

固态发酵青稞全谷物饼干的研制

刘成洋, 申瑞玲*, 董吉林, 李佳瑶
(郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南郑州 450001)

摘要: 为研发一款改善口感粗糙与功能性消化不良的青稞全谷物药食同源饼干, 以嗜酸乳杆菌固态发酵青稞全谷物粉为主要原料, 测定饼干预拌粉面团流变学特性、热特性以及饼干质构和感官评分, 并采用响应面试验优化饼干配方。添加 HMSC、糖粉、NaHCO₃ 后, 面团弹性 (G') 和粘性 (G'') 随着频率的增加而增加, 黏性随着剪切速率的增加而降低。随着糖粉和 NaHCO₃ 质量分数的增加, 糊化温度升高, 焓变降低。添加 HMSC 后, 饼干硬度先降低再升高, 黏性和咀嚼性显著升高 ($P<0.05$)。添加糖粉和 NaHCO₃ 后, 饼干的硬度、脆性、黏性和咀嚼性显著降低 ($P<0.05$), 而 NaHCO₃ 组的咀嚼性升高。响应面结果显示, 当固态发酵青稞粉中 HMSC、糖粉、NaHCO₃ 质量分数分别为 7.7%, 11.3%, 0.64% 时, 饼干感官评分最优。本研究研发了一款口感酥脆且具有促消化作用的饼干, 为开发药食同源与全谷物产品提供新的思路。

关键词: 固态发酵青稞粉; 药食同源; 口感粗糙; 饼干; 配方优化

文章编号: 1673-9078(2026)04-168-176 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0251

Development of Whole-grain Biscuit with Solid-state Fermented Highland Barley

LIU Chengyang, SHEN Ruiling*, DONG Jilin, LI Jiayao

(College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To develop a highland barley-based whole-grain biscuit with improved palatability and functional benefits for dyspepsia that embodies the concept of medicinal-food homology, solid-state fermented highland barley whole-grain powder (processed with *Lactobacillus acidophilus*) was used as a primary ingredient, and rheological and thermal properties of the dough, as well as texture and sensory scores of the biscuit, were measured. Response surface methodology (RSM) was used to optimize the formula of the biscuits. After the addition of HMSC, powdered sugar, and NaHCO₃, dough elasticity (G') and viscosity (G'') increased with the increase in frequency, and viscosity decreased with the increase in shear rate. With the increase in the mass fractions of powdered sugar and NaHCO₃, the gelatinization temperature increased, and the enthalpy change decreased. After the addition of HMSC, the hardness of biscuits first decreased and then increased, whereas viscosity and chewiness significantly increased ($P<0.05$). After the addition of powdered sugar and NaHCO₃, the hardness, brittleness, viscosity, and chewiness of the biscuits significantly decreased ($P<0.05$), whereas the samples treated with NaHCO₃ exhibited increased chewiness. RSM results showed that mass fractions of 7.7%, 11.3%, and 0.64% for HMSC, powdered sugar, and sodium bicarbonate, respectively, yielded the highest sensory score for the biscuits. A crispy biscuit with digestive-enhancing effects was successfully developed, providing novel insights for the development of homology-of-medicine-and-food products and whole-grain foods.

Key words: solid-state fermented highland barley powder; homology of medicine and food; rough taste; biscuit; formula optimization

引文格式:
刘成洋,申瑞玲,董吉林,等.固态发酵青稞全谷物饼干的研制[J].现代食品科技,2026,42(4):168-176.
LIU Chengyang, SHEN Ruiling, DONG Jilin, et al. Development of whole-grain biscuit with solid-state fermented highland barley [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 168-176.

收稿日期: 2025-02-24 ; 修回日期: 2025-04-08 ; 接受日期: 2025-04-09
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFD1001405)
作者简介: 刘成洋 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 谷物加工与营养, E-mail : 2492848884@qq.com
通讯作者: 申瑞玲 (1967-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 谷物加工与营养, E-mail : shenrl1967@163.com

青稞是一种重要的全谷物，广泛种植在我国西藏、青海等地区。青稞富含碳水化合物、矿物质、维生素、多酚、黄酮等多种营养成分以及生物活性成分，具有改善肠道菌群、预防心血管疾病、降低肥胖率等健康功能^[1]。青稞等谷物在精加工过程中会造成大量营养成分的损失，而全谷物能更完整地保留营养成分，具有更丰富的营养价值。另外，全谷物食品有利于防止心血管疾病、癌症、慢性呼吸道疾病和糖尿病的发生^[2]。青稞全谷物具有“三高两低”的特点^[3]，营养全面，是开发功能性健康食品的优质原料之一，也是当前研究热点。

目前青稞全谷物食品在研发中面临许多问题，主要是由于全谷物表皮膳食纤维含量丰富导致的口感粗糙，但不溶性膳食纤维（IDF）向可溶性膳食纤维（SDF）转变可有效改善消化吸收率与口感粗糙^[4]。有研究报道^[5]，嗜酸乳杆菌固态发酵谷物会产生多种酶，并创造酸性环境使 IDF 分解转变为 SDF。张烁^[6]发现青稞粉与小麦粉复配可以调节血糖、血脂、改善肠道菌群健康，但富含膳食纤维也会带来发酵面制品口感粗糙的问题。张成志^[7]利用青稞全谷物粉完全替代大米粉制备青稞全粉发糕，营养成分更加丰富，但其口感较为粗糙。Ge 等^[8]研究了青稞无糖饼干品质，发现外膳食纤维、 β -葡聚糖等含量较高会影响消化酶的可及性。经嗜酸乳杆菌固态发酵的青稞粉具有更好的营养和理化特性，IDF 被降解转化为 SDF，适合作为改善全谷物表皮膳食纤维含量丰富导致的口感粗糙和功能性消化不良问题的原料。有研究报道^[9]我国功能性消化不良的患者占比达到了 23.5%，功能性消化不良的传统治疗方式主要依赖药物干预，但这些药物往往会带来一些副作用。鸡内金、焦山楂、焦麦芽、六神曲等是具有促消化作用的药食同源物质，已有许多研究报道^[10-12]，目前也被广泛应用在食品中，将药食同源物质作为配方加入到青稞全谷物饼干中能改善功能性消化不良的问题，同时减少了功能性消化不良的药物依赖以及带来的副作用，这对于药食同源未来发展及功能性食品的开发具有重要意义^[13]。

本研究使用嗜酸乳杆菌固态发酵后 IDF 转变为 SDF 的青稞全谷物预拌粉并加入药食同源原料 HSMC 粉（焦山楂：焦麦芽：六神曲：鸡内金=1:1:1:1），来改善青稞全谷物富含膳食纤维导致的口感粗糙问题与功能性消化不良。考察了复配的配方（HMSC、糖粉、 NaHCO_3 ）对面团流变性、热特性、质构、感官等特性的影响，确定了最佳配方，揭示了 HMSC、糖粉、 NaHCO_3 对青稞饼干预拌粉面团的加工特性与饼干特性的影响，为解决青稞全谷物食品口感粗糙与功能性

