

β -葡聚糖酶降解黑木耳多糖工艺研究

吴迪¹,王旭升¹,于特¹,曹慧馨¹,赵竞²,吴琼^{1*}

(1. 长春大学 食品科学与工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春市十一高中, 吉林 长春 130000)

摘要:为降低黑木耳多糖的分子量,提高黑木耳多糖的利用率,采用 β -葡聚糖酶对黑木耳多糖进行酶解试验。在单因素试验基础上,采用正交试验确定最佳酶解工艺条件,得出4种因素对 β -葡聚糖酶的活力影响顺序:加酶量>酶解pH值>酶解时间>酶解温度,最优工艺条件:加酶量700 U/g、酶解pH5.2、酶解时间2 h、酶解温度30℃,在该条件下,得到的还原糖生成量为42.64 mg/g。采用高效液相色谱测定分子量、傅立叶红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)及紫外光谱测定光谱学性质,结果表明,酶解前后多糖分子量降低了127 912 Da,多糖特征峰没有发生改变,且酶解前后黑木耳多糖溶解率提高了3.6%。

关键词: β -葡聚糖酶;黑木耳;多糖;酶解;单因素试验

Optimization of β -Glucanase Degradation of *Auricularia auricula* Polysaccharides

WU Di¹, WANG Xu-sheng¹, YU Te¹, CAO Hui-xin¹, ZHAO Jing², WU Qiong^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Changchun University, Changchun 130022, Jilin, China;

2. Changchun City Eleven High School, Changchun 130000, Jilin, China)

Abstract: In order to reduce the molecular weight and improve the utilization rate of *Auricularia auricula* polysaccharides, used β -glucanase for the enzymatic hydrolysis of *A. auricula* polysaccharides. On the basis of single factor experiment, orthogonal test was designed to determine the optimal conditions of enzymatic hydrolysis. The influences of the four factors on β -glucanase activity were ranked in a descending order of enzyme amount, pH, time, and temperature. The conditions for the degradation were optimized as 700 U/g enzyme, pH5.2, 2 h, and 30℃, under which the yield of reducing sugars was 42.64 mg/g. The molecular weight was determined by high performance liquid chromatography, and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and ultraviolet spectroscopy were employed to determine the spectroscopic properties. The polysaccharides after enzymatic hydrolysis showed a decrease of 127 912 Da in molecular weight, no variation of the characteristic peaks, and an increase of 3.6% in dissolution rate.

Key words: β -glucanase; *Auricularia auricula*; polysaccharide; enzymatic hydrolysis; single factor test

引文格式:

吴迪,王旭升,于特,等. β -葡聚糖酶降解黑木耳多糖工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(6): 130-135.

WU Di, WANG Xusheng, YU Te, et al. Optimization of β -Glucanase Degradation of *Auricularia auricula* Polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2022, 43(6): 130-135.

黑木耳(*Auricularia auricula*)又称为黑菜、桑耳,木耳科木耳属真菌^[1],是一种具有价值的食用菌^[2],其中的黑木耳多糖具有抗肿瘤、抗凝血、抗氧化、降血脂、降血糖等多种生物活性^[3]。但天然的黑木耳多糖分子量大、形成的溶液黏度较大^[4-5],不利于黑木耳多糖的进

一步开发及利用,因此,将高分子量的黑木耳多糖降解成低分子量且溶解黏度小的酶解多糖^[6],对黑木耳多糖的应用具有重要意义。研究表明,酶解后多糖的生物活性会得到明显的提高^[7],多糖酶解主要是通过改变多糖的分子结构、分子质量、溶解度及取代基的

基金项目:吉林省科技厅科技计划项目(2021LY426L25)

作者简介:吴迪(1998—),女(汉),硕士,研究方向:功能性碳水化合物。

* 通信作者:吴琼(1978—),女(汉),副教授,博士,研究方向:功能性碳水化合物。

种类、数量以实现其理化性质的改变、生物活性的增强等效果^[8-9]。

黑木耳多糖主要由水溶性 β -D-葡聚糖、水不溶性 β -D-葡聚糖和2种酸性杂多糖构成^[10-11],且两种 β -D-葡聚糖都是由 β -1,3-糖苷键连接而成。 β -葡聚糖酶(β -glucanase)是可降解 β -1,3-糖苷键、 β -1,4-糖苷键的水解酶,可使多糖改性增溶^[12-13],基于此,本试验将 β -葡聚糖酶作为外源酶酶解黑木耳多糖,并通过调节加酶量、酶解pH值、酶解时间和酶解温度进行试验,降低黑木耳多糖的分子量^[14],得到最佳降解效果。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑木耳:市售;氢氧化钠、柠檬酸:北京化工厂;3-5二硝基水杨酸:国药集团化学试剂有限公司; β -葡聚糖酶(20 000 U/g):河南万邦实业有限公司;溴化钾:天津科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

