

# 竹豆清蛋白的营养价值及基本理化性质

姚海霞<sup>1</sup>, 齐斌<sup>2</sup>, 黄友如<sup>2</sup>, 王立梅<sup>2</sup>

(1. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130118)

(2. 常熟理工学院生物与食品工程学院, 江苏常熟 215500)

**摘要:** 本文采用 Osborne 分级法制备竹豆清蛋白, 并采用氨基酸自动分析仪、还原聚丙烯酰胺凝胶电泳 (SDS-PAGE)、示差扫描量热仪 (DSC) 和傅里叶红外光谱 (FT-IR) 分别对其氨基酸组成、亚基分子量分布、热学性质及二级结构作初步研究。结果表明竹豆清蛋白含有全面且丰富的必需氨基酸, 属于一种优质植物蛋白。SDS-PAGE 电泳表明竹豆清蛋白含有 9 个亚基条带, 最主要的亚基分子量分布在 49.6 ku 和 27.6 ku。热分析显示竹豆清蛋白变性温度 ( $T_d$ ) 在 pH=7.0 时最高, 达 100.6 °C; 变性焓 ( $\Delta H$ ) 在 pH=5.0 时最大, 达 3.40 J/g。傅里叶红外显示其二级结构分布如下:  $\beta$  转角最高 (33.59%), 其次是  $\beta$  折叠 (31.38%),  $\alpha$  螺旋 (17.97%) 和无规卷曲 (17.07%)。研究表明竹豆清蛋白营养价值丰富, 亚基分子量分布广, 有较强的热稳定性, 具有高度有序且稳定的结构, 这为后续研究竹豆清蛋白的功能特性以及应用提供了理论依据。

**关键词:** 竹豆; 清蛋白; 氨基酸分析; 热学性质; 结构表征

文章编号: 1673-9078(2018)05-41-46

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.05.006

## The Nutritional Value and Basic physicochemical Properties of Bamboo Bean Albumin

YAO Hai-xia<sup>1</sup>, QI Bin<sup>2</sup>, HUANG You-ru<sup>2</sup>, WANG Li-mei<sup>2</sup>

(1.School of Food Science and Engineering, Jilin Agriculture University, Changchun 130118, China)

(2.School of Biological and Food Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

**Abstract:** The bamboo bean albumin was prepared by Osborne procedure in this study, and its amino acid composition, subunit molecular weight, thermal properties and the secondary structure were preliminarily studied using automatic amino acid analyzer, reducing sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE), differential scanning calorimetry (DSC), and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), respectively. The results showed that bamboo bean albumin had abundant and comprehensive essential amino acids, belonging to a kind of high quality plant protein. Bamboo bean albumin contained nine subunits confirmed by SDS-PAGE, and the main subunits were distributed in 49.6 ku and 27.6 ku. Thermal analysis showed that the bamboo bean albumin had the highest denaturation temperature ( $T_d$ ) of 100.6 °C at pH = 7.0. And it had the highest degeneration enthalpy ( $\Delta H$ ) of 3.40 J/g at pH = 5.0. The fourier transform infrared spectroscopy showed its secondary structure was as follows: the proportion of beta angle was the highest (33.59%), followed by beta folding (31.38%), alpha helix (17.97%) and random coil (17.07%). Studies showed that bamboo bean albumin had rich nutritional value, wide molecular weight distribution, strong thermal stability, and highly ordered and stable structure, which provided a theoretical basis for subsequent research on the functional properties and application of bamboo bean albumin.

**Key words:** bamboo bean; albumin; amino acid analysis; thermal properties; structural characterization

竹豆 (bamboo bean) 又名爬豆、饭豆和蔓豆等, 属豆科类草本植物, 豇豆属, 生长在低海拔高温高湿的热带和亚热带地区, 我国主要分布在云南、山西、贵州和陕西等地区。与绿豆、小豆相比, 竹豆具有抗虫害、耐酸铝、产量高、适应力强等优势<sup>[1]</sup>, 适合在

收稿日期: 2017-12-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2013AA102203-03)