消化不良的问题提供参考。

1 材料和方法

1.1 实验材料

嗜酸乳杆菌固态发酵青稞全谷物粉（实验室自制，嗜酸乳杆菌接种量 6%、37 °C 发酵 48 h）^[5]；HSMC 粉（焦山楂：焦麦芽：六神曲：鸡内金=1:1:1:1），河南张仲景大药房股份有限公司；禄荣 NaHCO_3 ，天津市鸿禄食品有限公司；厨师之选牌淡味黄油，牧宝（上海）食品科技有限公司；甘汁园双碳绵白糖，购自南京甘汁园糖业有限公司；鸡蛋，购自郑州丹尼斯百华有限公司；市售青稞饼干，购自青海华实青稞生物技术开发有限公司。

1.2 主要仪器

MG38CB-AA 型电烤箱，广东美的厨房电器制造有限公司；HYP-3 型智能消化炉，上海纤检仪器有限公司；TGL-16M 型台式高速冷冻离心机，上海卢湘仪离心机仪器有限公司；Multiskan GO 型全波长酶标仪，赛默飞世尔科技（中国）有限公司；DiscoveryHR-1 型旋转流动仪、Q100 型差示扫描量热仪，美国 TA 公司；TA.new plus 型物性测定仪，上海瑞玢智能科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 单因素设计及饼干制作方法

HMSC 的质量分数分别为 0%、6%、8%、10%、12% 和 14%，糖粉的质量分数分别为 0%、10%、20%、30% 和 40%， NaHCO_3 的质量分数分别为 0%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7% 和 0.8%。（1）饼干原料：包括 A 和 B。青稞全谷物饼干预拌粉（A）：包含嗜酸乳杆菌固态发酵青稞全谷物粉、HMSC、糖粉、 NaHCO_3 。原料（B）：动物黄油和全蛋液。（2）制作方法：预拌粉（A）按比例配置，过 100 目筛，混合备用。原料（B）的黄油软化后于全蛋液加入 A 搅拌均匀。A、B 混合搅拌均匀，置于模具中，冷藏、成型，烘烤 15 min，火温 130 °C，冷却至室温，得到成品。

1.3.2 青稞全谷物饼干预拌粉面团流变学特性的测定

参考 Gharaie 等^[14]的方法取一定量面团置于直径为 50 mm 平板进行测定，调整平板间距为 1 mm，将样品多余的部分刮掉，并在样品周围涂上一圈硅油，以防水分蒸发。调整不同参数用流变仪进行频率和剪切扫描。频率扫描采用 25 °C，0.01~20 Hz，恒定应变为 0.05% 进行测定；剪切扫描采用 25 °C，0.01~1.0 s⁻¹，

恒定应变为0.05%进行测定；每种配方进行了三次测量。

1.3.3 青稞全谷物饼干预拌粉面团差示扫描量热法（DSC）测定

参考 Wang 等^[15]的方法使用差示扫描量热仪测量样品的热特性。取 5 mg 样品置于铝盘并加入 20 μL 去离子水，密封，室温下平衡 24 h。用添加 20 μL 去离子水密封的铝盘作为参考。以 10 ℃·min⁻¹ 从 25 ℃升温至 100 ℃，测定热特性参数。

1.3.4 青稞全谷物饼干质构的测定

饼干冷却至室温后进行 TPA 测定^[16]。质构仪参数：选用 P/36R 探头，测前速度 2 mm·s⁻¹，测试速度 1 mm·s⁻¹，测后速度 2 mm·s⁻¹，应变 60%，触发力 5 g，两次压缩之间的时间间隔为 5 s。

1.3.5 青稞全谷物饼干感官评分的测定

由 16 位具有一定专业知识的技术人员（10 名女性和 6 名男性）根据饼干感官评分标准进行评分^[17]，青稞全谷物饼干的感官评分标准见表 1。

表 1 青稞饼干的感官评分标准

Table 1 Sensory rating criteria of highland barley biscuit		
感官	评分标准	分数 / 分
口感	口感酥松可口，不黏牙	4~5
	口感较酥松，不黏牙	2~4
	口感坚硬，紧实发硬，黏牙	0~2
形态	外形完整，纹路清楚，饼体摊散适度，无连边	4~5
	外形较完整，纹路较清楚，饼体摊散适度，少许连边	2~4
	外形不完整，纹路不清，饼体摊散不足，有连边	0~2
色泽	色泽均匀，无焦边，有油润感	4~5
	色泽较均匀，稍有过焦、过白现象	2~4
	颜色较深，有过焦、过白现象	0~2
香味	有明显的愉悦香味，无异味	4~5
	有微微愉悦香味，无异味	2~4
	有焦糊的苦味，无香味，有异味	0~2
组织 结构	断面结构呈细密多孔状，无较大孔洞	4~5
	断面结构呈分散多孔状，孔洞大小不一	2~4
	断面结构无孔洞	0~2
破裂度 与杂质	破裂度良好，无杂质	2~5
	破裂度一般，少许杂质	0~2
整体可 接受性	整体接受度为优秀	4~5
	整体接受度为良好	2~4
	整体接受度为差	0~2

1.3.6 青稞全谷物饼干的配方优化

基于上述单因素试验，综合考虑 HMSC、糖粉和 NaHCO₃ 的添加量对感官评分的影响，依据 Box-Benhknen 组合试验设计原理，采用响应面设计，进行青稞全谷物饼干配方优化，因素和编码水平见表 2。

表 2 试验因素水平编码表

Table 2 Horizontal coding table of test factors				
因素	名称	水平		
		-1	0	1
A	HMSC/%	6	8	10
B	糖粉/%	0	10	20
C	NaHCO ₃ /%	0.5	0.6	0.7

1.3.7 成品青稞全谷物饼干与市售青稞饼干的基本营养组成测定

参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》测定饼干蛋白质；参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》测定饼干水分；参照 GB 2009.5-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》测定饼干脂肪；参照 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》测定饼干灰分；参照 GB 5009.88-2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》测定饼干膳食纤维；参照 GB 28050-2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》测定饼干碳水化合物和能量，其中，能量（kJ/100 g）= 蛋白质（g）×17+ 脂肪（g）×37+ 碳水化合物（g）×17+ 膳食纤维（g）×8。

