

# 纳豆菌发酵板栗渣工艺优化及其多糖的抗氧化性

张彪<sup>1</sup>, 杨晓宽<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 河北科技师范学院 食品科技学院, 河北 秦皇岛 066600; 2. 板栗产业技术教育部工程研究中心, 河北 秦皇岛 066000; 3. 河北省板栗产业协同创新中心, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 为改善板栗渣的营养组成并提高其多糖含量和抗氧化能力, 以板栗渣为原料, 以纳豆菌为发酵菌种, 以板栗渣多糖含量为评价指标, 在单因素试验基础上, 通过正交试验优化板栗渣的发酵工艺, 并研究多糖的抗氧化活性。结果表明, 最佳发酵条件为纳豆菌接种量 5%、发酵温度 37 °C、发酵时间 48 h、料液比 1:4 (g/mL), 在该条件下板栗渣中多糖的含量为 31.7%。在抗氧化活性方面, 发酵板栗渣多糖与对照组相比均有明显提高, 并随着多糖浓度增加, 发酵板栗渣多糖的抗氧化活性呈现增强趋势。发酵板栗渣可作为一种优质多糖源应用于食品领域。

**关键词:** 板栗渣; 纳豆菌; 发酵; 工艺优化; 多糖; 抗氧化性

## Optimization of Fermentation Process of Chestnut Residues by Natto Bacteria and Antioxidant Activity of Polysaccharides

ZHANG Biao<sup>1</sup>, YANG Xiaokuan<sup>1,2,3\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066000, Hebei, China; 2. Engineering Research Center of Chestnut Industry Technology, Ministry of Education, Qinhuangdao 066000, Hebei, China; 3. Hebei Collaborative Innovation Center of Chestnut Industry, Qinhuangdao 066000, Hebei, China)

**Abstract:** In order to improve the nutritional composition of chestnut residues and enhance their polysaccharide content and antioxidant capacity, chestnut residues were used as the raw material, and natto bacteria were used as the fermentation strain. In addition, polysaccharide content in chestnut residues was used as the evaluation index. Based on single-factor experiments, the fermentation process of chestnut residues was further optimized through orthogonal experiments, and the antioxidant activity of polysaccharides was studied. The results showed that the optimal fermentation conditions were a 5% inoculation amount of natto bacteria, a fermentation temperature of 37 °C, a fermentation time of 48 hours, and a solid-liquid ratio of 1:4 (g/mL). Under these conditions, the polysaccharide content in chestnut residues was 31.7%. In terms of antioxidant activity, polysaccharides in fermented chestnut residue showed significant improvement compared to those in the control group, and the antioxidant activity of polysaccharides in fermented chestnut residues rose with the increase in polysaccharide concentration. Fermented chestnut residues could be used as a high-quality polysaccharide source in the food industry.

**Key words:** chestnut residues; natto bacteria; fermentation; process optimization; polysaccharides; antioxidant activity

引文格式:

张彪, 杨晓宽. 纳豆菌发酵板栗渣工艺优化及其多糖的抗氧化性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 160-166.

ZHANG Biao, YANG Xiaokuan. Optimization of Fermentation Process of Chestnut Residues by Natto Bacteria and Antioxidant Activity of Polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 160-166.

作者简介: 张彪(1998—), 男(汉), 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工。

\*通信作者: 杨晓宽(1973—), 男(汉), 副教授, 硕士, 研究方向: 果蔬类农产品精深加工、新资源食品开发及功能性食品的研究与开发。

板栗又名栗子、大栗,是一种特色干果,口感香甜软糯,素有“干果之王”的美称<sup>[1]</sup>。板栗在中国部分地区被广泛种植,其产量和种植面积在全世界都名列前茅<sup>[2]</sup>。板栗果实中含有丰富的淀粉、不饱和脂肪酸、氨基酸等营养物质,除此之外,板栗中还含有大量的生物活性成分——多糖,研究表明板栗多糖具有降血糖、免疫调节、抗氧化、抗癌等作用<sup>[3]</sup>。从整体上看,中国的传统板栗产业正在迅速发展,生产规模正在逐步扩大<sup>[4]</sup>,目前市场上主要有糖炒板栗、板栗仁、板栗糕等初级加工产品<sup>[5]</sup>。在板栗仁的加工过程中,会产生大量的加工副产物(如板栗渣),若不加以充分利用会造成板栗资源的浪费,因此,亟需对板栗渣进行综合利用开发<sup>[6]</sup>。

