

# 香菇菌糠木质纤维素酶解产糖工艺优化及组成分析

刘丽娜<sup>1</sup>, 李顺峰<sup>1</sup>, 崔国梅<sup>1</sup>, 魏书信<sup>1</sup>, 王安建<sup>1</sup>, 杨超<sup>2</sup>

(1. 河南省农业科学院农产品加工研究中心 郑州 450002; 2. 河南农业大学国际教育学院 郑州 450002)

**摘要:** 为提高香菇菌糠利用率, 以香菇菌糠为主要原料, 利用木质纤维素酶解产糖, 采用单因素和正交试验对工艺条件进行了优化, 并对其木质纤维素组成及红外光谱进行比较分析。结果表明, 香菇菌糠木质纤维素酶解产糖的最优工艺条件为复合酶(纤维素酶/木聚糖酶)比例 1:1, 复合酶添加量  $3000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ , 固液比(g:mL) 1:2, 酶解时间 8 h, 在此条件下所得的还原糖含量可达 5.472%, 与原料相比提高了 2.304 倍。酶解后香菇菌糠中半纤维素、纤维素含量分别降低了 26.564%、12.105%; 红外光谱结果显示, 香菇菌糠酶解前后木质纤维素的特征官能团主要吸收峰的位置未变, 但强度减弱, 与木质纤维素各组分酶解后降解规律一致。综上所述, 香菇菌糠木质纤维素经过酶解后, 可显著提高还原糖含量并降解木质纤维素。本研究结果为香菇菌糠的高值化开发提供了科学依据。

**关键词:** 香菇菌糠; 酶解; 木质纤维素; 红外光谱

中图分类号: S646.1<sup>2</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1673-2871(2025)10-068-07

## Process optimization of sugar production by lignocellulose enzymatic hydrolysis in spent *Lentinus edodes* substrate and its composition analysis

LIU Lina<sup>1</sup>, LI Shunfeng<sup>1</sup>, CUI Guomei<sup>1</sup>, WEI Shuxin<sup>1</sup>, WANG Anjian<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>2</sup>

(1. Research Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. International Education College, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** In order to enhance the utilization efficiency of spent *Lentinus edodes* substrate, this study used it as the main raw material to produce sugars through lignocellulose enzymatic hydrolysis. Key process conditions were optimized using single-factor and orthogonal design experiments, and changes in lignocellulose composition as well as infrared spectroscopy characteristics before and after enzymatic hydrolysis were compared. The results showed that the optimal conditions for sugar production from lignocellulose in spent *Lentinus edodes* substrate were as follows: Compound enzyme (cellulase/xylanase) ratio of 1:1, compound enzyme addition of  $3000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ , solid-liquid ratio of 1:2, and enzymolysis time of 8 h. Under these conditions, the reducing sugar content reached 5.472%, which was 2.304 times higher than that of the raw materials. After enzymatic hydrolysis, the content of hemicellulose and cellulose decreased by 26.564% and 12.105%, respectively. Infrared spectroscopy analysis revealed that the characteristic absorption peaks of the lignocellulose functional groups remained unchanged in position, but weakened in intensity after enzymatic hydrolysis, which was consistent with the degradation trends of the two component. In conclusion, enzymatic hydrolysis effectively increased the yield of reducing sugar and promoted the degradation of lignocellulose in spent *L. edodes* substrate. This study provides a scientific basis for the high-value utilization of spent *L. edodes* substrate.

**Key words:** Spent *L. edodes* substrate; Enzymatic hydrolysis; Lignocellulose; Infrared spectroscopy

香菇是我国重要的常规主栽食用菌种类, 也是我国产量最高的食用菌。菌糠是以木屑、秸秆、麦麸等纤维类原料栽培食用菌后的废弃物, 每产 1 kg 食用菌约产生 3.25~5.00 kg 菌糠, 在香菇产业快速发展的同时不可避免会产生大量菌糠<sup>[1]</sup>。香菇是典

型的木腐菌, 栽培结束后, 菌糠中残留了菌类代谢产物、次生产物及未形成子实体的菌丝残体等, 含有丰富的营养物质, 是一种很好的动物饲料原料; 但由于菌糠中仍有很多未被利用的木质纤维素, 限制了菌糠高值化饲料利用。木质纤维素主要有纤

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2025-06-12

基金项目: 河南省重点研发专项项目(231111112500); 河南省科技攻关计划项目(232102110278); 河南省农业科学院自主创新项目(2025ZC86); 河南省农业科学院科技创新团队专项(2025)

