DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.017

发芽薏米固体饮料的研发及其营养品质分析

胡清[1,2],李楠[2],刘洪潇[1,2],董绪燕[1*],刘丽娜[1,2,3*]

(1. 青岛农业大学 食品科学与工程学院,山东 青岛 266109;2. 山东省农业科学院 农产品加工与营养研究所,山东 济南 250100;3. 国家盐碱地综合利用技术创新中心,山东 东营 257300)

摘　要:以发芽薏米为原料,通过单因素和正交试验得出发芽薏米固体饮料最佳配方,测定其营养品质并预测产品货架期。结果表明:发芽薏米固体饮料的最佳配方为发芽薏米粉和椰子粉质量比1∶5、赤藓糖醇添加量25%、车前子壳添加量8%、菊粉添加量1.0%、抗性糊精添加量5%,此配方下冲泡后的发芽薏米固体饮料均匀细腻、无明显分层和沉淀,感官评分最高,蛋白质含量为77.20 mg/g,膳食纤维含量为58.33 g/100 g,γ-氨基丁酸含量为91.32 mg/100 g,估算血糖生成指数(estimated glycemic index,eGI)值为50.44,水分含量及微生物含量均符合国家标准,25 ℃储藏可保存107 d。

关键词:薏米;发芽;固体饮料;营养品质;货架期

Development and Nutritional Quality Analysis of Sprouted *Coix* Seed Solid Beverage

HU Qing[1,2], LI Nan[2], LIU Hongxiao[1,2], DONG Xuyan[1*], LIU Lina[1,2,3*]

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China; 2. Institute of Agricultural Product Processing and Nutrition, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong, China; 3. National Salt alkali Land Comprehensive Utilization Technology Innovation Center, Dongying 257300, Shandong, China)

Abstract: Germinated *Coix* seed was used as the raw material to determine the optimal formulation of a germinated *Coix* seed solid beverage through single-factor and orthogonal experiments. The nutritional quality was evaluated, and the product shelf life was predicted. The results showed that the optimal formulation for the germinated *Coix* seed solid beverage consisted of a mass ratio of germinated *Coix* seed powder to coconut powder of 1∶5, with erythritol at 25%, psyllium husk at 8%, inulin at 1.0%, and resistant dextrin at 5%. The beverage prepared under this formulation was homogeneous and fine, with no significant stratification or sedimentation, and achieved the highest sensory acceptability. The protein content was 77.20 mg/g, dietary fiber content was 58.33 g/100 g, γ-aminobutyric acid (GABA) content was 91.32 mg/100 g, and the estimated glycemic index (eGI) value was 50.44. The moisture content and microbial counts met national standards, and the product could be stored for 107 days at 25 ℃.

Key words: *Coix*; sprouting; solid beverages; nutrition quality; shelf life

引文格式:

胡清,李楠,刘洪潇,等. 发芽薏米固体饮料的研发及其营养品质分析[J]. 食品研究与开发,2026,47(17):141-148.

HU Qing, LI Nan, LIU Hongxiao, et al. Development and Nutritional Quality Analysis of Sprouted *Coix* Seed Solid Beverage[J]. Food Research and Development, 2026, 47(17): 141-148.

基金项目:山东省重点研发计划(科技示范工程)项目(2024SFGC0401);农业农村部农产品加工与贮藏重点实验室开放课题(S2024KFKT-06);山东省农业科学院科技创新项目(CXGC2025H18)

作者简介:胡清(2000—),女(汉),硕士研究生,研究方向:粮油加工。

*通信作者:董绪燕(1980—),女(汉),副教授,博士,研究方向:油料加工及功能脂质开发;刘丽娜(1978—),女(汉),研究员,博士,研究方向:粮油加工及农业副产物综合利用。

薏米是亚洲传统的药食同源谷物，富含蛋白质、膳食纤维以及薏苡多糖、薏苡仁酯、酚酸等活性成分，具有良好的营养功能[1-2]。薏米经过发芽后 γ-氨基丁酸（γ-aminobutyric acid，GABA）、游离氨基酸、酚类化合物等有益代谢物含量增加，植酸等抗营养因子含量降解，营养价值提升[3]。现阶段，薏米主要用于面条、面包和薏米糖等方便食品及薏米液体饮料的开发，而针对发芽薏米产品的开发相对较少，主要局限于饼干等形式[4-7]。

固体饮料是一种便利且快捷的冲泡饮品，被视为受大众欢迎的饮品之一，销售市场广阔。但固体饮料饱腹感不强，且部分产品含有大量糖分，容易导致摄入热量过高，进而引起体重增加[8]。然而，谷物膳食纤维由于其能量密度低且不易粉碎等特点，可以增加饱腹感，减少能量摄入[9]，调控血糖并改善肠道健康[10]。据此，谷物膳食纤维的摄入可能是降低代谢综合征发病率的原因之一[11]。薏米和椰子粉中富含膳食纤维[12]，菊粉和抗性糊精作为可溶性膳食纤维，可应用于开发低升糖指数和富含纤维的食品[13]。因此，营养健康且高品质的固体饮料开始逐渐成为谷物功能性食品开发研究的热点。

