

青稞全粉营养成分分析及青稞脆片制备工艺优化

Nutritive composition analysis of highland barley flour and optimization of processing parameters for highland barley chips

何 伟

HE Wei

(长沙市食品药品信息与审评认证中心, 湖南 长沙 410013)

(Changsha Food and Drug Information and Evaluation and Certification
Center, Changsha, Hunan 410013, China)

摘要:分析了青稞全粉的蛋白质、脂肪、灰分、水分含量及氨基酸组成,并优化了青稞脆片的制备工艺条件,包括挤压膨化、预干燥及烘焙工艺。结果表明:青稞全粉的蛋白质含量为 10.23 g/100 g,脂肪含量为 2.51 g/100 g,灰分为 1.86 g/100 g,水分 8.41 g/100 g;青稞全粉中含有 17 种氨基酸,总氨基酸含量为 9.471 g/100 g。最佳挤压膨化工艺条件为挤压腔各区(T2~T6)温度依次为 60, 140, 140, 80, 50 °C,青稞全粉喂料量 50 kg/h,螺杆转速 280 r/min,青稞全粉含水量 23%;最佳预干燥条件为干燥温度 60 °C,风量 12%,停留时间 16 min,料层厚度 30 mm;最佳烘焙条件为底火 180 °C,面火 220 °C,时间 70 s,该条件下制品的糊化度达到 98.73%,制备的青稞脆片呈浅黄色、有光泽,表面有皱纹,膨化均匀、气泡细密,香且酥脆。

关键词: 青稞全粉;营养成分;青稞脆片;挤压膨化;糊化度

Abstract: Nutritional components of highland barley flour were analyzed, including protein, fat, ash, moisture and amino acids. The processing parameters for highland barley chips was studied, including extrusion puffed, pre-drying and roasting. The results showed that, in the highland barley flour, the protein contents of protein, fat, moisture and ash were 10.23 g/100 g, 2.51 g/100 g, 8.41 g/100 g, and 1.86 g/100 g respectively. Highland barley flour contained 17 amino acids, and the contents of total amino acid were 9.471 g/100 g. The optimum preparation of extrusion puffed conditions were determined as follows: barrel temperature of T2 to T6 were 60, 140, 140, 80, 50 °C, feeding rate 50 kg/h,

screw speed 280 r/min, and moisture content 23%. The optimum preparation of pre-drying conditions was determined as follows: drying temperature 60 °C, air volume 12%, drying time 16 min, material thickness 30 mm. The optimum preparation of roasting conditions was determined as follows: surface fire 180 °C, bottom fire 220 °C, time 70 s. Under the control of these conditions, the gelatinization degree of extruded puffing highland barley flour was 98.73%, and highland barley chips had good quality with good taste, color, aroma and appearance.

Keywords: highland barley flour; nutritional components; highland barley chips; extrusion puffed; gelatinization degree

青稞(*Hordeum vulgare* var. *coeleste* L.)又称裸大麦,属禾本科大麦属的变种,具有适应性强、生长期短、耐旱、耐瘠薄、易栽培等优异种性^[1],是青藏高原最具特色、最具优势的农作物。青稞属于“三高两低”(高蛋白、高纤维、高维生素、低脂肪和低糖)食品,其结构组成满足现代健康饮食的要求,是谷类作物中的佳品^[2]。而且青稞中还含有 β -葡聚糖^[3]、黄酮^[4]、多酚^[5]等具有保健和药用价值的生理活性成分,是一种潜在的营养保健经济作物。现代研究发现,青稞水溶性多糖对 HT-29 结肠癌细胞具有抑制作用^[6];从青稞中分离的 β -葡聚糖对乙醇引起的大鼠胃损伤具有保护作用^[7];紫青稞麸皮中的花青素具有抗氧化及抗生物膜活性^[8]。此外还有学者^[9]从青稞水解物中筛选出了抗菌肽。但由于青稞全粉口感较差,目前除了传统的青稞食品(糌粑^[10]和青稞酒^[11])外,新研发的青稞产品多数是将青稞作为部分添加成分,如青稞米卷^[12]、青稞粉油茶^[13]、青稞馒头^[14]、青稞全粉挤压米^[15]、松茸青稞饼干^[16]等,未见仅以青稞全粉为原料制备青稞脆片的相关报道。