作者简介: 姚海霞 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能性食品

通讯作者: 王立梅 (1964-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术

干旱、高温、土壤贫瘠地区种植。竹豆富含淀粉、蛋白质、钙、磷、铁及粗纤维、维A原、维生素B<sub>1</sub>、维生素B<sub>2</sub>和维C等<sup>[2]</sup>。竹豆的营养质量比许多其他豇豆类高, 主要是由于蛋白质和必需氨基酸含量高, 且抗营养物质如植酸磷, 多酚水平、皂苷和胰蛋白酶抑制剂在竹豆中也相对低于其他豆类食物<sup>[3]</sup>。竹豆不仅营养丰富, 而且还具有“利水、除湿和排血瘀, 消肿解毒”的功效, 对治疗水肿、脚气、黄疸、便血和痈肿等病有明显作用<sup>[4]</sup>。竹豆还具有抗氧化力和抗糖尿病潜力,

它对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶具有抑制活性,可以抑制晚期糖基化终产物的形成,在食品保健与医药领域具有广阔的应用前景<sup>[5]</sup>。

然而,竹豆作为一种夏季高产绿肥,其副产物竹豆籽粒一直被用作饲料,造成植物蛋白资源的巨大浪费。目前,国内外对竹豆的农艺性状<sup>[6]</sup>、栽培措施<sup>[7]</sup>和种质资源多样性<sup>[8]</sup>等均有报道,但关于竹豆蛋白的研究报道几乎没有。同时,植物清蛋白的研究大多集中在芸豆<sup>[9]</sup>、绿豆<sup>[10]</sup>、米糠<sup>[11]</sup>和菜籽粕<sup>[12]</sup>等农作物,围绕提取工艺、功能性质研究展开,关于清蛋白的性质及二级结构研究甚少,因此充分了解竹豆清蛋白的性质及结构,对其在食品中的开发应用具有重要意义。

本文通过阐明竹豆清蛋白的氨基酸组成、亚基分子量分布情况,研究不同 pH 下的热学性质,采用傅里叶红外对其二级结构进行表征,为竹豆清蛋白的功能特性研究及其应用提供了科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

竹豆:购于云南昆明兰姐特产店;聚丙烯酰胺凝胶快速配制试剂盒:碧云天生物技术研究所;其他试剂均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

磁力加热搅拌器:苏州赛恩斯 IKA 仪器有限公司;高速冷冻离心机:CR22G II,日本 HITACHI 公司;紫外可见分光光度计:UVmini-1240,日本 SHIMADZU 公司;冷冻干燥机:Alpha 1-2 LD plus,德国 CHRIST 公司;pH 计:Seven Easy S20K,瑞士 METTLER TOLEDO 公司;分析天平:XS105DualRange,瑞士 METTLER TOLEDO 公司;电泳仪:Mini-PROTEAN Tetra,美国 Bio-Rad 伯乐公司;综合热分析仪:TAQ2000,美国 TA 公司;傅里叶红外光谱仪:NICOLET IS10,美国热电 Thermo 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 竹豆清蛋白的制备

根据 Osborne 分级提取工艺<sup>[13]</sup>,取 100 g 脱脂竹豆于 2 L 烧杯中,按料液比 1:10 加入 600 mL 去离子水,置于恒温磁力加热搅拌器中,45 °C 搅拌浸提 1 h,离心(10000 r/min、4 °C、20 min)取上清液,沉淀再按料液比 1:10 重复浸提 1 次,合并两次上清液。用 1 mol/L HCl 将其 pH 调至等电点 4.0 处,静置 30 min 离心(10000 r/min、4 °C、20 min),所得沉淀用适量去离子水溶解,用 1 mol/L NaOH 回调 pH 至 7.0,4 °C

下透析 48 h,冷冻干燥后得竹豆清蛋白。每组实验重复三次,结果取平均值,采用凯氏定氮法测得竹豆清蛋白的纯度为 88.75% (干基)。

#### 1.2.2 竹豆清蛋白的氨基酸组成

采用酸水解法测 17 种氨基酸,步骤如下:准确称取 100 mg 的样品(精确到 0.0001 g),置于水解管中,加 8 mL 的 6.0 mol/L 盐酸。充氮气 3 min 后旋紧胶塞。将水解管封口于 120 °C 烘箱中水解 22 h,再加 4.8 mL 10M NaOH 中和,用蒸馏水定容至 50 mL。过滤后离心(10000 r/min、4 °C、15 min),取上清液。采用碱水解法测色氨酸,称取相同重量样品,加 8 mL 5 mol/L NaOH 水解,再加 6.7 mL 6 mol/L HCL 中和,其他步骤同上。

