

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.12.002

### 3 种物理改性方法对大米蛋白质功能性质的影响

#### Effects of three methods of physical modification on the functional properties of rice protein

程云辉<sup>1</sup> 赵红清<sup>1</sup> 张丽琍<sup>2</sup> 杜葳萱<sup>3</sup> 焦叶<sup>1</sup>CHENG Yun-hui<sup>1</sup> ZHAO Hong-qing<sup>1</sup> ZHANG Li-li<sup>2</sup> DU Wei-xuan<sup>3</sup> JIAO Ye<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学化学与食品工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 安徽燕之坊食品有限公司, 安徽 合肥 230000; 3. 四川得意绿色食品集团有限公司, 四川 成都 610000)

(1. School of Chemistry and Food Engineering, Changsha University of Science &amp; Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Anhui Yanzhifang Food Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000, China; 3. Sichuan Deyi Green Food Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China)

**摘要:**针对大米蛋白质因较低的溶解度在食品行业中的应用受到制约,研究以溶解度为主要指标,采用不同温度的热处理、不同压力的高压微射流处理以及不同温度的冷冻研磨组合处理对大米蛋白质进行改性,同时考察其乳化性与乳化稳定性、起泡性与起泡稳定性。大米蛋白质经 200 °C 热处理后,溶解度从 4.4% 提高到 17.4%, 乳化性和起泡性分别为原来的 3.2、1.9 倍;经 100 MPa 高压微射流处理后,溶解度提高到 9.5%, 乳化性和起泡性分别为原来的 3.4、1.7 倍;经 -60 °C 冷冻研磨组合处理后,溶解度提高到 34.3%, 乳化性和起泡性分别为原来的 4.2、2.3 倍;但是 3 种方法处理后,乳化稳定性和起泡稳定性均有所下降。

**关键词:**大米蛋白质;物理改性;功能性质

**Abstract:** Rice protein is a kind of high-quality plant protein, and its application in the food industry is restricted due to its low solubility. In this study, the rice protein was modified by heat treatment at different temperature, high pressure microfluidization treatment under different pressure and freezing and grinding at different temperature, and its solubility, emulsifying activity (EA), emulsifying stability, foaming activity (FA) and foaming stability of protein were investigated. After heat treatment at 200 °C, the solubility of rice protein increased from 4.4% to 17.4%, and EA and FA were 3.2 and 1.9 times as high as the original, respectively. The solubility increased to 9.5% after the

modification by high-pressure microfluidization at 100 MPa, and EA and FA were 3.4 and 1.7 times, respectively. As the modification by freezing-milling at -60 °C, the solubility increased to 34.3%, and EA and FA were 4.2 and 2.3 times of the original, respectively. However, the emulsifying stability and foaming stability of the three methods were decreased.

**Keywords:** rice protein; physical modification; functional properties

大米蛋白质氨基酸组成配比合理,可与牛乳、鸡蛋、牛肉相媲美,并且大米蛋白质属于低抗原性蛋白质,很适合作为生产婴幼儿食品的原料、化妆品和药物佐剂<sup>[1-3]</sup>。但是,大米蛋白质在中性条件下溶解度仅为 3%~8%,而溶解度是蛋白质在工业应用中最为重要的性质之一,其不仅是功能性质的基本指标,而且还会影响其他功能性质<sup>[4]</sup>,因此大米蛋白质在食品领域中的广泛应用大为受限。目前,这一优质蛋白质资源大多被当作饲料廉价处理,并未得到充分开发利用。因此,改善大米蛋白质的功能性质对于拓展其在工业领域中的应用是十分必要的<sup>[3, 5]</sup>。

食品蛋白质的改性方法主要包括物理法、化学法和酶法<sup>[6]</sup>。化学法虽然效果显著,但对蛋白质原有营养功效的破坏、有害毒理效应的产生和化学试剂毒性及残留等问题在一定程度上限制了其应用。酶催化水解改性虽然反应条件温和、有害副产物少,但是低水解度改性效果不理想、高水解度改性产生苦味肽也使得蛋白质产品的食用价值下降。物理法改性因无毒副作用、对蛋白质自身营养性能影响较小、费用低等优点而备受青睐,但物理法对大米蛋白质改性效果还有待进一步研究<sup>[7]</sup>。