传统的板栗加工方式主要是热加工,随着食品加工技术的发展,现代生物工程技术广泛应用于食品加工领域<sup>[7]</sup>。微生物发酵作为一种生物加工技术,是一种生态友好技术,可以提高食品的营养价值和感官性能,还可以增加食品中的生物活性成分含量<sup>[8]</sup>。纳豆菌具有高度抗逆能力,是一种潜在的益生菌,已经在医药和食品领域得到了广泛的应用<sup>[9]</sup>。研究表明,通过纳豆菌发酵底物后,可溶性膳食纤维、多糖的含量有明显提高,其抗氧化性也有相应的提升<sup>[10]</sup>。纳豆菌发酵小米糠,可溶性膳食纤维的含量由2.3%提高到13.2%。同时清除1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基的能力也增强<sup>[11]</sup>。屈雅宁等<sup>[12]</sup>以纳豆菌为原料,对豆科植物进行发酵,结果表明,纳豆菌不但可以增加大豆多糖的产量,而且还可以增强其抗氧化能力。刘玉洁等<sup>[13]</sup>利用纳豆菌发酵玉竹,明显提高了玉竹多糖的含量,多糖的抗氧化能力也有所提升。Xu等<sup>[14]</sup>通过纳豆菌发酵香菇后香菇多糖含量提高了87.13%,且发酵显著提高了香菇多糖的ABTS<sup>+</sup>自由基清除活性和铁离子还原能力(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)。

本文以板栗渣为原料,以纳豆菌为发酵菌种,以多糖含量为评价指标,在单因素试验基础上,通过正交试验优化板栗渣的发酵工艺条件,并研究板栗渣多糖的抗氧化性,以期为板栗渣多糖的抗氧化性深入研究及将板栗渣作为一种优质多糖源纳入食品配方并开发功能性食品提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

板栗渣:产自河北省迁西县;纳豆菌:安琪酵母股份有限公司;无水葡萄糖、浓硫酸、苯酚、过氧化氢、水杨酸、无水乙醇、三氯化铁、95%乙醇、抗坏血酸( $V_C$ )、硫酸亚铁、磷酸、过硫酸钾、石油醚、铁氰化钾(均为分析纯):天津欧博凯化工有限公司;DPPH、磷酸盐缓冲

溶液(0.2 mmol/L, pH6.6)、2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]:四川省维克奇生物科技有限公司;透析袋:美国 Viskase 公司。

### 1.2 仪器与设备

电热恒温水浴锅(HH.S21-6):上海一恒科学仪器有限公司;液晶超声清洗器(KS-5200DE):江苏省昆山市洁力美超声仪器有限公司;旋转蒸发仪(N-1300)、低速台式离心机(TD5A-WS):常州杰博森有限公司;立式压力蒸汽灭菌锅(YXQ-50A):西安索腾医疗科技有限公司;超净工作台(ACB-4E1-CN):太仓艺斯高医疗器械科技有限公司;电子天平(IME204E):梅特勒-托利多(上海)有限公司;恒温摇床培养箱(BLY-50TH):上海丙林电子科技有限公司;真空冻干机(LGJ-S30):北京四环起航科技有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 发酵板栗渣粉的制备

新鲜板栗渣→加水→高压蒸汽灭菌→接种纳豆菌→发酵培养→真空冷冻干燥→粉碎过筛→发酵板栗渣粉→储存备用。以未发酵板栗渣为对照。

#### 1.3.2 板栗渣粗多糖的提取工艺

板栗渣粉脱脂→超声波处理(200 W、24 min)→热水提取(80 °C、2.5 h)→离心(4 000 r/min、15 min)→Sevage 法除蛋白→减压浓缩→3 倍体积的 95% 乙醇沉淀→离心(4 000 r/min、15 min)→透析→冷冻干燥→板栗渣粗多糖。

#### 1.3.3 发酵条件单因素试验

以接种量 5%、发酵温度 37 °C、发酵时间 48 h、料液比 1:3 (g/mL)为基础培养条件,分别考察接种量(1%、3%、5%、7%、9%)、发酵温度(31、34、37、40、43 °C)、发酵时间(24、36、48、60、72 h)和料液比[1:1、1:2、1:3、1:4、1:5 (g/mL)]对板栗渣中多糖含量的影响。

#### 1.3.4 发酵条件正交试验优化

在单因素试验基础上,进行  $L_9(3^4)$  的正交试验设计,以板栗渣中多糖含量为评价指标,对发酵板栗渣工艺进行优化,正交试验设计因素与水平见表 1。

表 1 正交试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal experimental

水平	因素			
	A 接种量/%	B 发酵温度/°C	C 发酵时间/h	D 料液比/(g/mL)
1	3	34	36	1:2
2	5	37	48	1:3
3	7	40	60	1:4

#### 1.3.5 板栗渣多糖含量的测定

采用苯酚-硫酸法测定板栗渣多糖含量<sup>[15]</sup>。以吸光值为纵坐标,浓度为横坐标,绘制得到的标准曲线方

程为  $y=4.237 1x+0.241 2$ , 相关系数  $R^2=0.999 8$ , 线性关系良好。板栗渣多糖含量的计算公式如下。

$$X = \frac{100 \times C \times V}{M \times 1000} \times 100$$

式中:  $X$  为板栗渣多糖含量, %;  $C$  为根据标准曲线计算得到的板栗渣多糖的质量浓度, mg/mL;  $M$  为样品质量, g;  $V$  为样品溶液体积, mL; 1000 为换算系数; 100 为稀释倍数。