作者简介: 刘丽娜, 女, 助理研究员, 研究方向为食用菌加工。E-mail: 83231174@qq.com

通信作者: 王安建, 男, 研究员, 研究方向为食用菌加工。E-mail: jgs1419@163.com

纤维素、半纤维素和木质素组成,其中纤维素和半纤维素基本组成单元为葡萄糖、木糖等糖类,是香菇菌糠中主要产糖的成分,如果能将这部分纤维转变成糖类,进而作为动物饲料,对缓解粮食饲用压力、促进香菇产业绿色循环发展具有重要意义。

由于纤维素、半纤维素和木质素高度交联裹覆<sup>[2]</sup>,严重阻碍了生物酶与纤维素和半纤维素的可触性,影响还原糖的产率<sup>[3-5]</sup>。因此,常在酶解前对木质纤维素进行预处理,破坏其超分子结构,使木质结构中有效组分得以暴露或解离,提高纤维素和半纤维素的可及度<sup>[6-8]</sup>,更有利于后续酶制剂发挥作用。已有一些学者开展了这方面的研究,Yoo等<sup>[9]</sup>应用机械破碎处理大豆皮,酶解之后木糖产量增加了132.2%,显著提高了木糖产量;Ma等<sup>[10]</sup>用微波预处理稻秆发现,纤维素、半纤维素及总糖转化率分别提高了30.6%、43.3%和30.3%;何士成等<sup>[11]</sup>采用蒸汽爆破预处理小麦秸秆后,样品的酶解效率明显高于未处理麦秆,与碱法协同预处理后麦秆纤维素的酶解转化率可高达80.53%。由于木质纤维素原料种类多样及组成结构不同,因此实际应用时,需要结合原料的结构特点和组份性质,选择合适的预处理技术。

挤压膨化技术是集多种单元操作输送、搅拌、破碎、混合、加热和加压等融为一体的高新技术,可使纤维类成分同时发生化学、物理和生物化学变化,如纤维束结晶度和强度下降、聚合度分散、酶反应性与可及度提高等<sup>[12]</sup>。挤压膨化后的菌糠化学成分的变化更有利于菌糠的再利用,而且组织结构变得疏松多孔,增加了纤维素类物质的降解位点,能大大提高菌糠后续处理工艺的效率和<sup>[13]</sup>。同时,在挤压膨化过程中,机筒产生的热量以及压力可将绝大部分微生物杀死,起到了灭菌作用,减少了菌糠中杂菌的数量,更有利于菌糠的再利用和贮存<sup>[14]</sup>。因此,笔者选用挤压膨化后的香菇菌糠为原料,添加纤维素酶、木聚糖酶进行复合酶解产糖研究,以期香菇菌糠木质纤维素高价值利用与开发提供科学依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料

香菇菌糠由河南展宏有限公司提供;纤维素酶、木聚糖酶(200 000 U·g<sup>-1</sup>)购自宁夏和氏璧生物技术有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 香菇菌糠原料的挤压预处理 采集香菇菌

糠无霉变原料,并破碎成大小适中的块状,加入适量水调节含水量至40%,挤压条件为喂料速度35 kg·h<sup>-1</sup>、螺杆转速100 r·min<sup>-1</sup>、模孔直径为10 mm、I区温度60℃、II区温度115℃、III区温度135℃,处理后得到挤压的香菇菌糠原料,经50℃烘干备用(测得纤维素、半纤维素、木质素含量分别为24.368%、13.132%、13.464%)。香菇菌糠原料的挤压预处理于2024年2月在河南现代农业研究开发基地进行,后续酶解试验于2024年3—5月在河南省农业科学院完成。未挤压处理的香菇菌糠记作CK,挤压处理的香菇菌糠记作JCK,经过酶解挤压处理的香菇菌糠记作EJCK。

1.2.2 香菇菌糠的酶解 称取适量香菇菌糠原料置于锥形瓶中,按照一定的固液比加入去离子水混合均匀,添加一定量的复合酶(纤维素酶、木聚糖酶)后,置于50℃恒温振荡器中进行酶解反应,酶解一定时间后进行沸水浴灭酶处理10 min,然后50℃烘箱烘干后粉碎备用。

1.2.3 酶解原料和复合酶比例的确定 采用纤维素酶与木聚糖酶复配,在复合酶添加量2000 U·g<sup>-1</sup>、固液比(g:mL)1:2、酶解时间4 h条件下,设定纤维素酶与木聚糖酶复合酶比例为0:10、1:9、2:8、3:7、4:6、5:5、6:4、7:3、8:2、9:1、10:0,研究2种酶共同作用的酶解效果,选择还原糖含量最高的为最佳复合比例。同时,在最佳复合酶比例下进行未挤压处理的香菇菌糠酶解对照试验。