高效液相色谱仪(SPD-20A):岛津仪器(苏州)有限公司;红外光谱仪(NICOLET iS5):赛默飞世尔科技有限公司;集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101S):巩义市予华仪器有限责任公司;医用离心机(3K15):曦玛离心机有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 黑木耳多糖的提取

称取黑木耳粉末40 g,采用水提醇沉法对黑木耳多糖进行提取^[15-16],以料液比1:10(g/mL)加入80%的乙醇溶液,70℃下浸提2次,每次2 h,将滤渣60℃烘干,以料液比1:30(g/mL)称取滤渣并加入蒸馏水,90℃下浸提2次,每次4 h,3 500 r/min离心20 min得上清液,旋转蒸发至原体积的1/4,所得的浓缩溶液即为黑木耳粗多糖。向浓缩溶液中加入三氯乙酸,4℃冰箱中静置24 h,4 000 r/min离心20 min得黑木耳多糖^[17],加入4倍体积的无水乙醇,将其放入4℃冰箱中静置24 h,8 000 r/min离心20 min,所得沉淀冻干,得黑木耳多糖^[18]。

1.3.2 黑木耳多糖的降解

取100 mL 10 mg/mL黑木耳多糖溶液,通过添加柠檬酸或NaOH调节酶解pH值4.4、4.8、5.2、5.6、6.0,按加酶量300、500、700、900、1 100 U/g分别添加至配制好的多糖溶液中,在酶解温度10、20、30、40、50℃,酶解时间1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h下,测定筛选最佳反应条件。

在最佳工艺条件下制备黑木耳酶解多糖,通过添

加柠檬酸或NaOH将黑木耳多糖溶液的pH值调至5.2,按加酶量700 U/g加入 β -葡聚糖酶,置于30℃恒温振荡水槽中反应2 h,反应后沸水浴10 min灭活 β -葡聚糖酶,6 000 r/min离心5 min,加入4倍体积无水乙醇,将其放入4℃冰箱中静置24 h,8 000 r/min离心20 min,所得沉淀冻干,得黑木耳酶解多糖。

1.3.3 还原糖生成量测定

量取0.5 mL离心后的上清液放入试管中,加入1.5 mL二硝基水杨酸试剂,沸水浴5 min,加蒸馏水定容至10 mL。于540 nm处测定吸光度,3次平行试验,通过下式计算还原糖生成量。

$$\text{还原糖}/\% = \frac{\text{从标准曲线中算出的还原糖浓度} \times \text{样品体积}}{\text{样品质量}} \times 100$$

1.3.4 溶解率的测定

取酶解前后的黑木耳多糖10 mg于EP管中,充分溶解,在8 000 r/min离心10 min,除去上清液,在50℃下烘至完全干燥,称重,通过下式计算溶解率。

$$\text{溶解率}/\% = \frac{\text{酶解前质量} - \text{酶解后质量}}{\text{酶解前质量}} \times 100$$

1.3.5 多糖的结构分析

1.3.5.1 分子量测定

将样品配制成5 mg/mL的溶液,0.22 μ m微孔滤膜过滤后取20 μ L溶液进样。根据标准曲线计算样品分子量。采用高效液相色谱对酶解前后黑木耳多糖的分子量进行测定,分子量标准曲线如图1所示。

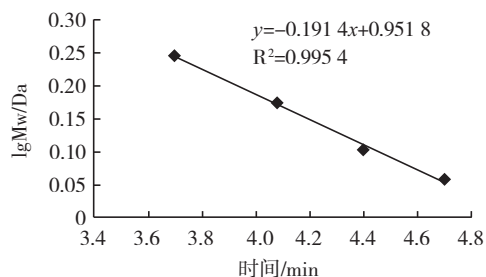


图1 分子量测定标准曲线

Fig.1 Standard curve for molecular weight determination

以RID-10A示差折射检测器,不锈钢色谱柱7.8 mm×300 mm,柱温为35℃,流动相为超纯水,流速为0.5 mL/min,分子量标准曲线的绘制以保留时间为横坐标,以标准葡聚糖的分子量对数(lg Mw)为纵坐标,得标准曲线 $y = -0.1914x + 0.9518$, $R^2 = 0.9954$ 。

