

李瑶, 贾艺恬, 汪巾岳, 等. LMWF 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学分析及其在低 GI 乳粉中的应用 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 101–111. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070048

LI Yao, JIA Yitian, WANG Jinyue, et al. Inhibition Kinetics of LMWF on α -Amylase and α -Glucosidase and Its Application in Low-GI Milk Powders[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 101–111. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070048

· 研究与探讨 ·

LMWF 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学分析及其在低 GI 乳粉中的应用

李 瑶¹, 贾艺恬¹, 汪巾岳², 何云海^{1,3}, 任丹丹^{1,3}, 刘 舒^{1,3,*}

(1.大连海洋大学食品科学与工程学院, 国家海藻加工技术研发分中心, 辽宁省水产品加工及综合利用重点实验室, 辽宁大连 116023;
2.贵州中科分子生物有限公司, 贵州贵阳 550000;
3.海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁大连 116034)

摘 要: 低分子量褐藻聚糖硫酸酯 (Low molecular weight fucoidan, LMWF) 易吸收且功能活性强, 具有很好的降血糖活性。本文通过酶促反应动力学研究 LMWF 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用, 绘制 Lineweaver-Burk 曲线判断其抑制类型, 并将其应用于低 GI 食品的开发利用中, 采用单因素实验和正交试验对低 GI 乳粉配方及工艺进行优化, 为 LMWF 资源的利用提供了新的途径。结果表明, 裙带菜褐藻聚糖硫酸酯 (Fucoidan from *Undaria pinnatifida* Suringar, UF) 以及酶法降解 UF 得到的酶解产物 EUF (Enzymatic degradation of UF, EUF) 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶均有抑制能力, 且 EUF 效果强于 UF, 说明褐藻聚糖硫酸酯降解后活性增强。EUF 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活力的 IC_{50} 分别是 9.188、1.118 mg/mL, 对 α -葡萄糖苷酶的抑制能力要强于对 α -淀粉酶; EUF 对 α -淀粉酶的抑制类型为可逆抑制中的反竞争性抑制, 对 α -葡萄糖苷酶抑制类型为可逆抑制中的竞争性与非竞争性的混合型抑制。低 GI 乳粉的最适乳粉配比为脱脂乳粉:全脂乳粉=1:0、菊粉添加量 0.4%、EUF 添加量 0.005%、异麦芽酮糖醇添加量 0.7%; 另外采用均质压力 500 Pa, 此条件下乳粉的 GI 值为 28.12, 且具有较好的感官特性和较高的营养价值。

关键词: α -淀粉酶, α -葡萄糖苷酶, 低分子量褐藻聚糖硫酸酯, 低 GI 食品, 降血糖

中图分类号: TS209

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)12-0101-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070048



本文网刊:

Inhibition Kinetics of LMWF on α -Amylase and α -Glucosidase and Its Application in Low-GI Milk Powders

LI Yao¹, JIA Yitian¹, WANG Jinyue², HE Yunhai^{1,3}, REN Dandan^{1,3}, LIU Shu^{1,3,*}

(1.College of Food Science and Engineering, National R & D Branch Center For Seaweed Processing, Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Utilization of Liaoning Province, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;
2.Guizhou Zhongke Molecular Biology Company, Guiyang 550000, China;
3.Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian 116034, China)

Abstract: Low molecular weight fucoidan (LMWF) was experimentally confirmed to be readily absorbed through oral administration and was scientifically validated to exhibit multifunctional biological activities, particularly hypoglycemic effects, as evidenced by its therapeutic efficacy in diabetic nephropathy and atherosclerosis management. In this study, the

收稿日期: 2024-07-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2100600); 国家农业产业技术体系 (CARS-50); 辽宁省教育厅基本科研项目 (JYTMS20230496); 辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金 (2024JBPTZ004)。

作者简介: 李瑶 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水生生物资源综合利用, E-mail: 13624287762@163.com。