1.2.4 复合酶水解单因素试验 在确定复合酶的最佳比例后,研究复合酶添加量(200、600、1000、1400、1800、2200、2600、3000 U·g<sup>-1</sup>)、固液比(g:mL)1:0.5、1:1、1:1.5、1:2、1:2.5)、酶解时间(2、4、6、8、10、12 h)各因素的酶解效果。

1.2.5 香菇菌糠酶解条件的优化 根据单因素试验结果,选择复合酶添加量(A)、固液比(B)、酶解时间(C)3个因素做正交试验,对香菇菌糠酶解条件参数进行优化。试验因素与水平设计见表1。

表1 正交试验因素水平设计

Table 1 The orthogonal experiment factor level

水平	因素 Factor		
Level	A/(U·g <sup>-1</sup> )	B/(g:mL)	C/h
1	2200	1:1.5	4
2	2600	1:2.0	6
3	3000	1:2.5	8

### 1.3 测定指标及方法

采用DNS法<sup>[15]</sup>测定还原糖含量。采用邓祥胜

等<sup>[16]</sup>的方法测定香菇菌糠中纤维素、半纤维素和木质素含量。称取香菇菌糠粉末样品 10 mg, 与 2 g 经干燥的 KBr 在玛瑙研钵中研磨均匀, 压片后用傅里叶变换红外光谱仪 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 扫描分析, 扫描波段为 4000~400 cm<sup>-1</sup>, 测试分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>, 扫描次数 64 次, 并参照相关文献<sup>[16-17]</sup>确定光谱图中木质纤维素的特征峰及归属。所得结果用 Omnic 8.0 软件进行分析。

#### 1.4 数据处理与作图

采用 SPSS 22.0 和 Origin 2021 进行数据分析、显著性检验和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 酶解原料和复合酶比例的确

以纤维素酶和木聚糖酶制备复合酶, 其不同比例对香菇菌糠的酶解效果如图 1 所示, 未挤压处理的香菇菌糠原料 (CK) 中还原糖含量仅有 1.274%, 经挤压处理后香菇菌糠原料 (JCK) 中还原糖含量为 1.656%, 比 CK 显著增加了 29.98%, 这说明挤压处理可有效破坏植物致密细胞壁结构及木质纤维素间的连接, 从而提高还原糖的得率。因此, 后续试验采用挤压处理的香菇菌糠 (JCK) 作为原料。从图中可以明显看出, JCK 原料添加复合酶后酶解效果显著, 且不同比例的复合酶对香菇菌糠的酶解效果存在显著差异。随着纤维素酶添加比例的不断增加, 酶解后还原糖含量呈先上升后下降的趋势, 复合酶比例为 5:5 时, 最

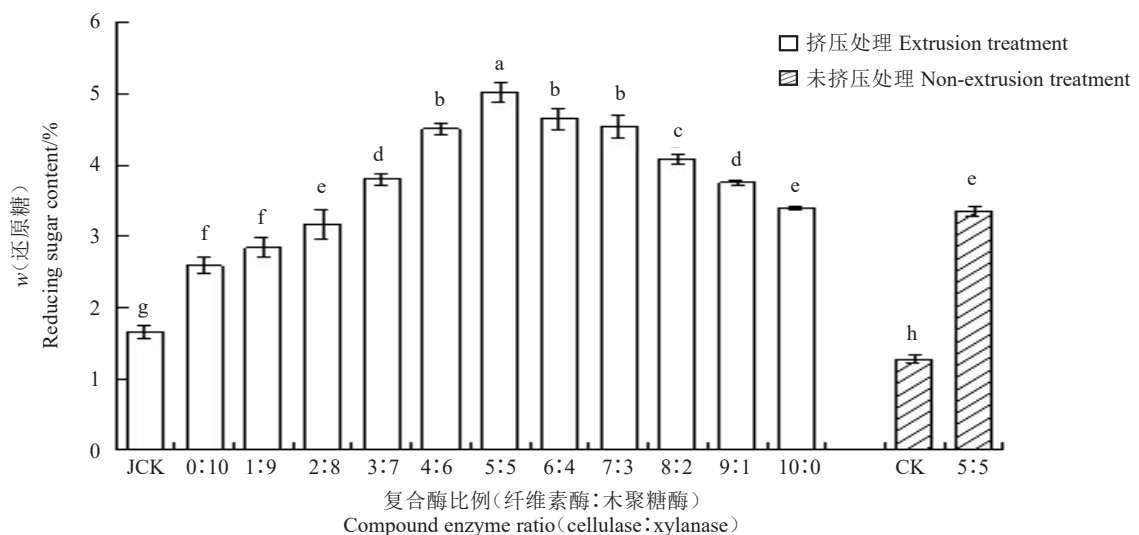
有利于产生还原糖, 还原糖含量达到 5.019%, 比使用单一纤维素酶、木聚糖酶显著增加了 47.748%、93.859%。由此可见, 单一纤维素酶酶解效果优于单一木聚糖酶, 二者复配后具有相互促进作用。把 JCK 和 CK 两种原料在复合酶比例为 5:5 条件下酶解后进行比较, 发现 JCK 酶解后还原糖含量显著高于 CK, 说明挤压有利于酶解。因此, 后续试验采用 JCK 为酶解原料, 复合酶比例为 5:5, 即两种酶等量 1:1 进行复配。

