

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.031

# 蛋清肽酶解工艺及血管紧张素转化酶抑制活性研究\*

刘静波 于志鹏 赵文竹 林松毅

(吉林大学军需科技学院, 长春 130062)

**【摘要】** 采用酶法制备蛋清肽, 色谱纯化 ACE 抑制活性组分并鉴定其一级结构。通过考察底物质量分数、加酶量、酶解温度和 pH 值对水解度的影响, 结合多元线性回归设计和二次回归正交组合设计建立蛋清 ACE 抑制肽酶解工艺模型, 并经液相色谱串联质谱鉴定其一级结构。结果表明: 最佳酶解工艺为底物质量分数 8%、pH 值 10.73、加酶量 12.14% 及酶解温度 56.80℃, 酶解物纯化后半抑制质量浓度为 0.18 mg/mL。液相色谱串联质谱鉴定高活性组分中 3 种活性肽一级结构, 氨基酸序列分别为 Arg-Val-Pro-Ser-Leu-Met、Thr-Pro-Ser-Pro-Arg 和 Asp-Leu-Gln-Gly-Lys。

**关键词:** 蛋清 ACE 抑制肽 酶解 优化 纯化 鉴定

**中图分类号:** TS201.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0147-06

## Enzymatic Hydrolysis Technology for ACE-inhibitory Peptides from Egg White

Liu Jingbo Yu Zhipeng Zhao Wenzhu Lin Songyi

(College of Quartermaster Technology, Jilin University, Changchun 130062, China)

### Abstract

Antihypertensive peptides were derived from egg white, and then were purified and their primary structure was identified. Egg white hydrolysis process model was established by examining the substrate concentration, E/S, hydrolysis temperature and pH value on the impact of the hydrolysis degree, combined with multivariate linear regression combination of design and quadratic regression orthogonal design. Hydrolysates were purified by gel chromatography, and were characterized by liquid chromatography tandem mass spectrometry. The results showed that the optimal enzymatic hydrolysis process was the substrate concentration of 8%, pH value of 10.73, E/S of 12.14% and temperature of 56.80℃. Hydrolysates were purified by sephadex G-25, the 50% inhibitory concentration as 0.18 mg/mL. Liquid chromatography-quadrupole-linear ion trap tandem mass spectrometry confirmed the structure of the active peptides in the component, the amino acid sequences were Arg-Val-Pro-Ser-Leu-Met, Thr-Pro-Ser-Pro-Arg, and Asp-Leu-Gln-Gly-Lys, respectively.

**Key words** Egg white protein, ACE-inhibitory peptides, Enzymatic hydrolysis, Optimization, Purification, Characterization

### 引言

血管紧张素转化酶 (angiotensin converting enzyme, 简称 ACE) 在生物体内对血压的调节起关键作用。目前普遍认为 ACE 主要通过以下两种途径: ACE 可催化不具有活性的血管紧张素 I 转化为

具有强烈收缩血管作用的血管紧张素 II; ACE 能降解具有舒张血管作用的舒缓激肽并导致其失活<sup>[1]</sup>。因此通过抑制 ACE 活性可达到治疗高血压的目的。自 1965 年 Ferreira<sup>[2]</sup>首次在南美茅头蝮蛇毒液中发现 ACE 抑制肽后, 不断有新的 ACE 抑制肽从天然食物蛋白资源中提取分离出来。蛋清中含有丰富的

收稿日期: 2009-12-02 修回日期: 2010-02-25

\* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA10Z329)

作者简介: 刘静波, 教授, 博士, 主要从事营养与功能性食品研究, E-mail: ljb168@sohu.com

蛋白质资源,且蛋白模式与人体的蛋白模式相似,可以被人体全面吸收。蛋清氨基酸组成比较丰富且疏水性氨基酸、脯氨酸和精氨酸等含量较高,这些氨基酸有利于得到含量较高的降血压物质。目前临床应用的 ACE 抑制药存在副作用,人们将目光转向了源于食品的 ACE 抑制肽研究<sup>[3-5]</sup>。

蛋白质分子大小、组成及结构等方面的多样性、复杂性以及酶解过程的偶然性不可避免地导致了蛋白质酶解液的成分复杂<sup>[6]</sup>。从混合物中纯化出具有较高 ACE 抑制活性的活性肽并进行结构鉴定,是研究具有生物活性和生理功能的目标产物的基础。