1.4 数据统计与分析

采用 SPSS 20.0 进行统计分析，数值均表示为平均值 ± 标准偏差，*P* < 0.05 表示有显著性差异。使用 Origin 7.5 软件绘制图形。

2 结果与讨论

2.1 青稞全谷物饼干预拌粉面团的流变特性

2.1.1 频率扫描分析

面团的整体强度可以根据 *G'*、*G''* 来确定，这可以有效地反映饼干的结构和加工特性。对添加不同比例 HMSC、糖粉和 NaHCO₃ 的青稞面团在 25 ℃进行频率扫描，结果如图 1 所示。*G'* 表示面团的弹性特性，*G''* 表示面团的黏性特性，样品的 *G'* 和 *G''* 都随着频率的增加而增加，且 *G'* 值均高于 *G''*，*G'* 和 *G''* 之间没有交叉，表明面团的弹性远大于黏性^[18]。与 HMSC 质量分数为 0% 组相比，质量分数 6% 组 *G'* 和 *G''* 先显著降低后质

量分数 10% 组又显著升高, HMSC 质量分数为 12% 时 G' 和 G'' 均最低, 表明 HMSC 的加入降低了面筋蛋白含量, 限制了面团形成强黏弹性结构的能力, 体系的凝胶网络结构减弱, HMSC 的加入使亲水性膳食纤维增多, 面团吸水率也随之增大, 获得了更大的黏弹性。陶虹伶等^[19]研究发现面团中添加 3%~12% 松茸粉后, 面团的弹性也先显著降低后升高, 添加松茸粉超过 6% 后 G'' 影响较小, 而添加 HMSC 超过 8% 后 G'' 影响较小, 这可能与 HMSC 和松茸粉成分中的亲水性膳食纤维有关。随着糖粉质量分数的增大, G' 和 G'' 有逐渐增大的趋势, 这与糖粉与直链淀粉之间的相互作用有关, 面团与糖粉 -OH 基团之间形成氢键使凝胶网络增强导致弹性增大^[20]。 G'' 增大可能是由于糖粉紧紧覆盖在面团分子表面, 削弱了直链淀粉-直链淀粉相互作用黏性增大, Zhou 等^[21]的研究也报道蔗糖通过与淀粉的包裹作用, 以及与直链淀粉的竞争作用使糖与淀粉混合物的黏弹性增大。随着 NaHCO_3 质量分数的增大, G' 和 G'' 也增大, NaHCO_3 质量分数为 0.4% 时 G' 和 G'' 最低, G' 和 G'' 升高说明碱盐改善面团流变性能的主要途径是通过改变蛋白质的结构, 包括蛋白质的二级结构和面团的二硫键, Jia 等^[22]的研究表明 0.6% 的碱盐使面团具有更好的交联与聚合能力, 面团的 G' 和 G'' 随着碱盐的添加而升高。频率扫描结果表明, HMSC 的亲水性膳食纤维、糖粉与淀粉的相互作用以及 NaHCO_3 改变蛋白质结构可以影响面团的黏弹性从而改善饼干品质。

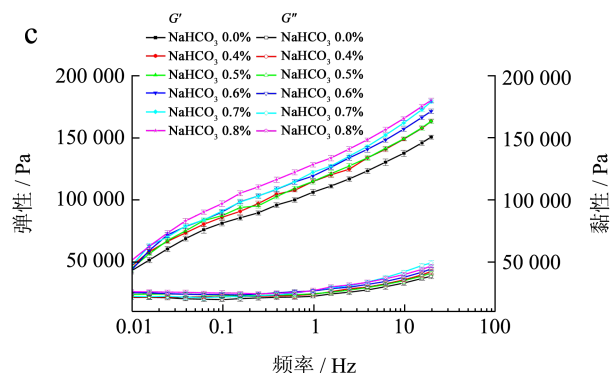
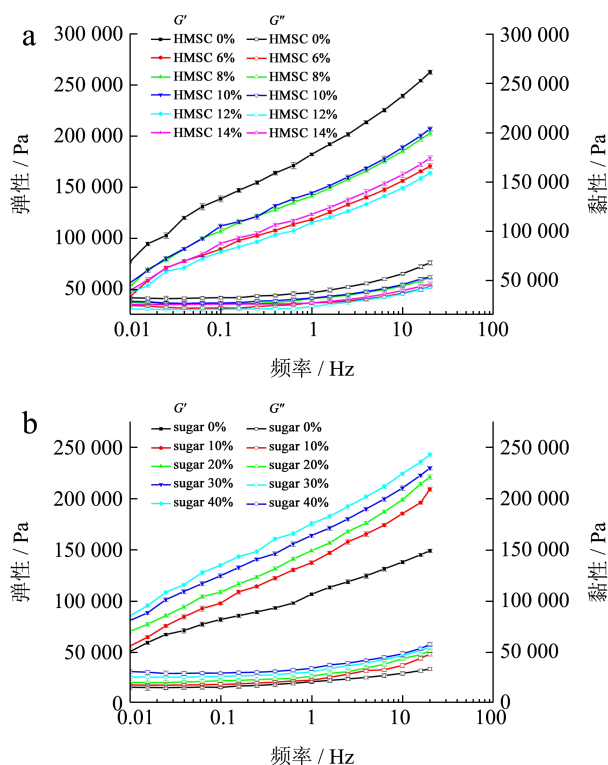


图 1 添加 HMSC、糖粉和 NaHCO_3 的饼干预拌粉面团

G' , G'' 随频率的变化

Fig.1 Variation of G' , G'' with frequency of cake intervention dough with HMSC, powdered sugar and NaHCO_3

注: a 为添加 HMSC 的饼干预拌粉面团 G' 、 G'' 随频率的变化; b 为添加糖粉的饼干预拌粉面团 G' 、 G'' 随频率的变化; c 为添加 NaHCO_3 的饼干预拌粉面团 G' 、 G'' 随频率的变化。

2.1.2 剪切扫描分析

面团黏性的差异可能会影响饼干的烘焙性能, 研究面团的黏性变化对于饼干加工特性具有重要意义。研究 25 °C 时剪切速率对不同添加量 HMSC、糖粉和 NaHCO_3 面团黏性的影响, 结果如图 2 所示。HMSC 质量分数由 0% 增加到 14%, NaHCO_3 的质量分数由 0% 增加到 0.8%, 面团的黏性逐渐降低, 6% 的 HMSC 质量分数时面团黏性最低, 0.8% 的 NaHCO_3 质量分数时面团黏性最低, 结果表现出非牛顿流体的剪切稀化流动行为, 这可以解释为剪切速率增强和大分子链之间的纠缠减少, 导致黏性显著下降, 这也可能是由于大分子链的取向导致剪切稀化, 即大分子链之间的氢键裂解三维空间结构被破坏。Yan 等^[23]的研究表明碱会影响凝胶多糖复合体系的流变特性, 主要是改变大分子的性质与构象, 而面团的黏性也表现出相似的变化, 但 HMSC 质量分数 6% 时面团黏性最低, 这可能与 HMSC 的中多糖和 NaHCO_3 的弱碱性有关。糖粉的质量分数由 0% 增大至 40%, 面团的黏性逐渐增大。40% 糖粉的质量分数黏性最高。糖粉通过与水氢键之间的相互作用使面团结构更加紧密, 增加了面团中单位体积粒子之间相互缠绕的可能性, 降低了面团聚合物相之间的界面张力, 提高了面团中聚合物分子之间的相容性, 使面团黏性增大。Taheri 等^[24]的研究发现, 加入糖粉后水芹籽粘液和 β -乳球蛋白纳米复合物表现出剪切稀化行为, 水芹籽粘液和 β -乳球蛋白纳米复合物的黏度增大。剪切扫描结果表明, 面团黏性与 HMSC 的中多糖等大分子结构的改变、糖粉与水之间的作用以及 NaHCO_3 的弱碱性有关, HMSC 和