色谱条件:Agilent Hypersil ODS 柱(5  $\mu$ m, 4.0 mm $\times$ 250 mm);流动相 A:27.6 mmol/L 醋酸钠-三乙胺-四氢呋喃体积比为(500:0.11:2.5),流动相 B:80.9 mmol/L 醋酸钠-甲醇-乙腈体积比为(1:2:2);流速为 1 mL/min;柱温:40 °C;紫外检测器(VWD)检测波长为 338 nm,以外标法进行定量。

#### 1.2.3 竹豆清蛋白的 SDS-PAGE 电泳

准确称取清蛋白 10 mg,溶于 2 mL 水中,35 °C 下超声提取 15 min,离心(4000 r/min, 15 min)取上清。取 80  $\mu$ L 上清液,加入 20  $\mu$ L 上样缓冲液(Sample Loading Buffer $\times$ 5),再加入 2  $\mu$ L 的巯基乙醇,沸水浴下进行 5~10 min,使其充分变性。冷却至室温后再离心(12000 r/min, 5 min),取 10  $\mu$ L 上清液上样。采用晶彩生物的蛋白电泳凝胶制备试剂盒进行制胶,进行不连续垂直电泳,浓缩胶采用 60 V、30 min,分离胶采用 100 V、1.5 h。待溴酚蓝条带移动到距离分离胶下边缘 1 cm 左右时关闭电源,结束电泳,凝胶进行考马斯亮蓝 G-250 染色,脱色后拍照保存。

#### 1.2.4 竹豆清蛋白的热变性

取 10 mg 左右的竹豆清蛋白,溶于 100  $\mu$ L 0.01 mol/L 的不同 pH 的磷酸缓冲液中,充分混匀。准确称取 10 mg 左右的样品于铝盘中,密封铝盘,以空铝盘作参比,采用氮气,从 30 °C 加热至 120 °C,升温速率为 5 °C/min,试验重复三次。记录曲线峰值点温度,即蛋白变性温度  $T_d$ ,采用仪器自带分析软件计算吸热曲线形成峰的面积,即焓变值  $\Delta H$ 。

#### 1.2.5 竹豆清蛋白的 FT-IR 测定

采用溴化钾压片法:在暖灯下,取 1 mg 竹豆清蛋白与 100 mg KBr 混匀研磨,充分干燥除去水分,均匀压制成片,采用 omnic 软件进行样品采集。光谱扫描范围为 400~4000  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ 。

图谱处理:取 1700~1600  $\text{cm}^{-1}$  的酰胺 I 带图谱,

用 PeakFit v4.12 软件进行分析。对曲线依次进行平滑、基线校正、Gaussian 去卷积、二阶导数拟合数据处理。

### 1.3 数据处理

试验结果采用 Origin 8.0 软件进行数据图像处理, SPSS 20.0 软件进行统计和差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 竹豆清蛋白的氨基酸组成

表 1 竹豆清蛋白的氨基酸组成分析

Table 1 Amino acid composition of bamboo bean albumin			
非必需氨基酸		必需氨基酸	
/(mg/g)	597.50	/(mg/g)	397.65
天门冬氨酸	116.72±1.26	苏氨酸	26.78±0.08
丝氨酸	44.37±0.43	缬氨酸	63.16±0.84
谷氨酸	182.62±2.02	蛋氨酸	14.66±0.98
甘氨酸	39.26±0.67	异亮氨酸	57.13±0.71
丙氨酸	44.49±0.54	亮氨酸	90.58±1.29
半胱氨酸	1.07±0.55	苯丙氨酸	65.19±0.80
酪氨酸	27.98±3.23	赖氨酸	74.35±1.74
组氨酸	27.33±0.98	色氨酸	5.80±1.12
精氨酸	66.76±0.26	氨基酸总和	995.15
脯氨酸	46.90±3.42		
E/N/%	66.55	E/T/%	39.96

