

发芽糙小米饮料液化工艺条件优化

宋佳敏¹, 安香玉¹, 李玉杰¹, 王成祥², 刘敬科³, 郝建雄^{1*}

(1. 河北科技大学食品与生物学院, 石家庄 050000; 2. 河北同福粥道食品有限公司, 石家庄 050000;
3. 河北省农林科学院谷子研究所, 石家庄 050000)

摘 要: **目的** 以发芽糙小米为主要原料, 制备发芽糙小米饮料, 并对其液化工艺进行优化。**方法** 以葡萄糖当量(dextrose equivalent, DE)值为评价指标, 研究中温 α -淀粉酶添加量、液化 pH、液化温度、液化时间对发芽糙小米饮料液化效果的影响, 采用单因素及响应面实验对液化工艺参数进行优化, 建立最优工艺条件。**结果** 各因素对 DE 值影响大小顺序为中温 α -淀粉酶添加量>液化时间>液化温度>液化 pH; 其最佳液化工艺条件为中温 α -淀粉酶添加量 12 U/g、液化 pH 6.0、液化温度 64 °C、液化时间 42 min。在此条件下, 发芽糙小米液的 DE 值为(36.32±0.23)%。**结论** 所建模型能合理地预测和分析发芽糙小米液的 DE 值, 适量添加中温 α -淀粉酶能够有效提高淀粉水解程度, 改善饮料品质, 该研究为今后小米产品研发中的液化工艺提供了理论支持。

关键词: 发芽糙小米; 液化; 葡萄糖当量值; 响应面; 饮料

Optimization of liquefaction process of germinated brown millet beverage

SONG Jia-Min¹, AN Xiang-Yu¹, LI Yu-Jie¹, WANG Cheng-Xiang², LIU Jing-Ke³, HAO Jian-Xiong^{1*}

(1. College of Food Science and Biology, Hebei University of Science Technology, Shijiazhuang 050000, China;
2. Hebei Tongfu Congee Food Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 3. Millet Institute of
Hebei Agriculture and Forest Academy, Shijiazhuang 050000, China)

ABSTRACT: Objective To prepare germinating brown millet beverage with germinated brown millet as the main raw material, and optimize its liquefaction process. **Methods** Using dextrose equivalent (DE) value as evaluation index, the effects of moderate temperature α -amylase addition, liquefaction pH, liquefaction temperature and liquefaction time on the liquefaction effects of germinated brown millet beverage were optimized, the processing parameters of liquefaction process were optimized through single factor and the response surface test. **Results** The order of various factors on DE value was medium temperature α -amylase addition>liquefaction time>liquefaction temperature>liquefaction pH; the optimal liquefaction conditions were as follows: Moderate temperature α -amylase addition 12 U/g, liquefaction pH 6.0, liquefaction temperature 64 °C and liquefaction time 42 min. Under these conditions, the DE value of sprouting rough millet liquid was (36.32±0.23)%. **Conclusion** The model can reasonably predict and analyze the DE value of germinated brown millet liquid, appropriate addition of the medium temperature α -amylase can effectively improve the degree of starch hydrolysis and improve the quality of beverage, this study provides theoretical supports for the liquefaction process in the research and development of millet

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972170)、河北省科技厅重点研发计划(19227110D)、河北省自然科学基金杰出青年基金项目(C2018208085)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31972170), the Plan of Science and Technology Department of Hebei Province (19227110D), and the Outstanding Youth Fund Project of Hebei Natural Science Foundation (C2018208085)

*通信作者: 郝建雄, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工与安全控制。E-mail: cauhjx@163.com

*Corresponding author: HAO Jian-Xiong, Ph.D, Professor, Hebei University of Science Technology, No.26, Yuxiang Street, Yuhua District, Shijiazhuang 050000, China. E-mail: cauhjx@163.com

products in the future.

KEY WORDS: germinated brown millet; liquefaction; dextrose equivalent value; response surface; beverage

0 引言

发芽糙小米是将去壳糙小米经生理活性化工艺处理萌发一定芽长而得到的由幼芽、糠层和胚乳组成的糙小米制品^[1]。它不仅具有糙小米的全部营养价值,同时还含有丰富的生理活性物质,如 γ -氨基丁酸^[2-4]。发芽是一种成本低且有效改善全谷物品质特性的加工技术^[5-7],可在酶的催化作用下,使谷物中的功能物质发生转化和富集,从而使维生素、膳食纤维、蛋白质、氨基酸等营养成分得到提高。同时,发芽还能够激活水解淀粉^[8-10],有效改善糙小米本身的食用品质^[11]。

谷物饮料是以谷物为原料研制而成的饮料产品,能够更大程度的保留脂肪、蛋白质、膳食纤维、碳水化合物、矿物质、维生素等营养物质^[12]。小米属于杂粮,适应能力极强,中国的小米产量占全世界的80%,且各种营养成分的配比合理、质地温和、易于吸收,是天然的营养来源^[13]。但是目前开发的小米产品并不多,对其深加工利用也较少,因此小米在饮料中的应用具有巨大潜力。由于小米中的淀粉含量较高,淀粉经加热后大多以糊化状态存在,糊化后的淀粉易产生浑浊或分层沉淀,在小米饮料的制备过程中会存在稳定性差的问题,最终影响饮料的品质。通过添加无毒、高效的酶能够显著降低淀粉,增加可溶性物质含量,从而提高谷物产品品质,使其在食品领域得到广泛的应用^[14-15]。