* 通信作者: 刘舒 (1987-), 女, 硕士, 高级实验师, 研究方向: 水生生物资源综合利用, E-mail: liushu@dlou.edu.cn。

inhibitory effects of LMWF on α -amylase and α -glucosidase were systematically investigated through enzymatic reaction kinetic assays, and Lineweaver-Burk double reciprocal plots were generated to elucidate the inhibition mechanism of LMWF on these enzymes. LMWF was applied in the development of low glycemic index (GI) food products, in which the optimal formulation ratio and critical processing parameters were systematically determined through single-factor experiments and orthogonal array testing, thereby establishing an innovative pathway for the functional utilization of marine-derived LMWF in diabetic-friendly food preservation and nutritional enhancement applications. Results demonstrated that UF (Fucoidan from *Undaria pinnatifida* Suringar) and EUF obtained by enzymatic degradation of UF (Enzymatic degradation of UF, EUF) exerted significant inhibitory effects on both α -amylase and α -glucosidase, and the effects of EUF were observed to be stronger than that of UF, which indicated that the activity of fucoidan was enhanced after degradation. The IC_{50} of EUF on α -amylase and α -glucosidase were determined as 9.188, 1.118 mg/mL, respectively, suggesting that the inhibitory ability of EUF on α -glucosidase was significantly stronger than that on α -amylase. The inhibitory type of EUF on α -amylase was identified as anticompetitive inhibition in reversible inhibition, and the inhibitory type on α -glucosidase was characterized as a mixture of competitive and noncompetitive inhibition in reversible inhibition. The optimal formula of low-GI milk powder was established as: skim milk powder:whole milk powder=1:0, the addition of inulin was 0.4%, EUF was 0.005%, isomaltulose was 0.7%, in combination with homogenization pressure of 500 Pa. The formulated milk powder exhibited a GI value of 28.12 along with favorable sensory properties and high nutritional value.

Key words: α -amylase; α -glucosidase; low molecular weight fucoidan; low-GI food; hypoglycemic

褐藻聚糖硫酸酯(Fucoidan, FUC)又称岩藻多糖,主要由岩藻糖、半乳糖、葡萄糖等多种单糖组成^[1],连接有独特的硫酸基团^[2],是一类具有抗氧化^[3]、抗炎^[4]等多种功效的活性多糖^[5]。但FUC分子量大、水溶性差等缺点极大地限制了其生物活性的发挥。低分子量褐藻聚糖硫酸酯(Low molecular weight fucoidan, LMWF)较同样来源的高分子量褐藻聚糖硫酸酯更易吸收,且由于分子量的降低LMWF的一部分生物活性得到了增强^[6]。因此LMWF的相关研究也逐渐成为热点,并应用于食品^[7]、医疗^[8]、美容等各方面^[9]。

研究表明,餐后高血糖和肝糖代谢紊乱导致的血糖异常是高血糖症的重要原因。餐后高血糖还会引发机体的氧化应激,不仅会进一步加重高血糖症状,而且会带来多种并发症,对机体造成伤害。来自人唾液和胃液中的 α -淀粉酶可以催化 α -(1,4)-葡萄糖苷键的水解,从淀粉中产生麦芽糖和葡萄糖; α -葡萄糖苷酶可从低聚糖中释放葡萄糖。因此 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶是降低餐后血糖的重要靶点。过往研究表明,抑制这两种酶的活性可以延缓葡萄糖进入血液,从而改善餐后高血糖的症状^[10]。探究LMWF对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制能力,对保护机体健康有重要意义^[11]。

普通食物中含有大量淀粉,食用后容易被分解成葡萄糖,造成餐后高血糖,对血脂、血糖、血压异常人群的机体健康造成负担^[12]。低GI食物能持续在体内释放能量,减缓消化吸收,帮助维持血糖的稳定,长期食用低GI食品对降低糖尿病患者餐后血糖水平、减少胰岛素需求、改善饱腹感有重要作用^[13]。而乳粉具有重量轻、体积小、营养丰富、贮运方便等特点,是一种大众接受度高、食用安全且营养价值均衡的产品,具有丰富的营养价值,能满足多种人群的日常营养需求。但乳粉中含有的乳糖会使高血糖人群