NaHCO₃ 加入会使面团黏性增大，而糖粉会使面团黏性降低。

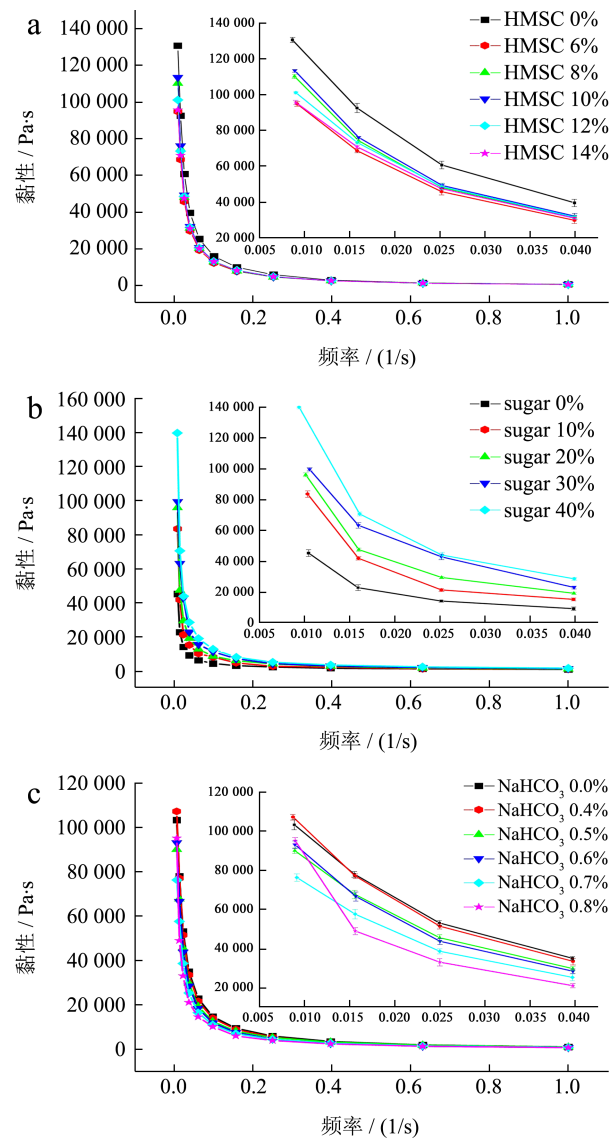


图2 添加HMSC、糖粉和NaHCO₃的饼干预拌粉面团黏性随频率的变化

Fig.2 The change of dough viscosity with frequency of cake intervention with HMSC, powdered sugar and NaHCO₃

注：a 为添加HMSC的饼干预拌粉面团黏性随频率的变化；b 为添加糖粉的饼干预拌粉面团黏性随频率的变化；c 为添加NaHCO₃的饼干预拌粉面团黏性随频率的变化。

2.2 青稞饼干预拌粉面团的热特性

面团的热特性作为糊化行为、温度和焓的变化对于理解面团在烘烤过程中的现象具有重要意义，这些特性取决于淀粉来源、水质量分数和直链淀粉与支链淀粉的比例。为了研究HMSC、糖粉与NaHCO₃对预拌粉面团热特性的影响，并从微观层面揭示其影响的原因，因此采用差示扫描量热法（DSC）测定了

HMSC、糖粉和NaHCO₃对面团热特性的影响，结果见表。由表3可知，随着HMSC质量分数的增加，*T*_o、*T*_p和*T*_c分别从49.24、51.79、57.25℃降低至41.36、50.38、56.98℃。 ΔH 从0.30 J·g⁻¹升高至0.97 J·g⁻¹。HMSC的多糖分子与淀粉颗粒结合并附着在淀粉颗粒表面，使淀粉颗粒吸水性增强，促进了淀粉颗粒的糊化作用。Yang等^[25]研究发现，雪耳多糖会使马铃薯淀粉的*T*_o、*T*_p升高， ΔH 降低，多糖强吸水作用限制了体系中水的流动性和可及性使淀粉获得水减少，延缓了淀粉的糊化， ΔH 结果相反，这可能与马铃薯淀粉结构的差异以及青稞面团中含有的蛋白有关。由表4可知，随着糖粉质量分数的增加，*T*_o、*T*_p和*T*_c分别从47.41、50.06、57.39℃增加至48.39、51.84、58.99℃， ΔH 降低，添加糖粉使糊化温度升高，由于糖粉和淀粉对有效水存在竞争关系，导致有效水的降低^[26]，抑制了淀粉颗粒的糊化作用。有研究表明，在糖的存在下，淀粉颗粒中氢键的断裂会影响淀粉的糊化，导致淀粉颗粒的溶胀温度升高，淀粉的糊化能大大增加^[27]。由表5可知，随着NaHCO₃质量分数的增大，*T*_o、*T*_p和*T*_c逐渐增大， ΔH 从1.99 J·g⁻¹（0.0%）下降到1.31 J·g⁻¹（0.8%）。差示扫描量热法结果表明，HMSC与面团淀粉分子相互作用，促进淀粉的糊化，糖粉与水的竞争作用和NaHCO₃会阻碍面团淀粉分子间氢键的结合，导致淀粉双螺旋结构展开。

表3 HMSC添加量对热特性的影响

Table 3 Effects of HMSC addition on thermal characteristics				
HMSC/%	<i>T</i> _o /℃	<i>T</i> _p /℃	<i>T</i> _c /℃	$\Delta H/(J \cdot g^{-1})$
0	49.24 ± 0.25 ^a	51.79 ± 0.32 ^a	57.25 ± 0.61 ^a	0.30 ± 0.02 ^d
6	48.18 ± 0.58 ^a	50.80 ± 0.81 ^a	54.30 ± 0.55 ^b	0.31 ± 0.02 ^d
8	41.17 ± 0.68 ^a	45.58 ± 0.37 ^b	56.71 ± 0.39 ^a	0.43 ± 0.01 ^c
10	47.71 ± 0.36 ^a	50.70 ± 0.23 ^a	55.80 ± 0.34 ^{ab}	0.65 ± 0.03 ^b
12	41.29 ± 0.62 ^b	45.14 ± 0.46 ^b	53.83 ± 0.24 ^c	0.92 ± 0.02 ^a
14	41.36 ± 0.28 ^b	50.38 ± 0.72 ^a	56.98 ± 0.22 ^a	0.97 ± 0.04 ^a