本研究选用发芽薏米为原料，研究不同辅料添加对发芽薏米固体饮料感官的影响，确定最终的配比，并对发芽薏米固体饮料的蛋白质、膳食纤维、GABA、估算血糖生成指数（estimated glycemic index，eGI）及货架期探究，开发一款富有膳食纤维和 GABA 的低 eGI 固体饮料，以期为发芽薏米的加工及相关食品的研发提供新的见解。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

薏米：贵州省农业科学院；椰子粉：海南南国食品实业有限公司；菊粉、抗性糊精：山东福田药业有限公司；赤藓糖醇：德州和洋生物科技有限公司；车前子壳：广州麦基涛涛电子商务有限公司；BCA 蛋白试剂盒：上海碧云天生物技术有限公司；乙酸钠缓冲液、硼酸盐缓冲液、无水葡萄糖、苯酚（均为分析纯）、二硝基水杨酸试剂（3,5-dinitrosalicylic acid reagent，DNS）试剂（≥98%）、碱性蛋白酶（200 U/mg）、α-淀粉酶（300 U/mL）、葡萄糖苷酶（260 U/mL）：上海源叶生物科技有限公司；无水乙醇（分析纯）、次氯酸钠（≥99.5%）：国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

FD-1A-50+ 冻干机：湖南湘仪博医康仪器有限公司；SHZ-A 水浴锅振荡器：巩义市英峪高科仪器厂；PHSJ-4F pH 计：上海雷磁仪器有限公司；Synergy H1 酶标仪：美国伯腾仪器有限公司；HS153 快速水分测定仪：仪研智造药检仪器有限公司；DHP-9032 恒温培养箱：上海一恒科学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发芽薏米固体饮料加工流程

薏米→发芽→蒸制→冻干→粉碎→加料→混匀→包装→成品。

1.3.2 发芽薏米粉制备

薏米种子采用 0.1% NaOCl 溶液进行表面灭菌，料液比为 1∶5（g/mL）。灭菌种子在浸泡前以 25 ℃、40 kHz、600 W 超声辅助处理 20 min，置于带无菌纱布的培养平板上，在 30 ℃培养箱中发芽，每隔 12 h 用纯水喷洒。在暗处发芽 72 h 后，用蒸馏水清洗。清洗后的薏米放入蒸锅蒸制 30 min，预冻（-20 ℃）。取出预冻好的薏米放入冻干机，在-50 ℃、2 Pa 真空度下干燥 48 h 后，进行粉碎处理，发芽薏米粉收集后经过 100 目筛后快速分装到密封袋，并放入干燥皿中密封保存，备用[14]。

1.3.3 感官评价

参与评价的 8 名人员均经过食品感官专业培训，以随机顺序品尝不同因素配比的发芽薏米固体饮料，发芽薏米固体饮料感官评分见表 1。

表 1 发芽薏米固体饮料感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for germinated *Coix* seed solid beverage

指标	评分标准	分值
气味（20）	香气较弱或过重，有轻微令人不愉快的味道	1~<6
	气味适中，但香气不足	6~<13
	香气浓郁，椰香和谷物的香气完美融合	13~20
口感（30）	入口粗糙，可感知到颗粒	1~<11
	入口细腻，颗粒感知较弱	11~<21
	入口细腻顺滑，未感知到颗粒	21~30
甜度（20）	甜度太浓或太淡，令人不舒适	1~<6
	甜度适中，可令人接受	6~<13
	甜味自然适中，令人愉悦接受	13~20
稳定性（30）	可见分层，有沉淀	1~<11
	分层不明显，少量沉淀	11~<21
	均一稳定，无分层和沉淀	21~30

1.3.4 单因素配方试验

固定发芽薏米粉和椰子粉总量 10 g。分别以发芽薏米粉和椰子粉质量比、赤藓糖醇添加量、车前子壳添加量、菊粉添加量和抗性糊精添加量开展单因素试验。

1.3.4.1 发芽薏米粉和椰子粉质量比的确定

在赤藓糖醇添加量15%、车前子壳添加量6%、菊粉添加量2.0%和抗性糊精添加量5%的条件下，设置发芽薏米粉和椰子粉质量比为1∶1、1∶2、1∶3、1∶4及1∶5。采用80 ℃、50 mL水冲调，考察发芽薏米粉和椰子粉质量比对发芽薏米固体饮料感官评分的影响。

1.3.4.2 赤藓糖醇添加量的确定

在发芽薏米粉和椰子粉质量比1∶3、车前子壳添加量6%、菊粉添加量2.0%和抗性糊精添加量5%条件下，设置赤藓糖醇添加量为5%、10%、15%、20%、25%，每份以80 ℃、50 mL水冲泡，考察赤藓糖醇添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响。

1.3.4.3 车前子壳添加量的确定

在赤藓糖醇添加量15%、发芽薏米粉和椰子粉质量比1∶3、菊粉添加量2.0%和抗性糊精添加量5%条件下，设置车前子壳添加量为2%、4%、6%、8%、10%，每份以80 ℃、50 mL水冲泡，考察车前子壳添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响。

