

姬松茸抗氧化酶解液的制备

Preparation of antioxidant hydrolysate of *Agaricus blazei* Murill

陈灼娟 柯秀贤 黄 霄

CHEN Zhuo-juan KE Xiu-xian HUANG Xiao

(福州大学至诚学院, 福建 福州 350102)

(Fuzhou University Zhicheng College, Fuzhou, Fujian 350102, China)

摘要:目的:研究制备姬松茸抗氧化酶解液的工艺条件,并分析酶解液的营养成分。方法:将木瓜蛋白酶、纤维素酶、果胶酶按 $m_{\text{木瓜蛋白酶}} : m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$ 为 3 : 4 : 4 制备复合酶,酶解姬松茸子实体;采用响应面试验优化姬松茸酶解工艺。结果:复合酶水解姬松茸的最佳工艺为复合酶添加量 0.5%,酶解 pH 6.2,酶解温度 49 °C,酶解时间 147 min,该条件下,当姬松茸酶解液质量浓度为 2.0 mg/mL 时,其对 DPPH 自由基的清除率为 69.15%,表现出很强的抗氧化活性。酶解液中蛋白质含量为 $(1\,013.83 \pm 25.11)$ mg/100 mL,粗脂肪含量为 (150.17 ± 1.21) mg/100 mL,总糖含量为 (721.41 ± 8.74) mg/100 mL,多糖含量为 (138.83 ± 1.66) mg/100 mL,游离氨基酸含量为 (800.94 ± 12.36) mg/100 mL,其中必需氨基酸占 40.22%。结论:采用复合酶法制备的姬松茸酶解液具有较强的抗氧化活性和较高的营养价值,可开发为功能性食品。

关键词:姬松茸;抗氧化;酶解;抗氧化活性

Abstract: Objective: This study aimed to investigate the technological conditions for the preparation of antioxidant hydrolysate of *Agaricus blazei* Murill and analyze the nutritional components of the hydrolysate. Methods: Papain, cellulase and pectinase were prepared in $m_{\text{papain}} : m_{\text{cellulase}} : m_{\text{pectinase}}$ ratio of 3 : 4 : 4 to dissolve the fruiting bodies of *A. blazei*. Response surface test was used to optimize the enzymatic hydrolysis process of *A. blazei*. Results: The optimal conditions of compound enzyme hydrolysis were as follows: compound enzyme dosage 0.5%, pH 6.2, hydrolysis temperature 49 °C, hydrolysis time 147 min. Under these conditions, when the concentration of *A. blazei* hydrolysate was 2.0 mg/mL, the DPPH radical scavenging rate

was 69.15%, showing strong antioxidant activity. The protein content of enzymatic hydrolysate was $(1\,013.83 \pm 25.11)$ mg/100 mL, crude fat content was (150.17 ± 1.21) mg/100 mL, total sugar content was (721.41 ± 8.74) mg/100 mL, and polysaccharide content was (138.83 ± 1.66) mg/100 mL. The content of free amino acids was (800.94 ± 12.36) mg/100 mL, of which essential amino acids accounted for 40.22%. Conclusion: The hydrolysate of *A. blazei* prepared by compound enzyme method has strong antioxidant activity and high nutritional value, which can be developed as functional food.

Keywords: *Agaricus blazei* Murill; antioxidant; enzymatic hydrolysis process; antioxidant activity

姬松茸含蛋白质、多糖、核酸、多种氨基酸、维生素、甾醇类物质等营养成分^[1],具有提高免疫力、抗疲劳等多种生理功效。目前姬松茸产品形式较为单一,仍以鲜品、干品为主要销售产品,缺乏深加工制品。姬松茸自身酶活力较低,难以发生自溶。纤维素酶、果胶酶可以降解细胞壁中的纤维素、果胶,促进蛋白酶的水解作用^[2]。通过纤维素酶、果胶酶、蛋白酶的共同作用,可以增强鲜味氨基酸、核苷酸等物质的释放,增加鲜味^[3],同时促进抗氧化物质,如多糖^[4]、多肽^[5]、多酚^[6]等物质的溶出,起到清除自由基、保护细胞免受氧化损伤的目的^[7]。研究拟以姬松茸子实体为原料,以 DPPH 自由基清除率为试验指标,优化酶解工艺,制备姬松茸抗氧化产品,以期姬松茸功能性食品的开发利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