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（*P* < 0.05）。下同。

表4 糖粉添加量对热特性的影响

Table 4 Influence of powdered sugar addition amount on thermal characteristics				
糖粉/%	<i>T</i> _o /℃	<i>T</i> _p /℃	<i>T</i> _c /℃	$\Delta H/(J \cdot g^{-1})$
0	47.41 ± 0.11 ^b	50.06 ± 0.41 ^a	57.39 ± 0.33 ^b	1.95 ± 0.04 ^a
10	48.04 ± 0.14 ^a	50.57 ± 0.53 ^a	58.48 ± 0.51 ^{ab}	1.52 ± 0.06 ^b
20	48.18 ± 0.21 ^a	50.80 ± 0.22 ^a	58.60 ± 0.17 ^a	1.51 ± 0.01 ^b
30	48.32 ± 0.24 ^a	50.96 ± 0.45 ^a	58.84 ± 0.26 ^a	1.47 ± 0.02 ^b
40	48.39 ± 0.31 ^a	51.84 ± 0.63 ^a	58.99 ± 0.34 ^a	1.57 ± 0.01 ^b

表 5 NaHCO₃添加量对热特性的影响

Table 5 Influence of NaHCO₃ addition amount on thermal characteristics

NaHCO ₃ /%	T _o /℃	T _p /℃	T _c /℃	ΔH/(J·g ⁻¹)
0.0	45.80 ± 0.48 ^c	49.02 ± 0.24 ^b	54.30 ± 0.15 ^c	1.99 ± 0.02 ^a
0.4	46.39 ± 0.56 ^{bc}	49.37 ± 0.31 ^a	57.52 ± 0.24 ^b	1.87 ± 0.06 ^a
0.5	46.71 ± 0.28 ^{bc}	49.64 ± 0.28 ^a	58.16 ± 0.52 ^{ab}	1.95 ± 0.05 ^a
0.6	47.03 ± 0.42 ^b	49.69 ± 0.26 ^a	58.86 ± 0.46 ^a	1.87 ± 0.01 ^a
0.7	48.18 ± 0.51 ^a	49.72 ± 0.62 ^a	59.02 ± 0.34 ^a	1.54 ± 0.03 ^b
0.8	48.99 ± 0.12 ^a	50.80 ± 0.71 ^a	59.58 ± 0.15 ^a	1.31 ± 0.01 ^c

2.3 青稞饼干的质构分析

质构分析是评价饼干品质常用的方法之一，其中硬度、脆性、弹性、黏聚性、黏性、咀嚼性和回复性是饼干质构分析中常见的重要指标。由表 6 可知，添加 HMSC 的饼干硬度先降低再升高，从 0% 组的 1.9×10⁴ g 增大至 14% 组的 2.2×10⁴ g，黏性和咀嚼性显著升高

(*P* < 0.05)，其它均无显著性差异。10% 的 HMSC 质量分数硬度较低，同时黏性和咀嚼性适中，说明饼干易于咀嚼，酥脆的口感被消费者接受。这可能是由于 HMSC 中的焦山楂、焦麦芽、六神曲、鸡内金质地松散，不易于成型，从而使得饼干最终硬度偏大。由表 7 可知，添加糖粉后，饼干的硬度、脆性、黏性和咀嚼性显著降低 (*P* < 0.05)。糖是一种保湿剂，它可以减少水分从饼干内部到外部的迁移，使得饼干相对较软^[28]。咀嚼性适当降低使得饼干的品质有所提高，可见糖粉的添加可以改善饼干的品质特性。由表 8 可知，饼干的硬度、弹性和黏性随着 NaHCO₃ 质量分数的增加而降低，而咀嚼性随着 NaHCO₃ 质量分数的增加而升高，这是由于碳酸氢钠的弱碱性和蓬松性对饼干理化和结构特性的影响。质构结果表明，黏性和咀嚼性适中，但饼干硬度较大，这可能与 HMSC 与青稞全谷物中膳食纤维有关。

表 6 HMSC添加量对质构的影响

Table 6 Effect of HMSC addition on texture

HMSC/%	硬度/g	脆性/g	弹性	黏聚性	黏性	咀嚼性	回复性
0	19 835.58 ± 854.11 ^{ab}	378.54 ± 40.25 ^b	0.33 ± 0.03 ^a	0.19 ± 0.00 ^a	2 751.35 ± 251.20 ^d	995.21 ± 9.25 ^c	0.14 ± 0.00 ^a
6	18 864.02 ± 352.76 ^b	395.76 ± 66.55 ^a	0.34 ± 0.08 ^a	0.17 ± 0.01 ^a	3 081.38 ± 457.82 ^c	1 023.34 ± 5.10 ^{bc}	0.13 ± 0.01 ^a
8	18 382.44 ± 1 195.53 ^b	365.96 ± 21.79 ^b	0.32 ± 0.01 ^a	0.17 ± 0.02 ^a	3 125.00 ± 574.39 ^c	1 134.25 ± 307.18 ^b	0.13 ± 0.02 ^a
10	15 666.88 ± 839.32 ^c	392.98 ± 82.26 ^a	0.34 ± 0.01 ^a	0.20 ± 0.00 ^a	3 301.90 ± 140.13 ^{bc}	1 110.59 ± 6.22 ^b	0.16 ± 0.00 ^a
12	20 579.83 ± 1 442.80 ^a	443.07 ± 60.49 ^a	0.38 ± 0.05 ^a	0.20 ± 0.01 ^a	3 830.78 ± 404.90 ^b	1 548.02 ± 180.57 ^{ab}	0.15 ± 0.00 ^a
14	22 804.71 ± 935.78 ^a	398.62 ± 148.03 ^a	0.32 ± 0.04 ^a	0.21 ± 0.02 ^a	4 897.39 ± 597.81 ^a	1 624.21 ± 116.82 ^a	0.16 ± 0.14 ^a

表 7 糖粉添加量对质构的影响

Table 7 Effect of powdered sugar addition on texture

糖粉/%	硬度/g	脆性/g	弹性	黏聚性	黏性	咀嚼性	回复性
0	26 164.66 ± 375.23 ^a	539.43 ± 65.63 ^a	0.44 ± 0.06 ^a	0.24 ± 0.02 ^a	6 523.90 ± 208.14 ^a	2 611.33 ± 252.31 ^a	0.18 ± 0.01 ^a
10	23 451.66 ± 164.19 ^b	535.64 ± 17.50 ^a	0.39 ± 0.03 ^b	0.27 ± 0.01 ^a	6 300.92 ± 246.65 ^a	1 799.69 ± 179.78 ^b	0.21 ± 0.01 ^a
20	21 355.82 ± 1 791.92 ^c	531.52 ± 8.17 ^a	0.37 ± 0.01 ^{bc}	0.24 ± 0.03 ^a	4 066.65 ± 839.05 ^b	1 530.25 ± 174.40 ^{bc}	0.19 ± 0.03 ^a
30	18 477.92 ± 452.61 ^d	394.57 ± 122.16 ^b	0.36 ± 0.06 ^c	0.19 ± 0.02 ^b	3 533.40 ± 95.18 ^c	1 219.80 ± 28.98 ^c	0.16 ± 0.02 ^{ab}
40	16 791.27 ± 640.72 ^c	349.41 ± 49.24 ^b	0.36 ± 0.06 ^c	0.16 ± 0.00 ^b	2 704.75 ± 250.16 ^d	951.03 ± 117.89 ^d	0.12 ± 0.01 ^b

