

豆基杂粮米稀挤压膨化工艺优化

Optimization of extruded process for bean-based multigrain rice paste

刘淑婷¹ 王颖^{1,2,3} 沈琰¹ 孙跃如¹ 佐兆杭¹

LIU Shu-ting¹ WANG Ying^{1,2,3} SHEN Yan¹ SUN Yue-ru¹ ZUO Zhao-hang¹

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 国家杂粮工程技术研究中心,

黑龙江 大庆 163319; 3. 黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

(1. College of Food, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

3. Key Laboratory of Agro-Products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

摘要:以豆渣为主要原料,复配杂粮及药食同源食材制备豆基杂粮米稀,以物料加水量、螺杆转速、Ⅲ区机筒温度为响应因素,糊化度为考察指标,在单因素试验的基础上,利用 Design-Expert 8.0.6 设计试验得到挤压膨化技术制备豆基杂粮米稀的最佳工艺条件。结果表明,在物料加水量 12.5%、螺杆转速 330 r/min、Ⅲ区机筒温度 160 ℃ 的条件下,制备的豆基杂粮米稀具有较高的糊化度(91.47%),冲调时口感细腻、香味浓郁、不易结块。

关键词:豆渣;杂粮米稀;挤压膨化;糊化度

Abstract: Taking bean dregs as the main raw material, compounding miscellaneous grains and homology of medicine and food to prepare soybean-based multigrain rice paste. The material addition amount, screw speed, and the temperature of the zone III barrel were used as response factors, and the gelatinization degree was the investigation index. On the basis of the single factor experiment, the optimal process conditions for the preparation of bean-based multigrain rice paste by the extrusion-expansion technique were obtained by Design-Expert 8.0.6 design test. The results showed that when the material addition amount was 12.5%, the screw rotation speed was 330 r/min, and the III zone barrel temperature was 160 ℃, the maximum expansion degree was 91.47%. The bean-based multigrain rice prepared under the optimal conditions had a high degree of gelatinization, with fine taste and rich flavor, meanwhile it was not easy to agglomerate.

Keywords: bean dregs; multigrain rice paste; extrusion puffing; gelatinization degree

杂粮中含有丰富的蛋白质、维生素、矿物质和膳食纤维,在调节血脂、延缓衰老、提高免疫力等方面具有积极作用^[1]。豆渣是豆奶或豆腐加工过程中的副产物,研究^[2]发现豆渣中含有 50%~70% 膳食纤维,膳食纤维具有降糖降脂、预防肠道疾病及控制体重等功效,已经成为一种新的功能性食品来源,但由于豆渣存在质地粗糙,适口性差,不易消化等问题,豆渣类产品缺乏多样性,目前主要应用于饼干、蛋糕等焙烤类食品,在与杂粮复配的冲调饮品中缺乏系统性的研究。

挤压膨化技术通过螺杆、物料以及机筒间相互强烈的机械摩擦和剪切作用及压力转变,使物料急速膨胀形成多孔隙结构^[3],将不利于人体吸收的大分子物质裂解、细化成小分子营养物质,具有提高物料香味,促进消化吸收,改善产品口感等优势^[4-5]。目前,挤压膨化工艺制备谷物冲调食品的研究主要集中在产品的冲调稳定性,如李雪帆^[6]研究了挤压膨化对燕麦麸皮冲调粉吸水指数的影响;许亚翠^[7]研究了挤压膨化对谷物早餐粉溶解度和结块率的影响;张琳等^[8]研究了挤压膨化技术对黑豆冲调粉膨化度的影响等。而在产品的冲调消化性方面,前人^[9-10]的研究主要集中在对单一原料冲调消化特性的影响,缺少挤压膨化技术对多种杂粮原料复配的冲调类食品消化性的研究。试验拟以豆渣为主要原料,复配杂粮及药食同源食材,以物料糊化度作为冲调消化性表征指标,探究挤压膨化技术对豆基杂粮营养米稀的最佳工艺参数,旨在提高豆渣的利用率,改善豆渣和杂粮复配后适口性差、不易消化等问题,为豆基杂粮类冲调食品的开发提供理论依据。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:2017YFD0401203);黑龙江省农垦总局科技项目(编号:HNK135-05-02)