### 1.3.6 板栗渣多糖的抗氧化活性测定

#### 1.3.6.1 板栗渣多糖的还原能力测定

采用铁氰化钾法测定还原能力<sup>[16]</sup>, 用吸光值表征铁还原力。在 700 nm 下测定吸光值, 用蒸馏水代替板栗渣多糖溶液作为空白对照,  $V_c$  作为阳性对照, 重复 3 次。

#### 1.3.6.2 板栗渣多糖对 DPPH 自由基清除能力的测定

板栗渣多糖对 DPPH 自由基清除能力的测定参考 Duan 等<sup>[17]</sup>的方法并稍作修改, 配制不同浓度的板栗渣多糖溶液(1、2、3、4、5 mg/mL), 各取 2 mL 上述溶液置于试管中, 加入 2 mL DPPH-无水乙醇(0.2 mmol/L)溶液, 避光处理 30 min 后, 在 517 nm 下测定吸光值  $A_1$ , 用蒸馏水代替 DPPH-无水乙醇溶液测定吸光值  $A_2$ , 用蒸馏水代替多糖样品溶液测定吸光值  $A_3$ ,  $V_c$  作为阳性对照, 重复 3 次。DPPH 自由基清除能力( $X$ , %)计算公式如下。

$$X = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100$$

#### 1.3.6.3 板栗渣多糖对羟基自由基清除能力的测定

板栗渣多糖对羟基自由基清除能力的测定参考赵丽清等<sup>[18]</sup>的方法并稍作修改。配制不同浓度的板栗渣多糖溶液(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mg/mL), 各取 1 mL 上述溶液置于试管中, 依次加入 1 mL 6 mmol/L 的  $H_2O_2$ 、1 mL 6 mmol/L 的硫酸亚铁溶液和 1 mL 水杨酸溶液, 摇匀后在 37 °C 水浴条件下反应 30 min, 在 510 nm 下测定吸光值  $A_1$ , 用蒸馏水代替过氧化氢溶液测定吸光值  $A_2$ , 用蒸馏水代替多糖样品溶液测定吸光值  $A_3$ ,  $V_c$  作为阳性对照, 重复 3 次。羟基自由基清除能力( $Y$ , %)计算公式如下。

$$Y = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100$$

#### 1.3.6.4 板栗渣多糖对 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力的测定

板栗渣多糖对 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力的测定参考 Li 等<sup>[19]</sup>的方法并稍作修改, 配制 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液和 7 mmol/L 的 ABTS 溶液, 各取上述溶液 10 mL 混合均匀后避光处理 12~16 h, 用无水乙醇稀释至在 734 nm 下的吸光值为  $0.70 \pm 0.02$ , 得到 ABTS 工作液。配制不同浓度的板栗渣多糖溶液 1、3、5、7、9 mg/mL, 各取 0.2 mL 上述溶液置于试管中, 加入 2.4 mL 的 ABTS 工作液, 摇匀后避光反应 10 min, 于 734 nm 下测定吸

光值  $A_1$ , 用蒸馏水代替 ABTS 工作液测定吸光值  $A_2$ , 用蒸馏水代替多糖样品溶液测定吸光值  $A_3$ ,  $V_c$  作为阳性对照, 重复 3 次。ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力( $P$ , %)计算公式如下。

$$P = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100$$

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2019 和 Origin 8.0 软件进行数据分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 发酵工艺单因素试验结果

#### 2.1.1 接种量的确定

适宜的接种量可以使底物被充分利用, 加快发酵速度, 促进多糖的产生<sup>[20]</sup>。接种量对板栗渣多糖含量的影响见图 1。

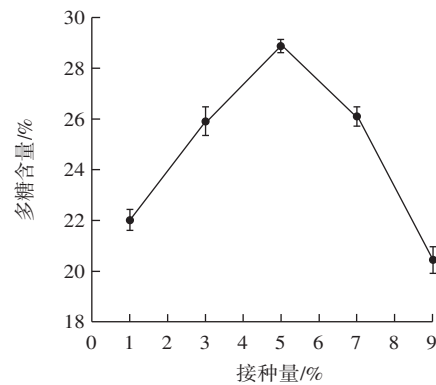


图 1 接种量对板栗渣多糖含量的影响

Fig.1 Effect of inoculation amount on polysaccharide content in chestnut residues

由图 1 可知, 随着纳豆菌接种量的增加, 多糖含量呈现先增加后减少的趋势。接种量为 1%~5% 时, 板栗渣多糖含量随接种量的增加而升高; 接种量为 5%~9% 时, 板栗渣多糖含量逐渐降低。这一趋势与纳豆菌发酵豆粕中接种量对多糖得率的影响一致<sup>[21]</sup>, 可能是接种量过大, 底物中可利用的营养成分有限, 无法满足菌体同步生长的需求, 不利于发酵代谢产物的产生<sup>[22]</sup>。当接种量为 5% 时, 板栗渣多糖含量达到最大值(28.9%), 故选择接种量 3%、5%、7% 进行后续试验。