饮用后血糖升高,因此低GI乳粉产品逐渐成为研究热点。目前,关于低GI食品的研究种类丰富,Arpita等^[14]开发了以大麦或小麦和其他草本植物为基础的低GI食品来管理糖尿病,通过进行体外营养、感官品质、GI值、 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制试验,结果表明,大麦和小麦为主的低GI食品能够稳定储存且适合糖尿病患者食用。Lai等^[15]以低GI食物为基础,为解决过劳和肥胖等问题,开发了一种膳食替代粉,能够用作高血糖患者的辅助治疗。目前关于低GI乳粉产品研发的内容较少,有部分研究对降血糖功效的乳粉进行了验证。桑跃等^[16]研究骆驼乳粉与双歧杆菌JT-6结合对糖尿病患者的协同治疗作用,验证了该乳粉的降血糖活性,为开发辅助治疗糖尿病的功能乳制品提供参考。白锦等^[17]研发了一款复合降糖乳粉,通过30例人体试食实验发现该乳粉能有效降低受试者的高血糖症状,确认了其调节血糖的功能。因此本文通过研究LMWF对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用并以此为原料复配牛乳研发产品,以期高血糖人群提供更多产品选择性。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

可溶性淀粉 大连可多林食品有限公司;对硝基苯基- α -D-葡萄糖苷、阿卡波糖 分析纯,美国Sigma公司;无水碳酸钠、无水硫酸钠 分析纯,天津市天力化学试剂有限公司; α -淀粉酶(50 U/mg)、 α -葡萄糖苷酶(50 U/mg) 分析纯,上海源叶生物技术有限公司;生牛乳、脱脂乳粉、全脂乳粉、80%乳清蛋白粉、椰子油 均购于大连沃尔玛超市;菊粉 武汉冠赢生物科技有限公司;麦芽糊精 山东泽恩达生物科技有限公司;乳糖酶、乳糖、异麦芽酮糖醇、低聚半乳糖、DHA、微生物、矿物质 佳禾食品工业股份有限公司;裙带菜褐藻聚糖硫酸酯(以下简称

UF)、酶法降解 UF 得到的酶解产物 EUF(以下简称 EUF) 国家海藻加工技术研发分中心自制;产酶微生物(*Cobetia amphilecti*, CA-25) 由国家海藻加工技术研发分中心提供。

AL204 精密型电子天平 梅特勒-托利多仪器有限公司; 354 酶标仪 美国 Thermo Fisher 公司; AH-BASIC 30 高压均质机 安拓思纳米技术有限公司; DC-1500 喷雾干燥机 上海达程实验设备有限公司; Thermo Scientific™ 台式离心机 美国 Thermo Fisher 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 低分子量褐藻聚糖硫酸酯的制备 参考本课题组之前的研究,采用复合酶解和乙醇沉淀的方法从裙带菜中提取 UF^[18]。EUF 的制备过程为:在无菌条件下,将产酶微生物 CA-25 接种于液体培养基(0.2%UF、0.65% 酵母粉,2%NaCl,115 ℃ 高压蒸汽灭菌 30 min)中,28 ℃、150 r/min 的条件下恒温水浴发酵培养 12 h 后,获得菌株发酵液。将菌株发酵液 10000 r/min 离心后,弃去上清液,收集沉淀复溶于 0.02 mol/L 的 Tris-HCl(pH8.0)中,经 300 W 超声破碎后,10000 r/min 离心收集上清液,以 1:1.8 的比例添加丙酮,在-20 ℃ 的条件下丙酮沉淀 1 h,8000 r/min 收集沉淀备用,即可得到褐藻聚糖硫酸酯酶。测定褐藻聚糖硫酸酯酶总酶活力后以酶活:底物为 7500:1 的比例加入底物 UF 混匀,酶解 24 h 后在沸水浴中灭酶 15 min,冷却至室温,在 4 ℃、10000 r/min 条件下离心 10 min,收集上清液透析、冻干后得到组分 EUF。

