



米曲霉菌发酵豆渣制备饼干的工艺研究与品质分析

薛伟^{1,2}, 顾佳丽³, 王苏月³, 曹仲文³

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏旅游职业学院 烹饪科技学院, 江苏 扬州 225127; 3. 扬州大学 旅游烹饪学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 为充分利用豆渣并适应人们营养健康需求, 本试验将以米曲霉菌发酵后的豆渣制成富含膳食纤维的豆渣饼干。通过单因素试验探讨豆渣、起酥油、白砂糖、脱脂牛奶对豆渣饼干食品感官的影响, 在此基础上进行响应面分析, 优化豆渣饼干的配方。结果表明: 发酵式豆渣饼干的最佳配方(以烘焙百分比表示)为豆渣添加量 31%, 起酥油添加量 41%, 脱脂牛奶添加量 36%, 白砂糖添加量 21%。按照此配方生产出的豆渣饼干色泽金黄, 酥脆适中, 甜度适宜, 硬度为 33.75 N, 内聚性为 0.25 Ratio, 弹性为 0.45 mm, 咀嚼性为 3.74 Jm, 与市场畅销饼干的客观数据接近。各理化指标符合国家标准, 发酵豆渣饼干水分含量为 3.60%, 灰分含量为 1.30%, 水分活度为 0.73, 粗脂肪含量为 26.00 g·(100 g)⁻¹, 粗蛋白含量为 10.63 g·(100 g)⁻¹, 膳食纤维含量为 6.24 g·(100 g)⁻¹。结果为制备出具良好的市场前景的富含膳食纤维的豆渣饼干奠定基础。

关键词: 大豆; 豆渣; 米曲霉菌; 发酵; 响应面分析; 质构; 食品感官; 饼干

Processing Technology and Quality Analysis of *Aspergillus oryzae* Fermented Soybean Dregs Biscuits

XUE Wei^{1,2}, GU Jiali³, WANG Suyue³, CAO Zhongwen³

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China; 2. College of Culinary Science and Technology, Jiangsu Tourism Vocational College, Yangzhou 225127, China; 3. College of Tourism and Culinary Science, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: In order to make full use of soya bean dregs and adapt to people's nutritional and health needs, soya bean dregs fermented with *Aspergillus oryzae* were made into dried soya bean dregs biscuits rich in dietary fibre. A one-way test was conducted to investigate the effects of soya bean dregs, shortening, sugar and skimmed milk on the organoleptic properties of soya bean dregs biscuits, based on which a response surface analysis was performed to optimize the formulation of soya bean dregs biscuits. The results showed that the optimal formula (expressed as baking percentage) for fermented soya bean dregs biscuits was 31% soya bean dregs, 41% shortening, 36% skimmed milk and 21% sugar. The dried soya bean dregs biscuits produced according to this formula were golden in colour, moderately crispy, suitably sweet, with a hardness of 33.75 N, cohesion of 0.25 Ratio, elasticity of 0.45 mm and chewiness of 3.74 Jm, which were close to the objective data of the best-selling biscuits in the market, and had a good market potential. Each physical and chemical indicators in line with national standards, fermented soya bean dregs biscuit moisture content of 3.60%, ash content of 1.30%, moisture activity of 0.73, crude fat content of 26.00 g·(100 g)⁻¹, crude protein content of 10.63 g·(100 g)⁻¹, and dietary fibre content of 6.24 g·(100 g)⁻¹.

Keywords: soybean; soybean dregs; *Aspergillus oryzae*; fermented; response surface analysis; texture; food senses; biscuits

豆渣是大豆加工过程中的副产物之一, 占全豆质量的 16% ~ 25%^[1], 含丰富的膳食纤维, 可降低血糖、血脂与胆固醇, 在预防结肠癌、高血压、糖尿病和心血管等疾病方面发挥着重要的作用, 且还含有一定量的蛋白质^[2-3]。由于豆渣水分含量高, 运输困难且易腐, 口感粗糙, 以往主要用于动物饲料, 甚至直接丢弃, 构成浪费和污染环境^[4-5], 故有必要充分利用豆渣的营养价值, 生产加工有益于人体健康的食品。

当豆渣应用于面制品中时, 随着豆渣含量增

加, 会使得面粉中面筋含量总体呈下降态势^[6]。饼干对面筋含量要求较低^[7], 目前市面上常见的饼干主要是以高热量、低膳食纤维的小麦粉为原料^[8], 因此, 以豆渣为原料制备饼干有其独特优势。豆渣制作的饼干, 主要有韧性饼干和酥性饼干两种^[9], 从豆渣充分应用的角度而言, 目前以酥性饼干为主。

部分研究直接将湿豆渣或烘烤、粉碎后的干豆渣粉代替部分面粉, 得到豆渣饼干。如吴金凤等^[10]通过增加糖油、疏松剂的用量, 干豆渣粉占面粉的用量甚至可达 40%, 但豆渣添加量直接影响面团的

收稿日期: 2023-11-26

基金项目: 中餐非遗技艺传承文化和旅游部重点实验室开放课题(WLB2202); 江苏省高校自然科学基金面上项目(19KDJ530002); 江苏高校“青蓝工程”中青年学术带头人培养项目(SJH202229)。

第一作者: 薛伟(1981—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事食品工程研究开发与智能决策研究。E-mail: xw_dht@163.com。

通讯作者: 曹仲文(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事轻工技术与工程及传统烹饪产业化研究。E-mail: zwcao@yzu.edu.cn。

流变性,添加量越大,面团性能变劣,当增大添加量时,应加大油的用量,故豆渣饼干的最佳添加量为20%以下。韩小存^[11]认为如果严格按照传统制作饼干的糖油比例标准,豆渣粉添加量不能超过6%。又因为豆渣具有一定的腥味和粗糙颗粒感^[2],故以豆渣粉直接添加进面粉制作饼干对食品感官具一定的影响。为此,目前的研究主要集中在豆渣的不同预处理方式,以及调整豆渣添加量和配方,使感官质量^[12]和营养价值提升。一般的预处理方法包括物理方式、化学方式、生物方式(发酵和酶解等)及多方法的综合联用^[13]。董艳梅等^[14]比较不同的干燥方法处理豆渣,认为经真空冷冻干燥处理效果最好,得到豆渣粉占添加量为10%的豆渣饼干。姚垚等^[15]采用胶体磨获得豆渣,而后经过烘干和高速粉碎,以豆渣粉15 g、小米粉15 g、低筋面粉26 g、木糖醇20 g、黄油22 g的配方获得感官评价较好的小米豆渣饼干。Wang等^[16]以超细粉碎和微波加热技术对豆渣进行预处理,得到含量达20%的豆渣饼干。