本文以蛋清蛋白质为原料,用碱性蛋白酶 Alcalase 酶解制备蛋清 ACE 抑制肽,在前期利用响应面直观分析<sup>[7]</sup>的基础上,采用多元线性回归设计和二次回归正交设计建立制备 ACE 抑制肽的模型,并利用西尔维斯特不等式从数学角度推导出回归模型最优解。同时采用 Sephadex G-25 对酶解制备的多肽进行初步分离,将不同分离组分的多肽进行收集冷冻干燥,并进行结构测定。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

蛋清蛋白粉,北京金健力公司生产;血管紧张素转化酶(ACE)、卡托普利、马尿酸组氨酰亮氨酸、马尿酸,美国 Sigma 公司;Sephadex G-25,北京凌峰源生物科技有限公司;Alcalase 碱性蛋白酶,诺维信公司;乙腈和三氟乙酸(色谱纯),天津市博迪化工有限公司。

### 1.2 试 验 方 法

#### 1.2.1 酶解蛋白质水解度(DH)的测定

水解度测定采用 pH-stat 法<sup>[8]</sup>。

#### 1.2.2 ACE 抑制活性的测定

采用高效液相色谱法,在文献[9]基础上进行改进,取 30  $\mu\text{L}$  马尿酸组氨酰亮氨酸(HHL)底物液,加入 10  $\mu\text{L}$  抑制剂混合均匀,在 37 $^{\circ}\text{C}$  恒温水浴中预热 3~5 min,然后加入 20  $\mu\text{L}$  ACE 液充分混合,37 $^{\circ}\text{C}$  保温 30 min 后,再加入 60 L 的 1 mol/L HCl 终止反应,得到反应液。同时用 10  $\mu\text{L}$  pH 值为 8.3 的硼酸缓冲液替代抑制剂溶液作为空白对照组。该反应液直接用 HPLC 系统进行分析。色谱条件:柱温 25 $^{\circ}\text{C}$ ,流速 0.5 mL/min,流动相乙腈/水(0.05% TFA)比例为 25:75 等度洗脱,检测波长 228 nm。ACE 抑制活性计算公式为

$$I = \frac{M - N}{M} \times 100\%$$

式中  $M$ ——空白对照组中马尿酸的峰面积

$N$ ——添加抑制剂组中马尿酸的峰面积

#### 1.2.3 蛋清 ACE 抑制肽的酶解工艺流程

蛋清蛋白质配成一定质量分数的水溶液 600 g,置于恒温水浴锅中 90 $^{\circ}\text{C}$  热变性 10 min。冷却至酶解温度,用 0.5 mol/L 氢氧化钠溶液调 pH 值至酶解条件,加入一定量 Alcalase 蛋白酶水解,水解过程中不断搅拌,并不断加入适当浓度的氢氧化钠溶液以维持 pH 值在规定的范围内(误差  $\pm 0.05$ ),水解完成后经 80 $^{\circ}\text{C}$  灭酶 10 min,离心(9 000 g) 10 min,喷雾干燥,保存备用。

#### 1.2.4 因素考察及酶解工艺模型建立

蛋清蛋白质酶解过程中,底物质量分数、加酶量、酶解温度和 pH 值等因素对酶解均有一定的影响,本试验依次考察各因素对酶解效果的作用。在研究单因素对酶解效果的影响基础上,采用多元线性回归正交设计对酶解模型进行初步研究,在其基础上进行三元二次回归正交组合设计,最终确立二次回归模型。多元线性回归正交因素编码见表 1,三元二次回归正交设计因素编码见表 2。

表 1 多元线性回归正交因素编码

Tab. 1 Experimental factors coding table

$Z$	pH 值 $Z_1$	酶解温度 $Z_2/^{\circ}\text{C}$	加酶量 $Z_3/\%$	底物质量 分数 $Z_4/\%$
$Z_{1j}$	9	50	1	4
$Z_{2j}$	11	60	7	10
$Z_{0j}$	10	55	4	7
$\Delta_j$	1	5	3	3
$X_j = (Z_j - Z_{0j})/\Delta_j$	$X_1 = (Z_1 - 10)/1$	$X_2 = (Z_2 - 55)/5$	$X_3 = (Z_3 - 4)/3$	$X_4 = (Z_4 - 7)/3$

表 2 三元二次回归正交组合设计因素编码

Tab. 2 Experimental factors coding table

编码	pH 值 $x_1$	酶解温度 $x_2/^{\circ}\text{C}$	加酶量 $x_3/\%$
1.35	12.0	55.0	7.0
1	11.5	53.0	6.2
0	10.0	47.5	4.0
-1	8.5	42.0	1.8
-1.35	8.0	40.0	1.0