挤压膨化技术作为一种经济实用的新型加工方法,主要是通过水分、热能、机械剪切和压力等综合作用形成的

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(编号:2017YFD0401204)

作者简介:何伟(1986—),男,长沙市食品药品信息与审评认证中心工程师,硕士。E-mail: 458485906@qq.com

收稿日期:2020-05-01

高温高压短时加工过程^[17],能够细化粗粮,改善杂粮口感,钝化不良因子、提高蛋白消化率。该技术以其连续性、高效性以及产品形态多样性被广泛应用于休闲食品、婴幼儿食品、速溶茶、面类、谷物等食品领域^[18]。刘霭莎等^[19]曾对青稞粉的挤压膨化工艺及挤压膨化处理对青稞粉品质的影响进行了研究,结果表明,挤压膨化能够改善青稞粉的加工品质。但该试验追求高膨化度,其优化出的工艺参数并不适用于青稞脆片的加工。试验拟以西藏青稞全粉为原料,分析其氨基酸组成,并以最终产品的糊化度和感官品质为指标,优化青稞脆片制备工艺条件,以期对青稞的深加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 试验材料

青稞全粉:西藏天麦力食品科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

氨基酸专用高效液相色谱仪:Agilent1260 型,日本岛津公司;

双螺杆挤压机:FMHE50-24 型,湖南富马科食品工程技术有限公司;

连续式预干燥流化床:FMYR-400 型,湖南富马科食品工程技术有限公司;

高速压片机:FMPK-400 型,湖南富马科食品工程技术有限公司;

半自动定氮仪:KDY-04 08(B)型,上海瑞正仪器设备有限公司;

连续式高温焙烤系统:FMDR-400 型,湖南富马科食品工程技术有限公司;

箱式电阻马弗炉: SX2-4-10 型,天津市中环实验电炉有限公司;

冷却机:FMCC-400 型,湖南富马科食品工程技术有限公司。

1.2 方法

1.2.1 工艺流程

青稞全粉→混合调质→挤压膨化(从进料端到出料端各区温度依次为 60,140,140,80,50℃,青稞全粉喂料量 50 kg/h,螺杆转速 280 r/min,青稞全粉含水量 23%)→预干燥(干燥温度 60℃,风量 12%,停留时间 16 min,料层厚度 30 mm)→压片(压辊温度 10℃,压辊间隙 2 μm)→烘焙(底火 180℃,面火 220℃,时间 70 s)→冷却(35℃)→成品

1.2.2 挤压膨化工艺优化 挤压膨化过程中,影响糊化度的主要因素有物料水分含量、喂料量、加工温度和螺杆转速^[20]。因此,试验对这 4 个因素进行优化。

(1) 腔体温度对青稞挤压膨化的影响:试验所用挤压机腔体温度从进料端到出料端共分 5 个温区(T2~T6),

前期预试验发现,T3 和 T4 温度对青稞挤压膨化效果的影响较大。因此,试验仅对这两个温区的参数进行优化。固定腔体 T2、T5 和 T6 温度分别为 60,80,50℃,青稞全粉喂料量 50 kg/h,青稞全粉含水量 24%,螺杆转速 280 r/min,考察 T3 和 T4 的温度组合(80℃/100℃,100℃/110℃,120℃/120℃,130℃/130℃,140℃/140℃)对青稞挤压膨化效果的影响。

(2) 青稞全粉喂料量对青稞挤压膨化的影响:固定挤压腔各区(T2~T6)温度依次为 60,140,140,80,50℃,螺杆转速 280 r/min,青稞全粉含水量 24%,考察青稞全粉喂料量(30,40,50,60,70 kg/h)对青稞挤压膨化效果的影响。

(3) 螺杆转速对青稞挤压膨化的影响:固定挤压腔体各区(T2~T6)温度依次为 60,140,140,80,50℃,青稞全粉喂料量 50 kg/h,青稞全粉含水量 24%,考察螺杆转速(160,220,280,340,400 r/min)对青稞挤压膨化效果的影响。

(4) 青稞全粉含水量对青稞挤压膨化的影响:固定挤压腔体各区(T2~T6)温度依次为 60,140,140,80,50℃,青稞全粉喂料量 50 kg/h,螺杆转速 280 r/min,考察青稞全粉含水量(18%,20%,22%,24%,26%)对青稞挤压膨化效果的影响。