1.3.5.2 红外光谱测定

在相对干燥环境下,取1 mg样品与0.18 g溴化钾混合研磨均匀,压片,在波段400 cm^{-1} ~4 000 cm^{-1} 处进行红外光谱扫描^[19],检测样品中是否存在多糖的特征吸收峰。

1.3.5.3 紫外-可见光谱分析

用去离子水配制浓度为 0.3 mg/mL 的 β -葡聚糖酶解黑木耳多糖溶液,以去离子水作为空白对照,在 200 nm~800 nm 内进行紫外全波段扫描,检测样品中是否具有核酸和蛋白质的特征吸收峰。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 加酶量对还原糖生成量的影响

加酶量对还原糖生成量的影响如图 2 所示。

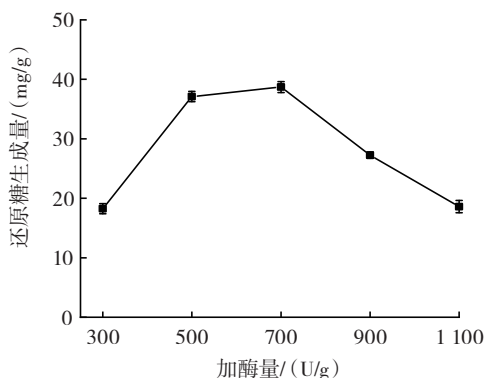


图 2 加酶量对黑木耳多糖降解效率的影响

Fig.2 Effect of enzyme dosage on the degradation efficiency of *Auricularia auricula* polysaccharide

还原糖生成量随加酶量增加先增大后减小,这是由于当加酶量大于一定值后,底物被充分利用,还原糖生成量不再增多,如果继续增加 β -葡聚糖酶的量会导致酶之间出现相互附着的情况,降低了酶与底物之间的作用效果,导致酶不能更好地分解黑木耳多糖,因此,在以还原糖的生成量为参考指标时,最适加酶量在 300 U/g~700 U/g。

2.1.2 酶解 pH 值对还原糖生成量的影响

酶解 pH 值对还原糖生成量的影响如图 3 所示。

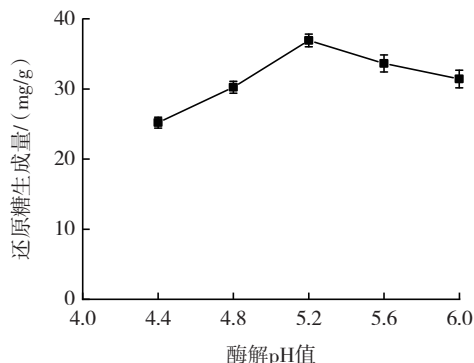


图 3 酶解 pH 值对黑木耳多糖降解效率的影响

Fig.3 Effect of pH value on the degradation efficiency of *Auricularia auricula* polysaccharide

还原糖生成量会根据 pH 值的不同而变化,pH 值过高或过低时还原糖生成量都较低,这是由于在多糖溶液中 pH 值大于或小于 β -葡聚糖酶的最适 pH 值时,酶的活性被抑制,导致 β -葡聚糖酶对黑木耳多糖分子的催化作用变弱,因此影响了 β -葡聚糖对黑木耳多糖的降解效率。因此,酶解最适 pH 值在 4.8~5.6。

2.1.3 酶解时间对还原糖生成量的影响

酶解时间对还原糖生成量的影响如图 4 所示。

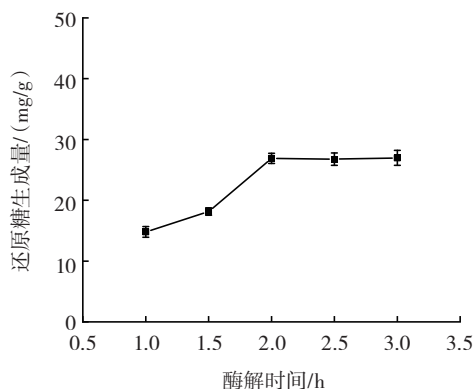


图 4 酶解时间对黑木耳多糖降解效率的影响

Fig.4 Effect of enzymolysis time on the degradation efficiency of *Auricularia auricula* polysaccharide

