

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.06.010

交变磁场辅助酶法改性米糠膳食纤维的工艺优化

林艳婷¹, 吴泽宇^{1,2}, 王宜坤³, 严伟龙⁴, 张文成^{1,2}

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 智能制造技术研究院, 安徽 合肥 230051; 3. 安徽喜洋洋农业科技有限公司, 安徽 合肥 231521; 4. 安徽省蒸谷米食品科技有限公司, 安徽 凤阳 233100)

摘要:文章以米糠为原料,采用交变磁场(alternating magnetic field, AMF)辅助纤维素酶处理的方法对米糠中的膳食纤维进行改性,以提高米糠可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)的得率;并研究纤维素酶添加量、酶解时间、酶解温度和磁场处理时间等因素对 SDF 得率的影响。基于单因素实验的结果,采用 Box-Behnken 设计和响应面分析法对改性工艺条件进行优化。结果表明,在纤维素酶添加量为 5.5 mg、酶解时间为 57 min、酶解温度为 56 °C、磁场处理时间为 22 min 的条件下,改性 SDF 的得率可达 14.46%,与未改性 SDF 相比,得率提高了 13.04 倍。

关键词:米糠;可溶性膳食纤维(SDF);交变磁场(AMF);纤维素酶;改性

中图分类号:TS213.3

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)06-0789-06

Process optimization of alternating magnetic field-assisted enzymatic modification of rice bran dietary fiber

LIN Yanting¹, WU Zeyu^{1,2}, WANG Yikun³, YAN Weilong⁴, ZHANG Wencheng^{1,2}

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Intelligent Manufacturing Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230051, China; 3. Anhui Xiyangyang Agricultural Technology Co., Ltd., Hefei 231521, China; 4. Anhui Zhenggumi Food Technology Co., Ltd., Fengyang 233100, China)

Abstract: The dietary fiber (DF) in rice bran was modified by using alternating magnetic field (AMF)-assisted cellulase treatment to improve the yield of soluble dietary fiber (SDF) from rice bran. The effects of enzyme addition, enzyme digestion time, enzyme digestion temperature and magnetic field time on the yield of rice bran SDF were investigated. Based on the results of single-factor experiments, the Box-Behnken design (BBD) and response surface analysis method were used to optimize the modification process conditions. The results showed that under the conditions of cellulase addition of 5.5 mg, enzyme digestion time of 57 min, enzyme digestion temperature of 56 °C and magnetic field time of 22 min, the yield of modified SDF could reach 14.46%. Compared with unmodified SDF, the yield was increased by 13.04 times.

Key words: rice bran; soluble dietary fiber (SDF); alternating magnetic field (AMF); cellulase; modification

米糠是一种在大米加工过程中产生的主要副产品,目前主要被用作动物饲料或直接丢弃,这不

仅带来了环境负担,也导致了生物资源的浪费。鉴于此,对米糠进行有效的开发与利用,已经成为

收稿日期:2024-03-18;修回日期:2024-04-22

基金项目:安徽省重点研究与开发计划资助项目(202204c06020075);合肥工业大学智能制造技术研究院“科技成果培育专项”资助项目(IMIPY2022015)

作者简介:林艳婷(1999—),女,福建福州人,合肥工业大学硕士生;

吴泽宇(1984—),女,安徽安庆人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:wuzeyu@hfut.edu.cn;

张文成(1973—),男,山东烟台人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

学术界和产业界日益关注的课题。

米糠富含的膳食纤维(dietary fiber, DF)有利于人体健康,根据其在水中的溶解度,DF 分为可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)和不可溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)。与 IDF 相比, SDF 具有更广泛的生理活性,它不仅能改善肠道微生物的生理功能^[1]、延迟胃排空^[2]、预防心血管疾病和缓解糖尿病^[3],还能改善食品的质地和口感^[4]。然而,DF 中 SDF 含量较低,限制了 DF 的生理效应^[5]。因此,寻找合适的改性方法来提高米糠 SDF 的得率具有重要意义。酶法水解因其条件温和、高效性和环境相容性,已被广泛用于 DF 改性。纤维素酶常被用于酶解 DF,可以降解 DF 分子中的纤维素和半纤维素,将 IDF 转化为 SDF^[6]。然而,单一改性方法存在局限性,而组合改性有望实现更佳的改性效果。近年来,越来越多的物理改性方法与酶法改性相结合,并实现了良好的改性效果^[4,7-8]。物理改性方法包括蒸汽处理、高压均质化、超微粉碎、挤出、超声波、微波等^[9]。目前,关于磁场处理用于 DF 改性的研究并不多。