1.3.4.4 菊粉添加量的确定

在赤藓糖醇添加量15%、发芽薏米粉和椰子粉质量比1∶3、车前子壳添加量6%和抗性糊精添加量5%条件下，设置菊粉添加量为0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%，每份以80 ℃、50 mL水冲泡，考察菊粉添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响。

1.3.4.5 抗性糊精添加量的确定

在赤藓糖醇添加量15%、发芽薏米粉和椰子粉质量比1∶3、车前子壳添加量6%和菊粉添加量2.0%条件下，设置抗性糊精添加量为1%、3%、5%、7%、9%，每份以80 ℃、50 mL水冲泡，考察抗性糊精添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响。

1.3.5 正交试验

根据单因素试验结果，设计三因素三水平$L_9(3^3)$正交试验。发芽薏米固体饮料用80 ℃、50 mL的水冲泡搅匀后进行感官评价。正交试验因素与水平见表2。

表2 正交试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of the orthogonal experiment

水平	A 发芽薏米粉和椰子粉质量比	B 赤藓糖醇添加量/%	C 车前子壳添加量/%
1	1∶3	15	6
2	1∶4	20	8
3	1∶5	25	10

1.3.6 水分含量测定

称取发芽薏米固体饮料3 g，放置于快速水分测定仪中，确保发芽薏米固体饮料能平铺成薄层。当发芽薏米固体饮料达到恒重时，水分测定仪自动停止，记录最终水分含量值，取3次样品的平均值作为结果。

1.3.7 蛋白质含量测定

发芽薏米固体饮料蛋白质含量根据BCA蛋白质试剂盒操作说明进行检测。

1.3.8 膳食纤维含量测定

基于Kanwar等[15]的方法对膳食纤维含量进行测定。将0.2 g脱脂薏米粉[正己烷按料液比1∶5（g/mL）处理12 h]悬浮于4 mL醋酸缓冲液（0.1 mol/L，pH6）中，与α-淀粉酶（20 μL）在96 ℃下培养1 h并搅拌。将pH值调整至7.5（0.1 mol/L NaOH溶液），加入蛋白酶（20 μL）在60 ℃酶解30 min。pH值升至4.5后，加入葡萄糖苷酶（100 μL）在60 ℃下反应4 h。沉淀纤维（80%乙醇溶液）离心（2 000×g，20 min），清洗（80%乙醇溶液和丙酮），干燥收集（40 ℃），过100目过筛并称重。膳食纤维含量（W，%）的计算公式如式（1）所示。

$$W = W_1/W_0 \times 100 \quad (1)$$

式中：W_1为提取后获得物质的干基总质量，g；W_0为初始阶段未提取的薏米粉干基总质量，g。

1.3.9 eGI值测定

基于贺捷群[16]的方法并稍作修改。配制葡萄糖溶液（浓度分别为0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 mg/mL）并制作葡萄糖标准曲线方程，为Y=0.948 2X+0.016 0。取2 mg发芽薏米固体饮料，加入6 mL KOH溶液（2 mol/L），振摇30 min。将1 mL 98%乙酸、3 mL乙酸钠缓冲液（0.4 mol/L，pH4.75）与60 μL淀粉葡萄糖苷酶加入其中，摇匀后在60℃水浴中反应45 min。结束后，取0.5 mL液体加入4 mL无水乙醇，离心（2 000×g，10 min）。取0.5 mL上清液，加相同体积的DNS，沸水5 min，冷却，540 nm测吸光值。分别取50 mL葡萄糖参比溶液（10 mg/mL）和1.5 g发芽薏米固体饮料，加20 mL 0.4 mol/L无水乙酸钠、20 mL α-淀粉酶和80 μL葡萄糖苷酶，于37 ℃、120 r/min振荡处理0、20、60、90、120、180 min，取1 mL各时间段的水解液加入无水乙醇（4 mL），离心（1 000×g，10 min）。0.5 mL取上清液加入相同体积的DNS试剂，沸水5 min，冷却，加蒸馏水4 mL，在540 nm处测得吸光值。淀粉水解率（H，%）的计算公式如式（2）所示；eGI值（Q）计算公式如式（3）所示。

$$H = m \times 0.9/M \times 100 \quad (2)$$

$$Q = 8.198 + 0.862 \times M \quad (3)$$

式中：m为取样点的葡萄糖质量，mg；M为总淀粉质量；mg。

1.3.10 GABA含量测定

GABA含量参照Sharma等[17]的方法并稍作修改。将0.5 g薏米粉溶于5 mL蒸馏水中制成均质样品，提取2 h后，在8 000×g条件下离心5 min，将0.5 mL所