(5) 正交试验设计:根据单因素试验结果,选择对青稞挤压膨化效果影响相对较大的因素,以糊化度为评价指标,进一步优化青稞全粉挤压膨化工艺参数。

1.2.3 预干燥工艺参数的确定 采用连续式预干燥流化床对挤压膨化后的青稞全粉进行预干燥处理。在通风量 12%,停留时间 16 min 的条件下,考察干燥温度和料层厚度对物料干燥效果及产能的影响。

1.2.4 烘焙时间的确定 在底火 180℃,面火 220℃的条件下,考察烘焙时间(50,60,70,80 s)对青稞脆片品质的影响。

1.2.5 测定项目及方法

(1) 水分含量:按 GB 5009.3—2016 的直接干燥法执行。

(2) 蛋白质含量:按 GB 5009.5—2006 的凯氏定氮法执行。

(3) 脂肪含量:按 GB 5009.6—2016 的索氏抽提法执行。

(4) 灰分含量:按 GB 5009.4—2016 的第一法执行。

(5) 氨基酸含量:参考文献[21]。

(6) 糊化度:酶水解法^[22]。

1.3 数据处理

所有试验均重复 3 次,结果以其平均值表示。

2 结果与分析

2.1 青稞氨基酸组成

2.1.1 基本营养成分 由表 1 可知,青稞全粉中蛋白含量高达 10.23 g/100 g,脂肪含量仅 2.51 g/100 g。

表 1 青稞全粉的营养成分

Table 1 Nutritional components of highland barley flour

成分	含量/(10 ⁻² g·g ⁻¹)
蛋白质	10.23
脂肪	2.51
灰分	1.86
水分	8.41

2.1.2 氨基酸组成 由表 2 可知,青稞全粉中总氨基酸含量为 9.471 g/100 g,其中必需氨基酸含量为 3.028 g/100 g,具有较高的营养价值。该结果与侯殿志等^[4]对中国 29 种青稞营养组分的分析结果基本一致。

2.2 青稞挤压膨化工艺优化

2.2.1 腔体温度对青稞挤压膨化的影响 在挤压膨化过程中,挤压腔和螺杆的剪切、摩擦作用会使青稞全粉产热,但其淀粉糊化所需的热量主要来源于挤压腔壁传递的热量。由图 1 可知,在试验范围内,腔体温度越高青稞全粉的糊化度越大。而且试验还发现,当 T3 和 T4 腔体温度低于 120 ℃时,制备的青稞脆片整体平整,但其表面粗糙,有生味且口感较硬;当 T3 和 T4 腔体温度均为 140 ℃时,制备的青稞脆片表面有皱纹,香脆,口感稍硬;当腔体温度超过 140 ℃后青稞全粉发生褐变。这是因为腔体温度较低时,水分子不易渗透至青稞淀粉的空间结构内,淀粉糊化不完全,腔体温度越高在有限的停留时间内青稞全粉吸收的热量越多,水分子运动越剧烈,有利于淀粉的糊化,但是腔体温度过高会使青稞全粉焦糊结块^[20,23]。因此,后续试验将 T3 和 T4 的温度固定为 140 ℃,即从进料端到出料端的各区(T2~T6)温度依次为 60,140,140,80,50 ℃。

表 2 青稞全粉的氨基酸组成

Table 2 Amino acid composition and contents of highland barley flour g/100 g

氨基酸	含量	氨基酸	含量
天冬氨酸	0.643	酪氨酸	0.248
苏氨酸*	0.347	苯丙氨酸*	0.511
丝氨酸	0.437	赖氨酸*	0.379
谷氨酸	2.483	组氨酸	0.221
甘氨酸	0.430	精氨酸	0.471
丙氨酸	0.450	脯氨酸	1.060
缬氨酸*	0.497	色氨酸*	0.115
蛋氨酸*	0.146	必需氨基酸含量	3.028
异亮氨酸*	0.340	氨基酸总量	9.471
亮氨酸*	0.693		

† * 为必需氨基酸。

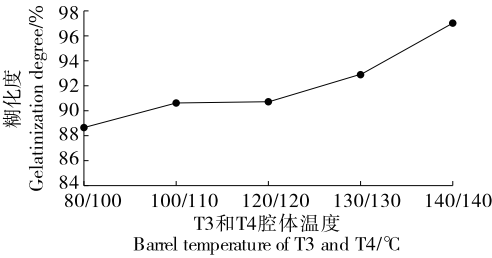


图 1 腔体温度对青稞全粉糊化度的影响

Figure 1 Effect of barrel temperature on gelatinization degree of highland barley flour