研究拟采用 3 种物理方法,即热处理、高压微射流处理以及冷冻与研磨组合处理对大米蛋白质进行改性,并

**基金项目:**国家自然科学基金(编号:31771901);长株潭国家自主创新示范区专项(编号:2018XK2007)

**作者简介:**程云辉,女,长沙理工大学教授,博士。

**通信作者:**焦叶(1989—),女,长沙理工大学讲师,博士。

E-mail: jiaoye@csust.edu.cn

**收稿日期:**2020-11-10

通过溶解性、乳化性和起泡性的变化来考察物理改性对大米蛋白质功能性质的影响。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与amp;仪器

#### 1.1.1 材料与amp;试剂

大米:金健米业股份有限公司;

大豆油:中粮集团有限公司;

2,4,6-三硝基苯磺酸(2,4,6-trinitrobenzene sulfonic acid, TNBS):美国 Sigma 公司;

十二烷基硫酸钠(Sodium dodecyl sulfate, SDS):美国 Fluka 公司;

其他化学试剂:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

高剪切乳化均质器:LR 型,无锡市群光化工设备有限公司;

微射流均质机:M-110EH-30 型,加拿大 Microfluidizer 公司;

胶体磨:JTM50ABK 型,沈阳新光粉碎机厂;

离心机:TDL-36C 型,上海安亭科学仪器厂;

冷冻干燥机:FD-1 型,北京博医康实验仪器有限公司;

pH 计:DELTA 320 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

定时电动搅拌器:JJ-1 型,江苏省金坛市金城国胜实验仪器厂;

数显恒温水浴锅:HH 型,江苏省金坛市金城国胜实验仪器厂;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9036A 型,上海精宏实验设备有限公司;

超低温冰箱:MDF-382E 型,日本三洋电机生物医学有限公司;

高速万能粉碎机:FW100 型,天津市泰斯特仪器有限公司。

### 1.2 方法

1.2.1 制备大米蛋白质 大米粉碎过 120 目筛,将大米粉分散于 0.05 mol/L 氢氧化钠溶液中(10 g/100 mL),室温下搅拌 2 h,3 500 r/min 离心 30 min,上清液用 1 mol/L 的盐酸溶液调节 pH 至 4.8,3 500 r/min 离心 30 min,沉淀用去离子水洗涤 3 次后冷冻干燥备用。自制的大米蛋白质的蛋白质含量为 88.4%(湿基)。

1.2.2 热处理大米蛋白质 将大米蛋白质分散于去离子水中(2 g/100 mL),分别于 80,100,120,140,160,180,200 °C 下在反应釜中热处理 2 h,取出立即冷却至室温,冷冻干燥备用。

1.2.3 高压微射流处理大米蛋白质 将大米蛋白质分散

于去离子水中(2 g/100 mL),用胶体磨均质处理,分别于 80,100,120,140 MPa 的高压微射流压力下处理 3 次,冷冻干燥备用。

1.2.4 冷冻研磨组合处理大米蛋白质 将大米蛋白质分散于去离子水中(2 g/100 mL),用 2 mol/L 的氢氧化钠溶液调节 pH 至 12.5,放置到超低温冰箱中,分别于 -20, -40, -60 °C 下冷冻 24 h,再经粉碎处理后,用 1 mol/L 的盐酸溶液调节 pH 至 7.5,离心取上清液冷冻干燥备用。

1.2.5 蛋白质含量的测定 采用凯氏定氮法,按 GB 50095—2010《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》执行,氮换算为蛋白质的系数为 5.95。

1.2.6 溶解度测定 将 0.5 g 样品分散于 25 mL pH 8.0 的磷酸盐缓冲溶液中,室温搅拌 1 h,3 500 r/min 离心 30 min,按式(1)计算溶解度。

$$S = m_1 / m_2 \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

S——溶解度,%;

$m_1$ ——上清液中蛋白质含量,g;