液化是指在酶的作用下,淀粉糖链断裂,淀粉转化为糊精和低聚糖,分子量越来越小、溶液黏度不断下降、流动性增强的现象。李伟等^[16]以糙米为主要原料制备富硒发芽糙米,确定了富硒发芽糙米的最佳酶解工艺条件,有效降低淀粉含量;张桂芳等^[17]优化小米饮料酶解工艺技术参数,淀粉的水解度显著提高;李根等^[18]对小米谷物饮料制作工艺进行研究,分析不同条件对液化效果的影响,确定最佳液化条件,降低了底物的黏度。综上可知,液化工艺可以有效降低淀粉含量、提高可溶性固形物含量^[19],减少饮料贮藏中沉淀分层的现象,改善产品品质,是制备谷物饮料的关键步骤。本研究拟利用酶解法对发芽糙小米饮料液化工艺进行研究,以葡萄糖当量(dextrose equivalent, DE)值为指标,确定最佳工艺参数,研制出一种品质较好、营养丰富的谷物饮料,以期拓展小米的开发和利用,为发芽糙小米饮料的产业化生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“豫谷 18 号”小米由河北省农林科学院谷子所提供;

中温 α -淀粉酶(10000 U/g, 北京索莱宝科技有限公司); 碳酸氢钠(食品级, 永清县兆发食品有限公司); 柠檬酸(食品级, 苏州市尊澜工贸有限公司); 葡萄糖标准溶液(1 mg/mL, 北京北方伟业计量技术研究院); 3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)(纯度 $\geq 98.0\%$, 天津石化光复精细化工研究所); 丙三醇、氯化钠(分析纯, 天津欧博凯化工有限公司); 氢氧化钠(NaCl, 分析纯, 天津市凯通化学试剂有限公司); 无水氯化钙(CaCl_2 , 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂)。

1.2 仪器与设备

BIC-400 型人工气候箱(上海博讯实业有限公司医疗设备厂); LGJ-10D 型冷冻干燥机(北京四环科学仪器厂有限公司); AISITE 型高速万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司); CP114 型电子分析天平[0.0001 g, 奥豪斯仪器(上海)有限公司]; DF-101 型集热式恒温加热磁力搅拌器(巩义市予华仪器有限责任公司); ST2100 型 pH 测量仪[奥豪斯仪器(常州)有限公司]; DF-101 型集热式恒温加热磁力搅拌器(巩义市予华仪器有限责任公司); 101-2A 电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司); HC-3018 高速离心机(安徽中科中佳科学仪器有限公司); SPECTRO star Nano 酶标仪(德国 BMG LABTECH 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 发芽糙小米饮料工艺流程

发芽糙小米饮料工艺流程如图 1 所示。

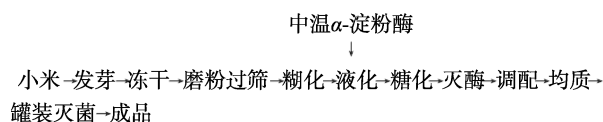


图 1 工艺流程图

Fig.1 Process flow diagram

操作要点: 取一定量的糙小米用 7.5 mmol/L NaCl 和 15 mmol/L CaCl_2 的混合盐溶液冲洗干净, 按照 5:1 (V:m) 的比例加入混合盐溶液, 在 28 °C 温度下浸泡 16 h。浸泡后, 铺于湿润纱布上, 在发芽温度为 27 °C 下培养 65 h, 发芽结束后, 冻干 24 h 磨粉过 80 目筛。按料液比 1:10 (g/mL) 将发芽小米粉和水充分混合搅拌均匀, 沸水糊化 10 min。糊化后, 调节 pH, 加入一定量的中温 α -淀粉酶, 在一定的温度下进行液化^[20]。

1.3.2 单因素实验

(1)中温 α -淀粉酶添加量对 DE 值的影响

糊化好的小米液, 调节 pH 为 6.0, 分别加入 2、6、10、

14、18、22 U/g 的中温 α -淀粉酶, 放入 60 °C 水浴锅中酶解 40 min。测定不同中温 α -淀粉酶添加量对 DE 值的影响。

(2) 液化 pH 对 DE 值的影响

糊化好的小米液, 调节 pH 分别为 4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0, 加入 10 U/g 的中温 α -淀粉酶, 放入 60 °C 水浴锅中酶解 40 min。测定不同液化 pH 对 DE 值的影响。

(3) 液化温度对 DE 值的影响

糊化好的小米液, 调节 pH 为 6.0, 加入 10 U/g 的中温 α -淀粉酶, 分别放入 50、55、60、65、70、75 °C 的水浴锅中酶解 40 min。测定不同液化温度对 DE 值的影响。