注: E/N: 必需氨基酸/非必需氨基酸; E/T: 必需氨基酸/总氨基酸量。

由表 1 可知, 竹豆清蛋白氨基酸含量丰富, 种类齐全, 含有 18 种人体所需氨基酸及 8 种人体必需氨基酸, 富含谷氨酸、天门冬氨酸、亮氨酸和赖氨酸, 是一种具有开发食用前景的植物蛋白资源。其中, 谷氨酸含量最高, 占 18.35%; 天门冬氨酸次之, 占 11.73%; 半胱氨酸的含量最少, 仅有 0.11%。非极性氨基酸(即缬氨酸、脯氨酸、丙氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸和蛋氨酸和色氨酸)占 38.98%; 不带电荷的极性氨基酸(即甘氨酸、苏氨酸、丝氨酸、酪氨酸, 天冬酰胺和谷氨酰胺除外)含量占 13.90%; 带正电荷的极性氨基酸(即赖氨酸、精氨酸和组氨酸)含量占

16.93%; 带负电荷的极性氨基酸(即天冬氨酸与谷氨酸)含量占 30.08%; 必需氨基酸(即苏氨酸、缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸和色氨酸)含量占 39.96%;

而所必需的半必需氨基酸(即精氨酸、组氨酸)含量占 9.48%。根据表 1 数据, 能够计算出必需氨基酸/氨基酸总量(E/T)为 39.96%, 必需氨基酸/非必需氨基酸(E/N)的值为 66.55%。这与 FAO/WHO<sup>[14]</sup>提出的必需氨基酸占总氨基酸的比值为 40%、必需氨基酸与非必需氨基酸的比值为 60%以上的参考蛋白模式相符, 说明竹豆清蛋白属于一种优质的植物蛋白。

### 2.2 竹豆清蛋白的 SDS-PAGE 分析

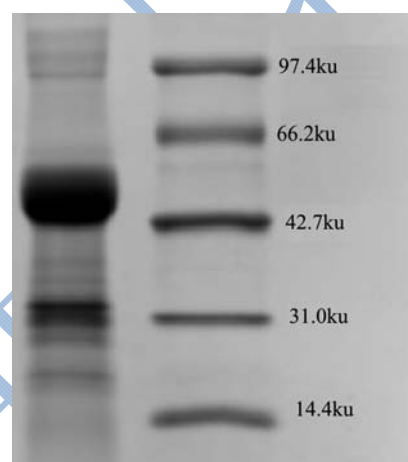


图 1 竹豆清蛋白的 SDS-PAGE 还原电泳

Fig.1 SDS-PAGE profile of bamboo bean albumin

竹豆清蛋白的 SDS-PAGE 电泳图如图 1 所示, 通过 Image Lab 软件, 将蛋白质 Marker 的分子量对数与条带相对迁移率作标准曲线:  $y = -2.4 * x + 2.88$ ,  $R^2 = 0.9833$  ( $y$  为条带相对迁移率,  $x$  为分子量对数)。将竹豆清蛋白条带相对迁移率带入上式, 计算其主要亚基分子量。

如表 2 所示, 竹豆清蛋白含有 9 个亚基条带, 分别为 113.3 ku、103.5 ku、94.6 ku、49.6 ku、35.3 ku、32.3 ku、27.6 ku、24.0 ku、19.7 ku。其中最主要亚基分布在 49.6 ku 和 27.6 ku, 分别占总量的 61.1%和 20.6%, 这与李永武提取的绿豆清蛋白<sup>[10]</sup>亚基分子量分布相似。

表 2 SDS-PAGE 竹豆清蛋白分子量分布表

Table 2 Molecular weight distribution table of bamboo bean albumin obtained by SDS-PAGE

条带	1	2	3	4	5	7	8	9
分子量/ku	113.3	103.5	94.6	49.6	35.3	27.6	24.0	19.7
条带百分比/%	2.3	3.1	1.9	61.1	1.4	20.6	3.4	4.5