本研究将交变磁场(alternating magnetic field, AMF)作为一种新型的物理改性方法,结合纤维素酶法对米糠膳食纤维(rice bran dietary fiber, RBDF)进行改性,以期提高米糠 SDF 的得率,实现米糠的综合利用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本文使用的米糠由合肥喜由米农业科技有限公司提供;实验所用的酶包括热稳定性 α -淀粉酶液(10 000 U/mL)、蛋白酶液(300 U/mL)和淀粉葡萄糖苷酶液(2 000 U/mL),均购于上海蓝季生物科技有限公司;酸性纤维素酶(10 000 U/g)购于上海麦克林生化科技有限公司;其他化学品均为分析级,由当地化学品供应商提供。

1.2 仪器与设备

本文所用仪器有:CH-Hall 型一维交直流磁场发生系统(北京翠海佳诚磁电科技有限公司);HWS-26 型电热恒温水浴振荡器(上海一恒仪器有限公司);TG16-WS 型离心机(湖南湘立科学仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 米糠预处理

使用石油醚对米糠样品进行脱脂处理,米糠

与石油醚体积比为 1 : 25,重复脱脂 4 次后将其烘干。干燥脱脂米糠过 60 目筛后密封备用。

1.3.2 RBDF 的提取

DF 的提取方法基于 AOAC 酶重量法^[10],并略作调整。使用蒸馏水作为溶剂,从脱脂米糠中提取 DF,料液比设置为 1 : 40,向样品中添加热稳定性 α -淀粉酶液(500 U/g),然后置于 95 ~ 100 °C 恒温振荡水浴箱中持续振摇 40 min;反应结束后,样品冷却至 60 °C,调节 pH 值至 8.2,并加入蛋白酶液(30 U/g),持续振摇 30 min;调节 pH 值至 4.5,并加入淀粉葡萄糖苷酶液(200 U/g),60 °C 反应 30 min 后,将混合液在 4 000g 下离心 20 min,离心所得沉淀物置于 60 °C 烘箱中烘干,得到 IDF。上清液中加入 95%乙醇(两者体积比 1 : 4),过夜醇沉,沉淀物于 60 °C 烘箱中烘干,得到 SDF,得率为 1.03%。将 IDF 和 SDF 混合、磨粉,制得 RBDF。

1.3.3 RBDF 磁场辅助酶法改性

根据文献[11]方法调整酶法改性步骤。具体操作如下:称取 1 g 的 RBDF 溶于蒸馏水中,料液比为 1 : 40,在适宜温度下振荡 30 min,以获得均匀的浆液;调节 pH 值至 4.8,并加入酸性纤维素酶,将样品转移到预设相同温度的磁场发生系统中,进行一定时间的 AMF 改性;AMF 处理完成后,将样品转回振荡箱中继续进行酶解反应,反应终止后,样品在沸水浴中灭活 10 min,然后在 4 000g 下离心 10 min;离心所得的上清液中加入 4 倍体积的 95%乙醇,并于 4 °C 沉淀直至溶液澄清;收集的沉淀物在 60 °C 烘箱中烘干,研磨,获得 AMF 辅助纤维素酶改性的 SDF(M+C-SDF)。

1.3.4 SDF 得率

SDF 得率 Y 的计算公式如下:

$$Y = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中: m_0 为样品质量; m_1 为 SDF 质量。

1.3.5 单因素实验

在酶解时间 60 min、酶解温度 50 °C、磁场处理时间 10 min 和磁感应强度 2 mT 的条件下,本研究考察纤维素酶添加量(1、5、10、15、20 mg)对 SDF 得率的影响。

在纤维素酶添加量 5 mg、酶解温度 50 °C、磁场处理时间 10 min 和磁感应强度 2 mT 的条件下,本研究考察酶解时间(30、60、120、180、240 min)对 SDF 得率的影响。

在纤维素酶添加量 5 mg、酶解时间 60 min、

磁场处理时间 10 min 和磁感应强度 2 mT 的条件下,本研究考察酶解温度(40、45、50、55、60 ℃)对 SDF 得率的影响。

在纤维素酶添加量 5 mg、酶解时间 60 min、酶解温度 50 ℃和磁感应强度 2 mT 的条件下,本研究考察磁场处理时间(10、20、30、40、50 min)对 SDF 得率的影响。