(4) 液化时间对 DE 值的影响

糊化好的小米液, 调节 pH 为 6.0, 加入 10 U/g 的中温 α -淀粉酶, 放入 60 °C 水浴锅中分别酶解 30、35、40、45、50 min。测定不同液化时间对 DE 值的影响。

1.3.3 液化响应面优化实验

葡萄糖当量值能够反映淀粉的水解程度。在单因素实验基础上, 采用 Box-Behnken 原理设计实验方案, 以中温 α -淀粉酶添加量(A)、液化 pH (B)、液化温度(C)、液化时间(D)为影响因素, 以 DE 值(R_1)为响应值, 优化其液化工艺参数, 实验因素及水平因素编码见表 1。

表 1 响应面实验因素及水平

Table 1 Codes and levels of independent variables used for response surface analysis

水平	因素			
	A/(U/g)	B pH	C/°C	D/min
-1	6	5.5	60	35
0	10	6.0	65	40
1	14	6.5	70	45

1.3.4 DE 值测定

DE 值是将样品中的还原糖以葡萄糖当量表示, 即还原糖占糖浆干物质的百分比, 按照公式(1)计算。

$$\text{DE 值}/\% = \frac{\text{还原糖含量}(\%)}{\text{固形物含量}(\%)} \times 100\% \quad (1)$$

(1) 还原糖含量测定

3,5-二硝基水杨酸试剂的配制: 用少量去离子水溶解 6.5 g 的 DNS, 加入 2 mol/L 的 NaOH 溶液 325 mL 和 45 g 丙三醇, 摇匀定容至 1000 mL 容量瓶中, 在棕色瓶中保存, 备用。

样品处理: 量取酶解液 10 mL, 于 8000 r/min 下离心 5 min, 上清液即为待测样品, 备用。

参考赵凯等^[21]的方法进行操作。分别吸取 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mL 葡萄糖标准溶液, 用蒸馏水定容至 0.5 mL, 加入 1.5 mL DNS 试剂混匀后沸水处理 5 min, 流水冷却。分别加入 4 mL 蒸馏水, 混匀。在波长 540 nm 下测吸光度,

以葡萄糖标准溶液浓度(X, mg/mL)为横坐标, 吸光度为纵坐标(Y), 绘制标准曲线, 得到回归方程为 $Y=0.3302X+0.0577$, $r^2=0.9952$ 。

样品还原糖含量测定: 将 0.5 mL 待测样品与 1.5 mL DNS 试剂混合均匀, 后续同上述步骤测定。根据公式(2)计算还原糖含量:

$$W/\% = \frac{c \times D \times V}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W 表示还原糖含量, %; c 表示根据吸光度值计算出的溶液质量浓度, mg/mL; D 表示溶液稀释倍数; V 表示取样体积, mL; m 表示取样质量, mg。

(2) 固形物含量测定

参考李根等^[18]的方法进行操作。取适量酶解液放入恒质量干燥烧杯中, 放入烘箱 105 °C 下烘至恒重。根据以下公式(3)计算固形物含量:

$$W/\% = \frac{M_1}{M_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中: M 表示固形物含量, %; M_1 表示恒重后的质量, g; M_2 表示恒重前的质量, g。

1.4 数据处理

所有的实验重复 3 次, 实验结果以平均值±标准偏差表示, 使用 Origin Pro 8.0、SPSS Statistics 26.0 和 Design-Expert 10 对实验数据进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果与分析

2.1.1 中温 α -淀粉酶添加量对 DE 值的影响

中温 α -淀粉酶是一种重要的淀粉水解酶, 广泛应用于谷物饮料的液化工艺中, 其能与淀粉发生作用, 切断淀粉内部的糖苷键, 将大分子淀粉降解为小分子的糖, 从而降低底物溶液黏度^[22-23]。本研究结果显示, 加酶量在 2~10 U/g 时, 发芽糙小米液经液化后的 DE 值呈明显上升趋势; 加酶量在 10~22 U/g 时, DE 值逐步趋于稳定($P>0.05$)。在中温 α -淀粉酶与发芽糙小米液的反应过程中, 随着中温 α -淀粉酶添加量持续增加, 酶与底物结合程度不断增加, 使淀粉分子量迅速降低; 但当酶添加量过高时, 此时淀粉底物不足, 过量的酶并不能继续参与与淀粉底物的反应, 因此继续添加液化用酶不会促进 DE 值的进一步升高^[24-25]。此结果与李长见^[26]在米汁饮料研制的研究中酶添加量对 DE 值的影响趋势较为一致。因此, 综合考虑成本因素及催化效率, 选择适宜的中温 α -淀粉酶添加量为 10 U/g, 并选择 6、10、14 U/g 进行进一步的响应面实验优化。