### 2.3 竹豆清蛋白的热稳定性分析

蛋白天然结构的改变及变性过程常伴随着焓变, 常采用差示热量扫描(DSC)来进行监控。在 DSC 谱

图中,最大峰对应的温度即变性温度( $T_d$ ),代表蛋白质的热稳定性<sup>[15]</sup>。由图1和表3可知,竹豆清蛋白的变性温度( $T_d$ )从高到低依次对应 pH: 7>5>9,在 pH=7.0 时最高,达到 100.6 °C,热稳定性最强。这是因为当 pH 在 5~7 时,接近蛋白原生环境,蛋白所带净电荷少,静电排斥力相当低,其天然结构未被破坏,蛋白较稳定。而在 pH=9 时,大量净电荷诱导,静电排斥力增加,导致蛋白质展开,发生部分变性,热稳定性降低。

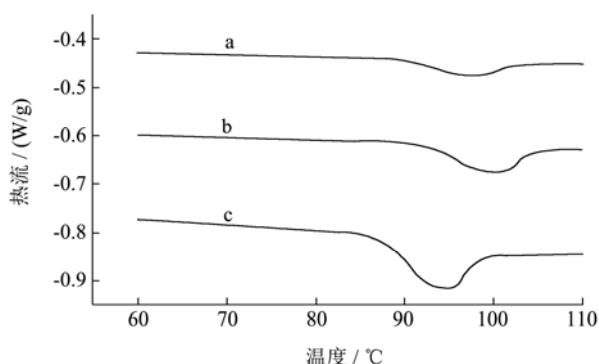


图2 pH对竹豆清蛋白热变性的影响

Fig.2 Effect of pH on thermal denaturation of bamboo bean albumin

注: a表示 pH 5.0; b表示 pH 7.0; c表示 pH 9.0。

表3 pH对竹豆清蛋白  $T_d$  和  $\Delta H$  的影响

Table 3 Effect of pH on  $T_d$  and  $\Delta H$  of bamboo bean albumin

因素	pH		
	5.0	7.0	9.0
$T_d/^\circ\text{C}$	97.1±0.2 <sup>a</sup>	100.6±0.2 <sup>b</sup>	94.9±0.1 <sup>c</sup>
$\Delta H(\text{J/g})$	3.40±0.15 <sup>a</sup>	2.26±0.13 <sup>b</sup>	1.23±0.10 <sup>c</sup>

注: 采用 Duncan's multiple range test 方法分析, 同一行不同字母表示显著性差异 ( $p<0.05$ ,  $n=3$ )。

变性焓( $\Delta H$ )即样品发生转变前后吸热峰的峰面积,反映蛋白质分子的疏水性或亲水性,同时也表征蛋白质分子的聚集程度(反应有序结构比例)。它是蛋白质变性过程中热能变化的指标值,主要反映在分子间氢键的断裂和疏水作用,氢键断裂吸热,破坏疏水作用放热<sup>[15]</sup>。由表3可知,竹豆清蛋白的变性焓( $\Delta H$ )从高到低依次对应 pH: 5>7>9,说明变性焓( $\Delta H$ )随 pH 的升高而降低,这与黎卫<sup>[16]</sup>等对芡实谷蛋白热学性质的研究结果相符。pH=5.0 时,变性焓( $\Delta H$ )达到最大,为 3.40 J/g,表明此时蛋白有序结构比例最高<sup>[17]</sup>。这归功于在这种 pH 下,蛋白静电斥力较小,疏水基团埋藏在蛋白质内部,疏水作用较小,蛋白结构紧凑有序,热变性时需吸收更多热能,焓变值较大。而在 pH=9.0 时,较强的静电斥力使蛋白分子伸展,疏水基团大量暴露,疏水作用增大,蛋白结构从有序向无序结构转

变,发生部分变性,热变性吸收的热能减少,焓变值变小。总的来说,竹豆清蛋白在等电点附近及中性环境下,蛋白结构有序紧凑,热稳定性更好,而在碱性条件下,蛋白易发生变性,无序结构增多,热稳定性较差。