#### 2.1.2 发酵温度的确定

温度对于菌体的生长、繁殖和代谢至关重要, 适宜的温度能加快发酵速率, 增加发酵产物的产量<sup>[23]</sup>。发酵温度对板栗渣多糖含量的影响见图 2。

由图 2 可知, 在 31~37 °C 范围内, 板栗渣多糖含量不断升高, 在 37~43 °C 范围内, 板栗渣多糖含量出现下降。这与周笑犁等<sup>[24]</sup>采用安琪酵母发酵刺梨果渣研究中, 发酵温度对刺梨果渣多糖含量的影响结果一致, 由于选用的菌种不同, 多糖含量达到最高值的温度略有

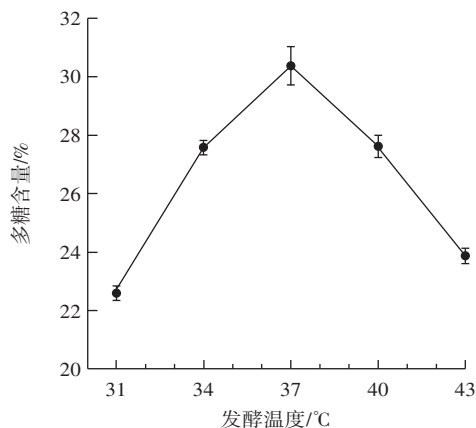


图2 发酵温度对板栗渣多糖含量的影响

Fig.2 Effect of fermentation temperature on polysaccharide content in chestnut residues

不同。可能是当温度过低时菌体的生长速率会降低,从而使得发酵周期变长;发酵温度过高时,菌体活性减弱,导致其无法正常生长和繁殖。此外,高温还可能破坏菌体的细胞结构,使其功能受损或死亡。在37℃时板栗渣多糖含量达到最高值(30.4%),故选择发酵温度34、37、40℃进行后续试验。

### 2.1.3 发酵时间的确定

时间是发酵过程中的一个关键参数,适宜的发酵时间可以确保产物的品质、产量和生产效率达到最佳状态<sup>[25]</sup>。发酵时间对板栗渣多糖含量的影响见图3。

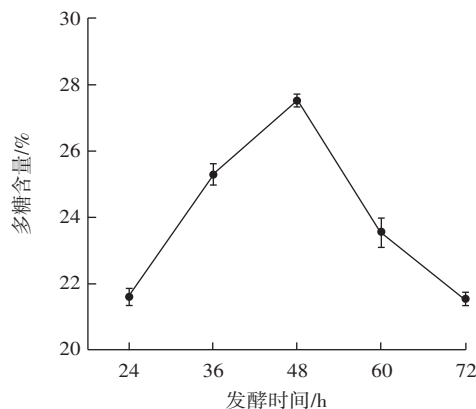


图3 发酵时间对板栗渣多糖含量的影响

Fig.3 Effect of fermentation time on polysaccharide content in chestnut residues

由图3可知,在24~48h范围内,板栗渣多糖含量呈现不断上升的趋势;在48~72h范围内,板栗渣多糖含量出现下降的趋势,与张腾霄等<sup>[26]</sup>利用枯草芽孢杆菌发酵香菇子实体,发酵时间对多糖含量的趋势是先升高再降低,且在48h达到最高的结果一致。可能是由于发酵前期营养物质充足,多糖逐渐积累,但随着时间的延长,菌体进入衰亡期,菌体代谢速率降低。因此,选择发酵时间36、48、60h进行后续试验。

### 2.1.4 料液比的确定

料液比对板栗渣多糖含量的影响见图4。

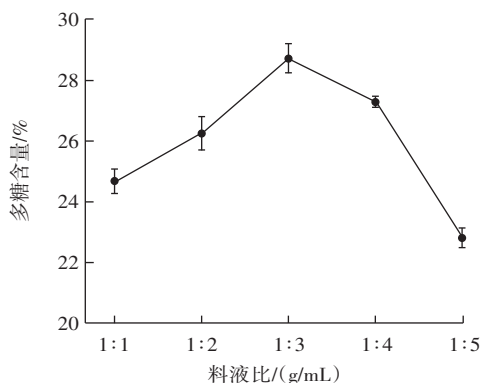


图4 料液比对板栗渣多糖含量的影响

Fig.4 Effect of solid-liquid ratio on polysaccharide content in chestnut residues

由图4可知,随着溶剂用量的增加,板栗渣多糖的含量呈现先升高后降低的趋势,在料液比为1:3(g/mL)时板栗渣多糖含量达到最高值(28.7%)。如果水量太少,导致培养基比较黏稠,溶氧降低,影响了纳豆菌的生长与代谢;如果水量过多,底物过少,底物的营养成分缺乏,影响细菌的生长<sup>[27]</sup>。故选择料液比为1:2、1:3、1:4(g/mL)进行后续试验。