得上清液与 0.5 mL 0.2 mol/L 硼酸盐缓冲液(pH9.0)、1 mL 5%(质量分数)苯酚和 0.5 mL NaOCl(7% 活性氯)混合。煮沸 10 min 后,将样品摇动 20 min,直到蓝绿色形成。再加入 1 mL 60% 乙醇溶液,在 640 nm 处测吸光度。配制质量浓度为 0、1、2、5、10、15 mg/mL 的 GABA 标准溶液,以质量浓度为横坐标、响应值为纵坐标绘制标准曲线,得到回归方程 Y=0.009 9X+0.078 5,R^2=0.991 0 8),根据回归方程计算其含量。

1.3.11 微生物测定

发芽薏米固体饮料的采样及处理根据 GB 4789.1—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验总则》和 GB/T 4789.21—2003《食品卫生微生物学检验冷冻饮品、饮料检验》进行。微生物指标具体检测项目与对应标准如下:菌落总数测定依据 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》进行;大肠菌群计数依据 GB 4789.3—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》进行;霉菌和酵母菌计数依据 GB 4789.15—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》进行;沙门氏菌检验依据 GB 4789.4—2024《食品安全国家标准 食品微生物学检验 沙门氏菌检验》进行。

1.3.12 货架期预测

参考 Martin-Torres 等[18]的方法并稍作修改。采用胡云飞等[19]的方法进行加速保藏试验(accelerated shelf life testing,ASLT)。将发芽薏米固体饮料放于透明密封袋中,分别储存于 45 ℃与 55 ℃两种恒温条件下,每 5 d 为间隔周期进行检测,到达国家标准限量值(25 g/100 g)后停止检测。货架期计算公式如式(4)、(5)、(6)所示。

$$\ln(P) = K_T t + \ln(P_0) \quad (4)$$

式中:P 为发芽薏米固体饮料过氧化值,g/100 g;P_0 为初始过氧化值,g/100 g;K_T 为发芽薏米固体饮料在 T 温度时的氧化速率;t 为发芽薏米固体饮料的储藏时间,d。

$$Q_{10} = N_T/N_{T+10} \quad (5)$$

式中:Q_{10} 为温度每上升 10 ℃时,化学反应速率提升的倍数;N_T 为 T 温度下的储藏时间,d;N_{T+10} 对应 T+10 温度下的储藏时间,d。

$$Q(T_0) = T_1 \times Q_{10}^{\triangle T/10} \quad (6)$$

式中:$Q(T_0)$为在 25 ℃下的储藏时间,d;T_1 为特定温度下的储藏时间,d;ΔT 为 25 ℃与温度 T_1 之间的差值,℃。

1.4 数据统计分析

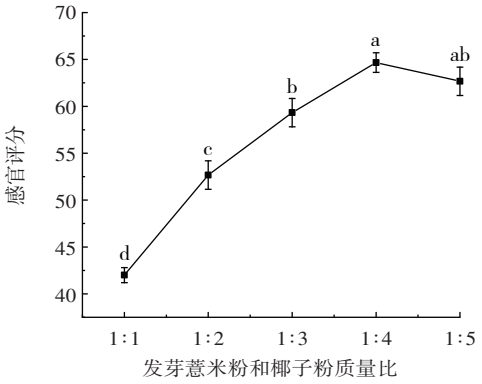
数据均用 SPSS 25 软件进行方差、显著性差异水平分析(P<0.05)和邓肯检验。采用 Origin 2021 软件绘图,所有处理进行 3 次重复。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果

2.1.1 发芽薏米粉和椰子粉质量比对饮料感官品质的影响

发芽薏米和椰子粉质量比对发芽薏米固体饮料感官评分和冲泡性的影响如图 1 和图 2 所示。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

图 1 发芽薏米和椰子粉质量比对发芽薏米固体饮料感官评分的影响

Fig.1 Effect of the ratio of germinated *Coix* seed to coconut powder on the sensory score of germinated *Coix* seed solid beverage

发芽薏米粉和椰子粉质量比由左到右分别为 1∶1、1∶2、1∶3、1∶4、1∶5。

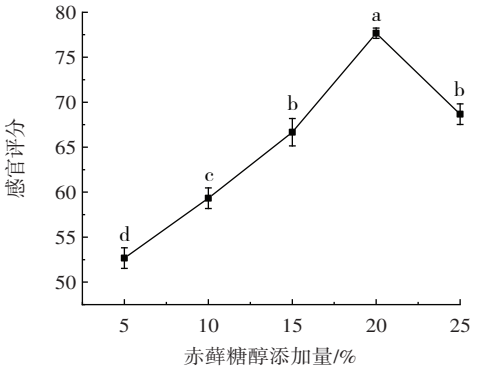
图 2 发芽薏米粉和椰子粉质量比对发芽薏米固体饮料冲泡性的影响

Fig.2 Effect of the ratio of germinated *Coix* seed to coconut powder on the reconstitution of germinated *Coix* solid beverage

