影响

Fig.11 Effect of [E]/[S] on the extraction yield of peanut protein

表 5 酶与底物浓度比 ([E]/[S]) 不同时的萃取速率常数

Table 5 Reaction rate constant of different ratios of enzyme and substrate

[E]/[S]/(U/g)	20000	30000	40000	50000
K	0.0321	0.0338	0.0365	0.0367

不同酶与底物浓度比对萃取过程的影响规律如图 11, 以不加酶时的花生萃取率为对照, 结果显示, 当酶与底物浓度再 40000 U/g 时花生蛋白的萃取率相对较高。碱性蛋白酶对花生蛋白有分解能力, 可将其水解成分子量相对较小的蛋白质或多肽, 花生蛋白在进入“水池”时减小了空间位阻, 更易被萃取, 因此提

表 6 花生蛋白萃取率的试验值与计算值

Table 6 The experimental value and calculated value of peanut protein extraction

时间 /min	28 °C			31 °C			38 °C			41 °C		
	试验值 /%	计算值 /%	相对误差 /%	试验值 /%	计算值 /%	相对误差 /%	试验值 /%	计算值 /%	相对误差 /%	试验值 /%	计算值 /%	相对误差 /%
1	30.27	28.70	5.48	31.56	29.19	8.13	32.19	30.37	6.00	31.68	30.87	2.64
2	35.87	39.29	8.71	39.99	39.96	0.07	42.23	41.51	1.73	43.11	42.17	2.23
3	44.28	46.93	5.65	49.82	47.70	4.45	53.80	49.48	8.73	53.65	50.23	6.81
4	56.09	53.01	5.80	55.55	53.86	3.15	58.08	55.80	4.09	59.93	56.62	5.85
5	58.19	58.10	0.15	60.08	59.00	1.82	67.05	61.06	9.80	67.11	61.93	8.37
6	67.67	62.49	8.30	68.26	63.42	7.62	70.50	65.57	7.53	71.37	66.47	7.37
7	70.68	66.33	6.55	70.76	67.30	5.14	72.78	69.50	4.72	75.20	70.42	6.78
8	72.70	69.75	4.23	72.50	70.73	2.50	78.28	72.97	7.28	80.31	73.91	8.66

### 3 结论

本文研究了含有碱性蛋白酶的 AOT/异辛烷反胶束体系萃取花生蛋白的传质过程, 通过改变搅拌速率、

高了花生蛋白萃取率。再增加酶的浓度时, 酶与底物的结合趋于饱和, 也会与蛋白产生竞争作用, 因此酶与底物浓度比过大对萃取率的提高并无显著作用。同上述 2.5, 表 5 和图 11 表示酶与底物浓度比不同时对萃取过程的影响, 其中得出表观反应级数为 0.159。

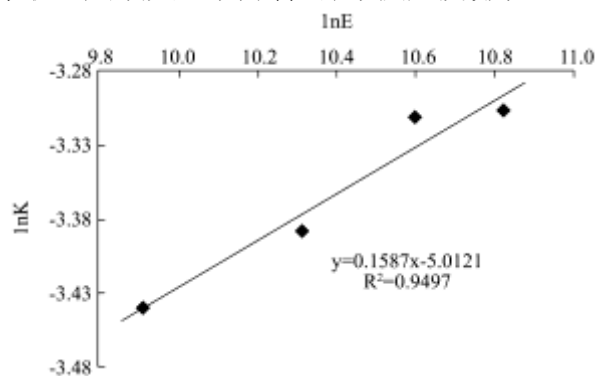


图 12 不同[E]/[S]时 lnK~lnE 的关系

Fig.12 Relationship between lnK and lnM at different [E]/[S]

### 2.7 建立传质模型及验证

经过以上试验及计算, 得出表观活化能为 9.64 kJ/mol, 说明含酶反胶束萃取花生蛋白的过程符合内扩散控制。因此, 此过程宏观传质模型可表示为:

$$1 + 2(1-x) - 3(1-x)^2 = 1.49 \cdot \exp\left(-\frac{1159.5}{T}\right) \cdot t \quad (9)$$