## 2.4 竹豆清蛋白的红外光谱分析

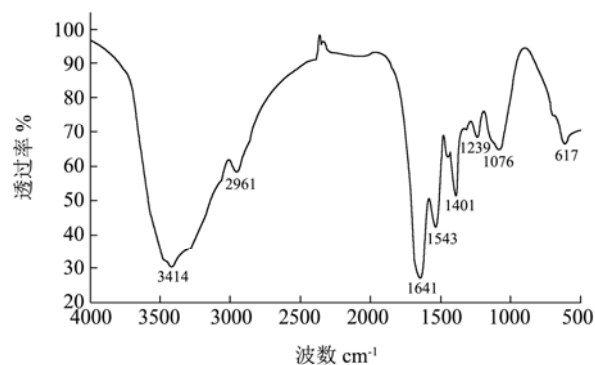


图3 竹豆清蛋白的红外光谱图

Fig.3 Infrared spectrogram of bamboo bean albumin

由图3可知,在 3414  $\text{cm}^{-1}$  有强而宽的吸收峰,可能是蛋白质 N-H 的反对称伸缩振动或者是醇羟基的 O-H 伸缩振动; 2961  $\text{cm}^{-1}$  处有吸收,是烷烃  $\text{CH}_3$  的反对称伸缩振动。蛋白质的肽链段属于酰胺,当蛋白二级结构以  $\alpha$  螺旋为主时, C=O 伸缩振动频率在 1651  $\text{cm}^{-1}$ , 以  $\beta$  折叠为主时,位于 1637  $\text{cm}^{-1}$  左右, 1641  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰表明固态状态下竹豆清蛋白的有序结构以  $\beta$  折叠为主,这也与红外拟合结果相一致<sup>[18]</sup>。1543  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收可能源于  $\text{NH}_4^+$  的不对称变角振动或者酰胺 II 的 C-N-H 弯曲振动; 1444  $\text{cm}^{-1}$  处的峰形尖而窄,可能是  $\text{NH}_3^+$  的对称变角引起的, 1401  $\text{cm}^{-1}$  的吸收峰可能是氨基酸化合物特征基团 COO 引起的对称伸缩导致; 1239  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰可能是清蛋白 C-N 的伸缩振动或 C=N=N 的对称伸缩振动; 1076  $\text{cm}^{-1}$  的吸收峰可能是竹豆清蛋白中的直链 C-C 伸缩振动或者杂质糖类 C-OH、C-O-C 基团的振动引起的。617  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为杂质峰,可能是磷酸盐或硫酸盐类引起的不对称变角振动。

蛋白质红外光谱图上的特征吸收主要分为三组: 1700~1600  $\text{cm}^{-1}$ 、1580~1500  $\text{cm}^{-1}$  以及 1340~1220  $\text{cm}^{-1}$ , 分别对应的蛋白质的酰胺 I 带 (C=O 伸缩振动)、酰胺 II 带 (C-N 伸缩振动和 N-H 变形)、酰胺 III 带 (C-N 伸缩振动)。

酰胺 I 带的吸收峰一般能反应蛋白质的二级结构,同时酰胺 I 带的谱峰指认目前已经比较成熟,其对应关系如下:  $\beta$  折叠 (1610~1640  $\text{cm}^{-1}$ ), 无规卷曲 (1640~1650  $\text{cm}^{-1}$ ),  $\alpha$  螺旋 (1650~1658  $\text{cm}^{-1}$ ),  $\beta$  转角

(1660~1700 cm<sup>-1</sup>) [19,20]。

本实验采用 KBr 压片法, 在图谱处理中, 采用 Savitsk-Golay 函数平滑后, 进行二阶导数和傅里叶去卷积, 采用 Gausse 函数对谱图进行拟合, 多次拟合使残差最小。

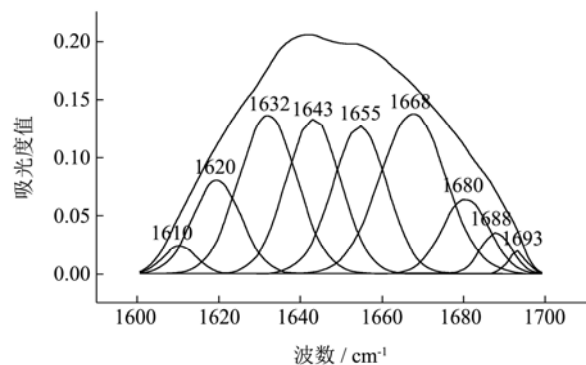


图4 竹豆清蛋白酰胺 I 带曲线拟合结果

Fig.4 The curve fitting results of amide I band from bamboo bean albumin

如图 4 所示, 根据各子峰的积分面积与波谱对应的二级结构关系, 计算出二级结构的相对百分含量。

表 4 傅里叶红外 (FT-IR) 下竹豆清蛋白二级结构含量

Table 4 Secondary structure content of bamboo bean albumin determined by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