### 2.2 发酵工艺优化正交试验结果与分析

发酵条件优化正交试验结果见表2。

表2 正交试验结果  
Table 2 Results of orthogonal experiments

试验号	A 接种量	B 发酵温度	C 发酵时间	D 料液比	多糖含量/%
1	1	1	1	1	22.6
2	1	2	2	2	28.7
3	1	3	3	3	24.2
4	2	1	2	3	29.5
5	2	2	3	1	23.8
6	2	3	1	2	26.2
7	3	1	3	2	21.7
8	3	2	1	3	28.5
9	3	3	2	1	22.4
k <sub>1</sub>	25.2	24.6	25.8	22.9	
k <sub>2</sub>	26.5	27.0	26.9	25.5	
k <sub>3</sub>	24.2	24.3	23.2	27.4	
R	2.3	2.7	3.7	4.5	

由表2可知,以多糖含量为评价指标时,各因素对板栗渣中多糖含量影响大小顺序为D>C>B>A,即料液比>发酵时间>发酵温度>接种量,最佳组合方案为A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>。

### 2.3 验证试验

对正交试验得到的两组最优组合(A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>、

$A_2B_1C_2D_3$ )进行验证试验, $A_2B_2C_2D_3$ 多糖含量为31.7%,高于组合 $A_2B_1C_2D_3$ 。因此,确定板栗渣的最佳发酵工艺条件为发酵温度 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 、发酵时间48 h、接种量5%、料液比1:4(g/mL)。

## 2.4 板栗渣多糖的抗氧化性试验结果

### 2.4.1 板栗渣多糖的还原能力

还原剂清除自由基依靠其自身还原能够产生电子,还原剂还原能力越强,则其清除自由基的能力越强,抗氧化能力也越强<sup>[28]</sup>。发酵板栗渣多糖的还原能力见图5。

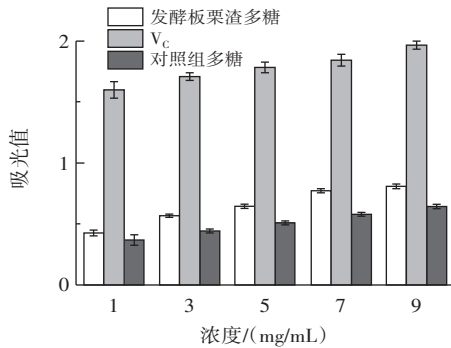


图5 发酵板栗渣多糖的还原能力

Fig.5 Reducing ability of polysaccharides in fermented chestnut residues

由图5可知,当样品浓度为 $9\text{ mg/mL}$ 时,发酵板栗渣多糖的吸光值为0.806,对照组的吸光值为0.644。发酵板栗渣多糖和对照组多糖均有一定的还原能力且随样品浓度的增加而增加,和样品浓度成正比关系,相同浓度下,发酵板栗渣多糖的还原能力高于对照组,但二者均低于 $V_c$ 。可能是发酵后板栗渣多糖的结构特征发生了改变,进而提高了其还原能力<sup>[29]</sup>。这与Chen等<sup>[30]</sup>研究结果一致。

### 2.4.2 板栗渣多糖对DPPH自由基清除能力

DPPH自由基常用来评估抗氧化剂的活性,在抗氧化剂作用下,DPPH自由基可以被清除或减少,从而起到抗氧化作用<sup>[31]</sup>。板栗渣多糖对DPPH自由基清除能力见图6。

由图6可知,板栗渣多糖对DPPH自由基的清除能力随着多糖浓度的增加而增加。当多糖浓度为 $2.5\text{ mg/mL}$ 时,对照组多糖的DPPH自由基清除率为49.8%,发酵板栗渣多糖的DPPH自由基清除率为54.0%,均低于 $V_c$ (99.1%)。结果表明,发酵板栗渣多糖相较于对照组多糖对DPPH自由基有明显的清除作用。可能是其作用机制与多糖分子量的改变有关,使DPPH自由基清除能力增强<sup>[32]</sup>,与刘娜等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。

### 2.4.3 板栗渣多糖对羟基自由基清除能力

羟基自由基具有强大的破坏力,可透过细胞膜与生物大分子发生反应,导致细胞死亡或突变<sup>[34]</sup>。板栗

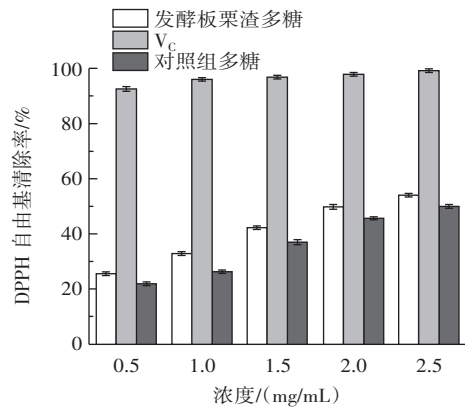


图6 板栗渣多糖对DPPH自由基清除能力

Fig.6 Scavenging ability of polysaccharides in chestnut residues on DPPH free radicals