作者简介:刘淑婷,女,黑龙江八一农垦大学在读硕士研究生。

通信作者:王颖(1979—),女,黑龙江八一农垦大学教授,博士。

E-mail: wychen156@163.com

收稿日期:2019-05-09

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

豆渣:实验室自制;

藜麦、黑米、芸豆、小米、燕麦、糙米、黄芪、山楂、枸杞等原料:市售;

硫酸钾、硫酸铜、酒石酸钾钠等:分析纯,辽宁泉瑞试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤压膨化机:DS32 系列实验型,济南赛信机械有限公司;

电子天平:YP1200 型,上海麦聚瑞电子仪器有限公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9070A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

电热恒温水浴锅:DK-S22 型,上海精密实验设备有限公司;

超微粉碎机:FDV 型,北京环亚天元机械技术有限公司。

1.3 方法

1.3.1 豆基杂粮米稀的制备

原料挑选→清洗浸泡→沥干→粉碎过筛(80 目)→混合配比→水分调节→挤压膨化→超微粉碎→指标测定→包装成品

以营养均衡为首要条件,在前期研究的基础上确定原料种类及配比为:豆渣(30%)、糙米(15%)、藜麦(15%)、芸豆(10%)、燕麦(10%)、薏米(10%)、栗子(2%)、黑枣(2%)、黑芝麻(2%)、枸杞(2%)、核桃(2%)。调节混匀的物料水分,双螺杆挤压膨化过程细化、均化物料,膨化物冷却至室温后超微粉碎机粉碎得到精细粉状成品。

1.3.2 挤压膨化单因素试验 选取物料加水量为 8%, 10%, 12%, 14%, Ⅲ 区机筒温度为 145, 155, 160, 165, 170 °C, 螺杆转速为 280, 300, 320, 340, 360 r/min, 经单因素试验确定不同条件对物料糊化度的影响。挤压膨化机分三段式加热,即喂料区(Ⅰ区)、挤压区(Ⅱ区)和膨化区(Ⅲ区),通常Ⅲ区温度较高,可在短时间内改变物料状态,因此主要考察Ⅲ区机筒温度。考察单一因素时,固定其他因素不变,进料速度 320 r/min,物料加水量 10%,机筒温度 70 °C(Ⅰ区)—95 °C(Ⅱ区)—160 °C(Ⅲ区),螺杆转速 340 r/min。平行试验 3 次,膨化产物冷却后粉碎。

1.3.3 响应面法优化挤压膨化工艺 根据单因素试验结果,以糊化度为响应值,物料加水量、螺杆转速及Ⅲ区机筒温度为响应因素,采用三因素三水平的 Box-Behnken 试验设计筛选优化物料加水量、螺杆转速及Ⅲ区机筒温

度参数。平行试验 3 次。

1.3.4 糊化度的测定 根据文献[11—12]修改如下:取两个具塞三角瓶 A、B,分别加入 1.0 g 样品和 50 mL 蒸馏水,另取三角瓶 C 只加 50 mL 水做空白对照;A 瓶糊化 20 min 后冷却至室温(B、C 不做处理),分别向 A、B、C 三角瓶中加 5% 糖化酶 5 mL, 37 °C 恒温振荡 1 h。取出后立即加入 1 mol/L 盐酸 2 mL 终止反应,将反应物各自定容至 100 mL,过滤储备。取 A、B、C 滤液各 10 mL 置于三角瓶中,分别加入 0.1 mol/L 碘液 10 mL 和 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液 18 mL,封口静置 15 min;最后加入 10% 硫酸溶液 2 mL,用 0.1 mol/L 硫代硫酸钠溶液滴定,记录消耗体积。按式(1)计算糊化度。

$$GD = \frac{V_C - V_A}{V_C - V_B} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

GD——糊化度, %;

V_C ——空白样品消耗硫代硫酸钠溶液的体积, mL;

V_A ——完全糊化样品消耗硫代硫酸钠溶液的体积, mL;

V_B ——待测样品消耗硫代硫酸钠溶液的体积, mL。

1.3.5 统计学分析 运用 Design Expert 8.0.6 和 SPSS 20 软件分析和处理数据,绘制相关图表。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 物料加水量对豆基杂粮米稀糊化度的影响 如图 1 所示,糊化度随物料加水量增加呈逐渐上升趋势,当加水量超过 12% 后糊化度呈下降趋势。推测淀粉糊化度受水分子影响,增加物料含水量利于淀粉吸水膨胀,提高糊化度^[13];但水分作为润滑物质,含量过高会降低物料在挤压膨化时所受机械作用,同时较多水分使受热溶胀后的淀粉分子难以联结、缠绕形成糊状胶体,从而降低物料糊化度^[14—15]。