2.2.2 青稞全粉喂料量对青稞挤压膨化的影响 喂料量直接影响物料在挤压腔中的填充程度,从而影响产品糊化。由图 2 可知,在试验范围内,随青稞全粉喂料量的增加,青稞全粉的糊化度先增大后减少,当喂料量为 50 kg/h 时青稞全粉糊化度最大。而且试验还发现,青稞全粉喂料量为 40~60 kg/h 时,制备的青稞脆片表面有皱纹,外观好,香脆,口感较硬;青稞全粉喂料量为 70 kg/h 时,制备的青稞脆片表面粗糙,有生味,口感较硬。这可能是因为适当增大青稞全粉喂料量,可以减小挤压段长度,使青稞全粉提前进入熔融状态,提高产品糊化度;但喂料速度过高,可能导致进入挤压腔的物料超出螺杆所能承受的范围,使物料挤压膨化缓慢,甚至会堵塞料筒,从而造成青稞全粉糊化度降低^[24]。因此,青稞全粉喂料量控制在 50 kg/h 左右较为适宜。

2.2.3 螺杆转速对青稞挤压膨化的影响 由图 3 可知,

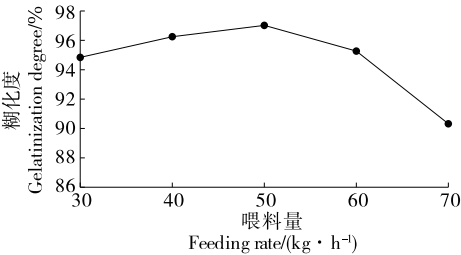


图 2 喂料量对青稞全粉糊化度的影响

Figure 2 Effect of feeding rate on gelatinization degree of highland barley flour

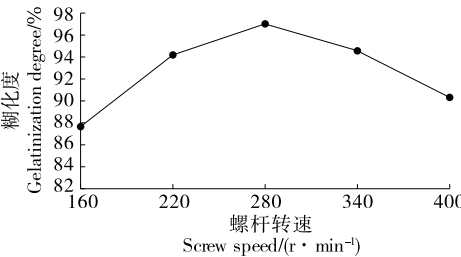


图 3 螺杆转速对青稞全粉糊化度的影响

Figure 3 Effect of screw speed on gelatinization degree of highland barley flour

在试验范围内,随螺杆转速的增加,青稞全粉的糊化度先增大后减少,当螺杆转速为 280 r/min 时青稞全粉糊化度最大。这是因为螺杆转速较低时,增加螺杆转速,能增强青稞全粉与螺杆及挤压腔之间的摩擦和剪切作用,加速青稞淀粉的糊化和分解,但转速过大会缩短青稞全粉在挤压腔内的停留时间,导致其因吸热不足而降低糊化度^[20]。因此,螺杆转速控制在 280 r/min 左右较为适宜。

2.2.4 青稞全粉含水量对青稞挤压膨化的影响 由图 4 可知,在试验范围内,青稞全粉含水量越高其糊化度越大,当含水量超过 22%以后糊化度增幅变小,可能是水分不足时,青稞全粉吸收热量较少,熔融糊化不充分,增加水分有利于产品挤压糊化^[24]。虽然在试验范围内,含水量越高青稞脆片的糊化度越大,但当含水量达到 24%时,制备的青稞脆片出现大气泡,影响了产品的感官品质。这可能是在模口处汽化的水分较多,吸收了大量的热量,使得挤压腔及模口处温度降低,从而影响了挤压膨化效果^[20]。因此,青稞全粉含水量控制在 22%~24% 较为适宜。

2.2.5 正交试验 根据单因素试验结果,固定挤压腔各区(T2~T6)温度依次为 60,140,140,80,50 ℃,以青稞全粉喂料量、螺杆转速、青稞全粉含水量为试验因素设计正交试验,试验因素及水平取值见表 3,试验设计及结果见表 4。

由表 4 可知,各因素对青稞全粉糊化度的影响顺序依次为 B、A 及 C,最佳工艺组合为 A₂B₂C₂,即青稞全粉喂料量 50 kg/h,螺杆转速 280 r/min,青稞全粉含水量 23%,挤压腔各区(T2~T6)温度依次为 60,140,140,80,