$m_2$ ——样品中总蛋白质含量,g。

1.2.7 乳化性与乳化稳定性测定 采用浊度法<sup>[8]</sup>,并略作修改。将样品分散于 pH 7.0 的磷酸盐缓冲溶液中(2 g/100 mL),按  $m_{\text{样品液}} : m_{\text{大豆油}} = 3 : 1$  加入大豆油,搅拌后将样品在高速分散器中以 10 000 r/min 分散 30 s,制成均匀的乳浊液。在乳浊液静置 0,10 min 后分别取 50  $\mu\text{L}$  加入 5 mL SDS 溶液中,振荡混匀后于 500 nm 处检测吸光值  $A_0$ 、 $A_{10}$ 。乳化性由均质后 0 min 立即测定的吸光值表示,按式(2)计算乳化稳定性。

$$S_E = \frac{A_0}{A_0 - A_{10}} \times \Delta t, \quad (2)$$

式中:

$S_E$ ——乳化稳定性,min;

$A_0$ ——均质结束后立即测定得到的吸光值;

$A_{10}$ ——样品静置 10 min 后测定的吸光值;

$\Delta t$ ——间隔时间(即 10 min),min。

1.2.8 起泡性与起泡稳定性测定 将样品分散于 pH 7.0 的磷酸盐缓冲溶液中(2 g/100 mL),搅拌均匀后取 50 mL 该样品于量筒中,室温下用高速均质机分散 40 s (10 000 r/min),均质后于 0,30 min 后分别记录泡沫体积  $V_0$  和  $V_{30}$ 。起泡性与起泡稳定性分别按式(3)和(4)计算:

$$A_F = V_0 / 50 \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

$A_F$ ——起泡性,%;

$V_0$ ——均质结束后立即测定得到的泡沫体积,mL。

$$S_F = V_{30} / V_0 \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

$S_F$ ——起泡稳定性,%;

$V_0$ ——均质结束后立即测定得到的泡沫体积, mL;

$V_{30}$ ——样品静置 30 min 之后泡沫的体积, mL。

1.2.9 数据处理 每次试验重复 3 次, 试验结果表示为“平均值±标准误差”。试验数据采用 SPSS(version 19.0 for Windows)和 Origin Pro 2016 进行分析和处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 热处理对大米蛋白质功能性质的影响

由图 1 可知, 大米蛋白质的溶解度随热处理温度的升高而增加, 当温度为 200 °C 时大米蛋白质的溶解度达到最高值 17.4%, 是原大米蛋白质的 4.0 倍, 可能是碱溶性蛋白含量降低所导致的<sup>[9]</sup>。但热处理的温度过高会使大米蛋白质颜色变黄, 略有焦糊味, 吕玉翠<sup>[10]</sup>研究发现大豆浓缩蛋白乳在高温热处理后出现由美拉德反应引发的褐变, 与试验热处理大米蛋白质的颜色变化相符。同时, 高温可能会产生有害的杂环类化合物<sup>[11]</sup>, 影响大米蛋白质的营养价值。

由图 2 可知, 大米蛋白质的乳化性随热处理温度的升高逐渐增加, 而乳化稳定性则随热处理温度的升高而降低。当温度为 200 °C 时, 大米蛋白质的乳化性最大, 是原大米蛋白质的 3.2 倍, 可能是热处理导致大米蛋白质结构被破坏, 蛋白质肽链松散, 原不溶聚集体经解聚或与其他蛋白亚基/聚集体重新形成可溶性聚集体的结果<sup>[12]</sup>, 从而导致大米蛋白质的乳化性增强。在测定乳化稳定性时, 蛋白质溶解度较低, 溶液中被乳化的油滴少, 静置后则只有少量油滴析出, 从而可能表现出乳化稳定性高<sup>[13]</sup>。

由图 3 可知, 大米蛋白质的起泡性随热处理温度的升高呈先升高后降低的趋势。当温度为 120 °C 时, 大米蛋白质的起泡性达到最高值 151.4%, 是原大米蛋白质的 1.9 倍。大米蛋白质起泡性稳定性和起泡性呈相反的变化趋势, 当温度为 120 °C 时, 大米蛋白质的起泡稳定性达到最低值 39.6%。起泡性与蛋白质降低界面张力的能力、分子结构的柔韧性以及两亲性、电荷分布等多种界面性质相关, 提高可溶性蛋白比例可能有利于蛋白质泡沫