2.1.2 螺杆转速对豆基杂粮米稀糊化度的影响 由图 2 可知,当螺杆转速低于 320 r/min 时,糊化度随螺杆转速

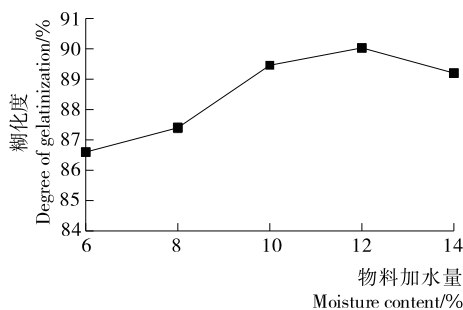


图 1 加水量对糊化度的影响

Figure 1 Influence of water addition on gelatinization degree

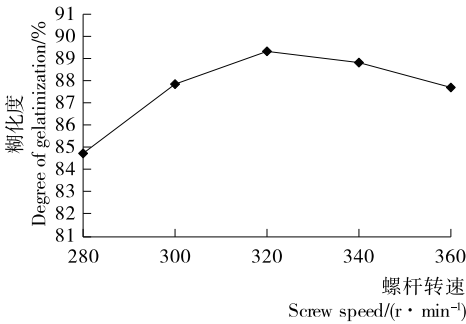


图 2 螺杆转速对糊化度的影响

Figure 2 Influence of screw speed on gelatinization degree

升高而增大;当螺杆转速超过 320 r/min 时,糊化度呈下降趋势。推测是螺杆旋转产生剪切力破坏淀粉结构,易于淀粉糊化^[7]。当螺杆转速较低时,随螺杆转速增加物料在膨化过程中受机械作用增大,颗粒结构破坏明显,淀粉较易糊化;当螺杆转速过快,物料在机筒中的停留时间缩短,吸收热能减少,糊化度因此下降^[16-18]。

2.1.3 Ⅲ区机筒温度对豆基杂粮米稀糊化度的影响 由图 3 可知,物料糊化度随机筒温度升高呈先上升后下降趋势;机筒温度为 160 ℃时糊化度最高,为 90.3%。当温度低于 160 ℃时,淀粉溶液迅速吸收热量,糊化度上升明显,而温度继续升高导致物料吸收热能增加,加剧反应^[19],淀粉由稳定糊化状态转向降解状态,颗粒解体后重新分散在水中,从而糊化度降低^[20-21]。

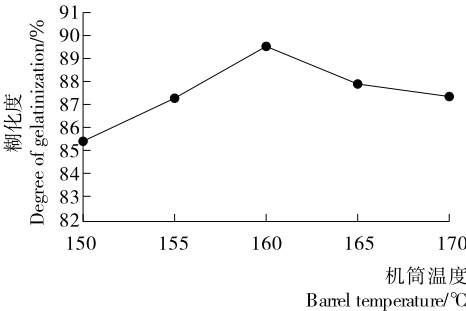


图 3 温度对糊化度的影响

Figure 3 Influence of temperature on gelatinization degree

2.2 响应面试验设计与结果分析

根据单因素试验结果,确定的试验因素水平设计表见表 1,试验结果见表 2。

由软件分析所得各因素和响应值关系的二次多项回归模型为:

$$Y = 91.43 + 1.88A + 2.01B + 2.28C - 2.29AB + 2.44AC + 2.92BC - 2.88A^2 - 2.45B^2 - 5.70C^2. \quad (2)$$

由表 3 可知,回归模型极显著($P < 0.01$)且失拟项不显著($P > 0.05$),说明多元回归模型成立;显著性检验结果

表 1 响应面因素与水平

Table 1 Response surface factors and levels

水平	A 物料加水量/%	B 螺杆转速/($r \cdot \min^{-1}$)	C Ⅲ区机筒温度/℃
-1	10	300	155
0	12	320	160
1	14	340	165