渣多糖对羟基自由基清除能力见图7。

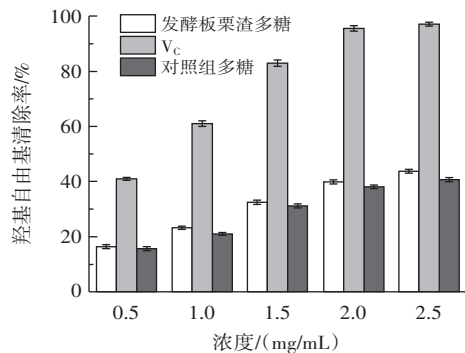


图7 板栗渣多糖对羟基自由基清除能力

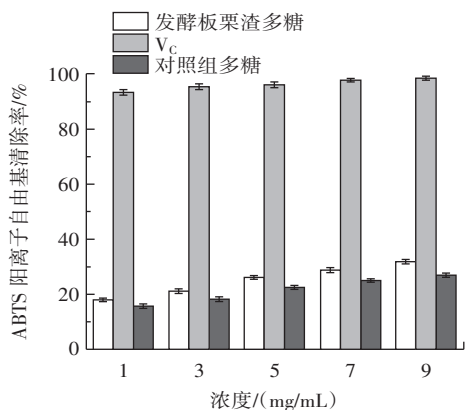
Fig.7 Scavenging ability of polysaccharides in chestnut residues on hydroxyl radicals

由图7可知,发酵后的板栗渣多糖及对照组多糖均有较强的羟基自由基清除能力,且随多糖浓度的增大而增强。浓度为 $2.5\text{ mg/mL}$ 时,发酵板栗渣多糖对羟基自由基的清除率可达43.9%,对照组多糖的羟基自由基清除率为40.2%,均低于 $V_c$ (97.1%),发酵板栗渣多糖清除能力高于对照组。马升等<sup>[35]</sup>的研究表明发酵金针菇根多糖的羟基自由基清除率高于普通菇根。这与本试验结果一致,可能是发酵板栗渣多糖链间分子的高度聚集所致。

### 2.4.4 发酵板栗渣多糖对ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力

ABTS分析通常用于测定各种样品的总抗氧化能力<sup>[36]</sup>。板栗渣多糖对ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力见图8。

由图8可知,发酵板栗渣多糖和对照组多糖对ABTS<sup>+</sup>自由基的清除能力随着多糖浓度的增加而增加。当多糖浓度为 $9\text{ mg/mL}$ 时,发酵板栗渣多糖的ABTS<sup>+</sup>自由基清除率为31.7%,对照组多糖的ABTS<sup>+</sup>自由基清除率为26.8%,结果表明,发酵板栗渣多糖对ABTS<sup>+</sup>自由基的清除能力高于对照组多糖,较对照组多糖提高18.3%,但二者均弱于 $V_c$ 的ABTS<sup>+</sup>自由基的

图8 板栗渣多糖对 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力Fig.8 Scavenging ability of polysaccharides in chestnut residues on ABTS<sup>+</sup> free radicals

清除能力(98.7%)。这与罗灿等<sup>[37]</sup>的研究结果一致。

### 3 结论

在单因素试验基础上采用正交试验优化纳豆菌发酵板栗渣的工艺条件,得到最佳发酵工艺条件为接种量 5%、发酵温度 37℃、发酵时间 48 h、料液比 1:4 (g/mL),在此工艺条件下板栗渣中多糖含量为 31.7%,高于正交试验最优组合的板栗渣多糖含量;优化后板栗渣多糖的还原能力、DPPH 自由基清除率、羟基自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率与对照组相比均有明显提升且具有浓度依赖性,其中当多糖浓度为 9 mg/mL 时,发酵板栗渣多糖的还原能力达到 0.806,是对照组的 1.25 倍,具有更强的抗氧化性;本研究表明发酵板栗渣是一种优质的多糖源,可作为营养强化剂,纳入多种食品配方,广泛应用于食品加工领域。