#### 1.2.5 蛋清 ACE 抑制肽纯化及结构鉴定

蛋清 ACE 抑制肽经交联葡聚糖凝胶 Sephadex G-25 初步分离,在流速 20 mL/h,进样质量分数为 20%,进样体积为 2 mL 条件下,去离子水洗脱。蛋清肽纯化后的高活性组分经液相色谱四极杆线性离子阱串联质谱测定其结构<sup>[10]</sup>。液相色谱流动相为

70% 乙腈水溶液(A)和含 0.1% 甲酸水(B),线性梯度洗脱 A :10% ~ 100% (0 ~ 10 min),检测波长 220 nm。质谱扫描模式采用 EMS/ER/EPI/EPI,扫描范围为  $m/z$  275 ~ 1 000。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

#### 2.1.1 酶解温度

将热处理后蛋清蛋白质溶液调至 pH 值 10,在底物质量分数 6%、加酶量 6% 条件下,分别在 40、45、50、55 和 60℃ 酶解 2 h。水解效果见图 1。可以看出温度在 40 ~ 55℃ 升高过程中,水解度逐渐升高。当酶解温度保持在 60℃ 时,明显低于 55℃ 条件下水解度,可以得出 55℃ 酶解效果较好。

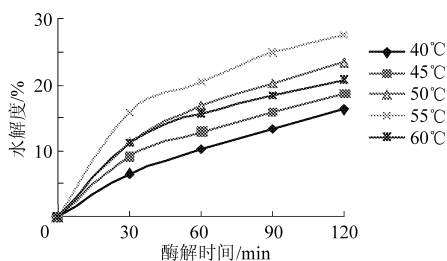


图 1 酶解温度对水解效果的影响

Fig. 1 Influence of temperature on the degree of hydrolysis

#### 2.1.2 加酶量

各种蛋白酶的合适用量随水解蛋白底物性质的变化而改变,酶的用量大一些对于水解反应本身没有不良效果,从经济角度讲其成本过高,因此应当根据底物的情况确定其合适用量。将热处理后蛋清蛋白质溶液调整至 pH 值 10,底物质量分数 6%,酶解温度 55℃,考察加酶量分别为 2%、4%、6%、8%、10% 条件下酶解 2 h 的水解效果,结果见图 2。可知随着加酶量的增加,水解度随之升高,但加酶量 6%、8% 和 10% 的水解度相差不大,从经济角度考虑确定加酶量 6%。

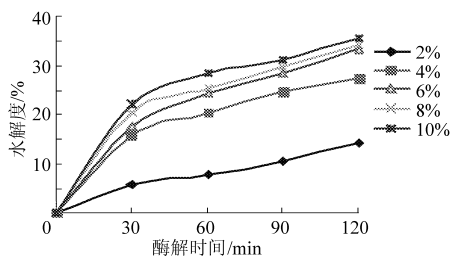


图 2 加酶量对水解效果的影响

Fig. 2 Influence of enzyme addition on the degree of hydrolysis

#### 2.1.3 pH 值

蛋白酶对于不同的酶解底物其最适 pH 值不同,可能由于不同底物的空间构型影响了蛋白酶的

活性。将热处理后蛋清蛋白质溶液调整至底物质量分数 6%、加酶量 6% 和酶解温度 55℃,考察 pH 值 8、9、10、11 和 12 条件下酶解 2 h 的水解效果,见图 3。可知 pH 值 10 条件下的水解度最高,表明在此条件下蛋白酶活性较高。

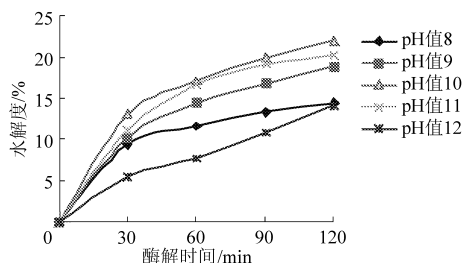


图 3 pH 值对水解效果的影响

Fig. 3 Influence of pH value on the degree of hydrolysis

#### 2.1.4 底物质量分数

蛋白酶均匀分散于整个蛋清蛋白质水体系,与底物接触并对其发生作用,且水也作为一种反应物参与酶解反应。此外,酶解过程中产生的小分子物质也可在水溶液中迅速扩散,防止局部产物浓度过高而抑制酶解反应的进行。在酶解温度 55℃、加酶量 6%、pH 值 10 条件下,考察底物质量分数为 2%、4%、6%、8% 和 10%,水解 2 h 的水解效果,试验结果如图 4 所示。底物质量分数在 4% ~ 8% 范围内,酶解 2 h 后水解度基本相同,而当底物质量分数增加至 10% 时,水解度有所下降,因此试验中选择底物质量分数 8%。