由图 1 可知,随着椰子粉添加量的增加,感官评分先上升后下降,发芽薏米粉和椰子粉质量比为 1∶4 时感官评分最高,而后下降。周倩等[20]在对竹笋复合固体饮料研究中发现,薏米的用量对其感官评分会产生一定的影响(先上升后下降),当薏米粉添加量高于 14% 时其香气、颜色及口感会下降。当发芽薏米粉和椰子粉质量比高于 1∶4 时,饮料的口感较粗糙且香气减弱,但过多椰子粉的添加则会使饮料产生较油腻的口感。此外,结合图 2 可以看出,随着椰子粉添加量的增加,其冲泡均匀性提升。因此,选择发芽薏米粉和椰子粉质量比为 1∶3、1∶4 和 1∶5 进行后续正交试验。

2.1.2 赤藓糖醇添加量对饮料感官品质的影响

赤藓糖醇添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响如图 3 所示。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

图 3 赤藓糖醇添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响

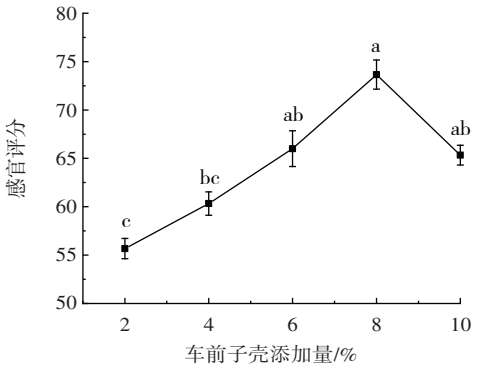
Fig.3 Effect of erythritol addition amount on the sensory score of germinated *Coix* solid beverage

由图 3 可知,感官评分随着赤藓糖醇添加量的增加呈现先上升后下降的趋势。发芽薏米固体饮料的感官评分在赤藓糖醇添加量为 20% 时达到峰值,此后赤藓糖醇添加量继续增加则感官评分降低。当赤藓糖醇添加量不足 20% 时,产品甜味略显不足,而赤藓糖醇添加量超过 20% 则太甜腻且不易溶解。赵明等[21]对黑木耳银耳固体饮料的研究中也观察到,随着赤藓糖醇用量的提高,感官得分呈现先上升后下降的趋势。因此,选择赤藓糖醇添加量为 15%、20% 和 25% 进行后续正交试验。

2.1.3 车前子壳添加量对饮料感官品质的影响

车前子壳添加量对发芽薏米固体饮料感官评分和冲泡性的影响如图 4 和图 5 所示。

从图 4 中可以看出,车前子壳添加量增大,发芽薏米固体饮料的感官评分表现出先上升后下降的趋势,



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

图 4 车前子壳添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响

Fig.4 Effect of psyllium husk addition amount on the sensory score of germinated *Coix* solid beverage

车前子壳添加量由左到右分别为 2%、4%、6%、8%、10%。

图 5 车前子壳添加量对发芽薏米固体饮料冲泡 1 h 后稳定性的影响

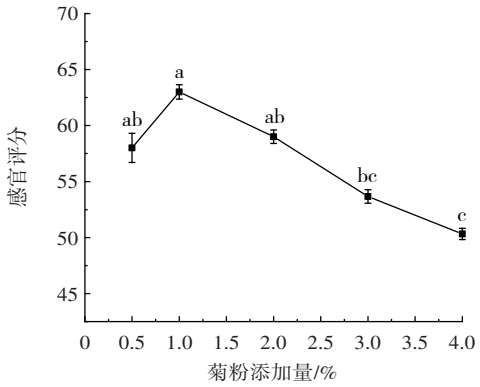
Fig.5 Effect of psyllium husk addition amount on the stability of germinated *Coix* solid beverage after 1 h of brewing

当车前子壳添加量达到 8% 时,感官评分最高。当车前子壳添加量小于 8% 时,饮料的稳定性较差,薏米粉会沉积在底部且液体稀薄,当车前子壳添加量高于 8% 时,液体稠度过大,甚至出现半固体状态,影响口感。王磊等[22]对益生元固体饮料配方研究中也表明了车前子壳的添加量会影响饮料的稠度和口感,报告指出当车前子壳添加量低于 20% 时其液体稀薄且口感寡淡,车前子壳添加量超过 20% 则呈果冻状且口感差。结合图 5 可知,发芽薏米固体饮料的稳定性与车前子壳添加量有着一定关系,当车前子壳添加量在 6% 以上时,分层现象开始弱化。因此,选择车前子壳添加量为 6%、8% 和 10% 进行正交试验。

2.1.4 菊粉添加量对饮料感官品质的影响

菊粉添加量对发芽薏米固体饮料感官评分和冲泡性的影响如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知,菊粉添加量为 1.0% 时发芽薏米固体饮料的感官评分最高,随后感官评分下降,但冲泡后对整体的口感无明显变化。由图 7 可知,由于菊粉吸湿性较强,导致发芽薏米固体饮料在冲泡时易出现结块现象,影响固体饮料的品质和口感。因此确定菊粉最



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

图 6 菊粉添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响

Fig.6 Effect of inulin addition amount on the sensory score of germinated *Coix* solid beverage