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken test design and results

试验序号	A	B	C	糊化度/%
1	-1	-1	0	80.45
2	1	-1	0	87.83
3	-1	1	0	88.95
4	1	1	0	87.18
5	-1	0	-1	80.69
6	1	0	-1	80.53
7	-1	0	1	80.32
8	1	0	1	89.90
9	0	-1	-1	81.84
10	0	1	-1	80.11
11	0	-1	1	80.61
12	0	1	1	90.57
13	0	0	0	90.77
14	0	0	0	89.02
15	0	0	0	93.85
16	0	0	0	92.02
17	0	0	0	91.51

表 3 多元回归模型及显著性检验

Table 3 Multiple regression model and significance test

方差来源	平方和	自由度	标准误差	F 值	P 值
A	28.24	1	28.24	13.83	0.007 5 **
B	32.32	1	32.32	15.83	0.005 3 **
C	41.54	1	41.54	20.34	0.002 8 **
AB	20.93	1	20.93	10.25	0.015 0 *
AC	23.72	1	23.72	11.61	0.011 3 *
BC	34.16	1	34.16	16.73	0.004 6 **
A ²	34.85	1	34.85	17.07	0.004 4 *
B ²	25.37	1	25.37	12.42	0.009 7 *
C ²	136.66	1	136.66	66.92	<0.000 1 **
模型	396.56	9	44.06	21.58	0.000 3 **
残差	14.29	7	2.04		
失拟项	1.84	3	0.61	0.20	0.893 5
误差	12.45	4	3.11		
总和	410.85	16			

† * 差异显著($P < 0.05$); ** 差异极显著($P < 0.01$)。

R^2 为 96.52% ($>90\%$), 说明该模型与实际数据具有较高的拟合度。物料加水量、螺杆转速及机筒温度均为极显著, 其显著性由大到小依次为机筒温度 $>$ 螺杆转速 $>$ 物料加水量。

如图 4~6 所示, 各等高线图均呈椭圆形, 说明物料加水量和螺杆转速、物料加水量和机筒温度、机筒温度和螺杆转速之间的交互作用显著^[22]。

由响应面软件优化得到挤压膨化制备豆基杂粮米稀的最佳工艺参数: 物料加水量 12.58%, 螺杆转速 330.16 r/min, 机筒温度 161.96 $^{\circ}\text{C}$ 时, 得到的膨化度最大为 92.66%。考虑到实际操作的可行性, 确定物料加水量 12.5%, 螺杆转速 330 r/min, 机筒温度 160 $^{\circ}\text{C}$, 进行 3 次平行验证实验, 糊化度的平均值为 91.47%, 与理论值接近, 说明利用此回归模型得到的最佳工艺参数具有实用价值。

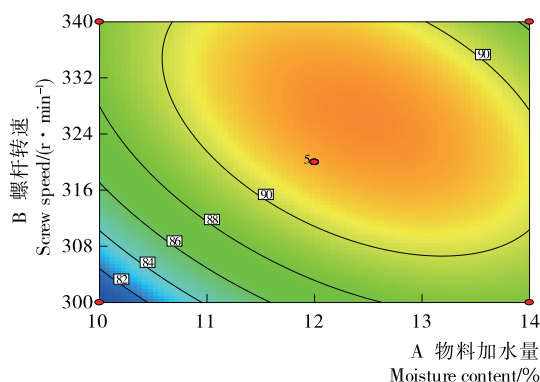


图 4 物料加水量与螺杆转速对糊化度的交互作用

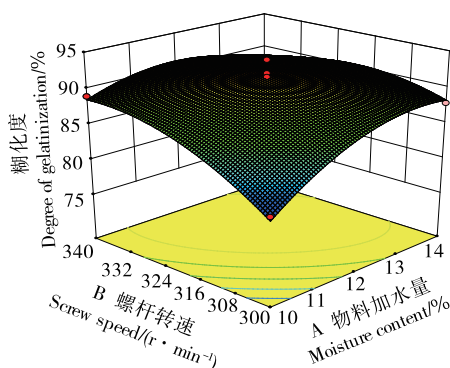


Figure 4 Interaction of material water addition and screw speed on sample gelatinization