豆渣经微生物发酵后口感可得到明显改善,有利于产品的感官品质提升^[5],且豆渣的蛋白经发酵后产生的小肽和游离氨基酸,具较好的生理机能^[6]。赵功玲等^[17]将新鲜豆渣经过胶体磨、高压灭菌、酶解,烘干、粉碎等工艺,最终获得总膳食纤维的含量不低于10%的豆渣饼干。孙禹凡等^[18]通过水酶法,获得豆渣占面粉比最高可达50%的豆渣饼干,但未对其进行感官评定。彭荣等^[19]以红曲霉发酵豆渣,获得豆渣占面粉比为17%的呈红褐色且有光泽、浓郁豆香味,口感松脆、细腻不粘牙、组织均匀有层次的饼干。肖少香^[20]以毛霉和面包酵母发酵后的豆渣粉为原料,得到豆渣占面粉和淀粉比达26%的、口感酥脆、香味纯正的发酵酵豆渣饼干。薛振环^[21]和黄文利^[22]以粗壮脉纹胞菌发酵豆渣,分别占面粉比为12%和10%,制作得到口感较好的酥性饼干,但由于豆渣含量较低,故而该饼干的膳食纤维含量较低,且该菌株不宜获得。

为充分利用豆渣的膳食纤维,易生奎通过酶解获得改性的豆渣膳食纤维,又将该膳食纤维由超声波-高速剪切联合处理及3D打印技术,得到豆渣饼干^[13]。该工艺设备投入较大,过程较为复杂。李镛基等^[23]通过碱浸提、酶解、脱色洗涤、脱水等步骤获得豆渣膳食纤维,将其与面粉、糖、黄油、鸡蛋混合,得到口感较好的豆渣饼干,但该工艺中单元操作较多。

本研究利用由米曲霉菌进行发酵后获得的豆渣制备饼干。参考相关研究在豆渣饼干中加入奶粉和牛奶的做法^[19,22,24-25],使用脱脂牛奶代替水调制面团,添加适量泡打粉与之平衡^[26],并参考传统配方添加一定量的盐、糖和起酥油,旨在制作营养和风味俱佳的豆渣饼干。

1 材料与方法

1.1 材料

豆渣由扬州大学扬子津校区津园食堂提供;食盐、益海嘉里花旗起酥油、展艺牌蛋糕用小麦低筋粉、伊利无菌砖脱脂奶、优级太古白砂糖和晏小铎比利时风味焦糖酥性饼干为市售。

1.2 主要仪器及设备

TA-XT plus 型质构仪,英国 SMS 公司;电子天平,奥豪斯国际贸易(上海)有限公司;DZM-140 小型压面机,辉轩食品机械有限公司;SUN-MATE 电烤箱,珠海三麦机械有限公司;101-2 型恒温干燥箱,上海实验仪器厂;KDN-04 凯氏定氮仪,上海向帆仪器有限公司;SZF-06A 脂肪测定仪,上海楚工实业有限公司;HD-3A 水分活度测量仪,无锡市华科仪器仪表有限公司;SX2-5-12A 马沸炉,郑州鑫涵仪器设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 发酵豆渣的制取 新鲜豆渣→压榨→蒸料→制曲→发酵。

压榨:将新鲜豆渣用三层纱布过滤,挤出多余水分。经过压榨后的豆渣,用手捏紧,手指间可见少量余水流出但不下滴即可。

蒸料:将已经压榨过的豆渣搓散,放在多孔板上,再放在沸水浴中进行蒸料,从上大汽开始计时,再蒸 20 min 左右(有热豆香味溢出即可)。

制曲:将米曲霉菌和面粉按照质量比 1:20 的比例混合,等蒸熟的豆渣冷却不烫手时,拌入菌种面粉,充分混匀(面粉的作用是为了接种均匀)。

发酵:曲房温度保持 30 ℃,让米曲霉菌生长 24 h,当曲料手感疏松柔软有弹性,菌丝丰富,开始生孢子,曲料略显黄绿色时酶的活力最高,此时结束发酵。

1.3.2 发酵豆渣制备饼干工艺流程 材料处理:将发酵后的的豆渣,放入 80 ℃烘箱中鼓风干燥 6 h,拌入低筋粉混合均匀。

面团调制:将辅料在和面机机中与主料混匀,在醒发箱 35 ℃条件下静置 10 min。

辊轧成型:压面机辊压面团成面片,手工将面

片分割成厚度为 3 mm 的饼胚。

焙烤、冷却:将饼胚平铺于烤盘放入烤箱,设置上下火均为 165 ℃,焙烤 17 min,表面呈金黄色出炉,将其冷却至室温。

1.3.3 单因素试验 以豆渣代替部分低筋粉,以烘焙百分比表示配方(该配方是以面粉的总量为 100%,配方中其他原料以其占面粉的百分比而定,且总百分比含量超过 100%),其中豆渣占面粉分别为 20%、25%、30%、35% 和 40%。因为泡打粉对饼干的食物感官没有显著性影响^[27],食盐对饼干的感官影响较小^[1],所以固定泡打粉含量 0.5%,食盐含量 0.5%。完全以脱脂牛奶代替水。添加脱脂牛奶 25%、30%、35%、40% 和 45%,起酥油 30%、35%、40%、45% 和 50%,白砂糖 10%、15%、20%、25% 和 30%,研究豆渣、起酥油、脱脂牛奶、白糖各单因素对饼干品质的影响。每个单因素 3 组重复试验,并由感官评定小组进行综合评定得分。

1.3.4 响应面试验 使用 Design-Expert 8.0.6 软件进行响应面分析。在单因素实验基础上,试验因素为豆渣添加量(A)、起酥油添加量(B)、脱脂牛奶添加量(C)、白砂糖添加量(D),设计响应面 Box-Behnken 中心试验,并以 1、0、-1 表示 4 个因素的