姬松茸干品:产于福建古田;

木瓜蛋白酶(800 U/mg)、果胶酶(500 U/mg)、纤维素酶(400 U/mg):生物纯,上海源叶生物科技有限公司;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH):色谱纯,上海麦克林化工有限公司;

基金项目:福建省教育厅中青年教师教育科研项目(编号: JAT191095);福建省大学生创新创业项目(编号: 202113470026)

作者简介:陈灼娟(1983—),女,福州大学至诚学院讲师,硕士。
E-mail: 304943501@qq.com

收稿日期:2022-05-07 **改回日期:**2022-11-24

抗坏血酸:分析纯,天津市北辰方正试剂厂;

氨基酸混合标准溶液:色谱纯,百灵威科技有限公司;

浓硫酸:分析纯,西陇化工股份有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

紫外分光光度计:UV-520 型,上海元析仪器有限公司;

台式冷冻离心机:3K15 型,德国 Sigma 公司;

恒温水浴锅:DK-S26 型,上海森信实验仪器有限公司;

酸度计:Fe28 Standard 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

凯氏定氮仪:B-324 型,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;

氨基酸分析仪:Biochrom 30+ 型,英国 biochrom 公司。

1.2 方法

1.2.1 酶解工艺流程 根据前期试验,按 m 木瓜蛋白酶: m 纤维素酶: m 果胶酶 为 3:4:4 制备复合酶。姬松茸实体干燥至恒重,粉碎过 60 目筛。称取 5.0 g 菌粉,按液料比 20:1 (mL/g) 加入蒸馏水,调节 pH 至 7.5,酶解温度 45 °C,添加 0.4% 复合酶进行酶解,每隔 30 min 搅拌均匀,酶解结束后,100 °C 灭酶 10 min,4 °C、3 000 r/min 离心 30 min,取上清,得姬松茸酶解液。

1.2.2 酶解工艺优化

(1) 单因素试验:按 1.2.1 酶解工艺进行酶解,固定其他条件,以酶解液 DPPH 自由基清除率为试验指标,考察复合酶添加量(0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%)、酶解 pH(4.5,5.5,6.5,7.5,8.5)、酶解温度(30,40,50,60,70 °C)、酶解时间(60,90,120,150,180 min)对酶解工艺的影响。

(2) 响应面试验:在单因素试验基础上,选择酶解 pH、酶解温度、酶解时间 3 个因素,根据 Box-Behnken 中心组合试验设计原理,采用 Design-Expert 8.0.5 软件设计三因素三水平响应面优化试验^[8]。

1.2.3 DPPH 自由基清除能力测定 参考 Yang 等^[9]的方法并修改。取 2 mL 姬松茸酶解液稀释液,加入 2 mL 0.02 mol/L 的 DPPH 溶液,混匀,避光反应 30 min,测定 517 nm 处吸光值。按式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$X = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

X ——自由基清除率,%;

A_0 ——蒸馏水代替样品测得的吸光度值;

A_1 ——样品组的吸光度值;

A_2 ——无水乙醇代替 DPPH 测得的吸光度值。

1.2.4 蛋白质含量测定 按 GB 5009.5—2016 执行。

1.2.5 总糖含量测定 按 GB/T 15672—2009 执行,以葡萄糖含量为纵坐标,吸光值为横坐标,绘制葡萄糖标准曲线,方程曲线为 $Y=123.19A$, $R^2=0.995$ 。