### 2.2 复合酶水解单因素试验结果

复合酶添加量、固液比、酶解时间对还原糖含量的影响见图 2。由图 2-A 可知, 香菇菌糠酶解后的还原糖含量随着复合酶添加量的增大而显著增加并趋于平缓, 复合酶添加量为 2600 U·g<sup>-1</sup> 时还原糖含量最高。这可能是由于底物浓度一定时, 酶添加量到一定程度, 酶解反应达到相对平衡的状态, 继续增加酶用量, 其作用不再明显。因此, 酶用量采用 2600 U·g<sup>-1</sup> 比较适宜。

如图 2-B 所示, 香菇菌糠酶解后的还原糖含量随着固液比的降低呈先升高后降低的趋势, 当固液比 1:2 时, 还原糖含量达到最高。固液比降低, 酶解体系流动性加大, 分子间酶促反应速率变快, 菌糠中还原糖含量增加; 进一步降低固液比, 由于酶浓度的降低, 酶促反应速率反而降低, 菌糠中还原糖含量出现减少趋势。故适宜固液比为 1:2。

酶解时间对香菇菌糠酶解效果的影响如图 2-C 所示, 2~6 h 时随着酶解时间的延长, 木质纤维素酶



注: 不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

图 1 两种原料与不同比例复合酶的酶解效果

Fig. 1 Effects of two raw materials and different compound enzyme ratios on enzymatic hydrolysis

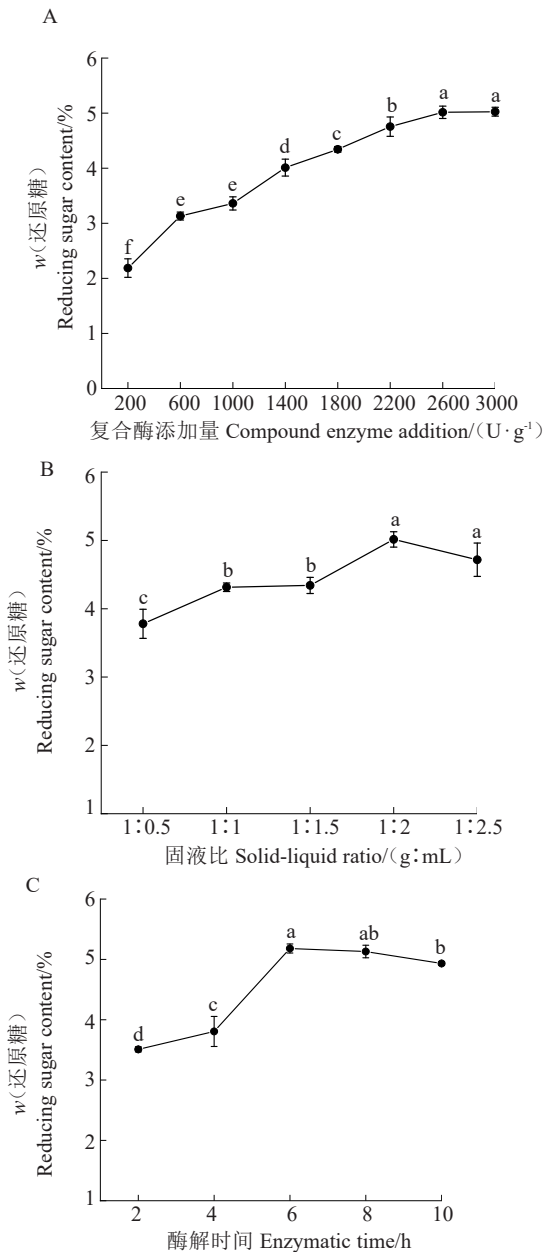


图2 不同因素对还原糖含量的影响

Fig. 2 Effects of different factors on reducing sugar content

解反应发生充分,产物还原糖含量显著持续增加,酶解6 h达到最好效果;当酶解时间超过6 h后,酶解反应逐渐减弱,同时不断积累的产物会逐渐产生抑制作用。因此酶解时间以6 h为宜。