还原糖生成量随着酶解时间的增加先增大后趋于平缓,这是因为随着酶解时间的延长,底物的多糖溶液在 β -葡聚糖酶的作用下不断减少,在 2 h 后底物被完全利用,曲线开始呈现平滑趋势,因此,确定最佳酶解时间在 2 h~3 h。

2.1.4 酶解温度对还原糖生成量的影响

酶解温度对还原糖生成量的影响如图 5 所示。

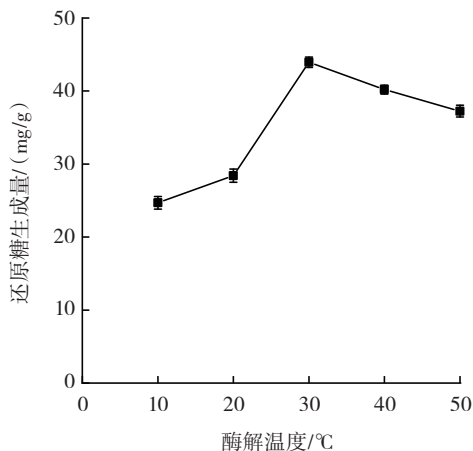


图 5 酶解温度对黑木耳多糖降解效率的影响

Fig.5 Effect of enzymolysis temperature on the degradation efficiency of *Auricularia auricula* polysaccharide

还原糖的生成量随着温度的升高,先上升后下

降,这是由于在 30 ℃之前,随着温度的升高,黑木耳多糖分子以及 β -葡聚糖酶分子之间的运动速度加快,相互接触的机会增大^[20],使得反应速率加快,因此曲线呈快速上升的趋势,在 30 ℃时达到最大值;当反应温度大于 30 ℃时, β -葡聚糖酶由于吸收了过多热量,自身化学键不稳定^[21],发生断裂,最终导致酶活性降低甚至丧失,黑木耳多糖的降解效率也随之降低,因此,最适酶解温度在 25 ℃~35 ℃。

2.2 正交试验

以单因素试验结果为依据,设计以加酶量、酶解 pH 值、酶解时间、酶解温度的正交试验。各因素水平设置如表 1 所示。

表 1 正交试验设计

Table 1 Orthogonal experimental design

试验编号	A 加酶量/(U/g)	B 酶解 pH 值	C 酶解时间/h	D 酶解温度/℃	还原糖生成量/(mg/g)
1	1(300)	1(4.4)	1(1.5)	1(30)	12
2	1	2(4.8)	2(2.0)	2(40)	25
3	1	3(5.2)	3(2.5)	3(50)	21
4	2(500)	1	2	3	23
5	2	2	3	1	27
6	2	3	1	2	28
7	3(700)	1	3	2	25
8	3	2	1	3	26
9	3	3	2	1	43
K ₁	0.58	0.59	0.65	0.81	
K ₂	0.78	0.77	0.90	0.78	
K ₃	0.93	0.92	0.73	0.70	
k ₁	0.19	0.20	0.22	0.27	
k ₂	0.26	0.26	0.30	0.26	
k ₃	0.31	0.31	0.24	0.23	
极差 R	0.12	0.11	0.08	0.04	
最佳组合	A ₃ B ₃ C ₂ D ₁				

极差分析结果表明,对 β -葡聚糖酶活力影响的主要顺序:加酶量>酶解 pH 值>酶解时间>酶解温度,最佳酶解条件为加酶量 700 U/g,酶解 pH 值 5.2,酶解时间 2 h,酶解温度 30 ℃,即最优参数组合为 A₃B₃C₂D₁。通过验证试验,在最佳条件下,还原糖生成量为 42.64 mg/g,证实正交试验结果可信。

2.3 溶解率

酶解前后黑木耳多糖干物质重分别为 0.026 6、0.024 3 g,酶解前后黑木耳多糖的溶解率分别为 37.96%、41.56%,酶解前后黑木耳多糖溶解率提高了 3.6%。