1.2.6 还原糖含量测定 采用 3,5-二硝基水杨法^[10]。

1.2.7 粗脂肪含量测定 按 GB 5009.6—2016 执行。

1.2.8 氨基酸含量测定 按 GB 5009.124—2016 执行。

1.2.9 数据处理 每个试验重复 3 次,结果以平均值±标准差表示,采用 Excel 2010 和 Design-Expert 8.0.5 软件分析处理数据。

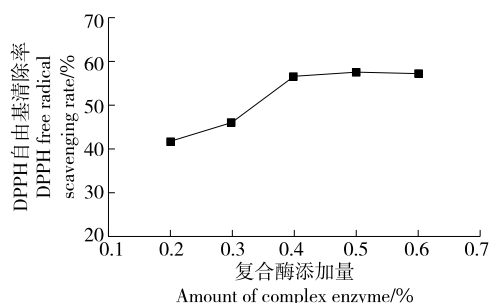
2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 复合酶添加量 由图 1 可知,当复合酶添加量为 0.2%~0.4% 时,随着酶添加量的增大,DPPH 自由基清除率先显著增加后增幅减缓。当复合酶添加量为 0.5% 时,DPPH 自由基清除率达最大值(57.62%)。当复合酶添加量为 0.6% 时,DPPH 自由基清除率与酶添加量为 0.5% 的无显著差异,是因为酶添加量的增大可以增加酶与底物的作用,提高底物水解程度^[11],抗氧化产物生成增多,DPPH 自由基清除率也随之增大。酶量充足时,底物已充分酶解,DPPH 自由基清除率也不再随着酶添加量的增大而升高。因此,选择复合酶添加量为 0.5%。

2.1.2 酶解 pH 由图 2 可知,当 pH 值为 6.5 时,DPPH 自由基清除率最大,pH 高于或低于 6.5,DPPH 自由基清除率均有所降低。这是因为环境中的 pH 值会影响酶的空间构象和底物的解离状态^[12],每种酶只有在特定的 pH 条件下才具有最高的生物活性,pH 过高或过低均会影响酶的活性,从而降低底物的水解程度^[13]。因此,选择 pH 5.5,6.5,7.5 进行响应面试验。

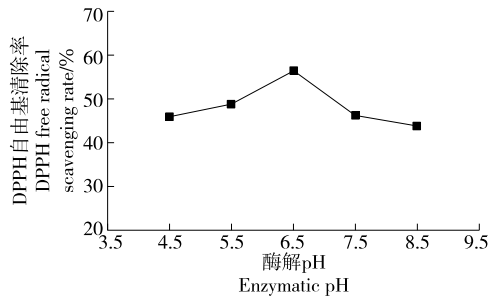
2.1.3 酶解温度 由图 3 可知,当酶解温度为 30~50 °C 时,随着酶解温度的上升,DPPH 自由基清除率增大。当酶解温度为 60 °C 时,DPPH 自由基清除率下降,是由于酶具有最适温度^[14],高于酶解最适温度,酶发生变构,活性降低,导致生成的抗氧化活性物质减少,DPPH 自由基



酶解 pH 7.5,酶解温度 45 °C,酶解时间 120 min

图 1 复合酶添加量对酶解液 DPPH 自由基清除率的影响

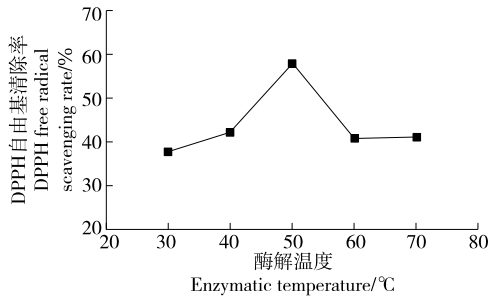
Figure 1 Effects of complex enzyme amount on DPPH free radical scavenging rate



复合酶添加量 0.5%, 酶解温度 45 ℃, 酶解时间 120 min

图 2 pH 值对酶解液 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 2 Effects of enzymatic pH on DPPH free radical scavenging rate



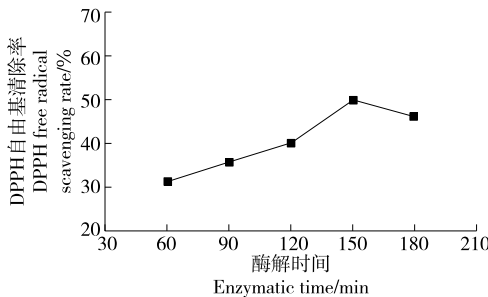
复合酶添加量 0.5%, 酶解 pH 6.5, 酶解时间 120 min

图 3 酶解温度对酶解液 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 3 Effects of enzymatic temperature on DPPH free radical scavenging rate