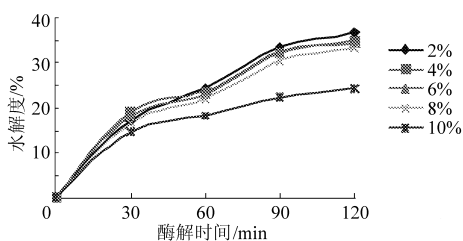


图 4 底物质量分数对水解效果的影响

Fig. 4 Influence of substrate on the degree of hydrolysis

## 2.2 酶解回归模型的建立

对多元线性回归正交设计结果进行了回归系数的显著性检验、回归方程检验和失拟检验:  $F_j = (S_j/f_j)/(S_R/f_R) = 3.34 > F_{0.25}(5, 5) = 1.89$ , 这表明回归方程的置信度仅为 75%。并且由于  $F_{Lr} = (S_{Lr}/f_{Lr})/(S_e/f_e) = 19.62 > F_{0.25}(3, 2) = 3.15$ , 显然该方程是失拟的。由此还需要考虑因素的非线性效应,需要进行二次回归设计,鉴于底物质量分数在 6% ~ 8% 范围内对水解度影响不显著,为减少试验量并降低生产成本,在确定底物质量分数为 8% 条件下进行三元二次回归正交设计,结果见表 3。在前期试验基础上进行三元二次回归正交组合设计,考察因

素的二次项对试验指标的影响程度。根据相关系数得到回归方程为

$$y = 25.9 + 0.25X_1 + 3.94X_2 + 5.46X_3 - 2.31X_1^2 - 1.21X_2^2 - 0.67X_3^2 + 1.13X_1X_2$$

$F_j = (S_j/f_j)/(S_R/f_R) = 18.493 > F_{0.01}(5, 11) = 5.32$ , 这表明回归方程的置信度为 99%。并且  $F_{Lif} = (S_{Lif}/f_{Lif})/(S_e/f_e) = 1.667 < F_{0.25}(9, 2) = 3.37$ 。统计检验结果表明, 方程的显著水平为 0.01, 且拟合较好。再根据西尔维斯特不等式判别方程的极值<sup>[11]</sup>。设在稳点  $X_0 = (X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0p})$  处, 计算  $y$  对  $X_j (j = 1, 2, \dots, p)$  的二阶偏导数, 并且定义行列式  $d_j$ , 并对 3 个变量依次计算 3 个行列式, 即

$$d_1 = \frac{\partial^2 y}{\partial^2 X_1} = -4.62 < 0$$

$$d_2 = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 y}{\partial^2 X_1} & \frac{\partial^2 y}{\partial X_1 \partial X_2} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial X_2 \partial X_1} & \frac{\partial^2 y}{\partial^2 X_2} \end{vmatrix} = 9.90 > 0$$

$$d_3 = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 y}{\partial^2 X_1} & \frac{\partial^2 y}{\partial X_1 \partial X_2} & \frac{\partial^2 y}{\partial X_1 \partial X_3} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial X_2 \partial X_1} & \frac{\partial^2 y}{\partial^2 X_2} & \frac{\partial^2 y}{\partial X_2 \partial X_3} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial X_3 \partial X_1} & \frac{\partial^2 y}{\partial X_3 \partial X_2} & \frac{\partial^2 y}{\partial^2 X_3} \end{vmatrix} = -13.27 < 0$$

由于  $d_1 < 0, d_2 > 0, d_3 < 0$ , 根据西尔维斯特不等式判别方程可以得出方程有极大值, 利用求驻点方法求得当水解度取得极值时,  $X_1 = 0.51, X_2 = 1.86, X_3 = 4.07$ 。通过回归系数检验、回归方程检验和失拟检验, 可以认为该方程为最优回归方程。将中心化处理公式和因素编码代入方程中, 通过计算当水解度取得极大值时对应各因素水平值分别为  $Z_1 = 10.73, Z_2 = 56.80$  和  $Z_3 = 12.14$ 。即底物质量分数为 8%, 酶解 pH 值 10.73, 加酶量 12.14% 和酶解温度 56.80℃。在此条件下分别测定反应 1、2、3 和 4 h 酶解产物的 ACE 抑制活性(图 5), 其中 3 h 酶解产物活性最高。