高低水平,每个试验组合重复 2 次,取其平均值,响应值 R 表示感官评定。试验因素及水平设置如表 1 所示,按照如下公式计算并形成各设置的编码。为检验实验准确度,进行 3 次平行试验。

$$X_1 = (A - 30) \div 5$$
$$X_2 = (B - 40) \div 5$$
$$X_3 = (C - 35) \div 5$$
$$X_4 = (D - 20) \div 5$$

表 1 试验因素及水平设置

Table 1 Setting of experimental factors and level

单位: %

因素 Factor	水平 Level		
	- 1	0	1
A	25	30	35
B	35	40	45
C	30	35	40
D	15	20	25

1.3.5 饼干的感官评价 参照国家标准 GB/T 20980—2007《饼干》改进饼干的感官评定方法,由 10 人组成的评定小组进行综合评价,取平均值,评分标准详见表 2^[1]。

表 2 发酵式豆渣饼干感官标准

Table 2 Sensory standards for fermented soybean residue biscuits

项目 Project	评分标准 Scoring criteria	分值 Score
形态 Form	外形完整,厚薄大致均匀,不起泡,无裂缝,不收缩,不变形,没有凹底	23 ~ 30
	外形完整,轻微起泡变形,有少量凹底	10 ~ 22
	外形不完整,表面起泡,有较多凹底	1 ~ 9
色泽 Colour and lustre	呈品种应有的金黄色,色泽基本均匀,表面有光泽,无白粉,无过焦现象	16 ~ 20
	色泽略有不均匀,略有过焦现象	9 ~ 15
	色泽很不均匀,表面没有光泽,有明显焦黑色或白点	1 ~ 8
滋味和口感 Flavor and taste	无豆渣腥味,无异味,口感酥松,不黏牙	20 ~ 25
	有豆渣味,无异味,口感较酥松,轻微黏牙	11 ~ 19
	有豆渣味和异味,口感不酥松,黏牙	1 ~ 10
组织 Structure	断面结构呈多孔状,细密,无大孔洞	20 ~ 25
	断面结构呈多孔状,不细密,有较少大孔洞	11 ~ 19
	断面结构呈多孔状,不细密,大孔洞较多	1 ~ 10

1.3.6 质构测定 采用 TA-XT plus 食品质构仪对饼干样品进行质构性能测定。选择直径 2 mm 的探头 P/36R 进行压缩测试。测定条件:测定前速率为 1 mm·s⁻¹、测定速率为 1 mm·s⁻¹、测定后速率为 1 mm·s⁻¹、高度 25 cm,触发力 1 N,压缩比 25%,测定发酵式豆渣饼干的硬度、咀嚼性、弹性、内聚性等参数。每组样品测定 3 次,取平均值。

1.3.7 饼干理化指标测定 参照 GB5009.3—2016 中的直接干燥法测定饼干水分含量;GB5009.4—2016 中的食物总灰分的测定饼干灰分含量;采用智能水分活度测量仪测定饼干水分活度;GB5009.6—2016 中的索氏抽提法测定饼干脂肪含量;GB5009.5—2016 中的凯氏定氮法测定饼干蛋白质含量;GB5009.88—2014 中的酶重量法测定饼干膳食纤维含量。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 豆渣添加量对饼干感官品质的影响 由图1可知,随着豆渣添加量的增加,感官评分呈现先上升后下降的趋势。这是由于豆渣中既含有不可溶性膳食纤维,不溶于水^[28],又含有一定的可溶性膳食纤维,具有很强的持水性,在和面过程中易吸水膨胀,与部分吸水的面筋蛋白一起形成网络^[2]。所以豆渣的添加一方面使小麦面筋的数量相对减少,导致面团流变学特性恶化,添加量越大,影响越大;另一方面豆渣中膳食纤维是一种多组分的凝胶体,对面团流变学特性具有一定的改良作用^[29]。故当豆渣含量过低时,面筋力显得过大,外表会过于干燥,当豆渣含量过高时,面筋力过小,制品在烘烤中难以保持良好的花纹,烘烤出的饼干松散易碎^[30]。且当豆渣含量过少时,品尝不到豆香味;豆渣添加量过多时,豆腥味重,色泽发暗,口感粗糙,饼干的硬度增加。即豆渣添加量对豆渣饼干的形态、色泽、滋味口感与组织形态均有显著性影响。本试验条件下最高感官评分对应的豆渣含量为30%,故初步确定豆渣的最佳添加量为30%。

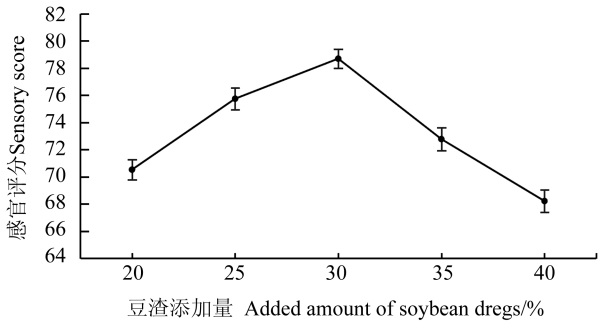


图1 发酵豆渣添加量对饼干感官品质的影响
Fig.1 Effect of the added amount of fermented soybean dregs on the sensory quality of biscuits

2.1.2 起酥油添加量对饼干感官品质的影响 由图2可知,随着起酥油添加量的增加,豆渣饼干的感官评分呈现先增加后降低趋势。这是由于起酥油分布在淀粉颗粒和蛋白质的表面,形成一层薄膜,一方面阻碍面团过多吸水,降低面团的内聚力,调节面团流变性,增加饼干的酥脆性^[9];另一方面,起酥油在面团内部形成的油膜,也阻碍水分的蒸发,提高饼干的持水力^[14]。当食物中缺少起酥油时,饼干较为坚硬,缺乏脆性,但当起酥油添加量超过40%时,感官评分逐渐下降,是因为起酥油过多时,面团过软,会使豆渣饼干口感油腻,且面团的黏性

和弹性降低导致饼干易破裂。故初步确定起酥油的最佳添加量为40%。

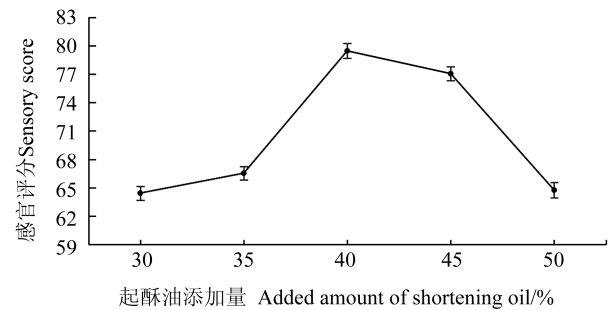


图2 起酥油添加量对饼干感官品质的影响
Fig.2 Effect of the added amount of shortening voil on the sensory quality of biscuits