清除率也随之减少。因此,选择 40, 50, 60 ℃ 进行响应面试验。

2.1.4 酶解时间 由图 4 可知,当酶解时间为 60 ~ 150 min 时,随着酶解时间的延长,DPPH 自由基清除率增大。这是因为在一定范围内,酶解时间越长,底物水解越充分^[15],抗氧化活性产物增多。当酶解时间 > 150 min 时,继续延长酶解时间,DPPH 自由基清除率下降,可能是由于酶解时间过长,水解出过多的游离氨基酸,从而导致抗氧化活性降低^[16]。因此,选择 120, 150, 180 min 进行响应面试验。



复合酶添加量 0.5%, 酶解温度 50 ℃, 酶解 pH 6.5

图 4 酶解时间对酶解液 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 4 Effects of enzymatic time on DPPH free radical scavenging rate

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面试验设计及结果 在单因素试验基础上,选择酶解 pH、酶解温度和酶解时间 3 个因素,设计三因素三水平的 BBD 试验,以 DPPH 自由基清除率为试验指标。响应面试验因素水平见表 1,试验设计及结果见表 2。

利用 Design-Expert 8.0 对数据进行回归分析,得到拟合方程为:

$$Y = -645.81 + 91.87A + 6.72B + 3.59C - 0.4875AB + 0.0579AC + 0.0044BC - 6.1455A^2 - 0.0445B^2 - 0.0142C^2 \quad (2)$$

由表 3 可知,模型 P 值 < 0.000 1,说明回归方程模型高度显著。失拟项 $P = 0.2142 > 0.05$,说明该模型拟合良好,相关系数 $R^2 = 0.9761$,与校正系数 $R_{adj}^2 = 0.9453$ 相近,说明拟合方程可以较好地解释各因素与响应值之间的真实关系。由 F 值可知,各因素对酶解液 DPPH 自由基清除率影响的顺序为酶解 pH > 酶解温度 > 酶解时间。

2.2.2 各因素交互作用 结合表 3 和图 5 可知,酶解 pH、酶解温度、酶解时间对酶解液的 DPPH 自由基清除

表 1 Box-Behnken 试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels of Box-Behnken design

水平	A 酶解 pH	B 酶解温度/℃	C 酶解时间/min
-1	5.5	40	120
0	6.5	50	150
1	7.5	60	180

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken design and experimental results

试验号	A	B	C	DPPH 自由基清除率/%
1	-1	-1	0	58.19
2	1	0	1	42.86
3	0	0	0	67.19
4	0	0	0	67.86
5	0	-1	-1	53.88
6	-1	1	0	61.26
7	0	0	0	65.00
8	0	1	1	49.22
9	-1	0	-1	57.68
10	0	0	0	69.77
11	1	-1	0	62.15
12	0	0	0	67.35
13	0	-1	1	49.47
14	1	0	-1	45.15
15	0	1	-1	48.30
16	-1	0	1	48.44
17	1	1	0	45.72

表 3 响应面设计回归模型方差分析[†]
Table 3 Analysis of variance of experimental results
of Box-Behnken design

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 308.51	9	145.39	31.71	<0.000 1	* *
A	110.15	1	110.15	24.02	0.001 8	* *
B	46.01	1	46.01	10.03	0.015 8	*
C	28.24	1	28.24	6.16	0.042 1	*
AB	95.06	1	95.06	20.73	0.002 6	* *
AC	12.06	1	12.06	2.63	0.148 9	
BC	7.09	1	7.09	1.55	0.253 7	
A ²	159.02	1	159.02	34.68	0.000 6	* *
B ²	83.68	1	83.68	18.25	0.003 7	* *
C ²	685.20	1	685.20	149.45	<0.000 1	* *
残差	32.09	7	4.58			
失拟项	20.46	3	6.82	2.35	0.214 2	不显著
纯误差	11.63	4	2.91			
总误差	1 340.60	16				