2.1.2 液化 pH 对 DE 值的影响

pH 会影响酶分子构象的稳定性和极性基团的解离状态, 从而影响酶与底物的结合力和催化能力^[27], 过酸或过

碱都可以使酶的空间结构破坏, 从而影响酶与底物的液化效果。本研究结果显示, pH 在 4.5~6.0 时, 经液化后的发芽糙小米液的 DE 值逐渐升高; pH 在 6.0~7.0 时, DE 值呈现下降趋势; pH 在为 6.0 时, DE 值达到最大($P<0.05$)。可能是因为中温 α -淀粉酶活性受酸碱度的影响很大, 在特定的 pH, 酶的空间结构较为稳固, 从而对酶的构象和酶活的相应变化影响较小^[28]。当 pH 过高或过低时, 中温 α -淀粉酶活性降低甚至失去活性而无法继续反应, 导致发芽糙小米液 DE 值下降^[29]。这与张桂芳等^[17]对小米饮料酶解条件优化中的影响趋势基本一致。因此, 本研究选择适宜的液化 pH 为 6.0, 并选择 5.5、6.0、6.5 进行进一步的响应面实验优化。

2.1.3 液化温度对 DE 值的影响

液化温度对淀粉水解程度影响较大, 能够改变酶分子与底物之间的有效碰撞次数以及酶活性, 从而影响液化效果和反应速率^[30]。本研究结果显示, 随着温度的不断升高, 发芽糙小米酶解液的 DE 值呈现先升高后降低的趋势, 在 65 °C 时 DE 值达到最高, 且显著高于其他温度条件下的 DE 值($P<0.05$)。在酶分子与底物反应的过程中, 随着液化温度的升高, 增加了酶分子与底物之间的有效碰撞次数, 反应速率加快, 发芽糙小米液的 DE 值升高; 当温度过高时酶的活性降低, 酶结构发生改变, 导致酶大量失活而失去作用, 酶解反应迅速减弱, 进而影响发芽糙小米粉中淀粉的水解程度, 导致 DE 值持续下降^[31-32]。这与刘静雪等^[33]利用酶解复合法优化改性玉米淀粉工艺的结果相似。因此, 本研究中选择适宜的液化温度为 65 °C, 并选择 60、65、70 °C 进行进一步的响应面实验优化。

2.1.4 液化时间对 DE 值的影响

结果显示, 液化时间在 30~40 min 时, 随着液化时间的延长, DE 值呈上升趋势, 40 min 后逐步趋于稳定。当液化时间分别为 40、45 和 50 min 时, 经液化后的发芽糙小米酶解液无显著性差异($P>0.05$)。原因可能是随着时间增加, 酶与底物不断充分反应, 当反应时间足够长时, 底物不断减少, 酶活力降低, 淀粉酶与底物淀粉反应基本完成, 导致酶解增幅减缓, 继续延长液化时间不会促进 DE 值的进一步升高^[17]。此结果与孙铭泽等^[34]研究玉米粉液化工艺的结果趋势保持一致。因此综合考虑时间和效率因素, 本研究中选择适宜的液化时间确定为 40 min, 并选择 35、40、45 min 进行进一步的响应面实验优化。

2.2 响应面实验结果与分析

2.2.1 响应面实验设计及结果

根据 Box-Behnken 中心组合实验设计原理, 综合单因素实验结果, 利用响应面法优化发芽糙小米饮料的液化工艺。以中温 α -淀粉酶添加量、液化 pH、液化温度、液化时间设计 4 因素 3 水平响应面优化实验, 实验设计与结果见表 2。

表 2 响应面实验设计与结果					
Table 2 Response surface experiment design and results					
实验号	A	B	C	D	$R_1/\%$ ($n=3$)
1	-1	0	-1	0	26.06±0.07
2	0	-1	0	1	26.89±0.06
3	0	1	0	-1	23.89±0.12
4	-1	0	1	0	28.13±0.07
5	0	0	1	-1	23.97±0.06
6	-1	1	0	0	25.97±0.29
7	1	1	0	0	26.29±0.17
8	1	0	1	0	27.73±0.07
9	0	0	0	0	34.54±0.17
10	1	0	0	-1	28.15±0.11
11	1	0	0	1	33.69±0.07
12	0	1	1	0	27.05±0.18
13	1	-1	0	0	28.93±0.12
14	-1	-1	0	0	23.90±0.23
15	1	0	-1	0	32.41±0.14
16	-1	0	0	-1	28.90±0.13
17	-1	0	0	1	28.23±0.12
18	0	0	0	0	36.82±0.18
19	0	0	0	0	32.35±0.35
20	0	0	0	0	33.22±0.24
21	0	1	0	1	30.47±0.18
22	0	0	-1	-1	30.52±0.13
23	0	0	-1	1	28.36±0.21
24	0	1	-1	0	27.09±0.07
25	0	-1	0	-1	27.83±0.07
26	0	-1	1	0	25.86±0.21
27	0	0	1	1	31.03±0.07
28	0	-1	-1	0	29.24±0.11
29	0	0	0	0	33.23±0.14