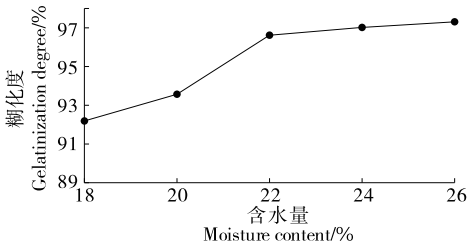


图 4 含水量对青稞全粉糊化度的影响
Figure 4 Effect of moisture content on gelatinization degree of highland barley flour

表 3 正交试验因素水平表
Table 3 Factors and levels in orthogonal test

水平	A 青稞全粉喂料量/ (kg · h ⁻¹)	B 螺杆转速/ (r · min ⁻¹)	C 青稞全粉 含水量/%
1	40	240	22
2	50	280	23
3	60	320	24

表 4 正交试验设计及结果
Table 4 Experimental design and results in orthogonal test

试验号	A	B	C	D	糊化度/%
1	1	1	1	1	88.28
2	1	2	2	2	94.61
3	1	3	3	3	93.14
4	2	1	2	3	94.26
5	2	2	3	1	97.02
6	2	3	1	2	95.92
7	3	1	3	2	87.83
8	3	2	1	3	92.69
9	3	3	2	1	94.56
k ₁	92.010	90.123	92.297	93.287	
k ₂	95.733	94.773	94.477	92.787	
k ₃	91.693	94.540	92.663	93.363	
R	4.040	4.650	2.180	0.576	

50 ℃。以该工艺组合进行 3 次平行验证实验,所得产品的糊化度为 98.73%,优于正交试验的其他工艺组合。因此,以该组合的工艺参数为最佳工艺条件。

2.3 预干燥工艺参数的确定

经挤压膨化后物料含水量在 22% 左右,不利于压片成型,而且会延长高温烘焙时间,影响青稞脆片的色泽。因此,先对挤压膨化后青稞全粉进行预干燥处理。与其他干燥方式相比,流化床干燥的气流与物料接触面积大、温度分布均匀、处理量大、干燥效率高,可在低温条件下实现快速干燥,而且加工成本低,适宜于工业化连续生产^[25]。因此,采用连续式预干燥流化床对物料进行预干燥处理。通过试验发现,水过高或过低均不利于压片成型,当物料水分为 17%~19% 时压片效果较好;在干燥温度 60 ℃,风量 12%,停留时间 16 min,料层厚度 30 mm 的条件下基本能满足生产对水分及产量的需求。

2.4 烘焙时间的确定

烘焙能有效去除物料中的水分,并且适当延长烘焙时间能够增香提色,改善青稞脆片的品质。通过试验发现,在底火 180 ℃,面火 220 ℃ 的条件下,烘焙 50 s 和 60 s 时产品水分高,色泽偏暗,香味欠佳;烘焙 80 s 时产品香且酥脆,但褐变过度,色泽不佳。相对而言烘焙 70 s 时的青稞脆片呈浅黄色、有光泽,表面有皱纹,膨化均匀、气泡细密,香且酥脆。此时青稞脆片的水分含量能降至 3% 以下,满足生产需求。因此,烘焙时间确定为 70 s。

3 结论

(1) 青稞全粉蛋白含量高(10.23%),脂肪含量低(2.51%),含有 17 种氨基酸(包括 8 种必需氨基酸),总氮

基酸和必需氨基酸含量分别为 9.471, 3.028 g/100 g, 具有较高的营养价值。

(2) 青稞全粉经挤压膨化、预干燥及烘焙等工艺处理后可以制备出色香味俱佳的青稞脆片, 其最佳处理工艺参数为: 挤压腔各区 ($T_2 \sim T_6$) 温度依次为 60, 140, 140, 80, 50 $^{\circ}\text{C}$, 青稞全粉喂料量 50 kg/h, 青稞全粉含水量 23%, 螺杆转速 280 r/min; 预干燥温度 60 $^{\circ}\text{C}$, 风量 12%, 停留时间 16 min, 料层厚度 30 mm; 烘焙时间 70 s。

(3) 试验仅以糊化度及感官品质为评价指标, 未考虑加工工艺参数对青稞功能成分的影响。有研究^[26]表明, 适当的热处理可以增强青稞的减肥、降血糖功效和抗氧化能力。但热处理也可能会对青稞功能成分造成负面影响。因此, 后续有必要对此进行深入研究, 以进一步提升青稞脆片的品质。