波数频率 (cm <sup>-1</sup> )	峰面积	百分 含量 /%	归属	百分含 量/%
1610	0.2426	1.96		
1620	1.2063	9.73	β 折叠	31.38
1632	2.4420	19.69		
1643	2.2289	17.97	无规则卷曲	17.97
1655	2.1166	17.07	α 螺旋	17.07
1668	2.7969	22.55		
1680	0.9234	7.45	β 转角	33.59
1688	0.3317	2.68		
1693	0.1123	0.91		

如表 4 所示, 可知竹豆清蛋白中 β 转角(33.59%)所占比例最高, 其次是 β 折叠(31.38%), α 螺旋(17.97%)和无规卷曲(17.07%)。其中 α 螺旋、β 折叠、β 转角占蛋白二级结构的 80%以上, 无规卷曲结构较少, 因此可认为竹豆清蛋白是一个高度有序且稳定的蛋白质 [21]。这与莲子清蛋白二级结构含量: β 转角 36.96%, β 折叠 33.88%, α 螺旋 20.39%和无规卷曲结构 8.77%相似 [22]。通过 FT-IR 可知, 该制备工艺下竹豆清蛋白二级结构以 β 折叠和 β 转角为主, 具有较少的 α 螺旋和无规卷曲结构, 是一个高度有序且稳定的蛋白质。

### 3 结论

竹豆清蛋白富含 18 种氨基酸, 且人体必需氨基酸种类齐全、组成平衡, 富含谷氨酸、天门冬氨酸、亮氨酸和赖氨酸, 是一种具有开发食用前景的植物蛋白资源。竹豆清蛋白含有 9 个亚基, 分子量分布较广, 主要集中在 49.6 ku 和 27.6 ku 处。pH 对竹豆清蛋白热学性质影响显著, 其变性温度 (T<sub>d</sub>) 在 pH=7.0 时最高, 可达到 100.6 °C, 热稳定最高; 变性焓 ΔH 在 pH=5.0 时最大, 表明此时有序结构比例最高。傅立叶红外结果显示, 竹豆清蛋白二级结构以 β 折叠和 β 转角为主, 具有较少的 α 螺旋和无规卷曲结构。通过研究竹豆清蛋白的理化性质及二级结构, 可为其功能性质的研究与应用开发提供理论依据, 对其在食品生产加工、药物生产或其他工业领域的应用具有重要参考价值。

### 参考文献

- [1] 王丽侠,程须珍,王素华.中国饭豆种质资源遗传多样性及核心种质构建[J].植物遗传资源学报,2014,15(2):242-247  
WANG Li-xia, CHENG Xu-zhen, WANG Su-hua. Genetic diversity analysis and a core collection construction of rice bean (*Vigna umbellata*) in China [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(2): 242-247
- [2] Shamshad Begum S, Musharati Begum J, Annapurna M L. Utilization of rice bean products in the daily diet [J]. Dairying Foods and Home Sciences, 2004, 23(2): 137-142
- [3] Katoch R. Morpho-physiological and nutritional characterization of rice bean (*Vigna umbellata*) [J]. Acta Agronomica Hungarica, 2015, 59(2): 125-136
- [4] 姜松仁.夏季饮用红豆粥可利水消肿[J].求医问药,2008,8: 39  
JIANG Song-ren. Summer drinking red bean porridge is available for water swelling [J]. Medicine, 2008, 8: 39
- [5] Yao Y, Cheng X Z, Wang L X, et al. Major phenolic compounds, antioxidant capacity and antidiabetic potential of rice bean (*Vigna umbellata* L.) in China [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2012, 13(3): 2707-2716
- [6] 程须珍,王述民.中国食用豆类品种志[M].北京:中国农业科技出版社,2009  
CHENG Xu-zhen, WANG Shu-min. Chinese edible legumes [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009
- [7] Katoch R. Effect of NPK enrichment on growth, yield and quality traits in rice bean (*Vigna umbellata*) [J]. Acta Agronomica Hungarica, 2011, 59(4): 317-324