2.4 分子量分析

酶解前后黑木耳多糖分子量图谱如图 6 所示。

由图 6 可知,采用凝胶色谱法测定各标准样品的

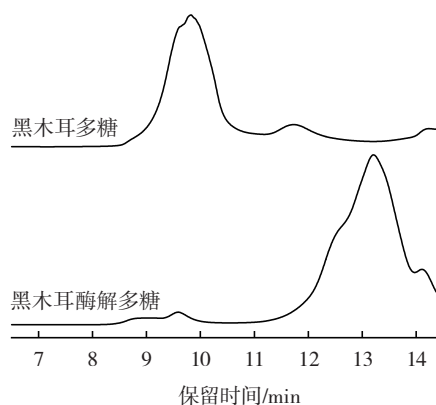


图 6 酶解前后黑木耳多糖分子量图谱

Fig.6 Molecular weight map of *Auricularia auricula* polysaccharide before and after enzymolysis

保留时间与分子量之间的关系,由图 6 可知,黑木耳多糖及其酶解多糖的保留时间分别是 9.823、13.209 min,由标准曲线得出其分子量分别为 131 300、3 388 Da,分析结果表明,酶解后黑木耳多糖保留时间延后,酶解前后分子量降低了 127 912 Da,说明酶解对多糖分子量的降低具有很好的作用。

2.5 红外光谱分析

红外光谱扫描结果如图 7 所示。

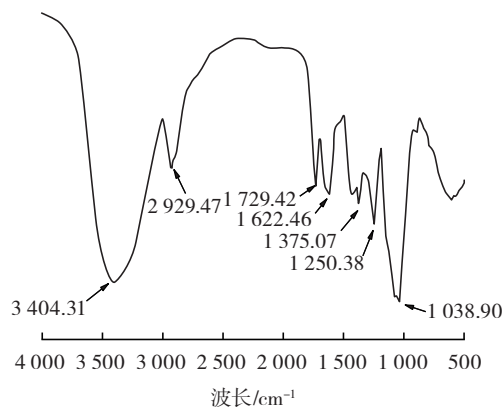


图 7 酶解多糖的红外光谱图

Fig.7 Infrared spectrum of enzymolysis polysaccharide

由图 7 可知,黑木耳酶解多糖在 3 404、2 929、1 729、1 622、1 375、1 250、1 038 cm⁻¹ 的附近存在吸收峰,在 3 404 cm⁻¹ 处的强吸收是-OH 的伸缩振动峰,在 2 929 cm⁻¹ 处的峰是 CH₃ 和-CH₂-中 C-H 键的伸缩振动峰^[22],1 375 cm⁻¹ 处的吸收峰为 C-H 键的变角振动,其与 C-H 的伸缩振动构成了糖环的吸收^[23],1 729 cm⁻¹ 处的吸收峰表明多糖中含有糖醛酸,1 622 cm⁻¹ 处的吸收峰是分子内氢键的特征峰^[24],在 1 250 cm⁻¹ 处的振动是由于 O-H 的拉伸和振动造成的,可以推断,黑木耳酶解多糖具有多糖的特征吸收峰^[25]。

2.6 紫外-可见光谱分析结果

紫外光谱扫描结果如图8所示。

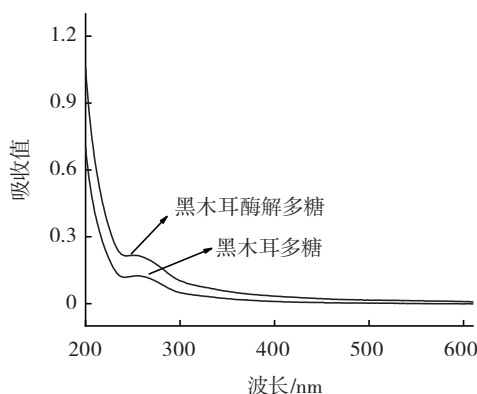


图8 酶解前后黑木耳多糖的紫外全波段扫描图

Fig.8 UV scanning of *Auricularia auricula* polysaccharide before and after enzymolysis

由图8可知,最大吸收峰比较集中,黑木耳多糖的成分较为单一,吸收峰主要在250 nm~280 nm,说明酶解前后的黑木耳多糖可能含有少量的蛋白质或核酸等成分^[26-27]。