[†] * 表示差异显著 ($P<0.05$); ** 表示差异极显著 ($P<0.01$); $R^2=0.976\ 1$, $R^2_{\text{adj}}=0.945\ 3$ 。

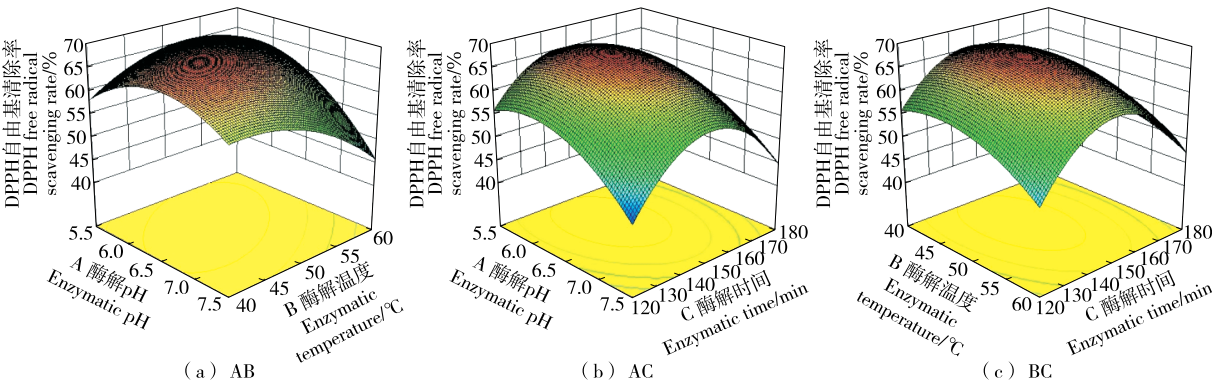


图 5 各因素交互作用的响应面

Figure 5 Response surface of interactive effects of experimental conditions

功能的活性物质^[18]。试验条件下制得的酶解液,营养价值高可用开发为调味品、功能性饮料等产品。

2.4 游离氨基酸含量分析

由表 4 可知,姬松茸酶解液中含有常见的 17 种氨基酸,总量达 800.94 mg/100 mL,必需氨基酸占氨基酸总量的 40.22%,说明姬松茸酶解液具有较高的营养价值。酶解液中谷氨酸和天门冬氨酸含量最高,谷氨酸和天门冬氨酸是形成鲜味的重要物质,可以使酶解液产生鲜美的口味,表明通过酶解反应,可以提高食用菌的营养价值,释放鲜味成分,是一种具有前景的食用菌加工方式。

3 结论

姬松茸抗氧化酶解液的最佳工艺条件为复合酶添加量 0.5%,酶解 pH 6.2,酶解温度 49 ℃,酶解时间 147 min。该方法制作的酶解液抗氧化活性强,蛋白质、

率影响显著,酶解 pH 与酶解温度的交互作用明显,而酶解温度与酶解时间、酶解 pH 与酶解时间的交互作用不明显^[17]。

2.2.3 验证实验 利用 Design-Expert 8.0 软件预测得到姬松茸抗氧化酶解工艺的最优条件为酶解 pH 6.2,酶解温度 49 ℃,酶解时间 147 min,此时预测 DPPH 自由基清除率为 68.18%。在该条件下进行实验验证,重复 3 次,测得 DPPH 自由基清除率为 69.13%,与模型预测值差 1.37%,说明响应面优化得到的模型回归方程及最佳条件可靠,该回归方程可应用于实践。

2.3 姬松茸酶解液的主要成分含量

最佳试验条件下,测得酶解液中蛋白质含量为 (1 013.83±25.11) mg/100 mL,脂肪含量为 (150.17±1.21) mg/100 mL,为低热量食品,总糖含量为 (721.41±8.74) mg/100 mL,多糖含量为 (138.83±1.66) mg/100 mL。食用菌中的蛋白质容易被人体消化吸收,是一种良好的蛋白质来源,且姬松茸多糖具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎、提高免疫力以及降血糖等生理功能,是一种具有多种生理