菊粉添加量由左到右分别为 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%。

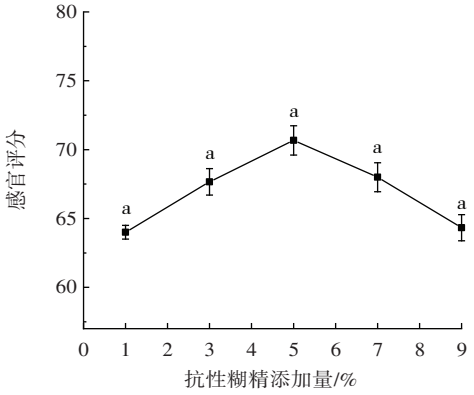
图 7　菊粉添加量对发芽薏米固体饮料冲泡性的影响

Fig.7　Effect of inulin addition amount on the reconstitution of germinated *Coix* solid beverage

佳添加量为 1.0%。

2.1.5　抗性糊精添加量对饮料感官品质的影响

抗性糊精添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响如图 8 所示。



相同小写字母表示差异不显著（P>0.05）。

图 8　抗性糊精添加量对发芽薏米固体饮料感官评分的影响

Fig.8　Effect of resistant dextrin addition amount on the sensory score of germinated *Coix* solid beverage

由图 8 可知，发芽薏米固体饮料的感官评分在抗性糊精添加量为 5% 时达到最高，抗性糊精添加量超过 5% 时饮料易结块，从而影响其品质。陈雅等[23]也报道了抗性糊精在固体饮料中结块的现象。此外，由于抗性糊精不同添加量之间不存在显著差异，因此，确定抗性糊精的最适添加量为 5%。

2.2　配方正交试验结果

发芽薏米固体饮料的正交试验结果如表 3 所示。

表 3　正交试验结果

Table 3　Results of the orthogonal experiment

试验号	A 发芽薏米粉和椰子粉质量比	B 赤藓糖醇添加量/%	C 车前子壳添加量/%	感官评分
1	1	1	1	59.55
2	1	2	2	63.99
3	1	3	3	62.89
4	2	1	2	63.77
5	2	2	3	63.89

续表 3　正交试验结果

Continue table 3　Results of the orthogonal experiment

试验号	A 发芽薏米粉和椰子粉质量比	B 赤藓糖醇添加量/%	C 车前子壳添加量/%	感官评分
6	2	3	1	62.66
7	3	1	3	66.33
8	3	2	1	66.34
9	3	3	2	70.11
K_1	186.43	189.65	188.55	
K_2	190.32	194.22	197.87	
K_3	202.78	195.66	193.11	
k_1	62.14	62.56	62.85	
k_2	63.44	64.74	65.96	
k_3	67.59	65.22	64.37	
R	5.45	2.66	3.11	

从表 3 中可以看出，由极差 R 得到因素间的先后影响次序是 A>C>B，即发芽薏米粉和椰子粉质量比>车前子壳添加量>赤藓糖醇添加量。由表中 K_1、K_2、K_3 值可知，发芽薏米固体饮料最佳配方为 $A_3B_3C_2$，即发芽薏米粉和椰子粉质量比 1∶5，赤藓糖醇添加量 25%，车前子壳添加量 8%，菊粉添加量 1.0%，抗性糊精添加量 5%。

2.3　营养成分及微生物含量

发芽薏米固体饮料的营养组成及微生物组成含量结果如表 4 和表 5 所示。

表 4　发芽薏米固体饮料营养组成

Table 4　Nutritional composition of germinated *Coix* solid beverage

水分含量/%	蛋白质含量/（mg/g）	膳食纤维含量/（g/100 g）	eGI 值	GABA 含量/（mg/100 g）
3.20±0.02	77.20±0.31	58.33±2.88	50.44±0.85	91.32±0.44

表 5　发芽薏米固体饮料微生物组成

Table 5　Microbial composition of germinated *Coix* solid beverage

菌落总数/（CFU/g）	大肠杆菌/（CFU/g）	酵母菌/（CFU/g）	霉菌/（CFU/g）	沙门氏菌/（CFU/g）
<10	<10	未检出	未检出	未检出

由表 4 可知，发芽薏米固体饮料的水分含量为 3.20%，符合 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》的要求（≤7%）。蛋白质含量为 77.20 mg/g，膳食纤维含量为 58.33 g/100 g。经过检测发芽薏米固体饮料的 eGI 值为 50.44，GABA 含量为 91.32 mg/100 g。由此可以看出，发芽薏米固体饮料中含有较高的膳食纤维和 GABA，且升糖指数较低。由表 5 可知，发芽薏米固体饮料菌落总数及大肠菌群