### 参考文献:

- 李红燕,王应杏,李晓幸,等.板栗多糖研究进展[J].安徽农业科学,2015,43(31):82-84.  
LI Hongyan, WANG Yingxing, LI Xiaoxing, et al. Research advances in polysaccharides of *Castanea mollissima* Blume[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(31): 82-84.
- ZHOU P F, ZHANG P, GUO M L, et al. Effects of age on mineral elements, amino acids and fatty acids in Chinese chestnut fruits[J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(8): 2079-2086.
- 胡美怡,梁建兰,李润峰,等.一种新型板栗黄酒多糖的提取分离及其体外免疫活性[J].食品科学,2023,44(8):78-85.  
HU Meiyi, LIANG Jianlan, LI Runfeng, et al. Extraction, isolation and *in vitro* immunological activity of polysaccharides from wine made from glutinous rice and Chinese chestnut[J]. Food Science, 2023, 44(8): 78-85.
- 韩元顺,许林云,周杰.中国板栗产业与市场发展现状及趋势[J].中国果树,2021(4):83-88.  
HAN Yuanshun, XU Linyun, ZHOU Jie. Current status and trends of chinese chestnut industry and market development[J]. China Fruits, 2021(4): 83-88.
- 张柳月,杨晓宽.板栗龙眼糯米黄酒发酵工艺优化[J].中国酿造,2022,41(2):187-192.  
ZHANG Liuyue, YANG Xiaokuan. Optimization of fermentation process of chestnut, Longan and glutinous rice Huangjiu[J]. China Brewing, 2022, 41(2): 187-192.
- 冯子瑶,张平平,张灿,等.苹果渣及板栗渣黄芪酒加工工艺研究[J].食品研究与开发,2021,42(15):47-52.  
FENG Ziyao, ZHANG Pingping, ZHANG Can, et al. Study on processing technology of *Astragalus* liquor from apple and chestnut pomaces[J]. Food Research and Development, 2021, 42(15): 47-52.
- 孙莹,马世岷,范春春,等.现代生物技术在食品工程中的应用[J].工业微生物,2023,53(3):22-24.  
SUN Ying, MA Shimin, FAN Chunchun, et al. On the application of modern biotechnology in food engineering[J]. Industrial Microbiology, 2023, 53(3): 22-24.
- DONG M Z, AN J Y, WANG L T, et al. Development of fermented chestnut with *Bacillus natto*: Functional and sensory properties[J]. Food Research International, 2020, 130: 108941.
- 胥振国,蔡玉华,范高福,等.纳豆芽孢杆菌应用研究进展及开发前景[J].基因组学与应用生物学,2015,34(11):2532-2537.  
XU Zhenguo, CAI Yuhua, FAN Gaofu, et al. Application progress of *Bacillus natto* and its development prospective[J]. Genomics and Applied Biology, 2015, 34(11): 2532-2537.
- 周亚楠,柴贺,初琦,等.纳豆芽孢杆菌发酵豆渣营养成分变化研究[J].食品研究与开发,2016,37(23):170-174.  
ZHOU Yanan, CHAI He, CHU Qi, et al. The variable pattern of nutrition components in *Bacillus natto* fermentation of bean residue[J]. Food Research and Development, 2016, 37(23): 170-174.
- CHU J X, ZHAO H Z, LU Z X, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto*[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 79-86.
- 屈雅宁,许梦粤,唐双庆,等.枯草芽孢杆菌发酵对豆类粗多糖结构与抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2023,44(17):129-138.  
QU Yaning, XU Mengyue, TANG Shuangqing, et al. Effects of the structure and antioxidant activity of legume crude polysaccharides after *Bacillus subtilis* fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 129-138.
- 刘玉洁,董丽婷,罗灿,等.枯草芽孢杆菌 LY-05 发酵玉竹产水溶性多糖工艺优化及其抗氧化活性研究[J].食品工业科技,2022,43(3):212-221.  
LIU Yujie, DONG Liting, LUO Can, et al. Optimization of fermentation process for water-soluble polysaccharides and antioxidant activity of *Polygonatum odoratum* fermented by *Bacillus subtilis* LY-05[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 212-221.
- XU M Y, QU Y N, LI H, et al. Improved extraction yield, water solubility, and antioxidant activity of lentinan from *Lentinula edodes* via *Bacillus subtilis natto* fermentation[J]. Fermentation, 2023, 9(4): 333.
- 胡楠楠,元伟华,尤丽新,等.玉米须多糖发酵工艺优化及其抗氧化活性研究[J].中国酿造,2022,41(10):159-164.  
HU Nannan, YU Weihua, YOU Lixin, et al. Optimization of fermentation technology and antioxidant activity of *Stigma maydis* polysaccharide[J]. China Brewing, 2022, 41(10): 159-164.
- 刘宇,戴沅霖,马越,等.金银花粗多糖提取工艺优化及其抗氧化活性评价[J].食品工业科技,2023,44(7):188-196.  
LIU Yu, DAI Yuanlin, MA Yue, et al. Extraction process optimization and antioxidant activity evaluation of crude polysaccharides from *Lonicera japonica*[J]. Science and Technology of Food Indus-