在纤维素酶添加量 5 mg、酶解时间 60 min、酶解温度 50 ℃和磁场处理时间 10 min 的条件下,本研究考察磁感应强度(2、4、6、8、10、12 mT)对 SDF 得率的影响。

1.3.6 响应面优化设计

基于单因素实验的结果,选择纤维素酶添加量(A)、酶解时间(B)、酶解温度(C)和磁场处理时间(D)为影响因素,以 SDF 得率 Y 为响应值,根据 Box-Behnken design(BBD)原理,采用四因素三水平响应面分析法,对数据进行回归分析及显著性检验,确定最优的 AMF 辅助纤维素酶改性工艺。BBD 试验因素与水平因素见表 1 所列。

表 1 BBD 试验因素与水平

因素	水平		
	-1	0	1
添加量/mg	2	5	8
酶解时间/min	40	60	80
酶解温度/℃	50	55	60
磁场处理时间/min	10	20	30

1.4 数据处理与分析

本研究进行 3 次平行实验。所得数据利用 Design-Expert 13.0 软件、SPSS 软件和 Prism 软件进行响应面优化分析、其他数据的统计分析和制图。不同小写字母表示有显著性差异($P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 单因素实验结果分析

2.1.1 纤维素酶添加量对 SDF 得率的影响

纤维素酶添加量对 SDF 得率的影响如图 1 所示。由图 1 可知,纤维素酶添加量在 1~20 mg 范围内时,SDF 得率呈现出先增加后减小的趋势。当纤维素酶添加量为 5 mg 时,SDF 得率达到最大值 12.03%,这是由于纤维素酶能够水解 IDF 中的纤维素和半纤维素成分,促使其转化为 SDF,从而提升了 SDF 的得率。然而,当添加量超过 5 mg 后,随着添加量的继续增加,SDF 得率

却出现了下降,这可能是由于过量的酶导致 SDF 被降解为还原性小分子,这些小分子具有醇溶性^[12],无法形成沉淀而析出。综上所述,5 mg 的纤维素酶添加量最为适宜。

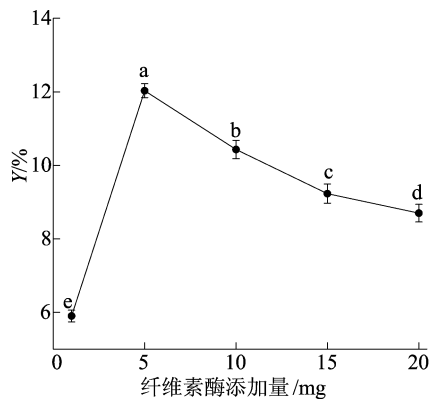


图 1 纤维素酶添加量对 SDF 得率的影响

2.1.2 酶解时间对 SDF 得率的影响

酶解时间对 SDF 得率的影响如图 2 所示。由图 2 可知,酶解时间对 SDF 得率的影响呈现出先增加后减少的趋势。在酶解时间为 30~240 min 的范围内,SDF 得率在 60 min 时达到最大值 11.67%,然后随着酶解时间的延长,SDF 得率逐渐降低。这种变化趋势的原因与酶添加量过量所导致的 SDF 得率下降类似,过长的酶解时间会导致纤维素酶对 RBDF 的酶解过于彻底,从而使得 SDF 被分解为醇溶性的还原糖等物质,导致 SDF 得率降低。为了避免上述情况发生,使 SDF 得率达到最优,建议采用 60 min 作为酶解时间。

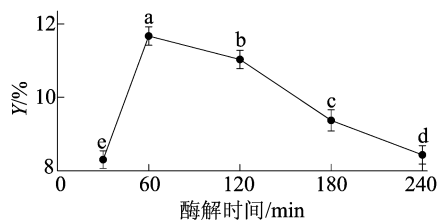


图 2 酶解时间对 SDF 得率的影响

2.1.3 酶解温度对 SDF 得率的影响

酶解温度对 SDF 得率的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出,酶解温度在 55 ℃时,SDF 得率达到最大值 12.37%,相比之下,酶解温度在 40、45、60 ℃时,SDF 得率都不理想。这是由于酶的活性与其所在环境的温度密切相关,过低或过高的温度会抑制纤维素酶的活性,从而影响酶解反应的效率,导致 SDF 得率降低。因此,最适酶解温度为 55 ℃。