表 8 NaHCO₃添加量对质构的影响

Table 8 Influence of NaHCO₃ addition on texture

NaHCO ₃ /%	硬度/g	脆性/g	弹性	黏聚性	黏性	咀嚼性	回复性
0	24 512.36 ± 1 123.20 ^a	349.23 ± 50.21 ^b	0.37 ± 0.02 ^a	0.22 ± 0.00 ^a	6 201.21 ± 456.21 ^a	715.22 ± 66.25 ^c	0.17 ± 0.01 ^a
0.4	23 676.96 ± 1 363.06 ^b	354.57 ± 63.44 ^b	0.42 ± 0.06 ^a	0.23 ± 0.01 ^a	5 504.14 ± 482.84 ^b	908.83 ± 80.61 ^d	0.18 ± 0.01 ^a
0.5	22 157.99 ± 695.27 ^c	316.56 ± 30.41 ^{ab}	0.40 ± 0.06 ^a	0.22 ± 0.01 ^a	4 822.42 ± 79.37 ^c	1 277.59 ± 88.25 ^c	0.16 ± 0.00 ^{ab}
0.6	21 513.95 ± 1 479.16 ^d	444.56 ± 90.38 ^a	0.39 ± 0.02 ^a	0.20 ± 0.01 ^a	3 660.17 ± 696.44 ^d	1 821.53 ± 123.37 ^b	0.15 ± 0.01 ^{ab}
0.7	18 723.28 ± 1 259.04 ^e	486.49 ± 124.70 ^a	0.35 ± 0.02 ^b	0.20 ± 0.02 ^a	3 710.43 ± 652.24 ^c	1 862.91 ± 47.23 ^b	0.16 ± 0.01 ^{ab}
0.8	16 643.02 ± 964.88 ^f	319.86 ± 42.20 ^b	0.33 ± 0.00 ^b	0.18 ± 0.01 ^a	3 128.19 ± 360.09 ^f	2 039.08 ± 75.14 ^a	0.14 ± 0.01 ^b

2.4 青稞饼干的感官分析

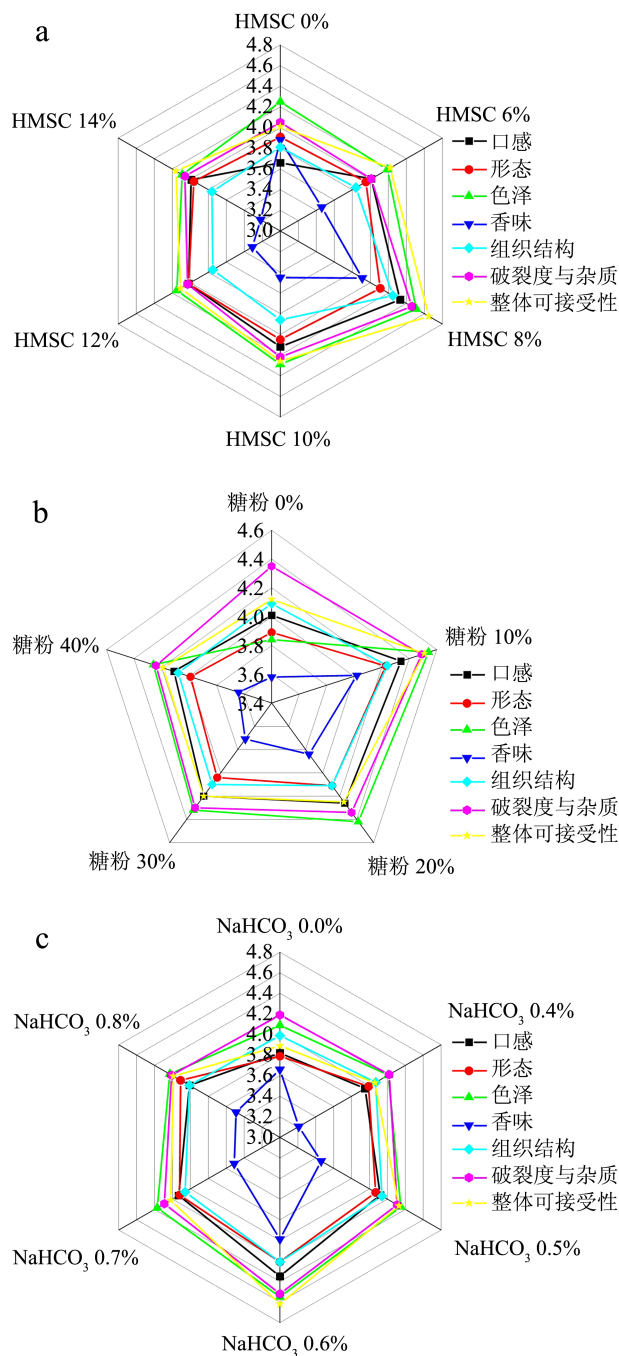


图 3 青稞全谷物饼干感官评分随 HMSC、糖粉和 NaHCO₃ 添加量的变化

Fig.3 Changes of sensory scores of highland barley whole grain biscuit with the addition of HMSC, powdered sugar and NaHCO₃

饼干的感官特性如图 3 所示。7 个感官参数通过 5 点数值评分测试进行评估。当 HMSC 质量分数为 8% 时，饼干的各个方面都得到了专业人士的好评，这是本文研究的产品中添加“HMSC”的潜在可接受性的一

个强有力的指标。糖粉在饼干中的积极作用可能是由于糖粉作为风味增强剂，可以掩盖负面的味道，它还有助于平衡可溶性和不可溶性膳食纤维，促进某些有益肠道细菌（益生元）的生长^[29]。结果表明，在实现潜在健康益处的同时，质量分数 10% 的糖粉足以产生对甜味的愉悦感知。通过消费者接受性测试来比较不同 NaHCO₃ 质量分数对饼干的感官特性的影响。与其他处理相比，添加 0.6% NaHCO₃ 的样品表现出最高的整体接受性。感官分析结果表明添加 HMSC、糖粉与 NaHCO₃ 可以改善饼干口感，饼干的口感及感官特性得到了全面改善。