2.3 香菇菌糠酶解条件的优化

根据单因素试验结果对复合酶添加量、固液比、酶解时间进行三因素三水平正交试验,试验结果与分析见表2,方差分析见表3。根据表2的结果,经极差分析可知,3个因素对还原糖含量的影响从大到小的顺序为A>C>B,即复合酶添加量影响最大,其次是酶解时间和固液比。最优水平组合为A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>,即复合酶添加量为3000 U·g<sup>-1</sup>,固液比

表2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment

试验号 Test number	A	B	C	w(还原糖) Reducing sugar content/%
1	1	1	1	4.336
2	1	2	2	4.610
3	1	3	3	4.962
4	2	1	2	4.946
5	2	2	3	5.321
6	2	3	1	4.774
7	3	1	3	5.416
8	3	2	1	5.101
9	3	3	2	5.289
k <sub>1</sub>	13.908	14.698	14.211	
k <sub>2</sub>	15.041	15.032	14.845	
k <sub>3</sub>	15.806	15.025	15.699	
R	0.633	0.111	0.496	

表3 方差分析

Table 3 Analysis of variance

方差来源 Variance source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value
A	0.608	2	0.304	79.334	0.012
B	0.024	2	0.012	3.169	0.240
C	0.372	2	0.186	48.508	0.020
误差 Error	0.008	2	0.004		
总和 Sum	1.012	8			

(g:mL)为1:2,酶解时间为8 h。经验证,此条件下复合酶酶解香菇菌糠的还原糖含量可达5.472%,与原料相比提高了2.304倍。由表3方差分析可知,A复合酶添加量和C酶解时间的P值均小于0.05,说明对香菇菌糠的还原糖含量影响显著,而固液比的P值大于0.05,说明对香菇菌糠的还原糖含量不存在显著影响。

2.4 香菇菌糠酶解后木质纤维素组成分析

将所得最优组合条件下的香菇菌糠酶解物进行木质纤维素各组分对比分析,结果见表4。香菇菌糠原料(JCK)中木质纤维素含量达到50.964%,经过酶解后,香菇菌糠(EJCK)木质纤维素各组分含量均有不同程度降低,其中,半纤维素、纤维素的含量分别显著降低26.564%、12.105%,结合图1中香菇菌糠原料中还原糖含量仅有1.656%,酶解后显著提高2.304倍,说明纤维素酶、木聚糖酶使得一部分纤维素和半纤维素发生降解,转化成相对分子质量较小的糖,促进了还原糖的产生。此外,酶解前后

香菇菌糠中木质素含量未发生显著变化,但在数值上呈现出略有下降的趋势。

表4 香菇菌糠酶解后木质纤维素含量的变化

**Table 4 Changes of lignocellulose content in spent *L. edodes* substrate**

处理 Treatment	w(木质纤维素) Lignocellulose content/%		
	半纤维素 Hemicellulose	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin
JCK	13.132±0.353 a	24.368±0.554 a	13.464±0.306 a
EJCK	9.643±0.685 b	21.418±0.224 b	12.837±0.585 a

注: 同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

对香菇菌糠原料与最优组合条件下的香菇菌糠酶解物进行红外光谱分析,结果见图3。光谱图中木质纤维素的特征峰及归属见表5。由图3、表5可知,香菇菌糠酶解前后具有类似的光谱特征,主要吸收峰的位置未发生改变,在800~1800 cm<sup>-1</sup>波段内,可以观测到木质纤维素各组分的特征基团振动,说明香菇菌糠酶解前后均主要由半纤维素、纤维素和木质素组成;但酶解后香菇菌糠的红外吸收峰在1734、1629、1511、1458、1424、1382、1317、1265、1158、1038、897 cm<sup>-1</sup>处的强度有所降低,表明酶解处理使得香菇菌糠中木质纤维素各组分被降解转化。在本试验中,1734 cm<sup>-1</sup>处乙酰基和羧基