- try, 2023, 44(7): 188-196.
- [17] DUAN G L, YU X B. Isolation, purification, characterization, and antioxidant activity of low-molecular-weight polysaccharides from *Sparassis latifolia*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 137: 1112-1120.
- [18] 洗丽清, 李珊, 冯彬, 等. 凌云白毫茶多糖超声波提取工艺优化及其抗氧化效果[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 178-184.  
XIAN Liqing, LI Shan, FENG Bin, et al. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides in Lingyun pekoe and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 178-184.
- [19] LI S Q, SHAH N P. Characterization, antioxidative and bifidogenic effects of polysaccharides from *Pleurotus eryngii* after heat treatments[J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 240-249.
- [20] 周向辉. 响应面法优化发酵猴头菇多糖提取工艺研究[J]. 化学工程师, 2023, 37(5): 10-14, 52.  
ZHOU Xianghui. Optimization of fermented monkey head mushroom polysaccharide extraction process by response surface method[J]. Chemical Engineer, 2023, 37(5): 10-14, 52.
- [21] 杨文丽, 杨光, 杨波. 纳豆多糖发酵工艺的优化及清除自由基研究[J]. 工业微生物, 2018, 48(6): 39-45.  
YANG Wenli, YANG Guang, YANG Bo. Optimization of fermentation conditions and antioxidant activity of natto polysaccharides[J]. Industrial Microbiology, 2018, 48(6): 39-45.
- [22] WANG Y, CHEN X Y, WANG C, et al. The bacterial community and fermentation quality of mulberry (*Morus alba*) leaf silage with or without *Lactobacillus casei* and sucrose[J]. Bioresource Technology, 2019, 293: 122059.
- [23] 梅玉立, 黄先智, 丁晓雯. 响应面法优化发酵对桑叶生物碱、黄酮和多糖含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(6): 1764-1772.  
MEI Yuli, HUANG Xianzhi, DING Xiaowen. Effects of optimized fermentation on the content of alkaloids, flavonoids and polysaccharides in mulberry leaves by response surface methodology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(6): 1764-1772.
- [24] 周笑犁, 卢颖, 朱坤珑, 等. 刺梨果渣多糖的发酵制备工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(14): 24-29.  
ZHOU Xiaoli, LU Ying, ZHU Kunlong, et al. Optimization of polysaccharide from *Rosa roxburghii* Tratt pomace by fermentation and its antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2019, 40(14): 24-29.
- [25] HUANG F, HONG R Y, ZHANG R F, et al. Dynamic variation in biochemical properties and prebiotic activities of polysaccharides from Longan pulp during fermentation process[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 915-921.
- [26] 张腾霄, 王斌, 张希, 等. 枯草芽孢杆菌对香菇发酵液糖类成分降解规律研究[J]. 食品工业, 2017, 38(1): 146-149.  
ZHANG Tengxiao, WANG Bin, ZHANG Xi, et al. Study on the degradation of sugars in *Lentinus edodes* fermentation broth by *Bacillus subtilis*[J]. The Food Industry, 2017, 38(1): 146-149.
- [27] 刘辉, 田亚红, 冯建勇, 等. 发酵法提取板栗壳水溶性膳食纤维及脱色工艺的研究[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(11): 88-92.  
LIU Hui, TIAN Yahong, FENG Jianyong, et al. Study on extraction of soluble dietary fiber from chestnut shell by fermentation and decolorization technology[J]. Cereals & Oils, 2018, 31(11): 88-92.
- [28] HOU F, WU Y W, KAN L N, et al. Effects of ultrasound on the physicochemical properties and antioxidant activities of chestnut polysaccharide[J]. International Journal of Food Engineering, 2016, 12(5): 439-449.
- [29] ZHANG Z H, FAN S T, HUANG D F, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* NCU116 fermentation on *Asparagus officinalis* polysaccharide: Characterization, antioxidative, and immunoregulatory activities[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(41): 10703-10711.
- [30] CHEN Q Y, WANG R F, WANG Y, et al. Characterization and antioxidant activity of wheat bran polysaccharides modified by *Saccharomyces cerevisiae* and *Bacillus subtilis* fermentation[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 97: 103157.
- [31] 张力妮, 张静, 孙润广, 等. 麦冬多糖的修饰及其抗氧化活性与空间结构的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(1): 27-33.  
ZHANG Lini, ZHANG Jing, SUN Runguang, et al. Study on antioxidant activity and spatial structure of *Ophiopogon japonicus* polysaccharide with modified[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2014, 33(1): 27-33.
- [32] CAI L L, ZOU S S, LIANG D P, et al. Structural characterization, antioxidant and hepatoprotective activities of polysaccharides from *Sophora tonkinensis* Radix[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 184: 354-365.
- [33] 刘娜, 范明君, 安晓萍, 等. 灵芝发酵麸皮粗多糖的组成及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 45-50.  
LIU Na, FAN Mingjun, AN Xiaoping, et al. Composition and antioxidant activity analysis of crude polysaccharide from *Ganoderma lucidum* fermented wheat bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 45-50.
- [34] 刘春阳, 白金波, 杨尚青, 等. 枳椇子多糖的酸提取工艺优化及其理化性质与抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 148-156.  
LIU Chunyang, BAI Jinbo, YANG Shangqing, et al. Optimization of acid extraction process for polysaccharide from *Hovenia dulcis* seed and analysis of its antioxidant activity[J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 50(9): 148-156.
- [35] 马升, 沈城, 徐建雄. 发酵金针菇根多糖提取、结构及抗氧化活性[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 147-154.  
MA Sheng, SHEN Cheng, XU Jianxiong. Extraction, structure and antioxidant activity of polysaccharide from fermented *Flammulina velutipes* root[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 147-154.
- [36] LI X C, WANG X Z, CHEN D F, et al. Antioxidant activity and mechanism of protocathechuic acid *in vitro*[J]. Functional Foods in Health and Disease, 2011, 1(7): 232.
- [37] 罗灿, 刘玉洁, 陈劲舒, 等. 灵芝菌液体发酵玉竹产水溶性多糖的工艺优化和抗氧化性研究[J]. 中国酿造, 2022, 41(11): 180-186.  
LUO Can, LIU Yujie, CHEN Shaoshu, et al. Liquid fermentation process optimization and antioxidant activity of water-soluble polysaccharide production by *Ganoderma lucidum* from *Polygonatum odoratum*[J]. China Brewing, 2022, 41(11): 180-186.