2.2.2 回归模型的建立及方差分析

利用 Design Expert 10.0.7 软件对表 2 中的数据进行多元回归拟合, 得到模型的二次多元回归方程:

$$R_1=34.03+1.33A-0.16B-0.83C+1.28D-1.18AB-1.69AC+1.55AD+0.83BC+1.88BD+2.30CD-2.66A^2-4.53B^2-2.78C^2-2.22D^2$$
, 对该回归方程进行方差分析, 结果见表 3。

由表 3 可知, 该模型的 $F=16.24$ 、 $P<0.01$ 极显著, 且失拟项 $P=0.9840$, 不显著, 说明模型的建立是合理的, 并且决定系数 R^2 为 0.9420, 模型的拟合程度较好, 说明此回

归方程可用于范围内预测。由表 3 回归模型系数的显著性分析, 将不显著项剔除, 简化后的回归方程为:

$$R_1=34.03+1.33A-0.83C+1.28D-1.69AC+1.55AD+1.88BD+2.30CD-2.66A^2-4.53B^2-2.78C^2-2.22D^2$$

分析对比一次项的 F 值, 得出 4 个单因素对酶解液 DE 值影响大小顺序为 $A>D>C>B$, 即中温 α -淀粉酶添加量>液化时间>液化温度>液化 pH。从表 3 中可知, 二次项

A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对 DE 值影响达到极显著($P<0.01$); 一次项 A 、 C 、 D , 交互项的 AC 、 AD 、 BD 、 CD 对 DE 值影响达到显著($P<0.05$); 其他项对 DE 值的影响不显著。

2.2.3 响应面的交互作用

经软件处理, 得到两两因素之间交互作用对 DE 值影响的等高线及响应面图, 如图 2 所示。

表 3 回归方程方差分析
Table 3 Regression equation analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	292.57	14	20.90	16.24	<0.0001	**
A-中温 α -淀粉酶添加量	21.32	1	21.32	16.56	0.0011	*
B-液化 pH	0.29	1	0.29	0.23	0.6406	
C-液化温度	8.18	1	8.18	6.36	0.0244	*
D-液化时间	19.74	1	19.74	15.34	0.0016	*
AB	5.56	1	5.56	4.32	0.0565	
AC	11.40	1	11.40	8.86	0.0100	*
AD	9.63	1	9.63	7.49	0.0161	*
BC	2.78	1	2.78	2.16	0.1635	
BD	14.09	1	14.09	10.94	0.0052	*
CD	21.22	1	21.22	16.49	0.0012	*
A^2	45.84	1	45.84	35.62	<0.0001	**
B^2	133.08	1	133.08	103.39	<0.0001	**
C^2	49.95	1	49.95	38.81	<0.0001	**
D^2	31.84	1	31.84	24.74	0.0002	**
残差	18.02	14	1.29			
失拟	5.87	10	0.59	0.19	0.9840	不显著
误差	12.15	4	3.04			
总和	310.59	28				

注: **为极显著, $P<0.01$, *为显著, $P<0.05$ 。

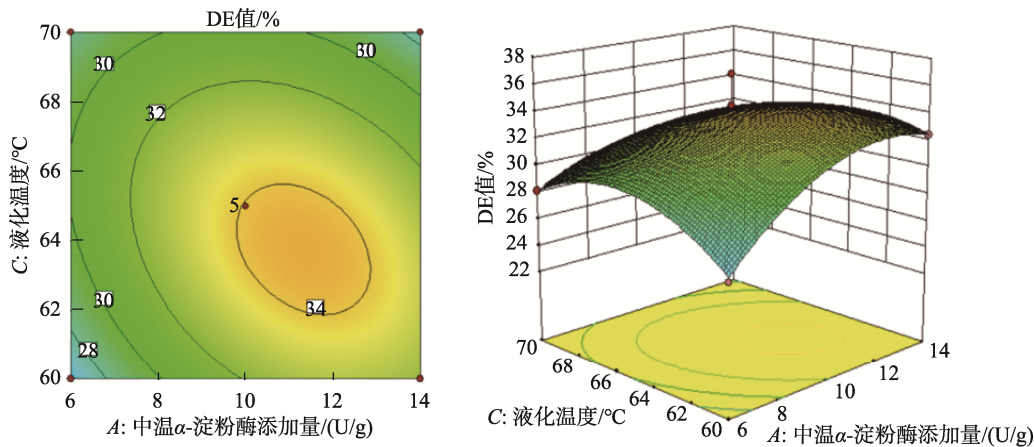


图 2 各因素交互作用对 DE 值影响的等高线及响应面图
Fig.2 Contour lines and response surface diagrams of interaction effects of various factors on DE values