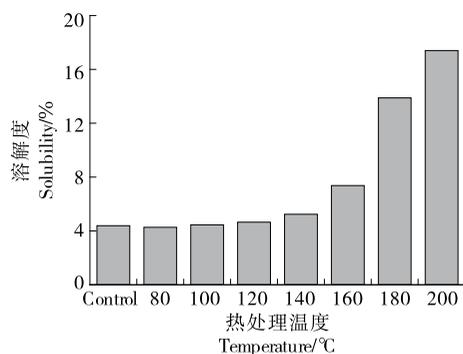


图 1 不同温度的热处理对大米蛋白质溶解度的影响  
Figure 1 Effect of the temperature of heat treatment on the solubility of rice protein

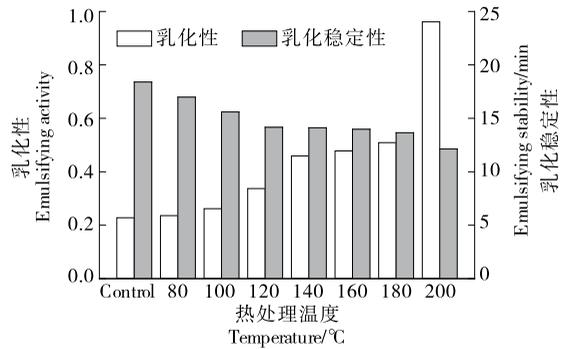


图 2 不同温度的热处理对大米蛋白质乳化性及乳化稳定性的影响

Figure 2 Effect of the temperature of heat treatment on the emulsifying activity and stability of rice protein

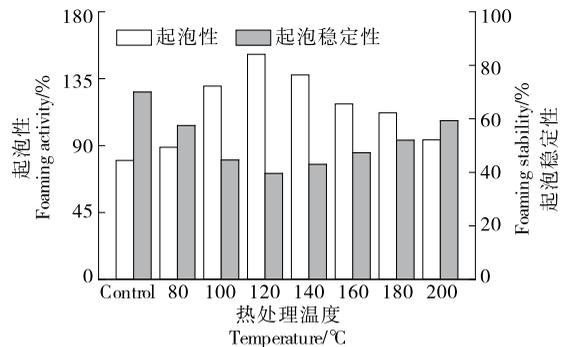


图 3 不同温度的热处理对大米蛋白质起泡性及起泡稳定性的影响

Figure 3 Effect of the temperature of heat treatment on the foaming activity and stability of rice protein

的形成, 但是蛋白质在溶液中的构象也会影响其起泡性<sup>[14]</sup>。而起泡稳定性对于蛋白质的要求与起泡性不尽相同, 需要蛋白质能够形成具有一定厚度、黏度和强度的液膜<sup>[15]</sup>, 因此与起泡性表现出了不一样的变化趋势。

### 2.2 高压微射流处理对大米蛋白质功能性质的影响

由图 4 可知, 高压微射流处理能够提高大米蛋白质的溶解度, 当压力为 100 MPa 时, 溶解度为 9.5%, 是原大米蛋白质溶解性的 2 倍, 可能是因为高压作用下, 大米蛋白质分子发生解聚和伸展, 一方面增大了蛋白质与水的接触面积, 另一方面蛋白质结构被破坏, 蛋白质分子表面电荷发生改变, 水化作用增强, 从而溶解度得以提高<sup>[16]</sup>。Fan 等<sup>[17-18]</sup>研究发现动态高压微射流处理显著提高了食用燕窝内水不溶蛋白质的溶解度, 并认为这可能是由于动态高压微射流处理的强烈剪切力、湍流力和空化作用引起的。

由图 5 可知, 大米蛋白质经高压微射流处理后, 乳化性提高。当高压微射流压力为 80 MPa 时, 乳化性最大值可达 0.766, 是原大米蛋白质的 3.4 倍。大米蛋白质的乳