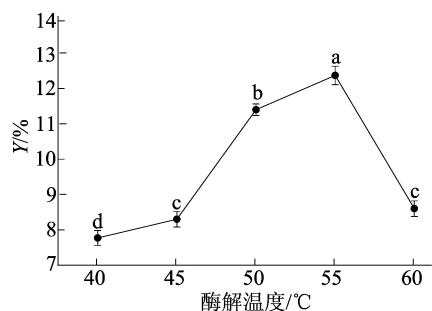


图 3 酶解温度对 SDF 得率的影响

2.1.4 磁场处理时间对 SDF 得率的影响

磁场处理时间对 SDF 得率的影响如图 4 所示。

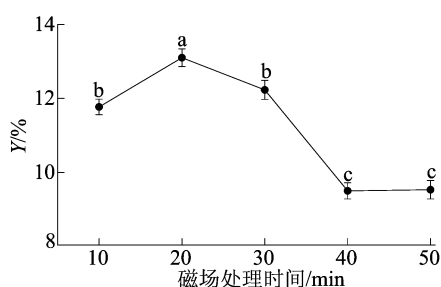


图 4 磁场处理时间对 SDF 得率的影响

由图 4 可知,当磁场处理时间为 20 min 时, SDF 得率达到最大值 13.10%,然而,当磁场处理时间延长到 30 min 后, SDF 得率迅速下降。上述结果的原因可能是,在较短的时间内, AMF 作为一种物理手段,能够有效破坏 RBDF 的细胞壁,从而使得纤维素酶更易与 RBDF 发生反应,进而

提高了 SDF 得率;但随着磁场处理时间的延长, 磁场可能会对纤维素酶的活性产生不利影响, 或者对已溶出的 SDF 造成破坏,从而导致了 SDF 得率的降低。因此,磁场处理时间应设置在 20 min 为宜。

2.1.5 磁感应强度对 SDF 得率的影响

磁感应强度对 SDF 得率的影响如图 5 所示。由图 5 可知,磁感应强度对 SDF 得率的影响呈现较为平缓的趋势。当磁感应强度在 2~12 mT 范围内变化时, SDF 得率在 11.43%~11.90% 之间波动,表明在此区间内,磁感应强度的变化对 SDF 得率的影响并不显著。考虑到能耗和效率的问题,选择 2 mT 作为 AMF 处理的磁感应强度。

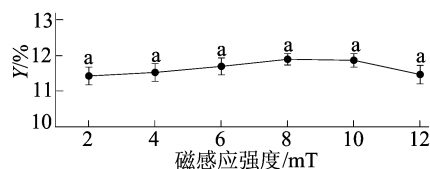


图 5 磁感应强度对 SDF 得率的影响

2.2 响应面优化分析

2.2.1 响应面设计与结果分析

本文以 SDF 得率为评价指标,采用响应面法优化 M+C-SDF 的改性条件。BBD 设计与结果见表 2 所列。采用方差分析(ANOVA)对显著性变量的影响进行线性 and 二次形式的评估和筛选,响应面二次模型的方差分析见表 3 所列。

表 2 BBD 设计与结果

序号	A/mg	B/min	C/°C	D/min	Y/%	序号	A/mg	B/min	C/°C	D/min	Y/%
1	2	60	55	10	8.9	15	8	60	55	10	10.3
2	8	60	60	20	11.7	16	8	60	55	30	11.8
3	5	80	50	20	11.0	17	5	80	55	30	12.2
4	5	60	50	10	11.3	18	8	80	55	20	10.5
5	2	80	55	20	9.2	19	5	60	60	10	11.4
6	5	60	60	30	13.6	20	8	40	55	20	11.5
7	5	40	60	20	13.3	21	5	60	50	30	11.2
8	5	60	55	20	14.9	22	5	40	55	30	12.3
9	5	60	55	20	14.4	23	8	60	50	20	12.3
10	2	60	55	30	9.1	24	5	80	55	10	11.0
11	5	60	55	20	14.6	25	2	60	60	20	10.2
12	5	40	55	10	11.9	26	5	80	60	20	13.1
13	2	60	50	20	9.3	27	5	40	50	20	13.2
14	2	40	55	20	10.2						