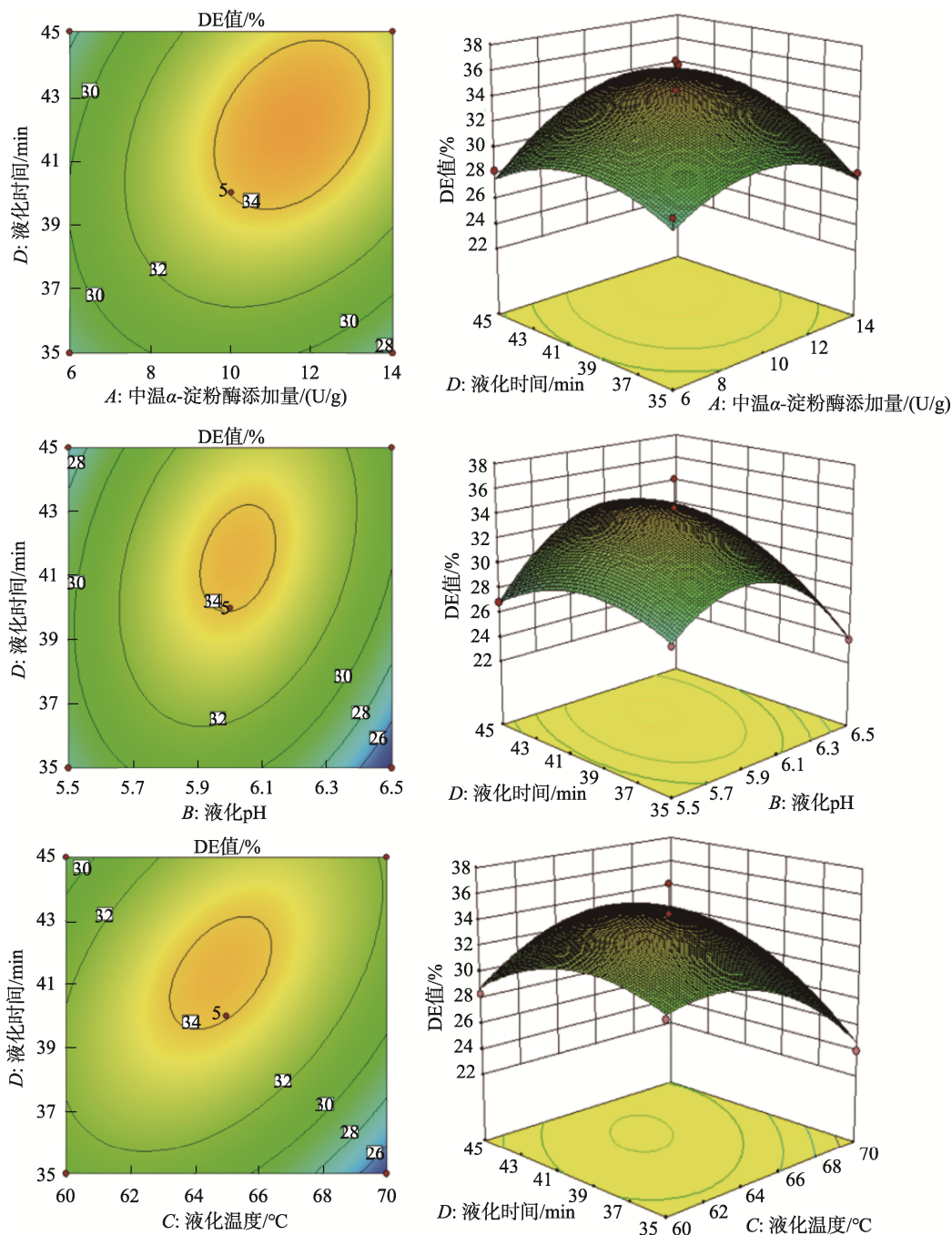


Fig.2 Contour lines and response surface diagrams of interaction effects of various factors on DE values

2.2.4 验证实验

通过软件分析,发芽糙小米饮料的液化工艺最优条件为中温 α -淀粉酶添加量为 11.5824 U/g、液化 pH 为 5.9981、液化温度为 64.4079 °C、液化时间 41.8278 min, 此条件下的 DE 值为 34.58%。考虑到实际操作性,将选取中温 α -淀粉酶添加量为 12 U/g、液化 pH 为 6.0、液化温度为 64 °C、液化时间 42 min, 进行验证性实验。将上述条件重复 3 次, 得到 DE 值为 $(36.32 \pm 0.23)\%$, 相对误差为 0.05, 与

理论值接近,表明该模型参数对优化液化工艺可行。

3 结 论

液化工艺是发芽糙小米饮料生产的重要环节, 决定了饮料的风味和口感。通过液化分解成小分子物质, 最大程度保留小米的营养成分, 防止回生沉淀^[35], 显著提高饮料品质。本研究利用单因素及响应面实验优化发芽糙小米饮料的液化工艺条件, 确定最佳条件为: 中温 α -淀粉酶添加量为