2.1.3 脱脂牛奶添加量对饼干感官品质的影响 由图3可知,随着脱脂牛奶添加量的增加,感官评分呈现先上升后下降的趋势,这是由于脱脂牛奶添加量过少和过多时,都会影响饼干的硬度^[25],且影响饼干的色泽和香味^[31]。脱脂牛奶过少时,面团不易成型,豆渣饼干较为干涩松散发硬,香味不够,随着脱脂牛奶的增加,水分增加,饼干的香味更加浓郁,色泽由浅黄转为金黄。但当脱脂牛奶比例超过35%时,口感较软,咀嚼性较差,当进一步增大时,由于形成较多的面筋,口感又开始发硬。本试验条件下,当比例为35%时,感官评分达到最大值,故初步确定脱脂牛奶的最佳添加量为35%。

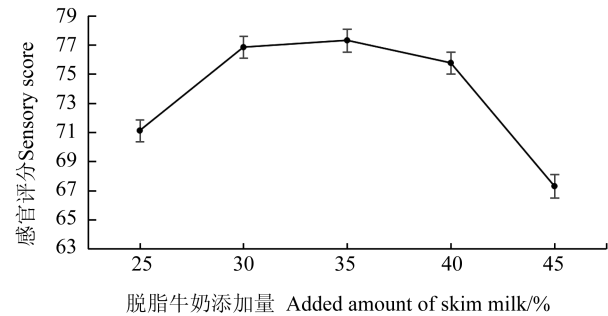


图3 脱脂牛奶添加量对饼干感官品质的影响
Fig.3 Effect of the added amount of skim milk on the sensory quality of biscuits

2.1.4 白砂糖添加量对饼干感官品质的影响 糖在饼干中的作用主要为乳化、赋味以及上色的作用^[30]。在饼干原料的搅打过程中,糖还能帮助起酥油打成松状的组织,使面团表面光滑细腻^[9]。由图4可知,随着白砂糖比例的增加,豆渣饼干的感官评分呈现先上升后下降的趋势,这是由于糖的含量对饼干的硬度、黏性和咀嚼性有复杂性影响^[19]。白砂糖可以减少面筋网络形成,使面团弹性降低。当白

砂糖添加量过少,豆渣饼干略有黏牙,甜味不足,酥松度不够,质地不均匀。当白砂糖逐渐增加时,一方面增加甜味,掩盖豆腥味,在烘烤过程中与豆渣中游离氨基酸发生美拉德反应^[27]和焦糖化反应^[21],使制品产生风味与颜色的变化。但当白砂糖添加量超过 20% 时,感官评分逐渐下降,是因为白砂糖在烘烤过程中会形成微晶体,使得饼干的质地较硬^[19],且口感过甜。本研究条件下,当添加量为 20% 时,感官评分最高。因此,初步确定白砂糖的最佳添加量为 20%。

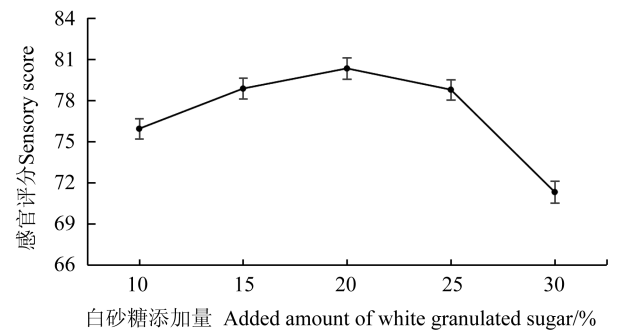


图 4 白砂糖添加量对饼干感官评分的影响

Fig. 4 Effect of added amount of white granulated sugar on the sensory score of biscuits

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面试验方差分析 由表 3 可知,在 29 组试验中,得分最高的为四因素的零水平组合,与单因素的试验最优点重合。但该结果仅仅表明了已做试验组的比较结果,为探索四因素的最佳实际组合,根据响应面的试验数据得到感官评分的回归方程,探究其极值和方程驻点(最佳组合)。由表 4 可以看出,模型 $P < 0.0001$,说明该模型极显著,对发酵式豆渣饼干试验的拟合较好,可以用来进行发酵式豆渣饼干的感官评分预测。一次项 A、B、C、D,交互项 AB、AD、BD 以及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对发酵式豆渣饼干的感官评分有极显著或显著影响。

交互项 AC、BC、CD 对发酵式豆渣饼干的感官评分不具有显著影响。因素影响主次顺序为豆渣添加量、起酥油添加量、白砂糖添加量、脱脂牛奶添加量。

表 3 试验方案及结果					
Table 3 Test Plan and Results					
序号 Serialnumber	X_1	X_2	X_3	X_4	Y(评分) Y(Score)
1	-1	-1	0	0	63.28
2	-1	1	0	0	66.54
3	-1	0	0	-1	70.04
4	-1	0	0	1	71.43
5	-1	0	-1	0	73.00
6	-1	0	1	0	74.78
7	0	0	-1	-1	67.83
8	0	0	1	-1	73.00
9	0	0	-1	1	75.00
10	0	0	1	1	75.02
11	0	-1	-1	0	75.36
12	0	1	-1	0	76.00
13	0	-1	1	0	77.00
14	0	1	1	0	77.46
15	0	-1	0	-1	78.00
16	0	1	0	-1	79.49
17	0	-1	0	1	80.00
18	0	1	0	1	80.00
19	0	0	0	0	85.36
20	0	0	0	0	85.46
21	0	0	0	0	85.47
22	0	0	0	0	85.63
23	0	0	0	0	86.72
24	1	-1	0	0	73.00
25	1	1	0	0	76.00
26	1	0	0	-1	76.00
27	1	0	0	1	77.00
28	1	0	-1	0	78.00
29	1	0	1	0	80.00