表 3 三元二次回归正交组合试验结果

Tab. 3 Results of quadratic regression orthogonal combination designed

试验序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	水解度 $y/\%$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	35
2	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	25
3	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	24
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	16
5	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	31
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	21
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	26
8	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	15
9	1.35	0	0	0	0	0	1.83	0	0	24
10	-1.35	0	0	0	0	0	1.83	0	0	27
11	0	-1.35	0	0	0	0	0	1.83	0	22
12	0	1.35	0	0	0	0	0	1.83	0	33
13	0	0	-1.35	0	0	0	0	0	1.83	19
14	0	0	1.35	0	0	0	0	0	1.83	38
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28
$D_j$	11.66	11.65	11.54	8.00	8.00	8.00	6.70	6.70	6.70	
$B_j$	2.94	45.95	63.00	9.00	-3.00	1.00	-15.49	-8.14	-4.48	
$b_j$	0.25	3.94	5.46	1.13	-0.38	0.13	-2.31	-1.21	-0.67	
$S_j$	0.74	181.18	343.90	10.13	1.13	0.13	35.82	9.87	2.99	
$F_j$	0.19	45.30	85.90	2.53	0.28	0.031	8.95	2.47	0.75	
$\alpha_j$		0.05	0.05				0.10			

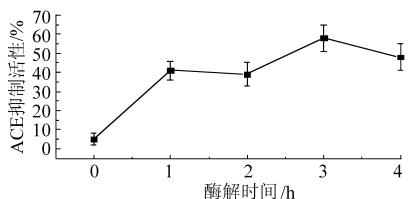


图 5 酶解时间对 ACE 抑制活性的影响

Fig. 5 Influence of enzymatic treatment time on the ACE activity

### 2.3 ACE 抑制肽的分离及结构鉴定

蛋清 ACE 抑制肽经色谱分离得到 8 个组分, 不断富集各组分后冷冻干燥, 高效液相色谱测定血管紧张素转化酶活性, 其中活性最高组分的半抑制质量浓度为 0.18 mg/mL。蛋清肽纯化后高活性组分经液相色谱分离和四极杆线性离子阱串联质谱, 共确证 19 个分子离子峰, 并对分子离子进行二级质谱。本文对其中的 3 个分子离子峰进行研究, 离子峰分别为 702.4043、557.3484 和 560.6570。经 ER 确定均为单电荷离子, 并通过数据分析软件 protein pilot 3.0 和蛋白质搜库 (ExPASy) 确定其一级结构为 Arg-Val-Pro-Ser-Leu-Met (图 6)、Thr-Pro-Ser-Pro-Arg (图 7) 和 Asp-Leu-Gln-Gly-Lys (图 8)。经软件解析, Arg-Val-Pro-Ser-Leu-Met 的测定分子量为 701.3970 Da,

二级质谱中包含除 b1 以外的全部 b 系列和 y 系列离子。Thr-Pro-Ser-Pro-Arg 和 Asp-Leu-Gln-Gly-Lys 的测定分子量分别为 556.3411 和 559.6497 Da, 且二级质谱中包含全部的 b 系列和 y 系列离子。Arg-Val-Pro-Ser-Leu-Met、Thr-Pro-Ser-Pro-Arg 和 Asp-Leu-Gln-Gly-Lys 的测定分子量与理论分子量的误差分别为 0.0076、0.0442 和 0.3531 Da。

Yuka K<sup>[12]</sup> 研究表明一些三肽的 ACE 抑制活性较强, 结构为亮氨酸/异亮氨酸 + 带正电荷氨基酸 + 芳香族氨基酸三肽对血管紧张素转化酶抑制活性较强。IKW、LKW 的 IC<sub>50</sub> 分别为 1.5 和 1.7 μmol/L。Cheung<sup>[13]</sup> 等提出构成 ACE 抑制肽的氨基酸残基氮端为支链氨基酸, 如缬氨酸、异亮氨酸具有高的活性, 并且碳端氨基酸残基为色氨酸、酪氨酸、脯氨酸、苯丙氨酸时有助于 ACE 抑制活性。随着 ACE 抑制肽研究的逐渐深入和越来越多 ACE 抑制肽结构被阐明, 这些作用模型已不能解释目前所出现的 ACE 抑制肽的抑制机理和预测 ACE 抑制活性。因此, Arg-Val-Pro-Ser-Leu-Met、Thr-Pro-Ser-Pro-Arg 和 Asp-Leu-Gln-Gly-Lys 的 ACE 抑制活性有待进一步研究。