12 U/g、液化 pH 为 6.0、液化温度为 64 °C、液化时间 45 min。本研究为糙小米饮料的开发提供了基础,具有重要的意义,但对饮料的功能性成分还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 胡丽丽, 马佩琚, 勾跃, 等. 有色发芽糙米面包的研制[J]. 农业科技与装备, 2021, (5): 45–46, 49.
HU LL, MA PJ, GOU Y, *et al.* Development of colored sprouted brown rice bread [J]. Agric Sci Technol Equip, 2021, (5): 45–46, 49.
- [2] 吴昊桐, 杜佳阳, 李东红, 等. 发芽糙米复合粉制备无麸质面包的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(15): 132–137.
WU HT, DU JY, LI DH, *et al.* Studies on gluten-free bread preparation using germinated brown rice compound powder [J]. Food Res Dev, 2021, 42(15): 132–137.
- [3] 刘晓飞, 侯艳, 马京求, 等. 发芽糙米糖蛋白抗炎、降血糖性能分析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 48–56.
LIU XF, HOU Y, MA JQ, *et al.* Analysis of anti-inflammatory and hypoglycemic properties of germinated brown rice glycoprotein [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(9): 48–56.
- [4] MON OE, KATESIRIN R, LADAWAN K, *et al.* Germinated brown rice attenuates cell death in vascular cognitive impaired mice and glutamate-induced toxicity in HT22 cells [J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(18): 5093–5106.
- [5] 杨鹏. 发芽对小米淀粉理化性质的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2020.
YANG P. Effect of germination on the physical and chemical properties of millet starch [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2020.
- [6] KAUR H, GILL BS. Comparative evaluation of physicochemical, nutritional and molecular interactions of flours from different cereals as affected by germination duration [J]. J Food Meas Charact, 2020, 14(3): 1147–1157.
- [7] 高琨, 谭斌, 汪丽萍, 等. 萌芽全谷物的研究现状、问题与机遇[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 71–80.
GAO K, TAN B, WANG LP, *et al.* The research status, problems and opportunities of sprouted whole grain [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2021, 29(2): 71–80.
- [8] 杜金凤, 郭航宏, 陶晓杰, 等. DABS-Cl 柱前衍生 HPLC 测定发芽糙米粉中 γ -氨基丁酸[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 468–472.
DU JF, GUO HH, TAO XJ, *et al.* Determination of γ -aminobutyric acid in germinated brown rice powder by HPLC with DABS-Cl precolumn derivatization [J]. Food Ind, 2021, 42(6): 468–472.
- [9] YANG QH, LUO Y, WANG HL, *et al.* Effects of germination on the physicochemical, nutritional and *in vitro* digestion characteristics of flours from waxy and nonwaxy proso millet, common buckwheat and pea [J]. Innov Food Sci Emerg, 2021, 67: 102586.
- [10] KAUR H, GILL BS. Changes in physicochemical, nutritional characteristics and ATR-FTIR molecular interactions of cereal grains during germination [J]. J Food Sci Technol, 2021, 58(6): 2313–2324.
- [11] 陈姝芳, 张名位, 张雁, 等. 发芽及挤压膨化对糙米挥发性风味物质的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 190–202.
CHEN YF, ZHANG MW, ZHANG Y, *et al.* Effect of germination and extrusion on volatile flavor compounds in brown rice [J]. China Agric Sci, 2021, 54(1): 190–202.
- [12] ROMANO AH, BRINO G, PETERKOFISKY A, *et al.* Regulation of beta-galactoside transport and accumulation in heterofermentative lactic acid bacteria [J]. J Bacteriol, 2019, 169(12): 5589–5596.
- [13] MANI V, HARI D. Upadhyaya, diversity and trait-specific sources for productivity and nutritional traits in the global proso millet (*Panicum Miliaceum* L.) germplasm collection [J]. Crop J, 2018, 6(5): 451–463.
- [14] 杨婧曦. 银杏饮料的制备工艺及其稳定性研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2014.
YANG JX. Study on processing and stsbility of ginkgo juice [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2014.
- [15] SHAN AT, ANAND BP, ARUNKUMAR E, *et al.* Improvement of nutrient bioavailability in millets: Emphasis on the application of enzymes [J]. J Sci Food Agric, 2021, 101(12): 4867–4878.
- [16] 李伟, 朱畅. 富硒发芽糙米饮料的研制[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(4): 105–109.
LI W, ZHU C. Preparation of a beverage with selenium-enriched germinated brown rice [J]. Food Res Dev, 2017, 38(4): 105–109.
- [17] 张桂芳, 王颖, 王鹏程, 等. 小米饮料酶解条件的优化研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2015, 27(5): 96–100.
ZHANG GF, WANG Y, WANG PC, *et al.* Optimization study of enzymolysis conditions on millet drink [J]. J Heilongjiang Bayi Agric Univ, 2015, 27(5): 96–100.
- [18] 李根, 杨志, 马寅斐, 等. 小米谷物饮料制作工艺研究[J]. 中国果菜, 2020, 40(6): 58–61, 17.
LI G, YANG Z, MA YF, *et al.* Research on the process of millet beverage [J]. China Fruit Veget, 2020, 40(6): 58–61, 17.
- [19] 齐希光, 张晖, 王立, 等. 紫薯饮料的液化糖化工艺研究[J]. 食品科技, 2014, 39(8): 109–113.
QI XG, ZHANG H, WANG L, *et al.* Liquefaction and saccharification technology of purple sweet potato beverage [J]. Food Sci Technol, 2014, 39(8): 109–113.
- [20] 李贞景, 薛意斌, 张兰, 等. 藜麦饮料液化糖化工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(18): 140–143.
LI ZJ, XUE YB, ZHANG L, *et al.* Study on liquefaction and saccharification of quinoa beverage [J]. Anhui Agric Sci, 2018, 46(18): 140–143.
- [21] 赵凯, 许鹏举, 谷广辉. 3,5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖含量的研究[J]. 食品科学, 2008, (8): 534–536.
ZHAO K, XU PJ, GU GY. Study on determination of reducing sugar content using 3,5-dinitrosalicylic acid method [J]. Food Sci, 2008, (8): 534–536.
- [22] 张冬媛, 邓媛元, 张名位, 等. 发芽-挤压-淀粉酶协同处理对速食糙米粉品质特性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 759–768.
ZHANG DY, DENG YY, ZHANG WM, *et al.* Effect of germination-extrusion-amylase assisted processing on quality properties of brown rice powder [J]. China Agric Sci, 2015, 48(4): 759–768.
- [23] 李文钊, 臧传刚, 李义, 等. α -淀粉酶的研究与应用进展[J]. 当代化工, 2017, 46(11): 2292–2296, 2299.
LI WZ, ZANG CG, LI Y, *et al.* Research and application progress of α -amylase [J]. Contemp Chem Ind, 2017, 46(11): 2292–2296, 2299.
- [24] 马丽媛, 李杨, 尚尔坤, 等. 小米红豆复合米粉酶解工艺[J]. 食品工业, 2021, 42(2): 96–100.
MA LY, LI Y, SHANG ERK, *et al.* The enzymatic hydrolysis of millet