2.5 青稞饼干的配方优化

表 9 Box-Behnken设计方案及结果
Table 9 Box-Behnken design scheme and results

试验号	A	B	C	感官评分 / 分
1	0	0	0	30.23
2	1	-1	0	22.36
3	0	0	0	29.93
4	0	0	0	29.88
5	0	0	0	30.15
6	0	-1	1	26.19
7	-1	0	-1	24.05
8	0	1	1	26.96
9	-1	-1	0	22.28
10	0	0	0	30.03
11	0	-1	-1	26.52
12	1	1	0	22.92
13	-1	1	0	22.54
14	1	0	1	24.54
15	-1	0	1	24.45
16	0	1	-1	26.93
17	1	0	-1	25.31

由表 9、10 可知，建立二次响应面回归拟合方程： $Y=30.04+0.226\ 3A+0.250\ 0B-0.083\ 7C+0.075\ 0AB-0.252\ 9AC+0.09BC-4.79A^2-2.73B^2-0.665\ 7C^2$ 。方程因变量与自变量之间存在显著线性关系，该模型回归为极显著 ($P<0.000\ 1$)，失拟项不显著，该模型 $R^2=99.86\%$ ， $R^2_{Adj}=99.67\%$ ，说明该模型与试验拟合良好。自变量与响应值之间线性关系显著，可以用于反应的理论推测^[30]。由图 4 可知响应面结果存在极大值，通过响应面寻优分析方法对回归模型进行分析，当 HMSC 质量分数为 7.7%，糖粉质量分数 11.3%，NaHCO₃ 质

量分数 0.64% 时, 饼干感官评分最优值为 29.77。经验证, 按照最佳配方制备的饼干感官评分为 29.81, 与理论值接近。上述条件下饼干感官评价高, 得到专业人士的肯定。

表 10 方差分析结果表
Table 10 Results of analysis of variance

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	140.48	9	15.61	541.57	<0.000 1	**
A-HMSC	0.409 5	1	0.409 5	14.21	0.007 0	*
B-糖粉	0.500 0	1	0.500 0	17.35	0.004 2	*
C-NaHCO ₃	0.056 1	1	0.056 1	1.95	0.205 6	
AB	0.022 5	1	0.022 5	0.780 7	0.406 3	
AC	0.342 2	1	0.342 2	11.87	0.010 8	*
BC	0.032 4	1	0.032 4	1.12	0.324 2	
A ²	96.64	1	96.64	3 353.04	<0.000 1	**
B ²	31.34	1	31.34	1 087.43	<0.000 1	**
C ²	1.87	1	1.87	64.75	<0.000 1	**
残差	0.201 7	7	0.028 8			
失拟项	0.115 8	3	0.038 6	1.80	0.2871	
纯误差	0.085 9	4	0.021 5			
总和	140.68	16				

注: * 在 $P<0.05$ 水平显著, ** 在 $P<0.001$ 水平显著。

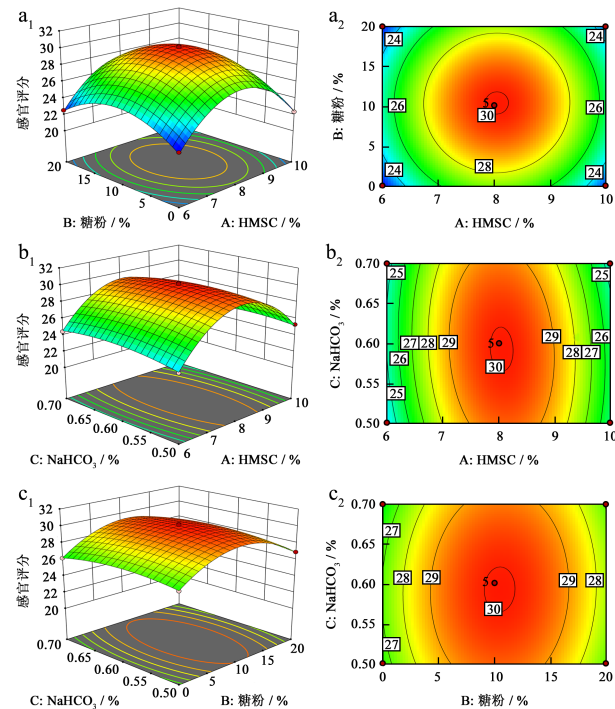


图 4 各因素交互作用对青稞全谷物饼干感官的响应曲面与等高线图

Fig.4 Response surface and contour map of the interaction of various factors to the sensory response of highland barley whole grain biscuit

2.6 成品青稞全谷物饼干与市售青稞饼干的基本营养组成分析

成品青稞全谷物饼干与市售青稞饼干的基本营养成分测定结果见表 11。由表 11 可知, 与市售青稞饼干相比, 成品青稞饼干的能量、蛋白质、脂肪分别高 7.24%、6.26%、14.66% ($P<0.05$), 表明成品青稞饼干具有更高的营养价值。此外, 成品青稞饼干的总膳食纤维与可溶性膳食纤维比市售青稞饼干高 48.05%、33.11% ($P<0.05$), SDF 与 IDF 的比值为 50.17 接近 1:2, 人们普遍认为适合作为食品的膳食纤维来源 SDF/IDF 比值应接近 1:2^[31], 这表明以嗜酸乳杆菌固态发酵后青稞粉为原料制成的成品青稞全谷物饼干适合作为功能性食品且有利于健康, 具有极高的价值。

表 11 成品青稞饼干与市售青稞饼干的基本营养组成 (100 g)

Table 11 Basic nutritional composition of finished highland barley biscuit and market highland barley biscuit (100 g)		
营养成分	市售青稞饼干	成品青稞饼干
能量/kJ	2 058.52 ± 10.66 ^b	2 219.21 ± 12.21 ^a
水分/g	4.29 ± 0.06 ^a	2.29 ± 0.19 ^b
灰分/g	1.13 ± 0.02 ^a	1.06 ± 0.05 ^a
蛋白质/g	8.39 ± 0.23 ^b	8.95 ± 0.15 ^a
脂肪/g	20.37 ± 0.15 ^b	23.87 ± 0.39 ^a
碳水化合物/g	65.82 ± 0.93 ^a	63.83 ± 0.88 ^a
总膳食纤维/g	6.81 ± 0.16 ^b	13.11 ± 0.27 ^a
可溶性膳食纤维/g	2.93 ± 0.11 ^b	4.38 ± 0.19 ^a