表 4 感官评定响应面方差分析结果						
Table 4 Sensory evaluation response surface analysis of variance results						
方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P	显著性 Significance
模型 Model	935.49	14	66.82	168.65	<0.000 1	**
A	139.61	1	139.61	352.36	<0.000 1	**
B	77.11	1	77.11	194.64	<0.000 1	**
C	14.06	1	14.06	35.49	<0.000 1	**
D	41.22	1	41.22	104.03	<0.000 1	**
AB	6.63	1	6.63	16.74	0.001 1	**
AC	0.23	1	0.23	0.58	0.458 4	
AD	13.10	1	13.10	33.08	<0.000 1	**
BC	0.07	1	0.07	0.18	0.674 5	

表 4(续)

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性
Source of variance	Sum of squares	Freedom	Mean square			Significance
BD	18.19	1	18.19	45.91	<0.000 1	**
CD	1.53	1	1.53	3.85	0.070 0	
A ²	384.40	1	384.40	970.21	<0.000 1	**
B ²	309.89	1	309.89	782.15	<0.000 1	**
C ²	47.49	1	47.49	119.85	<0.000 1	**
D ²	143.56	1	143.56	362.33	<0.000 1	**
残差 Residual	5.55	14	0.40			
失拟度 Misfitting degree	4.28	10	0.43	1.35	0.414 4	
纯误差 Pure error	1.27	4	0.32			
总和 sum	941.04	28				

注：* 表示 $P<0.01$ ；** 表示 $P<0.005$ 。
Note: * indicates $P<0.01$ ；** indicates $P<0.005$.

2.2.2 不同因素间的响应面分析 响应面图可直观地反映各因素对响应值的影响,响应面坡度越陡说明两因素交互作用显著^[32],将存在显著交互作用的因素作响应面如图 5 所示,响应面趋势较为陡峭,表明豆渣与起酥油、白砂糖与豆渣、白砂糖与起酥油之间的交互作用比较显著,因素相互之间在口感方面存在相互影响,与方差分析的结果相一致。

2.2.3 回归方程与最佳配方参数确定及验证 感官评定评分 R 与 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 的回归方程为: $R = 85.73 + 3.14A + 2.54B + 1.08C + 1.85D - 1.29AB - 0.24AC - 1.81AD + 0.14BC - 2.13BD - 0.62CD - 7.70A^2 - 6.91B^2 - 2.71C^2 - 4.70D^2$ 。其中, A 、 B 、 C 、 D 分别代表 $X_1 \sim X_4$ 因素对应的量。感官评分 R 的回归方程显著,表明该方程预测感官评分具有有效性, AC 、 BC 、 CD 对感官结果不具有显著性影响。进一步优化得到的回归方程: $R = 88.64 + 3.25A + 2.68B + 1.32C + 1.98D - 1.33AB - 1.97AD - 235BD - 7.89A^2 - 6.98B^2 - 2.98C^2 - 4.89D^2$ 。求解该回归方程的极值,得到发酵式豆渣饼干工艺优化得到的最佳配方为:豆渣添加量为 31%,起酥油添加量 41%,脱脂牛奶添加量为 36%,白砂糖添加量 21%,此时感官评分为 86.5 分。

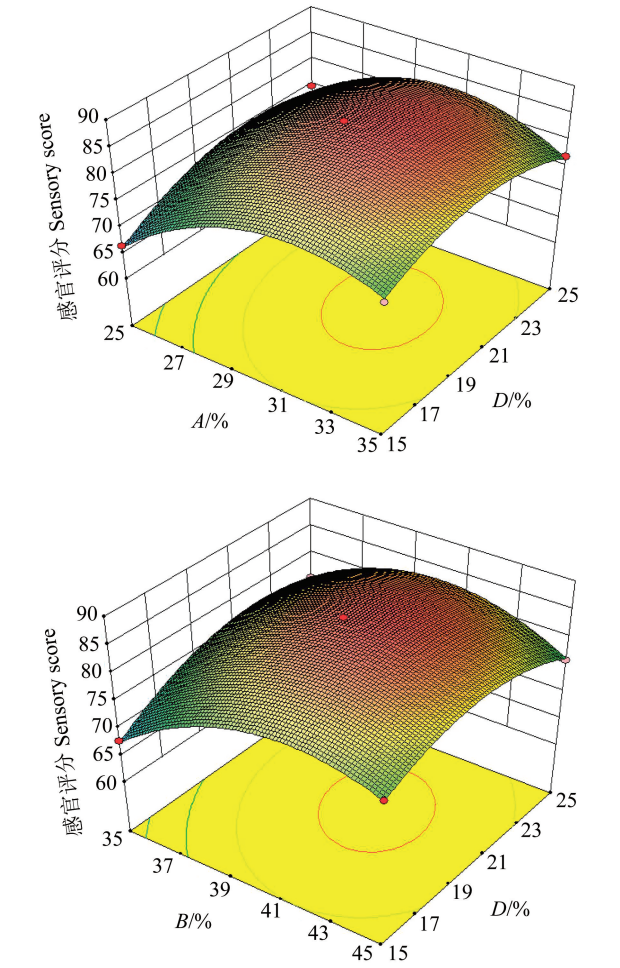
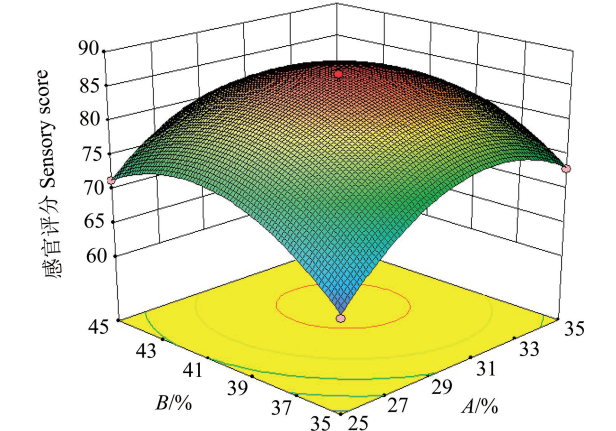


图 5 各因素对饼干感官评分的交互作用响应面图
Fig.5 Response surface map of the interaction of various factors on biscuit sensory scores

为检验实验准确度,进行 3 次平行试验,得到感官评分平均实测值为 86.92 分,与理论预测值相差不大,模型可靠,具有实际应用价值。在该参数下所制成的豆渣饼干形态完好,色泽金黄,口感酥松,风味较佳。