- and red bean compound flour [J]. Food Ind, 2021, 42(2): 96–100.
- [25] KRISTA A, SHISL ER, JOAN BB. Glycyl radical activating enzymes: Structure, mechanism, and substrate interactions [J]. Arch Biochem Biophys, 2014, 546(1): 64–71.
- [26] 李长见. 米汁饮料的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- LI CJ. Development of cereal beverages [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018.
- [27] 郭勇. 酶工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- GUO Y. Enzyme engineering [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [28] 刘晓艳, 陈艺焯, 吴林秀, 等. 响应面法优化灵芝总三萜酶辅助提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2017, 42(8): 225–230.
- LIU XY, CHEN YX, WU LX, *et al.* Response surface optimization of enzyme-assisted extraction triterpene from *Juncao Ganoderma lucidum* and its antioxidant activity [J]. Food Sci Technol, 2017, 42(8): 225–230.
- [29] 陈思雯. 发芽藜麦饮料的制备及其特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- CHEN SW. Study on the preparation and technology of quinoa malt beverage [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [30] 郭克娜, 姜璐璐, 阚建全. 薏米酒发酵前淀粉液化及糖化条件的优化[J]. 食品科学, 2013, 34(5): 197–201.
- GUO KN, JIANG LL, KAN JQ. Optimization of starch liquefaction and saccharification conditions before barley wine fermentation [J]. Food Sci, 2013, 34(5): 197–201.
- [31] 陈树俊, 庞震鹏, 刘晓娟, 等. 小米-藜麦饮品液化糖化及稳定剂配方研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 249–255, 282.
- CHEN SJ, PANG ZP, LIU XJ, *et al.* Study on the conditions of liquefaction, saccharification and stabilizer formula in millet-quinoa beverage [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(15): 249–255, 282.
- [32] 战旭梅, 祁兴普, 赖梦宇, 等. 玉米蛋白酶解产物对 α -淀粉酶活性抑制研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(5): 142–146, 155.
- ZHAN XM, QI XP, LAI MY, *et al.* Study on the inhibition of corn protein hydrolysates to α -amylase activity [J]. J Cere Oils, 2021, 34(5): 142–146, 155.
- [33] 刘锦雪, 樊红秀, 王庆庆, 等. 响应面法优化挤出酶解复合改性玉米淀粉工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 18–24.
- LIU JX, FAN HX, WANG QQ, *et al.* Optimization of modification process for corn starch using enzymatic hydrolysis combined with extrusion by response surface methodology [J]. Food Sci, 2015, 36(16): 18–24.
- [34] 孙铭泽, 宋遥遥, 卢晓霆. 玉米粉液化及糖化工艺条件优化[J]. 中国酿造, 2021, 40(3): 186–190.
- SUN MZ, SONG YY, LU XT. Optimization of liquefaction and saccharification process of corn flour [J]. China Brew, 2021, 40(3): 186–190.
- [35] 张桂芳, 陈羽红, 郭希娟, 等. 小米饮料稳定性的研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(12): 10–13.
- ZHANG GF, CHEN YH, GUO XJ, *et al.* Study on stability of millet beverage [J]. Food Res Dev, 2016, 37(12): 10–13.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介



宋佳敏, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全控制。
E-mail: 960634983@qq.com



郝建雄, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工与安全控制。
E-mail: cauhjx@163.com