- [8] Pol K M, Thakur D R, Awari V R. Correlation studies on various morpho-physiological characters with grain yield in rice-bean {*Vigna umbeillata* Thumb (Ohwi and Ohashi)} [J]. *Agricultural Science Digest*, 2003, 23(4): 267-269
- [9] 陈晓萌,王常青,訾艳,等.2 种红芸豆蛋白的提取及组分分析[J].*食品科学*,2015,36(2):149-154  
CHEN Xiao-meng, WANG Chang-qing, ZI Yan, et al. Extraction and analysis of proteins from red kidney beans from different growing regions [J]. *Food Science*, 2015, 36(2): 149-154
- [10] 李永武.绿豆清蛋白的提取及功能性质和理化性质研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2014  
LI Yong-wu. Study on the extraction, functional properties and physicochemical properties of mung bean albumin [D]. Daqing: August First Land Reclamation University, 2014
- [11] 吴伟,蔡勇建,林亲录,等.米糠贮藏时间对米糠清蛋白功能性质的影响[J].*中国油脂*,2015,40(10):15-19  
WU Wei, CAI Yong-jian, LIN Qin-lu, et al. Effect of storage time on the functional properties of rice bran albumin [J]. *Chinese Oils and Fats*, 2015, 40(10): 15-19
- [12] 赵蓓,王承明,张沙沙.菜籽粕中清蛋白的超声辅助提取及氨基酸组成研究[J].*中国粮油学报*,2015,10:32-36  
ZHAO Bei, WANG Cheng-ming, ZHANG Sha-sha. Ultrasound-assisted extraction and amino acid composition of napin from rapeseed meal [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 10: 32-36
- [13] Osborne T B. *The vegetable proteins* [M]. London: Longmans Green and Co, 1924
- [14] Kennedy B M. Amino acid content of foods and biological data on proteins [J]. *FAO Nutritional Studies*,1970, 24(5): 5-6
- [15] Li S, Wei Y, Fang Y, et al. DSC study on the thermal properties of soybean protein isolates/corn starch mixture [J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2014, 115(2): 1633-1638
- [16] 黎卫,毛健,齐斌.芡实谷蛋白的结构及热力学性质研究[J].*现代食品科技*,2015,10:129-133  
LI Wei, MAO Jian, Qi Bin. Structure and thermal properties of glutelin from euryale ferox seeds [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 10: 129-133
- [17] 黄友如,王教飞,朱东兴,等.芋艿分离蛋白的理化性质[J].*食品科学*,2016,37(15):45-48  
HUANG You-ru, WANG Jiao-fei, ZHU Dong-xing, et al. Physicochemical characterization of taro protein isolates [J]. *Food Science*, 2016, 37(15): 45-48
- [18] 翁诗甫.傅里叶变换红外光谱分析[M].北京:化学工业出版社,2010  
WEN Shi-fu. *Analysis of fourier transform infrared spectroscopy* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010
- [19] Zhang Q H, Huang X Q, Miao Y L, et al. Study on secondary structure of meat protein by FT-IR [J]. *Food & Fermentation Industries*, 2015,41(10): 247-251
- [20] Long G, Ji Y, Pan H, et al. Characterization of thermal denaturation structure and morphology of soy glycinin by FT-IR and SEM [J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(4): 763-774
- [21] Choi S, Ma C. Structural characterization of globulin from common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) using circular dichroism and Raman spectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(1): 150-160
- [22] 蔡联辉,曾虹燕,蔡西玲,等.莲子蛋白组分二级结构的研究[J].*光谱学与光谱分析*,2011,31(9):2394-2398  
CAI Lian-hui, ZENG Hong-yan, CAI Xi-ling, et al. Second structure of the protein fractions from lotus seeds [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(9): 2394-2398