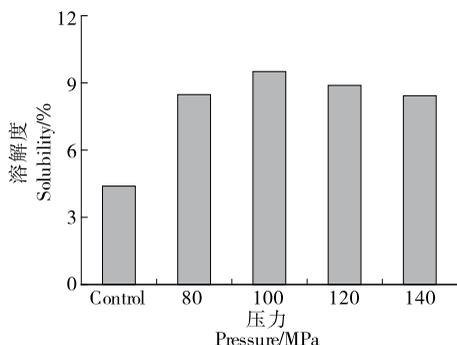


图 4 不同压力的高压微射流处理对大米蛋白质溶解度的影响

Figure 4 Effect of the pressure of high-pressure microfluidization on the solubility of rice protein

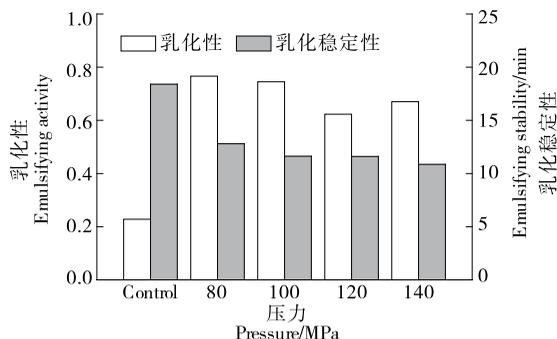


图 5 不同压力的高压微射流处理对大米蛋白质乳化性及乳化稳定性的影响

Figure 5 Effect of the pressure of high-pressure microfluidization on the emulsifying activity and stability of rice protein

化稳定性随高压微射流压力的提高逐渐降低,当压力为 140 MPa 时,大米蛋白质的乳化稳定性最小值为 10.8 min。邢贝贝等<sup>[19]</sup>采用高压微射流处理(35, 70, 105, 140 MPa)对天然大米谷蛋白进行酸法热处理制备纤维化热聚集体,乳化活性指数及乳化稳定性指数呈先上升后下降的趋势,在 70 MPa 时达到最大。

由图 6 可知,大米蛋白质经高压微射流处理后,起泡性提高,但起泡稳定性降低,当高压微射流压力为 80 MPa 时,起泡性最大可达 136%,是原大米蛋白质起泡性的 1.7 倍。Hu 等<sup>[20]</sup>发现适度的动态高压微流化处理可以减小马铃薯分离蛋白—壳聚糖复合物的粒径,增加表面电荷,改善马铃薯分离蛋白的溶解度及乳化和起泡性能。

### 2.3 冷冻研磨组合处理对大米蛋白质功能性质的影响

由图 7 可知,大米蛋白质经冷冻研磨组合处理后溶解性显著提高。随着温度的降低,大米蛋白质的溶解性逐渐增加。当冷冻温度为 -60 °C 时,大米蛋白质的溶解度为 34.3%,是原大米蛋白质溶解性的 7.8 倍。冷冻过程中产生的冰晶体可能使蛋白质中水溶性亚基增加,从而

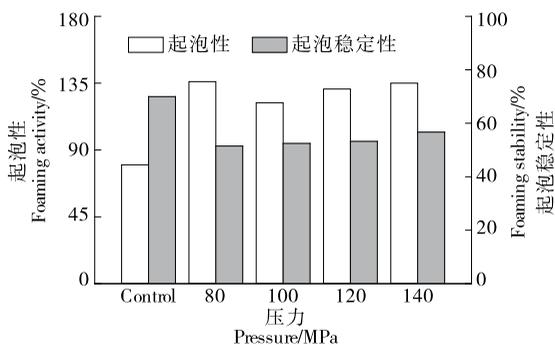


图 6 不同压力的高压微射流处理对大米蛋白质起泡性及起泡稳定性的影响

Figure 6 Effect of the pressure of high-pressure microfluidization on the foaming activity and stability of rice protein