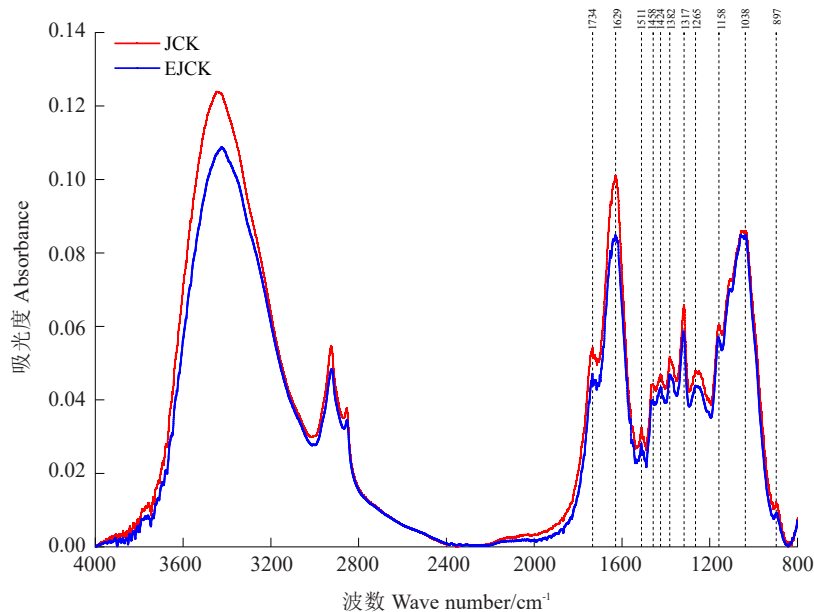


图3 香菇菌糠的 FTIR 图谱

Fig. 3 FTIR spectra of spent *L. edodes* substrate

表5 香菇菌糠红外光谱特征峰

Table 5 FTIR absorption peak location and assignment of spent *L. edodes* substrate

波数 Wave number/cm <sup>-1</sup>	基团特征峰归属 Group characteristic peak attribution	对应化学成分 Corresponding chemical constituents
1734	乙酰基和羧基 C=O 伸缩振动 Acetyl and carboxyl C=O stretching vibration	半纤维素 Hemicellulose
1629	羰基 C=O 伸缩振动 Carbonyl C=O stretching vibration	木质素 Lignin
1511	芳香环 C=C 伸缩振动 Aromatic ring C=C stretching vibration	木质素 Lignin
1458	-CH <sub>2</sub> 变形振动 -CH <sub>2</sub> deformation vibration	木质素和半纤维素 Lignin and hemicellulose
1424	-CH <sub>2</sub> 变形振动 -CH <sub>2</sub> deformation vibration	木质素和纤维素 Lignin and cellulose
1382	C-H 平面变形振动 C-H plane deformation vibration	纤维素和半纤维素 Cellulose and hemicellulose
1317	C-H 伸缩、C-O 振动 C-H stretching, C-O vibration	纤维素和木质素 Cellulose and lignin
1265	苯环-氧键伸缩振动 Benzene ring-oxygen bond stretching vibration	木质素 Lignin
1158	C-O-C 伸缩振动 C-O-C stretching vibration	纤维素和半纤维素 Cellulose and hemicellulose
1038	C-O 伸缩振动、愈创木基单元 C-H 变形 C-O stretching vibration, C-H deformation of guaiacyl unit	纤维素/半纤维素/木质素 Cellulose/Hemicellulose/Lignin
897	C-H 变形振动 C-H deformation vibration	纤维素 Cellulose

C=O 伸缩振动是半纤维素的特异吸收峰,图3中 $1734\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰向低波数降低的趋势在酶解后变得平缓,表明半纤维素发生了降解。 $1629\text{ cm}^{-1}$ 处羰基 C=O 伸缩振动、 $1511\text{ cm}^{-1}$ 处苯环芳香骨架振动、 $1265\text{ cm}^{-1}$ 处苯环-氧键伸缩振动是木质素的特征吸收峰,酶解后吸光度明显减弱,这与木质素含量的减少有关。 $1382$ 、 $1158\text{ cm}^{-1}$ 处是纤维素和半纤维素特定官能团振动引起的,酶解后吸收峰均下降,这证明了香菇菌糠的酶解效果。 $897\text{ cm}^{-1}$ 处代表纤维素 C-H 变形振动的特征吸收峰,酶解后降低进一步表明了纤维素的降解。红外光谱的结果说明,香菇菌糠经过酶解后木质纤维素各组分均有不同程度的降低,这与表4中木质纤维素含量变化的结果一致。