1.2.2 样品组成测定 采用苯酚硫酸法^[19]测定 UF、EUF 总糖含量,以标准糖为 D-半乳糖:L-岩藻糖=1:3 绘制标准曲线,样品浓度 2 mg/mL,测定 490 nm 下的吸光度值,根据标准曲线测定总糖含量。采用明胶-氯化钡法^[20]测定 UF、EUF 硫酸根含量。 K_2SO_4 为标准品绘制标准曲线,样品浓度为 1.4 mg/mL,测定 360 nm 下的吸光度值,按照标准曲线计算硫酸根含量。

1.2.3 分子量测定 参考张田田等^[21]的方法略有改动,将不同分子量的葡聚糖标准品(1、6、10、40 和 70 kDa)配制成浓度为 10 mg/mL 的标准品溶液,经 0.22 μ m 水相滤膜过滤后按 HPGPC 测试条件上机测试,记录其保留时间,制标准曲线。将 UF、EUF 配成 10 mg/mL 的样品溶液,过 0.22 μ m 微孔滤膜除菌,按上述方法测定分子量。

1.2.4 对两种关键消化酶的体外抑制动力学分析 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学分析参考 Yang 等^[22]的方法,并稍作修改。

1.2.4.1 对 α -淀粉酶的抑制动力学分析 固定底物浓度(1.0% 可溶性淀粉)分别设置不同浓度的酶溶液(0.15、0.3、0.6、0.9、1.2 mg/mL)和样品溶液(0、

0.1、0.5 和 1 mg/mL)。取不同浓度的样品溶液 20 μ L 分别加入等体积的 α -淀粉酶溶液,25 ℃ 下反应 10 min 后,加入 100 μ L 1.0% 淀粉溶液充分混匀,继续反应 10 min,加入 20 μ L DNS 溶液,沸水浴 10 min 后冷却至室温,最后加入 110 μ L 超纯水,在 540 nm 下测 OD 值。以酶解速率(mg/(mL·min))为纵坐标,酶浓度(mg/mL)为横坐标绘制点图并线性拟合,根据拟合直线的相交和平行情况及直线的斜率变化情况,探究 UF 与 EUF 对 α -淀粉酶抑制的可逆性。

固定酶浓度(0.9 mg/mL),分别设置不同浓度的底物溶液(0.25%、0.33%、0.5%、1.0%、2.0% 可溶性淀粉)和样品溶液(0、0.1、0.5 和 1 mg/mL)。反应体系同上。采用双倒数方程作图法,以反应初速度的倒数 $1/V$ 对底物浓度的倒数 $1/S$ 绘制点图并线性拟合,由纵轴截距可计算出最大反应速率的值 V_{max} ,再根据米氏方程计算出米氏常数 K_m ,由 V_{max} 和 K_m 的变化趋势确定酶的抑制类型。

1.2.4.2 对 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学分析 固定底物浓度(3 mmol/L pNPG)分别设置不同浓度的酶溶液(0.15、0.3、0.6、0.9、1.2 mg/mL)和样品溶液(0、0.1、0.5 和 1 mg/mL)。取不同浓度的样品溶液 50 μ L 分别加入 25 μ L α -葡萄糖苷酶溶液,37 ℃ 下反应 10 min 后,加入 50 μ L pNPG 溶液充分混匀,继续反应 15 min 后加入 100 μ L Na_2CO_3 (0.1 mol/L)溶液终止反应,在 405 nm 下测 OD 值。以酶解速率(mmol/(mL·min))为纵坐标,酶浓度(U/mL)为横坐标绘制点图并线性拟合,根据拟合直线的相交和平行情况及直线的斜率变化情况,研究 UF 与 EUF 对 α -葡萄糖苷酶抑制的可逆性。

固定酶浓度(0.40 U/mL),分别设置不同浓度的底物溶液(0.25、0.5、1、3、5 mmol/L pNPG)和样品溶液(0、0.1、0.5 和 1 mg/mL),反应体系同上。采用双倒数方程作图法,以反应初速度的倒数 $1/V$ 对底物浓度的倒数 $1/S$ 绘制点图并线性拟合,由纵轴截距可计算出最大反应速率的值 V_{max} ,再根据米氏方程计算出米氏常数 K_m ,由 V_{max} 和 K_m 的变化趋势确定酶的抑制类型。