3 结论

本研究以水提醇沉法提取黑木耳多糖,并用 β -葡聚糖酶酶解,得酶解最佳条件,即在加酶量700 U/g、酶解pH值5.2、酶解时间2 h、酶解温度30℃的条件下,得到的还原糖生成量为42.64 mg/g,并对酶解前后样品的溶解率、分子量、红外光谱以及紫外全光谱进行测定,对黑木耳多糖酶解前后的结构进行表征,酶解前后黑木耳多糖的溶解率分别37.96%、41.56%,酶解后溶解率提高了3.6%,说明酶解使黑木耳多糖的溶解率得到提高;酶解前后的黑木耳多糖分子量分别为131 300、3 388 Da,酶解后分子量降低了127 912 Da,表明酶解有效降低了黑木耳多糖的分子量;通过FT-IR分析发现,酶解前后黑木耳多糖的主要吸收峰没有变化,说明酶解对黑木耳多糖的主要结构没有影响。研究表明,将黑木耳多糖从高分子量降低成低分子量,可以提高其生物活性,并且低分子多糖更易被人体吸收,因此,本项研究对黑木耳多糖降解工艺的研究具有一定的推动作用。

参考文献:

[1] 薛依婷,白红霞,李明杰,等.黑木耳多糖凝固型酸奶发酵工艺优化[J].食品工业科技,2020,41(16):156-162.
XUE Yiting, BAI Hongxia, LI Mingjie, et al. Optimization of fermentation process of set yogurt with *Auricularia auricular* polysac-

charide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(16): 156-162.
[2] 董越,黄占旺,牛丽亚,等.不同因素对黑木耳全粉流变学特性的影响[J].食用菌学报,2020,27(4):120-130.
DONG Yue, HUANG Zhanwang, NIU Liya, et al. Effects of different factors on rheological properties of whole *Auricularia heimuer* powder[J]. Acta Edulis Fungi, 2020, 27(4): 120-130.
[3] 庄伟.黑木耳多糖的提取、结构解析及活性功能研究[D].上海:华东理工大学,2020.
ZHUANG Wei. Study on extraction, structural analysis and active function of polysaccharide isolated from *Auricularia auric Ula-judae*(bull.)[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.
[4] 秦丹丹.黑木耳多糖的酶法降解、抗氧化活性及应用研究[D].长春:长春大学,2020.
QIN Dandan. Enzymatic hydrolysis, antioxidant activity and application of polysaccharide from *Auricularia auricular*[D]. Changchun: Changchun University, 2020.
[5] 吴琼,代永刚,高长城,等.酸降解水溶性银耳多糖及抗氧化作用研究[J].食品科学,2009,30(13):93-96.
WU Qiong, DAI Yonggang, GAO Changcheng, et al. Antioxidations of acid-degrade water-soluble polysaccharides from *Tremella fuciformis*[J]. Food Science, 2009, 30(13): 93-96.
[6] YAN C, LIU Y H, CAO L P, et al. Oligosaccharide preparation from microwave-ethanol pretreated *Camellia oleifera* seed shell by enzymolysis of *Agrocybe aegerita*[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 161: 113155.
[7] WU Q, QIN D D, CAO H X, et al. Enzymatic hydrolysis of polysaccharide from *Auricularia auricula* and characterization of the degradation product[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 127-135.
[8] CHEN L, HUANG G L. Antioxidant activities of sulfated pumpkin polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 743-746.
[9] 李朋月,朱艳苹,国旭丹,等.淡豆豉多糖及其酶解产物的理化性质和抗氧化活性研究[J].中国粮油学报,2020,35(10):42-47.
LI Pengyue, ZHU Yanping, GUO Xudan, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of sojao semen praeparatum polysaccharide and its enzymolysis products[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(10): 42-47.
[10] 黄贤刚,全永亮,管斌,等.黑木耳多糖研究进展[J].粮油食品科技,2010,18(1):47-50,54.
HUANG Xiangang, QUAN Yongliang, GUAN Bin, et al. Research progress in *Auricularia auricula* polysaccharide[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2010, 18(1): 47-50, 54.
[11] 徐思琦.黑木耳多糖体外水解物的筛选制备及降糖作用研究[D].杭州:中国计量大学,2016.
XU Siqi. Study on the screening and preparation of the *Auricularia auricular* polysaccharide simulated hydrolysate and its hypoglycaemic effect[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2016.