2.3 饼干的质构分析

因为感官评价具有较大的人为主观性^[7],而质构模式是通过样品进行两次压缩来模拟人体口腔的咀嚼运动,具有检测精度高、性能稳定等特点,因此,广泛应用于肉制品、粮油等食品的物性学分析^[33]。根据响应面优化得到的最佳配方制作发酵式豆渣饼干,用质构仪测定其物性特征,并将其与淘宝市场综合排名第一的晏小铎比利时风味焦糖酥性饼干对比。如表 5 所示,发酵式豆渣饼干硬度虽有轻微增加,但与晏小铎比利时风味焦糖酥性饼干的质构特性差异并不显著,因此本研究制作的发酵式豆渣饼干预计可能有较好的市场前景。

表 5 发酵式豆渣饼干与晏小铎风味焦糖酥性饼干质构指标
Table 5 Texture indicators of fermented soybean dreg biscuits and Yanxiaoduo flavored caramel crispy biscuits

指标 Index	发酵式豆渣饼干 Fermented soybean dreg biscuits	晏小铎焦糖酥性饼干 Yanxiaoduo caramel crispy biscuits
硬度 Hardness/N	33.75	27.85
内聚性 Cohesiveness/Ratio	0.25	0.30
弹性 Elasticity/mm	0.45	0.43
咀嚼性 Chewability/mJ	3.74	4.53

2.4 豆渣饼干理化性质检测

将本文研究的豆渣饼干与相关文献的豆渣饼干所测定的理化性质进行比较,可知本研究研发的豆渣饼干水分介于各类文献所研发的豆渣饼干之间,且符合国家标准 GB7100-2015 小于 4% 的要求(表 6)。

本研究的豆渣饼干灰分含量低于孙禹凡等^[18]和李镭基等^[23]所研发的饼干,表明无机物含量较

低,这可能与配方,包括面粉的品种有关。当水分活度低于 0.9 时,会抑制细菌的生长繁殖;当水分活度低于 0.8 时,抑制霉菌的生长繁殖^[34]。本研究的豆渣饼干的水分活度为 0.73,有利于豆渣饼干品质的保持。

本研究的豆渣饼干的粗脂肪含量,相较于其他文献的饼干,数值较大,这可能与起酥油的添加量(41%)较大有关,而蛋白含量则介于各类文献所研发的豆渣饼干之间。其中周晓洁等^[35]的粗蛋白和粗脂肪含量明显优于本研究的结果,原因可能与该研究直接应用豆纤维粉有关,因为随着膳食纤维在饼干中含量的增加,粗蛋白含量和粗脂肪含量可有显著性增加和减小^[18]。该工艺生产过程中涉及了超微粉碎与橙皮糖提取等工艺,在原料成本和工艺复杂性方面均大于本文的豆渣饼干。

豆渣中最主要的成分是膳食纤维^[1-3],由此豆渣饼干最重要的营养特性在于其膳食纤维的含量。本研究的豆渣饼干的膳食纤维含量虽然低于任龙梅^[36]、赵功玲等^[17]、孙禹凡等^[18]研究的膳食纤维含量,但最终测定结果大于 $6\text{ g}\cdot(100\text{ g})^{-1}$,根据 GB28050—2011《预包装食品营养标签通则》规定属于高膳食纤维产品。任龙梅^[36]的配方中因为添加了一部分富含膳食纤维的全麦粉,所以最终膳食纤维含量较高,但蛋白质含量较低。赵功玲等^[17]和孙禹凡等^[18]通过酶解工艺,获得了较高含量的膳食纤维豆渣饼干,显示酶解较发酵具一定的优势,与周伏忠等^[37]的研究结论一致,但该工艺过程较为复杂,如赵功玲等^[17]还涉及胶磨、高压灭菌、干燥、粉碎等工艺,而本研究不涉及豆渣粉碎等操作。

表 6 豆渣饼干的理化性质
Table 6 Physical and chemical properties of soybean dreg biscuits

指标来源 Source of indicators	本文 This paper	文献 Literature								
		[1]	[11]	[13]	[14]	[22]	[26]	[27]	[30]	[32]
水分 Moisture content/%	3.60	0.17	—	—	2.40	2.86	—	1.80	4.50	1.85
灰分 Ash content/%	1.30	—	—	—	—	—	—	4.67	—	1.49
水分活度 Water activity	0.73	—	—	—	—	0.24	—	—	—	—
脂肪 Fat/[g·(100 g) ⁻¹]	26.00	—	—	25.80	20.40	17.56	—	24.43	—	—
蛋白质 Protein/[g·(100 g) ⁻¹]	10.63	—	12.54	6.20	19.03	5.97	11.70	9.44	16.35	5.83
膳食纤维 Dietary fiber/[g·(100 g) ⁻¹]	6.24	0.16	3.12	8.20	—	6.05	10.00	17.21	2.80	4.00

注:表中“—”表示该文献中对该指标未曾测定。其中文献[18]的数据指豆渣含量占面粉 30% 的参数(与本文的豆渣占比相近)。
Note: “—” in the table indicates that the indicator has not been measured in the literature. The data in reference^[18] refers to the parameter where the content of soybean residue accounts for 30% of flour (similar to the proportion of soybean residue in this article).

3 讨论

由单因素试验结果可知,豆渣、起酥油、牛奶、白砂糖的添加量与采用豆渣直接制作饼干^[9,27,29,31,36,38,39]和使用发酵后的豆渣制作饼干^[19,21-22]的研究结果均相一致。本研究配方起酥油的含量高于传统配方,是因为本研究的豆渣含量增加,而豆渣填入改变了面团特性,且其吸油性很强,所以添加豆渣就要相应增加油的用量^[29],且起酥油也能掩盖部分豆腥味,增加油脂香味^[19]。

由响应面分析可知,因素的主次顺序与以红曲发酵豆渣制作饼干的分析结果^[19]完全一致,豆渣添加量、起酥油添加量、白砂糖添加量的影响主次顺序也与以粗壮脉纹胞菌发酵豆渣的分析结果^[21]完全一致。发酵豆渣的添加量对饼干感官的影响最大,与未经发酵的豆渣制作饼干的分析结果^[31,39]也一致。未经发酵的豆渣制作饼干的分析结果^[30]一般是糖量的影响大于油量的影响,与本研究结果相反,一方面是因为如本研究所揭示,油与糖有极显著影响交互作用,此亦为周晓洁等^[35,40]研究所证明,另一方面亦可能是豆渣与油亦有影响,因为本研究结果证明豆渣添加量与油添加量有极显著相关性。