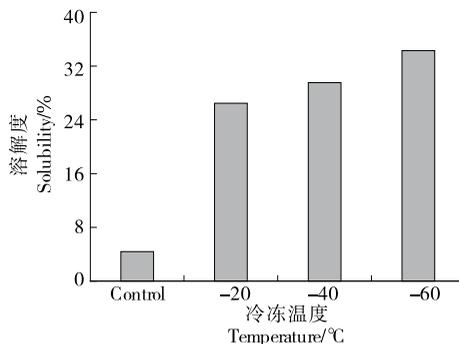


图 7 不同温度冷冻研磨组合处理对大米蛋白质溶解度的影响

Figure 7 Effect of the temperature of freezing-milling on the solubility of rice protein

使大米蛋白质的溶解性提高<sup>[21]</sup>。

不同温度冷冻研磨组合处理对大米蛋白质乳化性及乳化稳定性的影响如图 8 所示。大米蛋白质经冷冻研磨组合处理后,其乳化性显著提高,当冷冻温度为 -60 °C 时,大米蛋白质的乳化性最高可达 0.959,是原大米蛋白质乳化性的 4.2 倍,而乳化稳定性随冷冻温度的降低逐渐减小。Wang 等<sup>[22]</sup>的研究也发现 -20 °C 冷冻处理后大米蛋白质乳化性显著提高。

不同温度冷冻处理对大米蛋白质起泡性及起泡稳定性的影响如图 9 所示。经冷冻研磨组合处理后,大米蛋白质的起泡性随处理温度的降低逐渐升高,当冷冻温度为 -60 °C 时,大米蛋白质的起泡性达到 180%,是原大米蛋白质的 2.3 倍,而大米蛋白质的起泡稳定性则减小。在冷冻研磨组合处理中,起泡性与蛋白质溶解度变化趋势一致,与其密切相关<sup>[23-24]</sup>。

## 3 结论

在对大米蛋白质进行热处理、高压微射流处理及冷

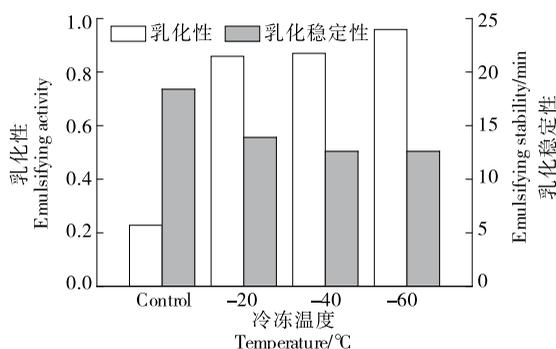


图8 不同温度冷冻研磨组合处理对大米蛋白质乳化性及乳化稳定的影响

Figure 8 Effect of the temperature of freezing-milling on the emulsifying activity and stability of rice protein

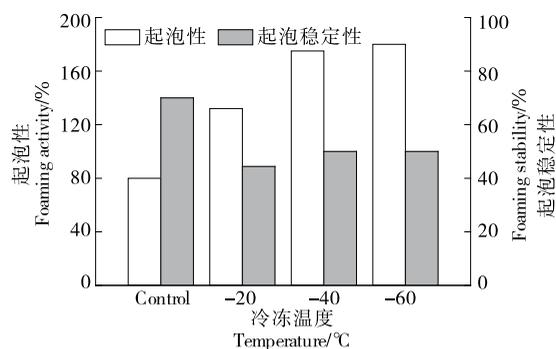


图9 不同温度冷冻研磨组合处理对大米蛋白质起泡性及起泡稳定的影响

Figure 9 Effect of the temperature of freezing-milling on the foaming activity and stability of rice protein

冻研磨组合处理后,其溶解度、乳化性和起泡性均有所改善,但乳化稳定性与起泡稳定性则有所降低。大米蛋白质结构复杂,功能性质受诸多因素影响,物理改性手段的应用还需进一步研究和探索。同时,物理法改性虽然具有对蛋白质营养价值影响较小以及费用低等优点,但是对于蛋白质功能性质的改善,尤其是溶解度,仍不及化学法和酶法。将物理改性手段与其他方法相结合,探究适宜工业生产的改性工艺,是拓展大米蛋白质应用领域的研究方向。

### 参考文献

[1] WANG Ren, XU Peng-cheng, CHEN Zheng-xing, et al. Complexation of rice proteins and whey protein isolates by structural interactions to prepare soluble protein composites[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101: 207-213.