1.2.5 低 GI 乳粉工艺流程 低 GI 乳粉的生产工艺流程见图 1。

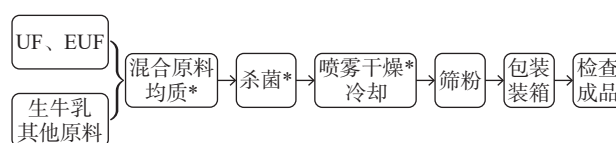


图 1 低 GI 乳粉生产工艺流程

Fig.1 Production process of low-GI milk powder

注:标*为关键工艺点。

1.2.6 操作要点及工艺条件 将 UF、EUF 与其他原料混合并溶解均匀,在 0.5 MPa 的压力下进行均质。均质后的样品经 80 ℃ 巴氏杀菌 15 min 后,在

进风温度 180 ℃、出风温度 88 ℃ 的条件下进行喷雾干燥;得到的样品经冷却、过 20 目筛后进行包装,再经过金属探测器及外观检查后备用。

1.2.7 原料配比优化 低 GI 乳粉的配方比例(以生牛乳 1 kg 为基础添加量)如表 1 所示。

表 1 低 GI 乳粉配方

Table 1 Formula of low-GI milk powder

原料名称	添加量(%)	备注
生牛乳	100	3.2%蛋白、3.8%脂肪、4.5%碳水化合物
脱脂乳粉/全脂乳粉	16	根据单因素实验结果调整
80%乳清蛋白粉	12	
植物油(椰子油)	3	
菊粉	/	根据单因素实验结果调整
麦芽糊精	12	
乳糖酶	0.12	
乳糖/异麦芽酮糖醇	/	根据单因素实验结果调整
低聚半乳糖	1	
DHA	1	
微生物和矿物质	1	
UF/EUF	/	根据单因素实验结果调整

1.2.8 单因素实验 根据低 GI 乳粉的研发需求,针对乳粉配方中的不同配料设置了 5 个单因素实验。分别为:

脱脂乳粉和全脂乳粉的添加比例为 1:0、1:1、2:1、1:2、0:1,其中固定菊粉添加量为 0.4%、EUF 添加量为 0.005%、异麦芽酮糖醇添加量为 0.7%、均质压力为 500 Pa,添加量以配料表为准;

对两种不同的碳水化合物乳糖、异麦芽酮糖醇分别设添加量 0%、0.1%、0.3%、0.5%、0.7%,其中固定菊粉添加量为 0.4%、EUF 添加量为 0.005%、脱脂乳粉和全脂乳粉的添加比例为 1:0、均质压力为 500 Pa;

设置 EUF 的添加量为 0%、0.0025%、0.005%、0.007%、0.01%,其中固定菊粉添加量为 0.4%、异麦芽酮糖醇添加量为 0.7%、脱脂乳粉和全脂乳粉的添加比例为 1:0、均质压力为 500 Pa;

菊粉添加量分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%,其中固定 EUF 添加量为 0.005%、异麦芽酮糖醇添加量为 0.7%、脱脂乳粉和全脂乳粉的添加比例为 1:0、均质压力为 500 Pa;

均质压力设定 200、300、400、500、600 Pa 5 个压力值,其中固定菊粉添加量为 0.4%、EUF 添加量为 0.005%、异麦芽酮糖醇添加量为 0.7%、脱脂乳粉和全脂乳粉的添加比例为 1:0。

其中乳粉添加比例,乳糖、异麦芽酮糖醇的选择,EUF 的添加量,菊粉添加量以感官评价得分、GI 值作为优选条件;均质压力的选择以产品稳定性、感官评价得分、GI 值作为优选条件。

1.2.9 正交试验 根据单因素实验结果,设定四因素

三水平正交试验,以 GI 值作为评价指标,具体安排如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平设计