表 4 酶解液中游离氨基酸含量

Table 4 Content of free amino acids in enzymatic hydrolysis solution mg/100 mL

氨基酸种类	含量	氨基酸种类	含量
天冬氨酸	86.35±1.44	异亮氨酸	39.05±0.59
苏氨酸	40.51±0.85	亮氨酸	67.65±1.12
丝氨酸	31.35±0.43	酪氨酸	20.95±0.46
谷氨酸	86.35±1.66	苯丙氨酸	41.25±0.68
脯氨酸	23.10±0.67	组氨酸	18.70±0.22
甘氨酸	56.11±0.41	赖氨酸	48.44±0.73
丙氨酸	67.65±0.98	精氨酸	55.23±0.58
半胱氨酸	7.15±0.14	必需氨基酸(EAA)	322.15±4.87
缬氨酸	46.75±0.33	总量(TFAA)	800.94±12.36
蛋氨酸	64.35±1.07		

多糖及游离氨基酸含量高,必需氨基酸占氨基酸总量的40.22%,谷氨酸和天门冬氨酸含量最高,说明酶解液具有丰富的营养价值及鲜美的口感。后续还需对酶解液的组分结构及体外抗氧化活性进行探究。

参考文献

- [1] 林戎斌, 林陈强, 张慧, 等. 姬松茸食药价值研究进展[J]. 食用菌报, 2012, 19(2): 117-122.
LIN R Q, LIN C H, ZHANG H, et al. Research progress on edible and medicinal value of *Agaricus blazei*[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2012, 19(2): 117-122.
- [2] 陈海强, 胡汝晓, 黄晓辉, 等. 复合酶法水解香菇工艺的研究[J]. 微生物学通报, 2012, 39(1): 62-67.
CHEN H Q, HU R X, HUANG X H, et al. Study on hydrolysis technology of *Lentinula edodes* degraded by composite enzyme[J]. *Microbiology China*, 2012, 19(2): 62-67.
- [3] 段秀辉, 黄文, 李露, 等. 生物酶技术在食用菌加工中的应用[J]. 食用菌, 2014, 36(6): 3-6.
DUAN X H, HUANG W, LI L, et al. Application of biological enzyme technology in edible fungi processing[J]. *Edible Fungi*, 2014, 36(6): 3-6.
- [4] 王馨. 姬松茸多糖生物活性研究与产品开发[D]. 成都: 西华大学, 2020: 7-8.
WANG X. Extraction and purification of *Agaricus blazei* polysaccharide and biological activity and product development[D]. Chengdu: Xihua University, 2020: 7-8.
- [5] 冯晴霞. 姬松茸多肽抗衰老作用及其机制研究[D]. 吉林: 北华大学, 2020: 1-3.
FENG Q X. Anti-aging effect of *Agaricus blazei* polypeptide and its mechanism[D]. Jilin: Beihua University, 2020: 1-3.
- [6] 邢鹏. 姬松茸多酚分离纯化及抗氧化活性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018: 2-3.
XIN P. Studies on purification and Antioxidant activity of Brazil mushroom polyphenols [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018: 2-3.
- [7] 王耀冉, 赵妍, 陈明杰, 等. 8种食用菌蛋白及其酶解产物抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 134-138.
WANG Y R, ZHAO Y, CHEN M J, et al. Study on antioxidant activities of proteins and enzymatic hydrolysates of eight edible fungi[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(9): 134-138.
- [8] 俞萍, 岳煜贤, 张宇, 等. 响应面法优化人参糖蛋白制备工艺[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 194-199.
YU P, YUE Y X, ZHANG Y, et al. Optimization of preparation of ginseng glycoprotein by response surface methodology[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(7): 194-199.
- [9] YANG H, HUA J L, WANG C. Anti-oxidation and anti-aging activity of polysaccharide from *Malus micromalus* Makino fruit wine[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 121: 1 203-1 212.
- [10] 郭华, 刁全平, 张博, 等. 杨树口蘑多糖的超声波辅助提取工艺及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 180-184.
GUO H, DIAO Q P, ZHANG B, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Tricholoma populinum* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(5): 180-184.
- [11] 廖慧琦, 曹少谦, 杨华, 等. 鲈鱼免疫活性肽的酶解工艺优化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 163-170.
LIAO H Q, CAO S Q, YANG H, et al. Enzymatic hydrolysis of immune active peptide in chub mackerel [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(14): 163-170.
- [12] 陶美洁, 孟粉, 董烨, 等. 贻贝蒸煮液酶解工艺的优化[J]. 中国食品学报, 2020, 20(12): 209-219.
TAO M J, MENG F, DONG Y, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of mussel cooking liquor[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(12): 209-219.
- [13] 陈瑜, 马剑锋, 许丹, 等. 基于两步水解法制备三疣梭子蟹调味品的酶解工艺优化研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2022, 48(3): 321-335.
CHEN Y, MA J F, XU D, et al. Optimization of enzymolysis technology for preparing *Portunus trituberculatus* seasoning based on a two-step hydrolysis method[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2022, 48(3): 321-335.
- [14] 董彩虹, 温青玉, 李天齐, 等. 复合酶法制备小麦面筋蛋白咸味酶解液的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 222-230.
DONG C H, WEN Q Y, LI T Q, et al. Optimization of the technology for preparing salty wheat gluten protein hydrolysate by compound enzyme method[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(3): 222-230.
- [15] 黄雨, 刘魏红, 王洪阳, 等. 裙带菜孢子叶仿生酶解工艺优化及酶解肽的抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 180-189.
HUANG Y, LIU W H, WANG H Y, et al. Optimization of bionic enzymatic hydrolysis of *Undaria pinnatifida* sporophyll and antioxidant activity analysis of its hydrolysate peptides[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(13): 180-189.
- [16] 邵志芳, 皇甫洁, 刘文颖, 等. 基于乳清蛋白粉水解产物抗氧化活性优化酶解工艺[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 143-149, 156.
SHAO Z F, HUANG F J, LIU W Y, et al. Optimization of enzymolysis technology of whey protein powder hydrolysate based on its antioxidant activity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(18): 143-149, 156.
- [17] 孙小飞, 罗国瑞, 李英美, 等. 仿刺参精酶解工艺的优化及酶解液的抗氧化活性[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 217-224.
SUN X F, LUO G R, LI Y M, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of *apostichopus japonicus* sperm and antioxidant activity of hydrolysate[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(4): 217-224.