[2] MUTHAYYA S, SUGIMOTO J D, MONTGOMERY S, et al. An overview of global rice production, supply, trade, and consumption[J]. Annals of The New York Academy of sciences, 2014, 1324: 7-14.

[3] SEN S, CHAKRABORTY R, KALITA P. Rice-not just a

staple food: A comprehensive review on its phytochemicals and therapeutic potential [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 265-285.

- [4] MENG Xiang-yong, LI Ting-ting, SONG Teng, et al. Solubility, structural properties, and immunomodulatory activities of rice dreg protein modified with sodium alginate under microwave heating [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(8): 2556-2564.
- [5] WANG Ling-ling, DING Jian, FANG Yong, et al. Effect of ultrasonic power on properties of edible composite films based on rice protein hydrolysates and chitosan[J]. Ultrason Sonochem, 2020, 65: 105049.
- [6] 马庆保, 汪一红, 刘志东, 等. 食品蛋白磷酸化改性的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(1): 99-101.
- [7] 郭超凡, 王云阳. 蛋白质物理改性的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(2): 428-433.
- [8] PEARCE K N, KINSELLA J E. Emulsifying properties of proteins: Evaluation of a turbidimetric technique[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1978, 26(3): 716-723.
- [9] 李和生, 王鸿飞, 徐霄晴. 热处理对大米蛋白质组分的影响[J]. 粮油食品科技, 2005, 13(4): 21-22.
- [10] 吕玉翠. 豆浆和大豆浓缩蛋白乳的热处理对其品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 33-37.
- [11] KATO Y, AOKI T, KATO N, et al. Modification of ovalbumin with glucose 6-phosphate by amino-carbonyl reaction: Improvement of protein heat stability and emulsifying activity [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1995, 43(2): 301-305.
- [12] 郭凤仙, 熊幼翎, 何志勇, 等. 热处理对大豆分离蛋白功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2009, 25(6): 9-11, 21.
- [13] 王章存, 姚惠源. 大米蛋白乳化性质研究[J]. 食品科学, 2005(2): 43-46.
- [14] 李维瑶, 何志勇, 熊幼翎, 等. 温度对于大豆分离蛋白起泡性的影响研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(2): 86-88.
- [15] 王文高, 陈正行, 姚惠源. 不同干燥方法对大米蛋白质功能性质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2002(5): 44-45.
- [16] SETIOWATI A D, SAEEDI S, WIJAYA W, et al. Improved heat stability of whey protein isolate stabilized emulsions via dry heat treatment of WPI and low methoxyl pectin: Effect of pectin concentration, pH, and ionic strength [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 716-726.
- [17] FAN Qun-yan, WANG Pei-xin, ZHENG Xin-yi, et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization on the solubility properties and structure profiles of proteins in water-insoluble fraction of edible bird's nests [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 132: 109923.
- [18] JEON H J, LEE I N, HAN Y E, et al. Physicochemical characteristics of powder from cryogenic grinding of aronia, grapefruit, black bean, and germinated brown rice[J]. Microbiology and Biotechnology Letters, 2017, 45(4): 291-298.

(下转第78页)

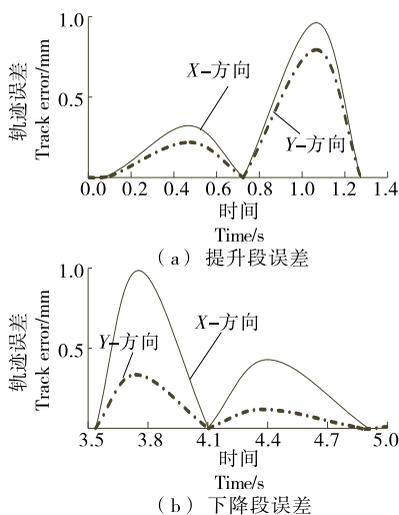


图 7 轨迹误差

Figure 7 Trajectory error

综上所述,整个运动过程中关节的速度和加速度具有连续性,速度曲线光滑、变化比较平稳,可以确保机器人运动的稳定性。而且该算法计算过程比较简单、运算速度快,能够满足约束条件,可以进行运行效率的最优化设计。