3 结论

在本研究中, 添加 HMSC、糖粉、NaHCO₃ 后, 面团动态流变学特性中所有样品的 G' 和 G'' 都随着频率的增加而增加, 表现出频率依赖性, 弹性远大于黏性。随着 HMSC 和 NaHCO₃ 质量分数的增加, 面团表现出更低的黏度, 而添加糖粉会使面团的黏度增大。面团的热特性结果表明, 随着糖粉和 NaHCO₃ 质量分数的增加, 糊化温度升高, ΔH 降低, 而 HMSC 表现出相反的结果。质构及感官评价结果表明, 随着 HMSC 质量分数增大, 饼干硬度先降低再升高, 黏性和咀嚼性显著升高, 饼干未表现出全谷物食品的粗糙口感。添加糖粉后, 饼干的硬度、脆性、黏性和咀嚼性显著降低。添加 NaHCO₃ 后, 饼干的硬度、弹性和黏性降低, 而咀嚼性升高。响应面试验结果显示, 当 HMSC 质量分数为 7.7%, 糖粉质量分数为 11.3%, NaHCO₃ 质量分数为 0.64% 时, 饼干的感官评分最高。本研究首次以嗜酸乳杆菌固态发酵青稞全谷物、药食同源 HMSC 以及糖粉、NaHCO₃ 为主要原料, 研发出一款具有促

消化且口感佳的全谷物饼干,报道了药食同源 HMSC、糖粉、NaHCO₃ 对面团加工特性与饼干特性的影响,为药食同源及青稞全谷物功能性食品的开发提供参考,为改善全谷物产品富含膳食纤维与功能性消化不良的问题提供更多的解决思路。

参考文献

- [1] OBADI M, SUN J, XU B. Highland barley: chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications [J]. Food Research International, 2021, 140: 110065.
- [2] LI Y, LI T, LIU R H. Bioactive compounds of highland barley and their health benefits [J]. Journal of Cereal Science, 2022, 103: 103366.
- [3] 姬艺琳,陈文文,董吉林,等.青稞全谷营养型挂面与市售挂面的营养组分及理化特性研究[J].轻工学报,2023,38(5):51-58.
- [4] 杨书林,牟惟琳,任晨刚,等.全谷物风味、口感及货架期提升关键技术研究进展[J].粮食与饲料工业,2022,4:3-6.
- [5] MA S, DONG J, LI J, et al. Effect of Solid-State fermentation on the nutritional composition and physicochemical properties of Whole-Grain highland barley and the application in digestive cookies [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104088.
- [6] 张烁.β-葡聚糖酶对青稞面包品质和淀粉消化性的影响[D].北京:中国农业科学院,2023.
- [7] 张成志.青稞全粉发糕的制备及其品质评价的研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [8] GE F, XIA R, WU D, et al. Toward a comprehensive understanding of various milling methods on the physicochemical properties of highland barley flours and eating quality of corresponding Sugar-Free cookies [J]. Food Chemistry, 2023, 413: 135657.
- [9] 王诚,丁博群,董桂红,等.罗伊氏粘液乳杆菌后生元在改善胃肠道功能性消化不良中的作用[J].食品安全导刊,2024,31:112-115.
- [10] 张晓薇,佟莹莹.鸡内金、焦山楂消食饼干的配方研究[J].粮食与油脂,2022,35(1):125-128.
- [11] 张晓薇,任艳.鸡内金焦山楂蛋卷消食棒的研制[J].农产品加工,2022,23:20-23,26.
- [12] 高启霞,郑敏思,王秀梅,等.六神曲的市售生品与米曲霉发酵品对食积小鼠胃肠道功能的影响[J].时珍国医国药,2020,31(3): 601-603.
- [13] 苑翼楠,周威.“药食同源”类食品国内外研究现状及展望[J].现代食品,2021,14:118-121.
- [14] GHARAIE Z, AZIZI M H, BARZEGAR M, et al. Gum tragacanth oil/gels as an alternative to shortening in cookies: rheological, chemical and textural properties [J]. LWT, 2019, 105: 265-271.
- [15] WANG Y, GUO J, WANG C, et al. Effects of konjac glucomannan and freezing on thermal properties, rheology, digestibility and microstructure of starch isolated from wheat dough [J]. LWT, 2023, 177: 114588.
- [16] YUCEER M, CANER C. Effects of Protease-Hydrolyzed egg white on the meringue batter properties and meringue textural and sensory properties during storage [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2021, 25: 100409.
- [17] LI S, WU G, LI X, et al. Roles of gelator type and gelation technology on texture and sensory properties of cookies prepared with oleogels [J]. Food Chemistry, 2021, 356: 129667.
- [18] TAO X, ZHANG Y, CHEN F, et al. Effects of sucrose on pasting, thermal, rheological and textural properties of native and Alcohol-Alkali-Treated waxy rice starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 166: 108-116.
- [19] 陶虹伶,王丹,马宁,等.松茸粉对面团流变特性及饼干品质的影响[J].食品科学,2019,40(5):51-56.
- [20] ZHANG X, TONG Q, ZHU W, et al. Pasting, rheological properties and gelatinization kinetics of tapioca starch with sucrose or glucose [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114(2): 255-261.
- [21] ZHOU D N, ZHANG B, CHEN B, et al. Effects of oligosaccharides on pasting, thermal and rheological properties of sweet potato starch [J]. Food Chemistry, 2017, 230: 516-523.
- [22] JIA S, CAO J, DAI Y, et al. Effect of potassium carbonate on rheological properties of dough and its mechanism [J]. LWT, 2021, 152: 112335.
- [23] YAN J K, CAI W D, WANG C, et al. Macromolecular behavior, structural characteristics and rheological properties of Alkali-Neutralization curdlan at different concentrations [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105785.
- [24] TAHERI A, KASHANINEJAD M. Rheological properties for determining the interaction of soluble cress seed mucilage and β-lactoglobulin nanocomplexes under sucrose and lactose treatments [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132133.
- [25] YANG F, DU Q, MIAO T, et al. Interaction between potato starch and Tremella fuciformis polysaccharide [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107509.
- [26] FU Y, LIU X, XIE Q, et al. Effects of Laminaria japonica polysaccharides on the texture, retrogradation, and structure performances in frozen dough bread [J]. LWT, 2021, 151: 112239.
- [27] LI Q, LI H, GAO Q. The influence of different sugars on corn starch gelatinization process with digital image analysis method [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 803-811.
- [28] MILNER L, KERRY J P, O'SULLIVAN M G, et al. Physical, textural and sensory characteristics of reduced sucrose cakes, incorporated with clean-label Sugar-Replacing alternative ingredients [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 59(1): 102235.
- [29] DESAI N M, MALLIK B, SAKHARE S D, et al. Prebiotic oligosaccharide enriched green coffee spent cookies and their nutritional, physicochemical and sensory properties [J]. LWT, 2020, 134: 109924.
- [30] 蔡天舒,李玮玮,赵智锋,等.桃金娘荞麦饼干配方的响应面法优化与品质分析[J].食品科技,2024,49(3):163-172.
- [31] PATHANIA S, KAUR N. Utilization of fruits and vegetable by-products for isolation of dietary fibres and its potential application as functional ingredients [J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2022, 27: 100295.