在 28 °C、31 °C、38 °C、41 °C 下萃取花生蛋白, 对上式进行验证, 结果如表 6, 由表可知, 试验值与计算值较为吻合, 相对误差不超过 10%, 因此该模型能较好的模拟含酶反胶束萃取花生蛋白的过程。

萃取温度、全脂花生粉添加量、酶与底物浓度比等条件, 考察其对萃取过程的影响。结果表明, 升高萃取温度有利于加速传质过程, 经计算得出含酶反胶束萃取花生蛋白过程的表观活化能为 9.64 kJ/mol, 确定萃

取过程控制步骤为花生蛋白从颗粒内部扩散至颗粒表面的内扩散控制;花生颗粒粒径越小,萃取速度越快,相同时间下萃取的花生蛋白也越多,且萃取过程的速率常数与粒径的平方成反比,符合内扩散控制模型;改变固液比和[E]/[S]对萃取速率进行研究,得到表观反应级数分别为 0.991、0.159;综合上述计算,建立含酶反胶束萃取花生蛋白的宏观传质模型,通过验证,该模型能较好的反映含酶反胶束传质过程,宏观模型为:

$$1 + 2(1 - x) - 3(1 - x)^{\frac{2}{3}} = 1.49 \cdot \exp\left(-\frac{1159.5}{T}\right) \cdot t$$

#### 参考文献

- [1] Chen X Y, Ru Y, Chen F L, et al. FTIR spectroscopic characterization of soy proteins obtained through AOT reverse micelles [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(2): 435-437
- [2] 孙秀平.反胶束制备低温花生粕中蛋白的工艺与功能特性研究[D].福州:福建农林大学,2012  
SUN Xiu-ping. Extraction and functional properties of protein from low-temperature peanut meal by reverse micelles [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012
- [3] Zhu K X, Sun X H, Chen Z C, et al. Comparison of functional properties and secondary structures of defatted wheat germ proteins separated by reverse micelles and alkaline extraction and isoelectric precipitation [J]. Food Chemistry, 2010, 123(4): 1163-1169
- [4] 李飞,朱科学,周惠明,等.反胶束法同时提取玉米胚芽中蛋白质和油脂的前萃工艺研究 [J]. 中国油脂, 2009, 34(11): 27-30  
LI Fei, ZHU Ke-xue, ZHOU Hui-ming, et al. Simultaneous extraction of maize germ oil and protein by reverse micelles study on the process of forward extraction [J]. China Oils and Fats, 2009, 34(11): 27-30
- [5] 陆强,李宽宏.反胶束液-液萃取牛血清白蛋白的动力学研究:I. 萃取过程[J].华东理工大学学报:自然科学版,1996, 20(6): 723-729  
LU Qiang, LI Kuan-hong. Kinetics of the solubilization using reversed micelles I. extraction of protein [J]. Journal of East China University of Science and Technology Natural Science Edition, 1996, 20(6): 723-729
- [6] Mohd-Setapar S H, Mat H, Mohamad-Aziz S N. Kinetic study of antibiotic by reverse micelle extraction technique [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2012, 43(5): 685-695
- [7] Badenes S M, Lemos F, Cabral J M. Kinetics and mechanism of the cutinase-catalyzed transesterification of oils in AOT reversed micellar system [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2011, 34(9): 1133-1142
- [8] Zhi X, Yang H, Yuan Z, et al. Kinetic analysis of hydrogen production using anaerobic bacteria in reverse micelles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 2926-2930
- [9] Dövyap Z, Bayraktar E, Mehmetoğlu Ü. Amino acid extraction and mass transfer rate in the reverse micelle system [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 38(3): 557-562
- [10] 赵俊廷, 琚瑶, 陈复生, 等.反胶束萃取文冠果种仁蛋白的前萃动力学研究[J].中国油脂, 2012, 37(9): 36-39  
ZHAO Jun-ting, JU Yao, CHEN Fu-sheng, et al. Kinetics of forward extraction of protein from *Xanthoceras sorbifolia* bunge kernel by reverse micelles [J]. China Oils and Fats, 2012, 37(9): 36-39
- [11] 华一新.冶金过程动力学导论[M].冶金工业出版社:2004  
HUA Yi-xin. Kinetics of metallurgical process [M]. Metallurgical Industry Press: 2004