表 3 响应面二次模型的方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	71.35	14	5.10	31.55	<0.000 1	**
A	10.45	1	10.45	64.72	<0.000 1	**
B	2.43	1	2.43	15.04	0.002 2	**
C	2.08	1	2.08	12.90	0.003 7	**
D	2.43	1	2.43	15.04	0.002 2	**
AB	0	1	0	0	1.000 0	
AC	0.56	1	0.56	3.48	0.086 6	
AD	0.42	1	0.42	2.62	0.131 8	
BC	1.00	1	1.00	6.19	0.028 5	*
BD	0.16	1	0.16	0.99	0.339 3	
CD	1.32	1	1.32	8.19	0.014 3	*
A ²	46.81	1	46.81	289.78	<0.000 1	**
B ²	7.21	1	7.21	44.62	<0.000 1	**
C ²	4.20	1	4.20	26.01	0.000 3	**
D ²	15.64	1	15.64	96.83	<0.000 1	**
残差	1.94	12	0.16			
失拟项	1.81	10	0.18	2.86	0.286 7	不显著
净误差	0.13	2	0.063			
总离差	73.29	26				

注: ** 表示 $P<0.01$; * 表示 $P<0.05$ 。

由表 3 可知:整体模型的 $P<0.000\ 1$,表明所采用的二次方程模型极显著;失拟项 P 值为 $0.286\ 7$,不显著,说明回归模型拟合良好,检验误差较小,故可以代替真实值对结果进行分析; R^2 值为 $0.990\ 1$, R_{Adj}^2 为 $0.972\ 3$,并且预测 R^2 值与 R_{Adj}^2 相吻合(差异小于 0.2)。说明该模型可靠性较高,足以反映响应值的变化趋势^[13]。因此,该模型可作为分析和预测改性 RBDF 加工工艺的有效工具。此外,由表 3 可知,因素 A、B、C、D 及平方项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 均达到极显著水平($P<0.01$),BC 和 CD 达到显著水平($P<0.05$)。上述结果表明,纤维素酶添加量、酶解时间、酶解温度和磁场处理时间都与 SDF 得率有显著相关性,并且这些因素的影响并不仅仅是线性的。以 SDF 得率 Y 作为因变量,以纤维素酶添加量、酶解时间、酶解温度和磁场处理时间为自变量建立的四元二次回归方程为:

$$Y = 14.63 + 0.933\ 3A - 0.45B + 0.416\ 7C +$$
$$0.45D - 0.375AC + 0.325AD + 0.5BC +$$
$$0.2BD + 0.575CD - 2.96A^2 - 1.16B^2 -$$
$$0.887\ 5C^2 - 1.71D^2。$$

2.2.2 交互项分析

三维响应面和二维等高线图可以直观地展示变量之间的相互作用。本研究考察了模型中显著的两组交互项的三维响应面图和二维等高线图,交互项对 SDF 得率影响的响应面图和等高线图如图 6 所示。

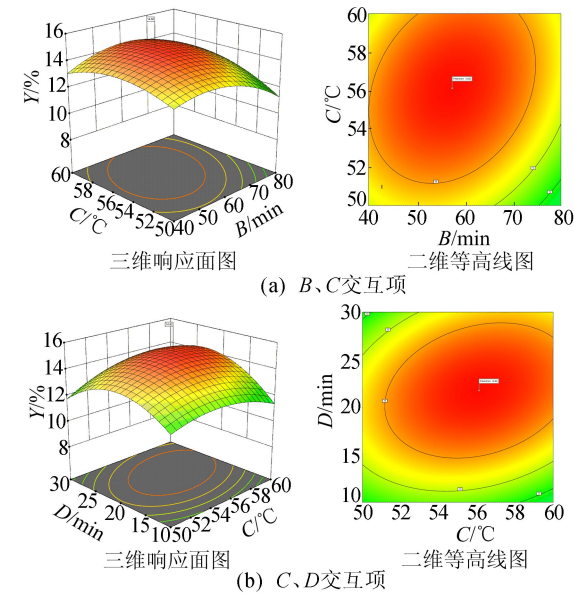


图 6 交互项对 SDF 得率影响的响应面图和等高线图

此外,可以通过三维响应面图中的最高点评估变量的最佳水平。在每个三维图中,展示的是两个变量的关系,而将第 3 个变量固定在 0 水平上。三维响应面图中的曲线越弯曲、颜色变化越快,说明试验因素对响应值的影响越显著^[14]。变量之间的相互作用可以通过二维等高线图的形状观察到,椭圆形意味着变量之间的相互作用对响应值有显著影响,而圆形表示影响不显著^[14]。由图 6 可知,改性的 SDF 得率随因素水平的增加呈先升后降的趋势。通过等高线图的分析可知,随