参考文献

- [1] 党斌, 杨希娟, 刘海棠. 青稞加工利用现状分析[J]. 粮食加工, 2009, 34(3): 69-71.
- [2] 刘新红, 杨希娟, 吴昆仑, 等. 青稞品质特性及加工利用现状分析[J]. 农业机械, 2013(14): 49-53.
- [3] 范珈璇, 裴清扬, 王金荣, 等. 青稞 β -葡聚糖对冷冻熟面品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 115-119, 146.
- [4] 侯殿志, 沈群. 我国 29 种青稞的营养及功能组分分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(2): 289-298.
- [5] SHEN Ying-bin, ZHANG Hui, CHENG Li-ling, et al. In vitro and in vivo antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland barley[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 1 003-1 012.
- [6] CHENG Dai, ZHANG Xin-yu, MENG Meng, et al. Inhibitory effect on HT-29 colon cancer cells of a water-soluble polysaccharide obtained from highland barley [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 88-95.
- [7] CHEN Hai-hong, NIE Qi-xing, XIE Min, et al. Protective effects of β -glucan isolated from highland barley on ethanol-induced gastric damage in rats and its benefits to mice gut conditions[J]. Food Research International, 2019, 122: 157-166.
- [8] ZHANG Yong-zhu, LIN Yan-fei, HUANG Lu, et al. Composition, antioxidant, and anti-biofilm activity of anthocyanin-rich aqueous extract from purple highland barley bran [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 109181.
- [9] PEI Jin-jin, FENG Zhen-zhen, REN Ting. Selectively screen the antibacterial peptide from the hydrolysates of highland barley[J]. Engineering in Sciences, 2018, 18(1): 48-54.
- [10] 马洁, 周洋, 陈璐瑶, 等. 3 种青稞糌粑分级粉性质差异及相关性分析[J]. 食品与机械, 2018, 34(5): 49-53.
- [11] IKRAM Sana, ZHANG Hui-juan, AHMED Muhammad Saad, et al. Ultrasonic pretreatment improved the antioxidant potential of enzymatic protein hydrolysates from highland barley brewer's spent grain (BSG)[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 1 045-1 059.
- [12] 祝东品, 吕庆云, 周梦舟, 等. 低脂青稞膨化米卷加工工艺及其品质[J]. 食品工业, 2020, 41(3): 115-121.
- [13] 董吉林, 董桂梅, 景新俊, 等. 膨化萌动青稞粉油茶的制备及其品质评价[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(24): 153-158.
- [14] 胡伟, 刘静, 沈汪洋, 等. 挤压青稞馒头的制作及评价[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(12): 30-33.
- [15] 祝东品, 吕庆云, 周梦舟, 等. 青稞全粉挤压米工艺优化及品质研究[J]. 食品科技, 2019, 44(7): 202-210.
- [16] GU Xue-dong, PU Li, LEI Peng, et al. Optimization of formula of matsutake highland barley biscuit by response surface methodology[J]. Asian Agricultural Research, 2017, 9(11): 48-53.
- [17] 毋修远, 徐超, 谢新华, 等. 青稞棒挤压膨化工艺优化及其品质特性的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(17): 47-53.
- [18] 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): 1 329-1 334.
- [19] 刘霭莎, 白永亮, 李敏, 等. 青稞粉挤压膨化工艺优化、品质研究及产品开发[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 118-123.
- [20] 杜冰, 梁淑如, 程燕锋, 等. 挤压膨化加工过程参数及其影响[J]. 食品与机械, 2008, 24(5): 133-136.
- [21] 尹孝超, 钱海峰, 王立, 等. 米糠固态发酵工艺优化及其氨基酸变化[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 42-46, 65.
- [22] 王肇慈. 粮油食品品质分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000: 112-114.
- [23] 李向阳, 刘传富, 刁恩杰, 等. 双螺杆挤压对膨化小米糊化特性的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(5): 44-46.
- [24] 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.
- [25] 田俊青, 马小涵, 赵丹, 等. 响应面法优化甘薯渣流化床干燥工艺[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 224-230.
- [26] ZHENG Bo, ZHONG Shao-wen, TANG Yu-kuo, et al. Understanding the nutritional functions of thermally-processed whole grain highland barley in vitro and in vivo[J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125979.