- [12] 欧阳乐, 王振宇. 酶法降解黑木耳多糖工艺研究[J]. 中国林副特产, 2012(5): 20–23.
OUYANG Le, WANG Zhenyu. Process research of enzymatic degradation on *Auricularia auricular* polysaccharide[J]. Forest by-Product and Speciality in China, 2012(5): 20–23.
- [13] 岳菲菲, 倪利晓, 王逸飞, 等. β -葡聚糖酶对人工湿地反应器中胞外多糖的酶解研究[J]. 环境科技, 2020, 33(2): 7–11, 16.
YUE Feifei, NI Lixiao, WANG Yifei, et al. Study on the enzymatic hydrolysis of extracellular polysaccharide in constructed wetland reactor by β -glucanase[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 33(2): 7–11, 16.
- [14] 易华西, 徐德昌. β -葡聚糖酶的应用及研究现状[J]. 中外食品, 2005(5): 38–39.
YI Huaxi, XU Dechang. Applications and advances on β -glucanase[J]. Global Food Industry, 2005(5): 38–39.
- [15] 龚志华, 胡雅蓓, 郭雨桐, 等. β -葡聚糖酶辅助提取茯苓水溶性糖研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(5): 293–295.
GONG Zhihua, HU Yabei, GUO Yutong, et al. Study on β -glucanase-assisted extraction of water-soluble saccharides from *Poria Cocos*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(5): 293–295.
- [16] 侯静宇, 国利超, 鲁玉佳, 等. 两种不同方法制备的黑木耳多糖性质比较[J]. 菌物学报, 2020, 39(7): 1429–1436.
HOU Jingyu, GUO Lichao, LU Yujia, et al. Optimization of preparation method and property analysis of *Auricularia heimuer* polysaccharide[J]. Mycosystema, 2020, 39(7): 1429–1436.
- [17] 张盼, 徐炜, 张利刚, 等. 黑木耳理化性质的研究及其多糖的提取纯化[J]. 现代食品, 2019(21): 80–82.
ZHANG Pan, XU Wei, ZHANG Ligang, et al. Physicochemical properties of *Auricularia auricula* and extraction and purification of its polysaccharide[J]. Modern Food, 2019(21): 80–82.
- [18] 徐秀忠, 宋广磊. 黑木耳多糖提取及多糖冲剂制备工艺研究[J]. 食品科技, 2012, 37(1): 186–190.
XU Xiuzhong, SONG Guanglei. The extraction of *Auricularia polytricha* polysaccharide and preparation of polysaccharide granules[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(1): 186–190.
- [19] 庄伟, 屈咪, 赵迪, 等. 黑木耳多糖的结构组成及其免疫活性研究[J]. 食品科技, 2020, 45(2): 205–210.
ZHUANG Wei, QU Mi, ZHAO Di, et al. Structural composition and immunomodulatory activities of polysaccharides from *Auricularia Auricula*[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(2): 205–210.
- [20] MITTAL R, RAGHAVARAO K S M S. Extraction of R-Phycocyanin from marine macro-algae, *Gelidium pusillum*, employing consortia of enzymes[J]. Algal Research, 2018, 34: 1–11.
- [21] CHEN Y J, JIANG X, XIE H Q, et al. Structural characterization and antitumor activity of a polysaccharide from *Ramulus mori*[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 190: 232–239.
- [22] TANG J, NIE J, LI D P, et al. Characterization and antioxidant activities of degraded polysaccharides from *Poria Cocos sclerotium*[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 105: 121–126.
- [23] LIU W, XU J N, ZHU R, et al. Fingerprinting profile of polysaccharides from *Lycium barbarum* using multiplex approaches and chemometrics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 78: 230–237.
- [24] 苗晶因, 邱军强, 李海霞, 等. 一种黑木耳酸性多糖的分离纯化及其结构鉴定[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 1–8.
MIAO Jingnan, QIU Junqiang, LI Haixia, et al. Isolation, purification and identification of an acid polysaccharide of *Auricularia Auricula*[J]. Food Research and Development, 2019, 40(6): 1–8.
- [25] ZHAO T, FAN Y N, MAO G H, et al. Purification, characterization and antioxidant activities of enzymolysis polysaccharide from *Grifola frondosa*[J]. Iranian Journal of Pharmaceutical Research: IJPR, 2017, 16(1): 347–356.
- [26] 朱丹晔. 连续制备的洋葱多糖的理化性质、抗氧化和抑菌能力研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
ZHU Danyue. Physicochemical properties, antioxidant and antibacterial activities of polysaccharides sequentially extracted from *Allium cepa* L[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [27] 施君君. 牡丹籽粕多糖理化特性及抗氧化、抗肿瘤功能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
SHI Junjun. Physicochemical properties, antioxidant and anticancer activities of polysaccharides extracted from peony seed dreg[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

加工编辑: 孟琬星

收稿日期: 2021–04–13