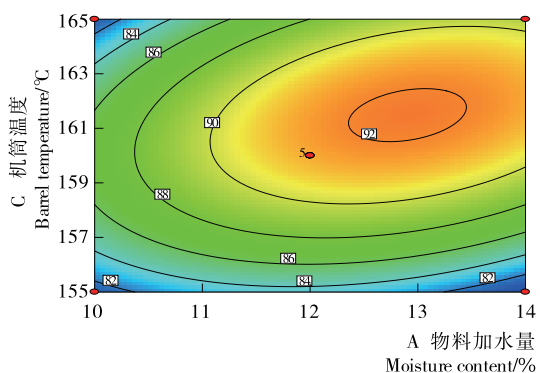


图 5 物料加水量与机筒温度对糊化度的交互作用

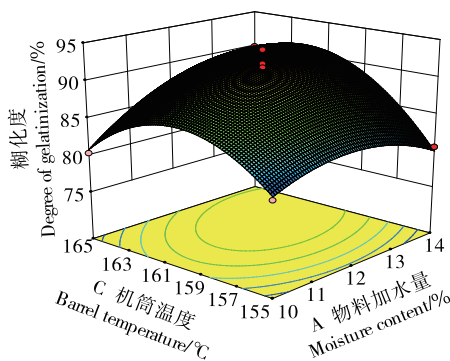


Figure 5 Interaction of material addition water volume and barrel temperature on gelatinization degree

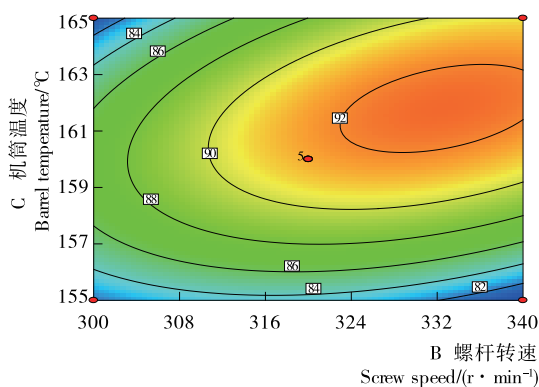


图 6 螺杆转速与机筒温度对糊化度的交互作用

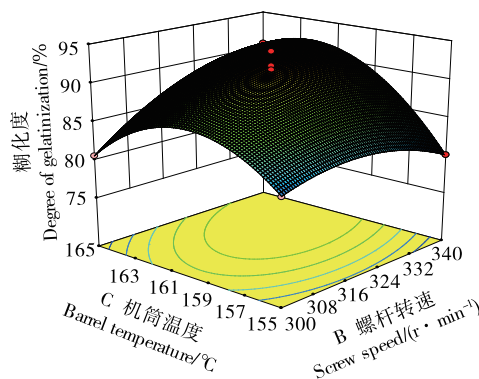


Figure 6 Interaction of screw speed and barrel temperature on gelatinization

3 结论

通过响应面试验优化得到挤压膨化技术制备豆基杂粮米稀的最佳工艺参数为物料加水量 12.5%、螺杆转速 330 r/min、Ⅲ区机筒温度 160 ℃。在此工艺条件下制备的豆基杂粮米稀糊化度较高,口感细腻,表明通过挤压膨化技术可提高包含多种杂粮原料(复配药食同源食材)的豆基杂粮米稀的冲调消化性,且制备的豆基杂粮米稀营养均衡,易于吸收,作为营养强化型即食代餐类食品具有较高食用价值。