综上,本研究与相关文献豆渣饼干的理化参数测得的数据与添加量比较吻合,且配方的影响趋势也比较一致,但本研究的豆渣饼干在膳食纤维含量的提升和工艺简化方面取得了一定的进展。

4 结论

本研究最终确定的发酵豆渣饼干的最优配方为:豆渣添加量31%,起酥油添加量41%,脱脂牛奶添加量为36%,白砂糖添加量为21%。理化指标的测定结果表明该饼干水分要求符合国家标准,属于高膳食纤维产品。与市场畅销饼干的质构参数对比可知,其在食品品质的客观数据上接近,具良好的市场前景。

在后续的研究中,可进一步优化配方和制作工艺,如将白砂糖改用合适的代糖,因为油糖的交互作用显著,可适当降低油的含量,并应用粉碎工艺,以获得具更好的食品感官和营养价值的豆渣饼干。

参考文献

[1] 赵立,陈军,李艳利. 豆渣高纤维咸香饼干配方的研制[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(11): 287-289. (ZHAO L, CHEN J, LI Y L. Development of the formula of bean dregs high fiber salty biscuits[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(11): 287-289.)

[2] 王秋玉,姚远,陈航,等. 烘烤豆渣制作可可脂巧克力工艺研究[J]. 美食研究, 2018, 35(2): 48-51. (WANG Q Y, YAO

Y, CHEN H, et al. Preparation technology of cocoa butter chocolate with baked soybean dregs[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2018, 35(2): 48-51.)

[3] 薛伟,曹仲文,袁洁茹. 基于单纯形的豆渣酱配方优化研究[J]. 美食研究, 2020, 37(3): 64-68. (XUE W, CAO Z W, YUAN J R. A study on the formula optimization of soy paste based on simplex-lattice design[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2020, 37(3): 64-68.)

[4] XUE Y, CUI L, QI J, et al. The effect of dietary fiber (oat bran) supplement on blood pressure in patients with essential hypertension: A randomized controlled trial [J]. Nutrition, Metabolism, and Cardiovascular Diseases: NMCD, 2021, 31(8): 2458-2470.

[5] MIHIRANIE S, JAYASUNDERA M, PERERA N. Development of snack crackers incorporated with defatted coconut flour[J]. Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 2017, 7(2): 153-159.

[6] 李争艳. 大豆与豆腐品质相关性及其豆渣面制品研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009: 31-32. (LI Z Y. Study on the correlation between soybean and the quality of tofu and flour products made from bean dregs [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009: 31-32.)

[7] 陈晓柯,常虹,郭卫芸,等. 豆渣的综合利用现状及其研究进展[J]. 河南农业科学, 2015, 44(12): 1-5. (CHEN X K, CHANG H, GUO W Y, et al. Current situation and research progress of exploitation of soybean dregs[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(12): 1-5.)

[8] 尹乐斌,何平,刘娅丽,等. 豆渣综合利用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(5): 14-16. (YIN L B, HE P, LIU Y L, et al. Research progress of comprehensive utilization of bean dregs [J]. Cereals & Oils, 2021, 34(5): 14-16.)

[9] 李燮昕,王鑫,刘世洪,等. 豆渣酥性饼干和韧性饼干的研制及其质构特性比较[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(8): 78-84. (LI X X, WANG X, LIU S H, et al. Development and texture comparison of soybean residue crisp biscuit and semi-hard biscuit [J]. Cereals & Oils, 2021, 34(8): 78-84.)

[10] 吴金凤,尚永彪,李翔,等. 豆渣酥性饼干的研制[J]. 四川食品与发酵, 2006, 42(6): 32-35. (WU J F, SHANG Y B, LI X, et al. Study on the crisp bean dregs biscuit [J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2006, 42(6): 32-35.)

[11] 韩小存. 大豆渣粉在酥性饼干中的应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8223-8228. (HAN X C. Research on the application of soybean dregs powder in crisp biscuits [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(20): 8223-8228.)

[12] 李静. 豆渣的综合利用研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2022, 29(2): 28-32. (LI J. Research progress on comprehensive utilization of bean dregs [J]. Cereal & Food Industry, 2022, 29(2): 28-32.)

[13] 易生奎. 超声-高速剪切改性大豆豆渣不溶性膳食纤维用于3D打印曲奇饼干的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2019: 4-6. (YI S K. Study on the use of ultrasound high-speed shear modified insoluble dietary fiber from soybean residue for 3D printing of cookies [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019: 4-6.)

[14] 董艳梅,宋梦盼,安艳霞,等. 豆渣的干燥方式对饼干品质的影响及其加工工艺的研究[J]. 农产品加工, 2020(15): 26-31. (DONG Y M, SONG M Y, AN Y X, et al. Study on the influence of drying methods of soybean residue on the quality of biscuits and its processing technology [J]. Agricultural Products Processing, 2020(15): 26-31.)

[15] 姚垚. 小米豆渣低糖纤维饼干工艺条件的优化[J]. 现代面粉

工业, 2020, 34(2): 53. (YAO Y. Optimization of processing conditions of low-sugar fiber biscuits with millet bean dregs[J]. Modern Flour Milling Industry, 2020, 34(2): 53.)

[16] WANG F, SUKMANOV V, ZENG J. Effect of the addition of soybean dregs treated by ultrafine grinding and microwave technology on the quality of crispy biscuits[J]. Ukrainian Food Journal, 2021, 10(4): 678-690.

[17] 赵功玲, 孔捷. 酶解豆渣纤维饼干的研制[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(10): 67-69. (ZHAO G L, KONG J. Enzymolysis bean dregs biscuit development [J]. Food Research and Development, 2009, 30(10): 67-69.)

[18] 孙禹凡, 齐宝坤, 廖一, 等. 水酶法豆渣对饼干品质及消化性影响的研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(2): 113-117, 137. (SUN Y F, QI B K, LIAO Y, et al. Effect of aqueous enzymatic bean dregs on quality and digestibility of biscuit[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(2): 113-117, 137.)

[19] 彭荣, 蔡琼, 张杰. 制备工艺对红曲发酵豆渣饼干品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(12): 109-113. (PENG R, CAI Q, ZHANG J. Effect of preparation technology on the quality of Monascus fermented bean residue biscuit [J]. Cereals & Oils, 2022, 35(12): 109-113.)