的数目均低于 10 CFU/g，酵母菌、霉菌、沙门氏菌没有检测出，这表明发芽薏米固体饮料的微生物指标满足国家相关要求。

2.4 过氧化值

过氧化值作为油脂氧化初期的特征产物，是评价其氧化程度的指标[24]。发芽薏米固体饮料的过氧化值如图 9 所示，过氧化值拟合方程及货架期如表 6 所示。

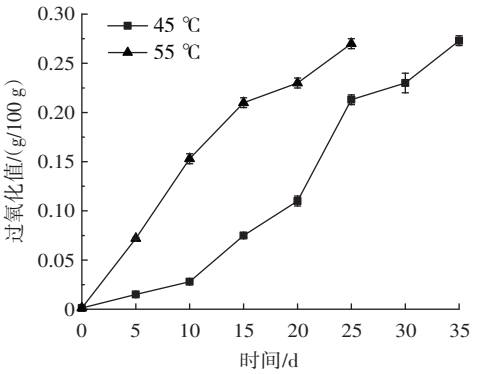


图 9 45 ℃和 55 ℃对发芽薏米固体饮料过氧化值的影响

Fig.9 Effect of 45 ℃ and 55 ℃ on the peroxide value of germinated *Coix* solid beverage

表 6 发芽薏米固体饮料的过氧化值拟合方程及货架期

Table 6 Fitting equation and shelf life of germinated *Coix* solid beverage for peroxide value

温度/℃	线性回归方程	R^2	货架期/d
45	$\ln P = 0.080t - 4.13$	0.905 8	35
55	$\ln P = 0.063t - 2.69$	0.874 5	25

注：P 为发芽薏米固体饮料过氧化值；t 为发芽薏米固体饮料的储藏时间。

由图 9 可知，在不同贮藏温度下，发芽薏米固体饮料的过氧化值随贮藏时间的延长表现出升高的趋势。通过过氧化值对数 $\ln P$ 与贮藏时间的关系进行回归拟合。由表 6 可知，在 45 ℃贮藏条件下发芽薏米固体饮料的货架期为 35 d，而在 55 ℃贮藏条件下，发芽薏米固体饮料的货架期 25 d，经过计算得出 Q_{10} 为 1.75。以过氧化值为指标经过公式(6)计算得出，在 25 ℃下的发芽薏米固体饮料预测货架期是 107 d。

3 结论

本文通过单因素和正交试验并结合感官评价，得到了发芽薏米固体饮料的最佳配方为发芽薏米粉和椰子粉质量比 1∶5、赤藓糖醇添加量 25%、车前子壳添加量 8%、菊粉添加量 1.0%、抗性糊精添加量 5%。经检测，发芽薏米固体饮料的水分及微生物含量均符合相关国家标准。其蛋白质含量为 77.20 mg/g，GABA 含量为 91.32 mg/100 g，膳食纤维含量较高(58.33 g/100 g)，eGI 值较低(50.44)。同时，对发芽薏米固体饮料的货架期进行预测，结果表明，107 d 为发芽薏米固体饮料的最佳食用期限。本研究结果不仅能拓展薏米的商业化应用途径，也为高品质功能性发芽薏米产品的开发和利用拓展了思路。

参考文献：

[1] HA D T, NAM TRUNG T, BICH THU N, et al. Adlay seed extract (*Coix Lachryma*-jobi L.) decreased adipocyte differentiation and increased glucose uptake in 3T3-L1 cells[J]. Journal of Medicinal Food, 2010, 13(6): 1331-1339.

[2] WANG W Q, ZHAO Y M, BAI Z L, et al. Extraction, purification, structural characterization and bioactivities of polysaccharides from *Coix seed*: A review[J]. Food Chemistry, 2025, 492: 145396.

[3] DONG L D, YANG Y, ZHAO Y C, et al. Effect of different conditions on the germination of *Coix seed* and its characteristics analysis[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101332.

[4] 张丰娥. 福建 4 种薏苡面条加工品质分析[J]. 现代食品, 2023, 29(1): 81-87.
ZHANG Feng′e. Analysis on the processing quality of four types of *Coix lachryma*-jobi L. noodles in Fujian[J]. Modern Food, 2023, 29(1): 81-87.

[5] 董丹萍, 周旭华. 赤小豆薏米酸枣特色面包的研制[J]. 食品安全导刊, 2023(30): 141-143, 176.
DONG Danping, ZHOU Xuhua. Development of the special bread of red bean, *Coix seed*, sour jujube[J]. China Food Safety Magazine, 2023(30): 141-143, 176.

[6] SANJAYA S, ROMULO A. Study of chemical, physical stabilites, and sensory properties of sorghum-adlay-based milk[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1252(1): 012157.

[7] 尚敏. 发芽薏米赤小豆压缩饼干的研制及品质分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
SHANG Min. Study on the analysis of germinated adlay and adzuki bean compressed biscuits[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.

[8] DENNIS E A, FLACK K D, DAVY B M. Beverage consumption and adult weight management: A review[J]. Eating Behaviors, 2009, 10(4): 237-246.

[9] SLAVIN J L, MARTINI M C, JACOBS D R, et al. Plausible mechanisms for the protectiveness of whole grains[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1999, 70(3): 459S-463S.

[10] DE SILVA A, BLOOM S R. Gut hormones and appetite control: A focus on PYY and GLP-1 as therapeutic targets in obesity[J]. Gut and Liver, 2012, 6(1): 10-20.

[11] VELUVALI A, SNYDER M. Dietary fiber deficiency in individuals with metabolic syndrome: A review[J]. Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care, 2023, 26(6): 564-569.