参考文献

- [1] 谭斌, 谭洪卓, 张晖, 等. 杂粮加工与杂粮加工技术的现状与发展[J]. 粮食加工, 2015, 15(5): 6-10.
- [2] NORAJIT K, GU B J, RYU G H. Effects of the addition of hemp powder on the physicochemical properties and energy bar qualities of extruded rice[J]. Food Chemistry, 2011, 129(4): 1 919-1 925.
- [3] 刘晓松, 薛红梅, 刘玉美, 等. 杂粮营养健康调食品的研[J]. 粮食科技与经济, 2019, 44(1): 69-73.
- [4] 李学琴, 秦礼康, 张秀军. 挤压膨化茯苓复合营养粉冲调性研究及营养评价[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 192-198.
- [5] 裴斐, 仲磊, 杨文建, 等. 蛹虫草复合谷物杂粮膨化产品的工艺优化及糊化特性[J]. 食品科学, 2016, 37(24): 47-53.
- [6] 李雪帆. 燕麦麸皮杂粮冲调粉的研制[D]. 太谷: 山西农业大学, 2016: 20-22.
- [7] 许亚翠. 谷物早餐粉挤压工艺及其冲调性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 10-11.
- [8] 张琳, 李建科, 任彩霞, 等. 挤压膨化技术制备脱脂黑豆冲调粉的研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 208-211.
- [9] 王庆, 张光, 杨春华, 等. 挤压膨化对大米粉糊化度及蛋白质体外消化率的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 230-234.
- [10] 欧阳梦云, 孙子钦, 王燕, 等. 响应面试验优化挤压膨化法制备速食糙米粥工艺[J]. 中国农学通报, 2018, 34(22): 156-164.
- [11] 陈子意. 槟榔芋全粉挤压膨化特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015: 10-11.
- [12] 郑大朋. 面包糠挤压膨化工艺研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012: 14-15.
- [13] 王丽娟, 杨雪飞, 黄毅, 等. 挤压工艺参数对膨化杂粮粉感官品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 67-70.
- [14] 张冬媛, 张名位, 邓媛元, 等. 发芽—挤压膨化—高温 α 淀粉酶协同处理改善全谷物糙米粉冲调性的工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(6): 106-112.
- [15] 张乾能, 吴斌, 宗力. 微细化莲子淀粉的流变特性研究[J]. 食品科学, 2009, 30(9): 89-94.
- [16] 魏再鸿, 周洋, 王丹晖, 等. 双螺杆挤压机参数对挤压工程米吸水指数的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 101-102.
- [17] 刘骏. 淮山全粉挤压膨化特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015: 15-18.
- [18] 张丽颖. 杂粮代餐粉冲调性质的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017: 24-27.
- [19] 刘宜伯, 张璐, 王丽娟, 等. 燕麦冲调粉速溶性的研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2014, 6(12): 15-16, 20.
- [20] 刘汶鹏, 解迪, 邹险峰, 等. 挤压膨化对玉米豆粕混合物糊化度及脲酶活性的影响[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(2): 76-79.
- [21] 宋超洋. 小米速溶粉的制备及其性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 56-58.
- [22] 王龙平, 程祖铎, 修茹燕, 等. 响应面优化高抗性淀粉速食粥加工工艺[J]. 食品科技, 2014, 33(7): 141-146.
- (上接第 217 页)
- [15] 宫晓, 郑喜群, 刘晓兰, 等. 脉孢霉固体发酵产木聚糖酶的条件研究[J]. 粮食与饲料工业, 2015, 12(6): 51-55.
- [16] 邓永平, 刘晓兰, 艾瑞波, 等. 好食脉孢霉液态发酵产木聚糖酶的研究[J]. 饲料工业, 2013, 34(2): 45-48.
- [17] LI Yan-jun, PENG Xiao-wei, CHEN Hong-zhang. Comparative characterization of proteins secreted by *Neurospora sitophila* in solid-state and submerged fermentation[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2013, 116(4): 493-498.
- [18] 周德庆, 徐德强. 微生物学实验教程[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 350.
- [19] 毕韬韬, 吴广辉, 高愿军. 豆渣深加工研究进展[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(6): 149-152.
- [20] 高大响, 黄小忠. 1 株黑曲霉固态发酵豆渣生产纤维素酶及淀粉酶工艺的优化[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(22): 218-220.
- [21] PANDEY A, SOCCOL C R, LARROCHE C. Current developments in solid-state fermentation: Water relations in solid-state fermentation (Gervais P.) [M]. Springer New York, 2008: 74-116.
- [22] KRISHNA C. Solid-state fermentation systems: An overview[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2005, 25(1): 1-30.
- [23] GARCIA N F L, DA SILVA SANTOS F R, GONÇALVES F A, et al. Production of β -glucosidase on solid-state fermentation by *Lichtheimia ramosa* in agroindustrial residues: Characterization and catalytic properties of the enzymatic extract[J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2015, 18(4): 314-319.
- [24] RAJOKA M I, HUMA T, KHALID A M, et al. Kinetics of enhanced substrate consumption and endo- β -xylanase production by a mutant derivative of *Humicola lanuginosain* solid-state fermentation[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2005, 21(6/7): 869-876.
- [25] XU Xiang-qun, LIN Meng-meng, ZANG Qiang, et al. Solid state bioconversion of lignocellulosic residues by *Inonotus obliquus* for production of cellulolytic enzymes and saccharification[J]. Bioresource Technology, 2018, 247(8): 88-95.