Table 2 Factor level design of orthogonal experiment

水平	A 菊粉 添加量(%)	B EUF 添加量(%)	C 异麦芽酮糖醇 添加(%)	D 均质压力 (Pa)
1	0.2	0.003	0.3	500
2	0.4	0.005	0.5	600
3	0.6	0.007	0.7	700

1.2.10 理化指标测定

1.2.10.1 还原糖的测定 采用 3,5-二硝基水杨酸法(DNS)^[23]来测定还原糖含量。

1.2.10.2 体外模拟消化测定 淀粉水解率及 GI 值参考了潘玥^[24]方法进行了一些改良,模拟人体胃和小肠等消化系统及消化环境,在体外构建模拟体系,分析食品在人类上消化道的消化行为,每组设置三个平行。

称取待测样品(含 50 mg 淀粉),模拟口腔消化阶段:加入 α -淀粉酶(7.5 U/mL),37 ℃ 恒温水浴消化 2 min,液体样品可省略口腔消化阶段;模拟胃消化阶段:待测样品用 10 mL 0.1 mol/mL HCl-KCl 溶解后,加入 0.2 mL 的 2 mg/mL 胃蛋白溶液,pH 调至 3.0,37 ℃ 恒温水浴消化 2 h;模拟肠消化阶段:加入 α -淀粉酶(10 U/mL),pH 调至 7.0,37 ℃ 恒温水浴消化,在 0、10、20、40、60、90、120、180 min 时均匀取样 1 mL,沸水灭活后使用 DNS 法测定还原糖生成量,按下列公式计算样品的淀粉水解率:

$$\text{淀粉水解率}(\%) = \frac{(C_t - C_0) \times 30.2 \times 0.9}{50} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中, C_t : 对应时间下样品中的葡萄糖含量(mg/mL); C_0 : 样品中的初始葡萄糖含量(mg/mL)。

以水解时间为横坐标,以淀粉水解率为纵坐标,绘制得到水解率曲线,采用 Origin 软件求水解率曲线下面积(AUC),计算样品的水解指数(HI, %):

$$\text{HI}(\%) = \frac{\text{AUC}(\text{待测样})}{\text{AUC}(\text{葡萄糖})} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

HI 与 GI 存在高度的相关性($r=0.826$):

$$\text{GI} = 0.862\text{HI} + 8.1981 \quad \text{式 (3)}$$

1.2.11 产品稳定性 以离心后油脂析出率为参考,通过离心后顶部油脂覆层的高度与样品液体的高度的比值,判断不同分组间的离心稳定力差异,油脂析出率越低则说明产品越稳定,油脂析出率计算公式如下:

$$\text{油脂析出率}(\%) = \frac{N_1}{N_2} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中, N_1 : 顶部油脂覆层的高度(cm); N_2 : 样品液体的高度(cm)。

表 3 低 GI 乳粉感官评价标准
Table 3 Sensory evaluation criteria of low-GI milk powder

项目	评分标准	分数	
色泽 (10 分)	色泽均一, 呈产品应有颜色; 有光泽	10	
	色泽均一, 呈产品应有颜色; 略有光泽	7~9	
	颜色特殊或带异色; 基本无光泽	4~6	
	色泽不正常	1~3	
组织状态 (20 分)	颗粒均匀、适中、松散、流动性好	19~20	
	颗粒较大或稍大、不松散, 有结块或少量结块, 流动性较差	13~18	
	颗粒细小或稍小, 有较多结块, 流动性差; 有少量肉眼可见的焦粒粉	7~12	
	粉质粘连, 流动性非常差; 有较多肉眼可见的焦粒粉	1~6	
冲调性 (30 分)	下沉时间 (10 分)	≤10 s	10
		11~20 s	7~9
		21~30 s	4~6
		≥31 s	1~3
	挂壁和小白点 (10分)	小白点≤10, 颗粒细小; 杯壁无小白点和絮片	10
		有少量小白点, 颗粒细小; 杯壁上的小白点和絮片≤10 个	7~9
		有少量小白点, 四周较多, 颗粒细小; 杯壁有少量小白点和絮片	4~6
		有大量小白点和絮片, 中间和四周无明显区别; 杯壁有大量小白点和絮片而不下落	1~3
	团块(10分)	0	10
		1≤团块≤5	7~9
		5<团块≤10	4~6
	滋味及气味 (40 分)	团块>10	1~3
奶粉应有的气味		31~40	
气味不浓, 无不良气味		21~30	
夹杂其他异味		11~20	
	气味不浓同时夹杂其他异味	1~10	