着各因素之间相互作用的增强,交互作用效应对 SDF 得率的影响呈现出显著的椭圆形等高线。

2.2.3 预测模型的验证及最优条件的确定

数值优化结果表明,交变磁场辅助酶法改性工艺的最佳条件为纤维素酶添加量 5.46 mg,酶解时间 57.387 min,酶解温度 56.111 °C,磁场处理时间 21.756 min,预测 SDF 最大得率为 14.82%。考虑到实际的可操作性,将最佳条件调整为纤维素酶添加量 5.5 mg,酶解时间 57 min,酶解温度 56 °C,磁场处理时间 22 min。利用上述的最佳条件进行了 3 次验证实验,M+C-SDF 的平均得率为 14.46%,与预测值基本一致,证实了响应面模型的可靠性。

3 结 论

本文通过响应面优化法确定的磁场辅助纤维素酶改性米糠 DF 的最佳工艺条件如下:纤维素酶的添加量为 5.5 mg,酶解时间为 57 min,酶解温度为 56 °C,磁场处理时间为 22 min。在该条件下,改性的米糠 SDF 得率达到 14.46%,经实验得知未改性的米糠 SDF 得率为 1.03%,M+C-SDF 的得率提高了 13.04 倍。这一显著的提升表明,通过优化工艺参数,能够大幅度提高 SDF 的得率,为米糠的营养价值和功能性开发提供了理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] AIN H B U, SAEED F, KHAN M A, et al. Comparative study of chemical treatments in combination with extrusion for the partial conversion of wheat and sorghum insoluble fiber into soluble[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(6):2059-2067.
- [2] YANG C, SI J, CHEN Y, et al. Physicochemical structure and functional properties of soluble dietary fibers obtained by different modification methods from *Mesona chinensis* Benth. residue [J]. Food Research International, 2022, 157:111489.
- [3] WEI C, GE Y, LIU D, et al. Effects of high-temperature, high-pressure, and ultrasonic treatment on the physicochemical properties and structure of soluble dietary fibers of millet bran[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 8:820715.
- [4] HUANG H, CHEN J, CHEN Y, et al. Modification of tea residue dietary fiber by high-temperature cooking assisted enzymatic method; structural, physicochemical and functional properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145:111314.
- [5] ZHENG Y, LI J, WANG X, et al. Effects of three biological combined with chemical methods on the microstructure, physicochemical properties and antioxidant activity of millet bran dietary fibre[J]. Food Chemistry, 2023, 411:135503.
- [6] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution[J]. Food Chemistry, 2019, 297:124983.
- [7] FAN X, CHANG H, LIN Y, et al. Effects of ultrasound-assisted enzyme hydrolysis on the microstructure and physicochemical properties of okara fibers[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69:105247.
- [8] LI S, HU N, ZHU J, et al. Influence of modification methods on physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from corn bran[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14:100298.
- [9] GAN J, XIE L, PENG G, et al. Systematic review on modification methods of dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119:106872.
- [10] LEE S C, PROSKY L, DEVRIES J. Determination of total, soluble, and insoluble dietary fiber in foods—enzymatic-gravimetric method, MES-TRIS buffer; collaborative study[J]. Journal of AOAC International, 1992, 75(3):395-416.
- [11] MA R, CHEN J N, ZHOU X J, et al. Effect of chemical and enzymatic modifications on the structural and physicochemical properties of dietary fiber from purple turnip (*Brassica rapa* L.) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145:111313.
- [12] LIU Y, ZHANG H, YI C, et al. Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment[J]. Food Chemistry, 2021, 342:128352.
- [13] LU H, YANG K, ZHAN L, et al. Optimization of flavonoid extraction in dendrobium officinale leaves and their inhibitory effects on tyrosinase activity[J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2019, 2019:1-10.
- [14] YUN C, JI X, CHEN Y, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction of *Scutellaria baicalensis* root polysaccharide and its hypoglycemic and immunomodulatory activities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 227:134-145.

(责任编辑 闫杏丽)