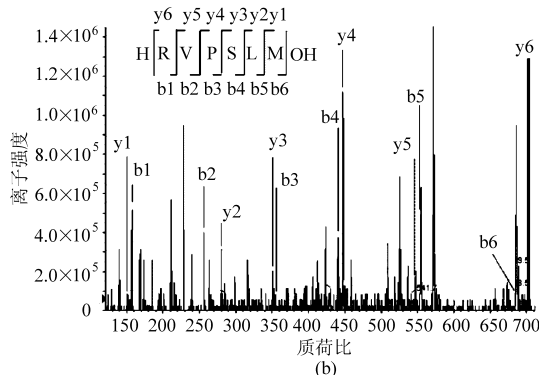
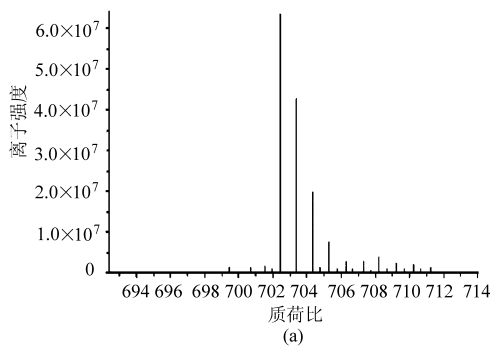


图 6 Arg-Val-Pro-Ser-Leu-Met 质谱图

Fig. 6 Mass spectrometry of Arg-Val-Pro-Ser-Leu-Met

(a) 一级质谱图 (b) 二级质谱图

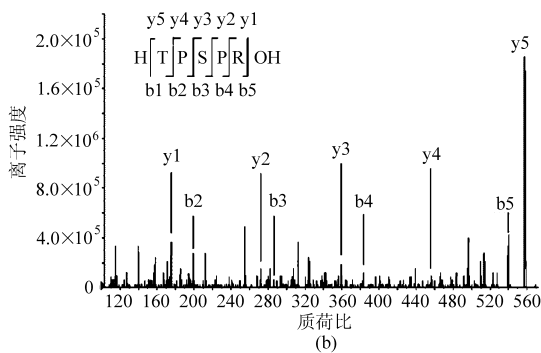
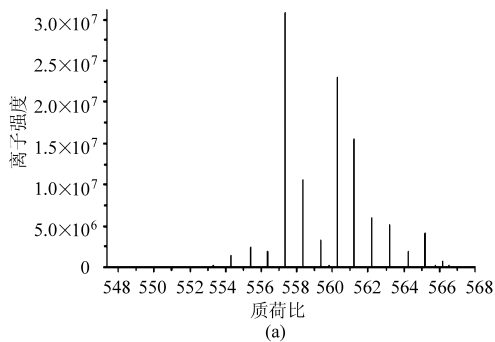