(下转第 232 页)

- [38] SÁEZ-JIMÉNEZ V, SANDRA A, VICTOR G, et al. Improving the oxidative stability of a high redox potential fungal peroxidase by rational design[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0124750.
- [39] MLGPA B, MPMA C, LRCA B. Presence of *aiiA* homologue genes encoding for N-Acyl homoserine lactone-degrading enzyme in aflatoxin B₁ decontaminating *Bacillus* strains with potential use as feed additives[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 124: 316-323.
- [40] KUMAR V, BAHUGUNA A, RAMALINGAM S, et al. Recent technological advances in mechanism, toxicity, and food perspectives of enzyme-mediated aflatoxin degradation[J]. Food Science and Nutrition, 2021, 62(20): 5 395-5 412.
- [41] GUAN Z B, QUAN L, WANG H R, et al. Bacterial laccases: Promising biological green tools for industrial applications[J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2018, 75(19): 3 569-3 592.
- [42] WANG X, BAI Y, HUANG H, et al. Degradation of aflatoxin B₁ and zearalenone by bacterial and fungal laccases in presence of structurally defined chemicals and complex natural mediators[J]. Toxins, 2019, 11(10): 609.
- [43] WANG J, OGATA M, HIRAI H, et al. Detoxification of aflatoxin B₁ by manganese peroxidase from the white-rot fungus *Phanerochaete sordida* YK-624[J]. FEMS Microbiology Letters, 2011, 314(2): 164-169.
- [44] LOI M, RENAUD J B, ROSINI E, et al. Enzymatic transformation of aflatoxin B₁ by Rh_DypB peroxidase and characterization of the reaction products[J]. Chemosphere, 2020, 250(7): 126296.
- [45] ZHAO L H, GUAN S, GAO X, et al. Preparation, purification and characteristics of an aflatoxin degradation enzyme from *Myxococcus fulvus* ANSM068 [J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 110(1): 147-155.
- [46] LIANG X, MOHAMED E A, LANCINE S, et al. Novel aflatoxin-degrading enzyme from *Bacillus shackletonii* L7[J]. Toxins, 2017, 9(1): 36.
- [47] LIU D L, YAO D S, LIANG R, et al. Detoxification of aflatoxin B₁ by enzymes isolated from *armillariella tabescens* [J]. Food & Chemical Toxicology an International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association, 1998, 36(7): 563-574.
- [48] TRIPATHI S, MISHRA H N. Modeling and optimization of enzymatic degradation of aflatoxin B₁(AFB₁) in red chili powder using response surface methodology [J]. Food & Bioprocess Technology, 2011, 4(5): 770-780.
- [49] SAMUEL M S, SIVARAMAKRISHNA A, MEHTA A. Degradation and detoxification of aflatoxin B₁ by *pseudomonas putida*[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 86: 202-209.
- [50] CUI R Y, ZHENG J, WU C D, et al. Effect of different halophilic microbial fermentation patterns on the volatile compound profiles and sensory properties of soy sauce moromi [J]. European Food Research & Technology, 2015, 240(2): 669-670.