### 3 讨论与结论

香菇菌糠主要由木屑、麸皮等木质纤维类物质组成,是一种很有前途的木质纤维素转化为高值化学品的潜在生物资源,由于具有环境友好、能耗低、效率高、降解产物无毒等优点,酶的生化转化已逐渐成为木质纤维素高值转化工艺流程中重要的中间生产环节<sup>[18-20]</sup>。由于木质纤维素结构复杂,纤维素酶直接酶解纤维素的效率一般不高于50%,其主要原因是木聚糖在空间上的阻碍与屏障,目前木聚糖酶能提高纤维素酶水解效率已得到公认<sup>[21-22]</sup>,因此,本研究利用复合酶制剂对香菇菌糠木质纤维素进行酶解产糖。通过对比挤压前后菌糠原料及原料酶解后的还原糖得率,发现挤压处理有利于酶解,提高还原糖含量,这可能是挤压使纤维类成分的酶反应性与可及度提高的缘故<sup>[12]</sup>,因此,选定挤压后的香菇菌糠作为试验酶解原料。通过单因素和正交试验对酶解产糖工艺条件进行了优化,确定了香菇菌糠木质纤维素酶解产糖的最佳工艺为纤维素酶与木聚糖酶复合酶比例1:1,复合酶添加量 $3000\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ ,固液比(g:mL)1:2,酶解时间8 h,在此条件下酶解后香菇菌糠的还原糖含量可达5.472%,与原料相比提高了2.304倍。Corrêa等<sup>[23]</sup>用纤维素酶和 $\beta$ -葡萄糖苷酶酶解侧耳属真菌菌糠,可产生 $77.5\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的总还原糖;Zhu等<sup>[24]</sup>用酶水解蘑菇菌糠,还原糖含量达到 $42.01\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;陈瑞荣等<sup>[25]</sup>使用复合酶酶解灵芝菌糠后总糖含量达到原来的2.51倍;这些菌糠酶解糖化工艺的研究也有相似的结果。

在此基础上,采用范式抽提法和傅里叶变换红

外光谱法对所制备的香菇菌糠酶解物进行木质纤维素组成及红外光谱分析,与香菇菌糠原料相比,经过酶解后香菇菌糠木质纤维素各组分含量均有不同程度的降低,其中,半纤维素、纤维素含量分别显著降低26.564%、12.105%,结合酶解后香菇菌糠还原糖含量显著提高2.304倍,说明纤维素酶、木聚糖酶使得一部分纤维素和半纤维素发生降解,转化成相对分子质量较小的糖,促进了还原糖的产生。这与王岩等<sup>[15]</sup>利用酶制剂降解杏鲍菇菌渣纤维素的研究结果相一致。此外,酶解前后香菇菌糠中木质素含量未发生显著变化,这可能与木质素结构复杂、稳定性高有关<sup>[26]</sup>;而由于香菇菌糠呈弱酸性,有机酸的存在会使木质素的结构部分断裂进而发生解聚<sup>[27]</sup>,从而使得木质素含量数值上呈现出略有降低的趋势。关于酶制剂对食用菌菌糠纤维类物质酶解作用的研究较少,张安荣<sup>[22]</sup>利用纤维素酶、木聚糖酶和 $\beta$ -半乳糖苷酶协同发酵杏鲍菇菌渣,中性洗涤纤维降解率为23.69%;陈瑞荣等<sup>[25]</sup>采用复合酶对灵芝菌糠进行酶解,终产物中纤维素含量降解率为36.81%,半纤维素含量降解率为29.09%;与本研究前半纤维素、纤维素含量分别降低26.564%、12.105%存在差异,可能是使用的菌糠原料、酶制剂不同引起的。

红外光谱可以进一步多角度反映出木质纤维素各组分及表征结构的变化特征<sup>[28]</sup>。红外光谱结果显示,香菇菌糠原料酶解前后均具有木质纤维素的红外光谱特征官能团的振动,红外光谱主要吸收峰的位置未变,但振动强度减弱,这进一步表明了木质纤维素各组分的降解,且与酶解后香菇菌糠中木质纤维素含量变化结果一致。因此,采用复合酶制剂对香菇菌糠木质纤维素酶解产糖,可以有效提高还原糖含量并降解木质纤维素,为香菇菌糠的高值化利用与开发提供科学依据。

#### 参考文献

- [1] 刘丽娜,魏书信,田广瑞,等.香菇菌糠资源化利用研究进展[J].中国瓜菜,2024,37(4):7-13.
- [2] 史正军.甜龙竹及巨龙竹半纤维素、木质素结构诠释及相互间化学键合机制解析[D].北京:北京林业大学,2013.
- [3] 卢开红,陈晓娟,周宇.提升木质纤维生物质酶解炼制高值化学品的预处理技术[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2023,41(4):30-42.
- [4] PENG P, PENG F, BIAN J, et al. Studies on the starch and hemicellulose fractionated by graded ethanol precipitation from bamboo *Phyllostachys bambusoides* f. Shouzhu Yi[J]. Journal Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(6):2680-2688.
- [5] BINOD P, SATYANAGALAKSHMI K, SINDHU R, et al.