[20] 肖少香. 豆渣发酵技术的研究及产品开发[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006: 1-2. (XIAO S X. Study on the fermentation technique of bean residue and the product development [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2006: 1-2.)

[21] 薛振环. 粗壮脉纹胞菌发酵豆渣的研究及产品开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2008: 67-68. (XUE Z H. Study on fermented soybean dregs by Neurospora. crassa and its products development [D]. Nanchang: Nanchang University, 2008: 67-68.)

[22] 黄文利. 粗壮脉纹胞菌发酵豆渣多糖的结构解析及其对结肠炎小鼠肠道菌群的影响和产品研发[D]. 南昌: 南昌大学, 2022: 58-67. (HUANG W L. Structural analysis of fermented soybean residue polysaccharides by Streptomyces robustus and their effects on gut microbiota in colitis mice, as well as product development [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 58-67.)

[23] 李镛基, 赵峰, 郑克炜, 等. 碱浸提豆渣膳食纤维提取工艺及豆基高纤饼干配方优化[J]. 大豆科学, 2022, 41(3): 314-322. (LI R J, ZHAO F, ZHENG K W, et al. Alkaline extraction technology of dietary fiber from soybean dregs and formula optimization of soybean-based high-fiber biscuit [J]. Soybean Science, 2022, 41(3): 314-322.)

[24] 郭雪霞, 牟建楼, 王颖, 等. 奶香豆渣膳食纤维饼干的研制[J]. 食品工业, 2015, 36(4): 143-148. (GUO X X, MU J L, WANG J, et al. Development of milk and bean dregs dietary fiber biscuit[J]. The Food Industry, 2015, 36(4): 143-148.)

[25] 张雅娜, 郭昊, 杨九莹, 等. 豆渣黑米曲奇饼干配方优化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(6): 140-145. (ZHANG Y N, GUO H, YANG J Y, et al. Formula optimization of bean dregs black rice cookies[J]. Food Research and Development, 2023, 44(6): 140-145.)

[26] 陈霞. 西点工艺[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2019: 88-102. (CHEN X. Foreign pastry craft [M]. Beijing: China Textile Publishing House, 2019: 88-102.)

[27] 李颖, 崔少宁, 谢玮, 等. 豆渣饼干的研制[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(12): 22-24. (LI Y, CUI S N, XIE W, et al. The development of soybean dreg biscuit[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(12): 22-24.)

[28] 苟青松, 胡伟, 王展, 等. 添加豆渣对苏打饼干制作过程及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 39-44. (GOU Q S, HU W, WANG Z, et al. Effect of bean pule on processing and quality of soda biscuits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 39-44.)

[29] 宋莲军, 张莹, 李争艳. 豆渣饼干工艺条件的优化[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(10): 112-116. (SONG L J, ZHANG Y, LI Z Y. Research on optimal process conditions of soybean residue biscuit[J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(10): 112-116.)

[30] 黄益前, 苏扬. 豆渣膳食纤维饼干的研制[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(5): 41-44. (HUANG Y Q, SU Y. Development of bean dregs biscuits with dietary fiber[J]. Food Research and Development, 2015, 36(5): 41-44.)

[31] 王瑞霞, 甄红伟, 牟建楼, 等. 豆渣纤维饼干关键技术研究[J]. 食品工业, 2014, 35(7): 113-116. (WANG R X, ZHEN H W, MU J L, et al. The study on the key technology of dietary fiber biscuit made of soybean residue [J]. The Food Industry, 2014, 35(7): 113-116.)

[32] 薛伟, 曹仲文, 陆可佳. 基于模糊数学和响应面优化鸡骨架鲫鱼汤研究[J]. 美食研究, 2021, 38(4): 54-60. (XUE W, CAO Z W, LU K J. Optimization of chicken skeleton crucian carp soup based on fuzzy mathematics and response surface methodology [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2021, 38(4): 54-60.)

[33] 谭霄, 曾林, 韩超, 等. 杏鲍菇残渣膳食纤维在酥性饼干中的应用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(14): 192-195. (TAN X, ZENG L, HAN C, et al. Application of dietary fiber extracting from Pleurotus eryngii residue in crisp biscuit [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(14): 192-195.)

[34] VIEIRA M V, OLIVEIRA S M, AMADO I R, et al. 3D printed functional cookies fortified with Arthrospira platensis; Evaluation of its antioxidant potential and physical-chemical characterization [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105893.

[35] 周晓洁, 王秋香, 赵良忠, 等. 响应面法在豆纤维橙味曲奇饼干研制中的应用[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 163-168, 180. (ZHOU X J, WANG Q P, ZHAO L Z, et al. Application of response surface methodology in the development of soybean fiber orange cookies[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 163-168, 180.)

[36] 任龙梅. 豆渣膳食纤维饼干最佳制作工艺配方研究[J]. 现代食品, 2021, 27(3): 116-118. (REN L M. Study on the optimum manufacturing process formula of bean dregs dietary fiber biscuits[J]. Modern Food, 2021, 27(3): 116-118.)

[37] 周伏忠, 冯菲, 宁萌, 等. 鹰嘴豆浆液蛋白发酵与酶解效果的对比分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(29): 54-58. (ZHOU F Z, FENG F, NING M, et al. Comparative analysis of fermentation and enzymolysis of chickpea milk proteins [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(29): 54-58.)

[38] 邱燕燕, 原琦. 一种豆渣酥性饼干的研制[J]. 大豆科技, 2018(1): 39-43. (QIU Y Y, YUAN Q. Production on crispy biscuit from bean dregs[J]. Soybean Science & Technology, 2018(1): 39-43.)

[39] 杨君, 聂燕华, 林丹琼. 高蛋白高膳食纤维豆渣饼干的研制[J]. 现代食品科技, 2013, 29(4): 792-795. (YANG J, NIE Y H, LIN D Q. Development of soybean dregs biscuit with high protein and dietary fiber [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(4): 792-795.)

[40] 陈玉娇, 沙蕾, 朱嘉依, 等. 利用豆渣生产无糖豆渣饼干的工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(36): 14017-14019. (CHEN Y J, SHA L, ZHU J L, et al. Study on the processing technology of the sugar-free okara biscuit production using bean dregs[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(36): 14017-14019.)