图 7 Thr-Pro-Ser-Pro-Arg 质谱图

Fig. 7 Mass spectrometry of Thr-Pro-Ser-Pro-Arg

(a) 一级质谱图 (b) 二级质谱图

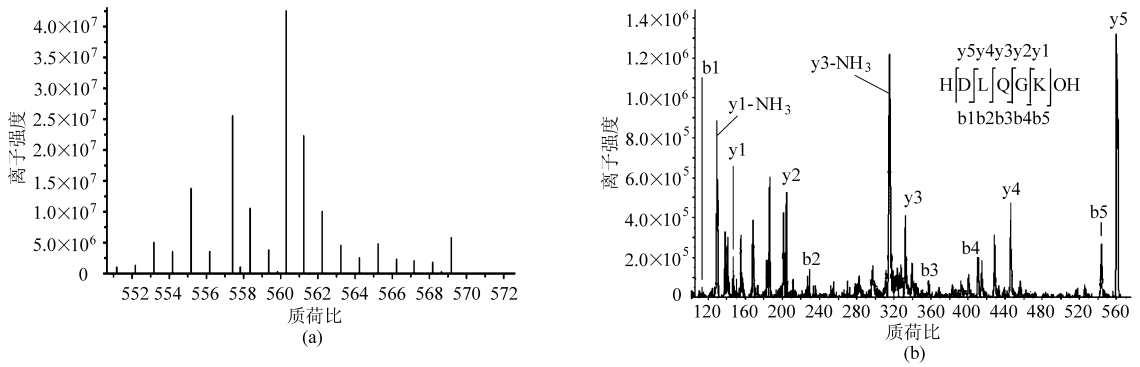


图8 Asp-Leu-Gln-Gly-Lys 质谱图

Fig. 8 Mass spectrometry of Asp-Leu-Gln-Gly-Lys

(a) 一级质谱图 (b) 二级质谱图

### 3 结束语

以蛋清蛋白质为原料,选用 Alcalase 酶进行酶解,建立酶解工艺模型: $y = 25.9 + 0.25X_1 + 3.94X_2 + 5.46X_3 - 2.31X_1^2 - 1.21X_2^2 - 0.67X_3^2 + 1.13X_1X_2$ 。通过回归系数检验、回归方程检验和失拟检验,可以认为该方程为最优回归方程,并且由西尔维斯特不等式得出该方程存在极大值点,求得极

值点并将其转化为自然空间,得到在底物质量分数 8%、酶解 pH 值 10.73、加酶量 12.14% 和酶解温度  $56.80^\circ\text{C}$  条件下,酶解 2 h 所得的蛋清蛋白质水解度为 40%。酶解物经交联葡聚糖 Sephadex G-25 分离得到高活性组分的半抑制质量浓度为 0.18 mg/mL,并利用蛋白质组技术鉴定其中所含的肽段氨基酸序列为 Arg-Val-Pro-Ser-Leu-Met、Thr-Pro-Ser-Pro-Arg 和 Asp-Leu-Gln-Gly-Lys。

### 参 考 文 献

- 管晓,刘静,王立,等. 高活性燕麦蛋白源 ACE 抑制肽的制备、纯化及结构鉴定[J]. 高等学校化学学报,2009,30(10): 1992~1997.  
Guan Xiao, Liu Jing, Wang Li, et al. Preparation, purification and structure identification of angiotensin converting enzyme inhibitory peptide with high activity from oat protein[J]. Chemical Journal of Chinese University, 2009, 30(10): 1992~1997. (in Chinese)
- Ferreira S H Bradykinin. Potentiating factor present in the venom of *Bothrops jarace* [J]. British Journal of Pharmacology, 1965, 24: 163~169.
- 辛志宏,马海乐,吴守一. 食品蛋白质中血管紧张素转化酶抑制肽的研究[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2003, 24(4):17~21.  
Xin Zhihong, Ma Haile, Wu Shouyi. Study on ACE inhibitory peptide derived from food protein [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2003, 24(4): 17~21. (in Chinese)
- 阮长青,迟玉杰,张瑞东. 蛋清蛋白源血管紧张素转化酶抑制肽研究进展[J]. 食品科学,2009,30(9):245~248.  
Ruan Changqing, Chi Yujie, Zhang Ruidong. Research progress on angiotensin converting enzyme (ACE) inhibitory peptides derived from egg white proteins [J]. Food Science, 2009, 30(9): 245~248. (in Chinese)
- Miguel M, Recoil I, Gomez-Ruiz J A, et al. Angiotensin I-converting enzyme inhibitory activity of peptides derived from egg white proteins by enzymatic hydrolysis [J]. Journal of Food Protection, 2004, 67(9): 1914~1920.
- 谢正军,金征宇,徐学明. 超滤对苜蓿蛋白酶解物抗氧化性的影响[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2009,30(2):109~112.  
Xie Zhengjun, Jin Zhengyu, Xu Xueming. Effect of ultra-filtration on antioxidant activity of alfalfa protein hydrolysates [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(2): 109~112. (in Chinese)
- 刘博群,林松毅,于志鹏,等. 蛋清蛋白源血管紧张素转化酶抑制肽研究进展[J]. 食品科学,2009,30(16):172~176.  
Liu Boqun, Lin Songyi, Yu Zhipeng, et al. Response surface methodology as an approach to optimize preparation process of antihypertensive peptides from egg white proteins [J]. Food Science, 2009, 30(16): 172~176. (in Chinese)
- Liu Lijun, Zhu Chuanhe, Zhao Zheng. Analyzing molecular weight distribution of whey protein hydrolysates [J]. Food and Bioproducts Processing, 2008, 86(1): 1~6.