(上接第 60 页)

- [14] 刘霄希. 基于柔性材料和 SERS 技术的番茄表面农药残留快速检测的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 50-51.
LIU X X. Rapid detection of pesticide residues on tomato surface based on flexible materials and SERS technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 50-51.
- [15] 占绣萍, 刘彬, 黄兰淇, 等. 应用胶体金法检测叶类蔬菜中吡虫啉、多菌灵、啉虫脒、噻虫嗪的残留量分析[J]. 农药科学与管理, 2021, 42(10): 24-31.
ZHAN X P, LIU B, HUANG L Q, et al. Determination of imidacloprid, carbendazim, acetamiprid and thiamethoxam residues in leafy vegetables by colloidal gold immunochromatography[J]. Pesticide Science and Administration, 2021, 42(10): 24-31.
- [16] WANG M S, ZHU W B, ZHAO L Y, et al. Simultaneous detection of thiabendazole and carbendazim in foods based on two-color up conversion and magnetic separation nanoparticles fluorescence immunoassay[J]. European Food Research and Technology, 2021, 248(1): 85-94.
- [17] LI J, MA X G, ZHANG M Y, et al. Preparation of molecularly imprinted polymer sensor on electrochemically reduced graphene oxide modified electrode for selective probing of thiabendazole[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 166(2): 84-91.
- [18] 唐录华, 秦思楠, 高林, 等. 基于对巯基苯胺膜的高灵敏己烯雌酚印迹传感器的制备及应用[J]. 化工进展, 2019, 38(11): 5 074-5 083.
TANG L H, QIN S N, GAO L, et al. Preparation and application of sensitive diethylstilbestrol imprinting sensor based on p-aminothiophenol film [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(11): 5 074-5 083.

(上接第 187 页)

- [18] 徐勇, 孙培龙, 张安强. 姬松茸多糖提取、生物活性及产品开发生研究进展[J]. 食药菌, 2017, 25(5): 308-312.
XU Y, SUN P L, ZHANG A Q. Research progress on preparation analysis, biological activities and product development of polysaccharides from *Agaricus Blazei* Murill [J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2017, 25(5): 308-312.
- [19] 艾有伟, 刘超群, 陈艳丽. 香菇、平菇酶解液成分及其免疫功能研究[J]. 食品科学, 2011, 32(19): 258-261.
AI Y W, LIU C Q, CHEN Y L. Composition analysis and immunological functions of enzymatic hydrolysates of *lentinus edodes* and oyster mushroom prepared with papain [J]. Food Science, 2011, 32(19): 258-261.