## 4 结论

研究表明,试验提出的轨迹规划方法能够在保证稳定性的前提下提高码垛食品机器人执行效率。通过分析前人<sup>[1-6]</sup>提出的以时间为优化目标和以抖动为优化目标,构建了以时间—抖动为优化目标,将粒子群算法引入到码垛食品机器人的轨迹优化中,使所研究的码垛食品机器人的效率和冲击达到了很好的平衡效果,并通过对机器人运动轨迹仿真和试验进行了验证。

虽然试验同时考虑时间和抖动,但在优化算法方面仍缺乏深入研究,尤其在优化过程中出现的局部最优问题,在未来工作中需作进一步研究和验证。

## 参考文献

[1] 张程, 张卓. 码垛机器人运动学分析及关节空间轨迹规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(2): 19-21, 25.

[2] 刘一均. 基于 RBF 神经网络的码垛机器人轨迹优化[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(2): 62-65.

[3] 方健, 宋宇, 朱茂飞, 等. 基于时间最优的码垛机器人轨迹规划[J]. 控制工程, 2018, 25(1): 93-99.

[4] SU Ting-ting, ZHANG Hao-jian, WANG Yun-kuan, et al. Deleta robot dynamic target grab algorithm based on ferrari method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 46(6): 128-132.

[5] VOLTZ M, WEBSTER R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 473-490.

[6] ZHANLAV T, MIJIDDORJ R. A comparative analysis of local cubic splines[J]. Computational & Applied Mathematics, 2018, 31(5): 1-11.

[7] 于洋, 周佳伟, 冯迎宾, 等. 基于三次 B 样条曲线的无人车轨迹优化方法研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(5): 71-75.

[8] ENRICO Bertolazzi, MARCO Frego, FRANCESCO Biral. Point data reconstruction and smoothing using cubic splines and clusterization[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2020, 176: 36-56.

[9] 何建成, 李林升, 林国湘. 基于自适应粒子群算法的 FS20N 机器人时间最优轨迹规划[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(1): 192-195.

[10] 王鹏, 曹现刚, 马宏伟, 等. 基于余弦定理-PID 的煤矸石分拣机器人动态目标稳准抓取算法研究[J/OL]. 煤炭学报. [2020-05-01]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2019.1565>.

[11] PENG You, DENG Wan-ling, WU Wei-jing, et al. Hybrid modelling routine for metal-oxide TFTs based on particle swarm optimisation and artificial neural network[J]. Electronics Letters, 2020, 56(9): 453-456.

[12] MOSA Mohamed Atef. A novel hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm for multi-objective optimization of text mining [J]. Applied Soft Computing, 2020, 90: 106189.

(上接第 11 页)

[19] 邢贝贝, 张亭亭, 赵强, 等. 高压微射流处理对米谷蛋白热聚集性质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 109-115.

[20] HU Chun, XIONG Zhou-yi, XIONG Han-guo, et al. Effects of dynamic high-pressure microfluidization treatment on the functional and structural properties of potato protein isolate and its complex with chitosan[J]. Food Research International, 2020, DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109868.

[21] LI Su-yun, YANG Xue, ZHANG Yan-yan, et al. Effects of ultrasound and ultrasound assisted alkaline pretreatments

on the enzymolysis and structural characteristics of rice protein[J]. Ultrason Sonochem, 2016, 31: 20-28.

[22] WANG Tao, WANG Li, WANG Ren, et al. Effects of freeze-milling on the physicochemical properties of rice protein isolates[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 832-839.

[23] 胥伟, 代钰, 王宏勋, 等. 冷冻处理对蛋清液起泡性与凝胶性的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 96-98.

[24] 石嘉怿, 张太, 梁富强, 等. 大米谷蛋白储藏过程中结构与功能性质变化的研究[J/OL]. 食品工业科技. [2020-12-12]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100061>.