- Short duration microwave assisted pretreatment enhances the enzymatic saccharification and fermentable sugar yield from sugarcane bagasse[J]. *Renewable Energy*, 2012, 37(1): 109-116.
- [6] 李萍. 木质纤维素预处理及其降解机制的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [7] 贾丽萍, 姚秀清, 杨磊, 等. 木质纤维素的预处理技术进展[J]. *纤维素科学与技术*, 2022, 30(2): 72-80.
- [8] 赵烁, 李莹, 王震, 等. 木质纤维素预处理方法的研究进展[J]. *中国造纸*, 2024, 43(8): 29-38.
- [9] YOO J, ALAVI S, VADLANI P, et al. Thermo-mechanical extrusion pretreatment for conversion of soybean hulls to fermentable sugars[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(16): 7583-7590.
- [10] MA H, LIU W W, CHEN X, et al. Enhanced enzymatic saccharification of rice straw by microwave pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(3): 1279-1284.
- [11] 何士成, 孙曼钰, 孙忠岩, 等. 蒸汽爆破与碱法协同预处理对小麦秸秆结构及酶解的影响[J]. *林产化学与工业*, 2017, 37(5): 126-132.
- [12] 叶琼娟, 杨公明, 张全凯, 等. 挤压膨化技术及其最新应用进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(5): 1329-1334.
- [13] 陈晓明, 高隽, 张志军. 食用菌菌糠双螺杆挤压膨化工艺的优化[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(14): 92-96.
- [14] 陈晓明, 高隽, 张志军. 挤压膨化处理对灵芝菌糠中主要成分的影响[J]. *保鲜与加工*, 2018, 18(5): 97-100.
- [15] 王岩, 于洪敏, 李娟, 等. 酸处理·酶制剂对杏鲍菇菌渣还原糖和纤维素降解的影响[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(8): 86-91.
- [16] 邓祥胜, 李明蔓, 何鹏, 等. 桉树伐桩分解过程中木质纤维素成分的变化特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(5): 160-169.
- [17] ELMAS G M, YILGOR N. Chemical and thermal characterizations of *Pinus sylvestris* and *Pinus pinaster*[J]. *Bioresources*, 2020, 15(2): 3604-3620.
- [18] 王子妍, 刘颖, 贾健辉, 等. 预糊化-复合酶解法制备婴幼儿留胚米粉及其理化性质研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(20): 228-234.
- [19] DESSIE W, LUO X F, WANG M F, et al. Current advances on waste biomass transformation into value-added products[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104(11): 4757-4770.
- [20] 潘润泽, 牟璐, 邱敏, 等. 木质纤维素生物转化的技术研究和应用前景[J]. *能源环境保护*, 2024, 38(2): 94-104.
- [21] YOSHIDA M, LIU Y, UCHIDA S, et al. Effects of cellulose crystallinity, hemicellulose, and lignin on the enzymatic hydrolysis of miscanthus sinensis to monosaccharides[J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2008, 72(3): 805-810.
- [22] 张安荣. 菌酶协同发酵杏鲍菇菌糠工艺优化及其营养价值评定[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [23] CORRÊA R C G, DA SILVA B P, CASTOLDI R, et al. Spent mushroom substrate of *Pleurotus pulmonarius*: A source of easily hydrolyzable lignocellulose[J]. *Folia Microbiologica*, 2016, 61(5): 439-448.
- [24] ZHU H J, LIU J H, SUN L F, et al. Combined alkali and acid pretreatment of spent mushroom substrate for reducing sugar and biofertilizer production[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 136: 257-266.
- [25] 陈瑞荣, 班雯婷, 梁磊, 等. 复合酶对甘蔗渣栽培灵芝菌糠的降解作用[J]. *甘蔗糖业*, 2015(6): 33-37.
- [26] HUANG X A, KOCAEFE D, KOCAEFE Y, et al. Structural analysis of heat-treated birch (*Betula papyrifera*) surface during artificial weathering[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 264: 117-127.
- [27] 王慧梅, 刘忠, 惠岚峰, 等. 温压分控爆破处理杨木及其产物性能分析[J]. *天津科技大学学报*, 2021, 36(1): 19-24.
- [28] 刘丽娜, 李顺峰, 许方方, 等. 不同生长期香菇培养料中木质纤维素的变化特征[J]. *河南农业科学*, 2024, 53(3): 110-117.