空气温度较环境温度高,使就仓干燥时间大大缩短。本次实验含水率下降 0.4%,实际通风时间 42 h。根据文献中自然通风就仓干燥实验结果,采用自然通风方式含水率下降 0.4% 大约需要 120 h<sup>[8]</sup>,可以看出使用该系统后干燥时间缩短 2/3。

### (3) 干燥均匀性改善

本文研究的就仓干燥工艺中使用了移动式翻粮机械,使得粮仓上下部粮食得到交换,常规就仓干燥中的不均匀性现象得到较好改善。如第 2 节所述,取样点最大含水率差由 4.7% 减小到 2.8%,层间最大含水率差由 0.7% 减小到 0.3%,干燥均匀性得到较大改善。

### (4) 受环境条件限制小

常规自然通风就仓干燥依赖于环境条件,环境

温度低或者湿度高的时候均不适合进行通风。太阳能辅助热泵的使用克服了这种缺陷,该加热系统在对环境空气升温的同时也降低了其相对湿度,使其适用的气候范围大大增加。

## 4 结束语

对太阳能辅助热泵就仓干燥系统进行了实验研究,研究结果显示,在本实验条件下,所采用的太阳能空气集热器热效率高,平均值达到 63%,天气晴朗时,集热器总加热量最高可以达到 62.8 kW,加热量充足;热泵性能系数达到 5.4,能够提供稳定的加热量,高效且节能;两者结合用于就仓干燥,干燥效果良好。干燥时间短,能耗低,干燥均匀性好,不影响粮食品质。

## 参 考 文 献

- 1 Wisniewski G. Market development of the solar crops drying technologies in Poland and Europe [J]. *Renewable Energy*, 1999, 16(7): 1 278 ~ 1 283.
- 2 Atul Sharma, Chen C R, Nguyen Vu Lan. Solar-energy drying systems: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6): 1 185 ~ 1 210.
- 3 代建国. 太阳能辅助热泵就仓干燥系统关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.  
Dai Jianguo. Investigation on key technology of a solar assisted heat pump in-bin grain drying system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- 4 付立思, 孙国凯, 王滨, 等. 热能辅助型太阳能箱式干燥器的设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2005, 36(8): 157 ~ 158.
- 5 刘圣勇, 张百良, 袁超, 等. 采用太阳能集热器干燥玉米的研究 [J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 93 ~ 96.  
Liu Shengyong, Zhang Bailiang, Yuan Chao, et al. Experimental study on drying corn using solar air collectors [J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(6): 93 ~ 96. (in Chinese)
- 6 刘圣勇, 张梅峰, 杜俊峰, 等. 太阳能集热器干燥小麦的研究 [J]. *河南农业大学学报*, 2000, 34(2): 168 ~ 171.  
Liu Shengyong, Zhang Meifeng, Du Junfeng, et al. Study on drying wheat with solar air collectors [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2000, 34(2): 168 ~ 171. (in Chinese)
- 7 LS/T 1202—2002 储粮机械通风技术规程 [S].  
LS/T 1202—2002 Technical regulation of aeration for grain storage [S]. (in Chinese)
- 8 刘慧, 张来林, 任立民, 等. 高分水粮机械通风就仓干燥实验 [J]. *河南工业大学学报*, 2007, 28(5): 22 ~ 25.  
Liu Hui, Zhang Lailin, Ren Limin, et al. The in-store drying experiment of high moisture content by mechanical ventilation [J]. *Journal of Henan University of Technology*, 2007, 28(5): 22 ~ 25. (in Chinese)

(上接第 152 页)

- 9 Cushman D W, Cheung H S. Spectrophotometric assay and properties of the angiotensin-converting enzyme of rabbit lung [J]. *Biochemical Pharmacology*, 1971, 20(7): 1 637 ~ 1 648.
- 10 Drogaris P, Le Blanc J C Y, Fitzgerald J E, et al. Enhanced protein detection using a trapping mode on a hybrid quadrupole linear ion trap (Q-trap) [J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(15): 6 300 ~ 6 309.
- 11 任露泉. 试验优化设计与分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 440 ~ 442.
- 12 Yuka K, Tadashi Y, Tomohis A K, et al. Angiotensin-1 converting enzyme (ACE) inhibitory mechanism of tripeptides containing aromatic residues [J]. *J. Biosci. Bioeng.*, 2008, 106(3): 310 ~ 312.
- 13 Cheung H S, Wang F L, Ondetti M A, et al. Binding of peptide substrates and inhibitors of angiotensin-converting enzyme. Importance of the COOH-terminal dipeptide sequence [J]. *J. Biol. Chem.*, 1980, 255(2): 401 ~ 407.