[12] TRINIDAD T P, MALLILLIN A C, VALDEZ D H, et al. Dietary fiber from coconut flour: A functional food[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2006, 7(4): 309-317.

[13] YAO M L, HAN X F, PI N, et al. *In vitro* effects of inulin, resistant dextrin, and stachyose on the functional properties and digestibility of corn starch[J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(9): e70165.

[14] 刘可昕. 白熟期鲜枣制粉工艺及枣粉固体饮料的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2023.
LIU Kexin. Study on the process of making jujube power with white ripening period and the solid beverage of jujube powder[D]. Baod-

ing: Hebei Agricultural University, 2023.
[15] KANWAR P, YADAV R B, YADAV B S. Influence of chemical modification approaches on physicochemical and structural properties of dietary fiber from oat[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 111: 103688.
[16] 贺捷群 . 低 GI 马铃薯雪花烤饼的研制及其体外消化特性的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
HE Jiequn. Study on development and in vitro digestibility of low GI potato snow scones[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
[17] SHARMA S, SAXENA D C, RIAR C S. Changes in the GABA and polyphenols contents of foxtail millet on germination and their relationship with *in vitro* antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 863-870.
[18] MARTÍN-TORRES S, RUIZ-CASTRO L, JIMÉNEZ-CARVELO A M, et al. Applications of multivariate data analysis in shelf life studies of edible vegetal oils - A review of the few past years[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 31: 100790.
[19] 胡云飞, 周德, 朱妮, 等 . 天麻脆片的研制、品质分析及其货架期预测[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 242-252.
HU Yunfei, ZHOU De, ZHU Ni, et al. Development, quality analysis, and shelf-life prediction of *Gastrodia elata* crisp chips[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(23): 242-252.
[20] 周倩, 孙汉巨, 王静, 等 . 竹笋复合固体饮料的工艺研究[J]. 农产品加工·学刊, 2012(12): 75-79.
ZHOU Qian, SUN Hanju, WANG Jing, et al. Technology of bamboo shoots compound solid beverage[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2012(12): 75-79.
[21] 赵明, 毛雪, 姜威, 等 . 黑木耳银耳复合固体饮料加工工艺研究[J]. 中国食物与营养, 2025, 31(6): 36-39.
ZHAO Ming, MAO Xue, JIANG Wei, et al. Study on processing technology of *Auricularia auricula* and *Tremella fuciformis* compound solid beverage[J]. Food and Nutrition in China, 2025, 31(6): 36-39.
[22] 王磊, 黄燕巧, 杨瑞利, 等 . 一种益生元复合固体饮料配方及通便功能研究[J]. 食品科技, 2023, 48(11): 114-122.
WANG Lei, HUANG Yanqiao, YANG Ruili, et al. Study on the formula and laxative function of a prebiotic composite solid beverage[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(11): 114-122.
[23] 陈雅, 傅海庆 . 大麦魔芋益生固体饮料的研制[J]. 食品科技, 2020, 45(6): 98-104.
CHEN Ya, FU Haiqing. Development of barley and konjac solid drink[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(6): 98-104.
[24] 唐小闲, 唐文称, 任爱清, 等 . 不同加工方式对柿子脆片物理特性及营养品质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 185-191.
TANG Xiaoxian, TANG Wencheng, REN Aiqing, et al. Comparative analysis s of physical characteristics and nutritional quality of persimmon chips prepared using different processing methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 185-191.

加工编辑:李文欣
收稿日期:2026-02-02

(上接第 76 页)

Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(19): 277-284.
[21] HEDAYATI S, SHAHIDI F, KOOCHEKI A, et al. Physical properties of pregelatinized and granular cold water swelling maize starches at different pH values[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 730-735.
[22] SINGH J, SINGH N. Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(1): 63-72.
[23] SUN Z Y, WANG R, BEREKA T Y, et al. Physiochemical properties of V-type cold water swelling tapioca starch prepared by ethanolic extrusion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 306: 141435.
[24] BAEK M, JEONG S, JEON S, et al. Effect of rice protein on the retrogradation of waxy rice starch gels[J]. Food Science and Biotechnology, 2025, 34(11): 2507-2518.
[25] HU X P, ZHANG B, JIN Z Y, et al. Effect of high hydrostatic pressure and retrogradation treatments on structural and physicochemical properties of waxy wheat starch[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 560-565.
[26] 孙慧君, 徐艺璇, 王佳萌, 等 . 微波处理对燕麦淀粉结构、理化特性及消化性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 19-27.
SUN Huijun, XU Yixuan, WANG Jiameng, et al. Effect of microwave treatment on structure, physicochemical properties, and digestibility of oat starch[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 19-27.
[27] AMBIGAIPALAN P, HOOVER R, DONNER E, et al. Starch chain interactions within the amorphous and crystalline domains of pulse starches during heat-moisture treatment at different temperatures and their impact on physicochemical properties[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 175-184.

加工编辑:李文欣
收稿日期:2026-02-24