1.2.12 感官评价分析 针对色泽、组织状态、冲调性、滋味以及气味等方面的因素, 设计了感官评价标准用于评价低 GI 乳粉的整体感官得分, 参考王茜等^[25]的方法并加以改良, 评分标准为百分制, 采用六人评价法, 具体评分标准如表 3。

1.3 数据处理

所有实验至少重复测定 3 次, 使用 Excel 2019、Origin 2018 软件进行数据分析和作图, SPSS 26 软件进行方差分析和 Dunnett’s test 事后检验, 分析独立组间均值的差异, $P<0.05$ 表示具有显著性差异, 部分数据用平均值±标准偏差(SD)表示。

2 结果与分析

2.1 UF、EUF 样品组成分析

UF、EUF 的总糖、硫酸根含量如表 4 所示。由结果可知, 经降解后的 EUF 总糖含量提升, 由 UF 的 54.37% 提升至 71.36%, 总糖纯度提升, 分析原因为 EUF 经酶解处理、透析等步骤后部分杂质得以去除; EUF 的硫酸根含量较 UF 略有下降, 可能与酶切

位点有关。

2.2 分子量分析

采用 1.2.3 方法, 测得标准曲线为 $y=-0.0628x+20.906$ ($R^2=0.9938$), 其中 x 为分子量(kDa), y 为时间(min)。UF、EUF 分子量如图 2 所示, UF 及 EUF 组分分别在 16.975 min 和 18.025 min 达到峰值。其中 UF、EUF 分子量分布如表 5 所示, 较降解前的 UF 组分相比, 酶解后 EUF 组分的峰值分子量(MP)、数均分子量(Mn)和重均分子量(Mw)均降低。根据标曲计算可得峰值分子量由 65.5 kDa 降至 48 kDa; 数均分子量由 76.8 kDa 降至 63.3 kDa; 重均分子量由 86.1 kDa 降至 74.7 kDa。该结果说明通过酶法降解得到的 EUF 组分的分子量较未降解的 UF 组分得到了显著降低。

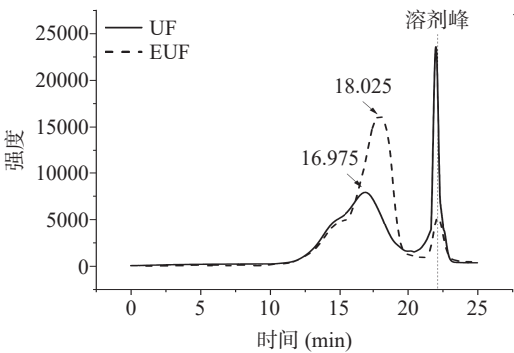


图 2 UF、EUF 分子量的分析结果

Fig.2 Molecular weight results of UF and EUF

表 4 UF、EUF 成分含量 Table 4 Composition content of UF and EUF		
样品	总糖(%)	硫酸根(%)
UF	54.37±0.51 ^b	20.60±0.56 ^A
EUF	71.36±0.51 ^a	18.35±0.28 ^B

注: 小写字母代表总糖组间差异, 大写字母代表硫酸根组间差异, 其中有相同字母表示两组间无显著性, 不同字母表示两组间具有显著性差异 ($P<0.05$)。

表 5 UF、EUF 分子量分布

Table 5 Molecular weight distribution of UF and EUF

样品	Mp(kDa)	Mn(kDa)	Mw(kDa)
UF	65.5	76.8	86.1
EUF	48	63.3	74.7

2.3 UF 与 EUF 对 α -淀粉酶的抑制类型分析

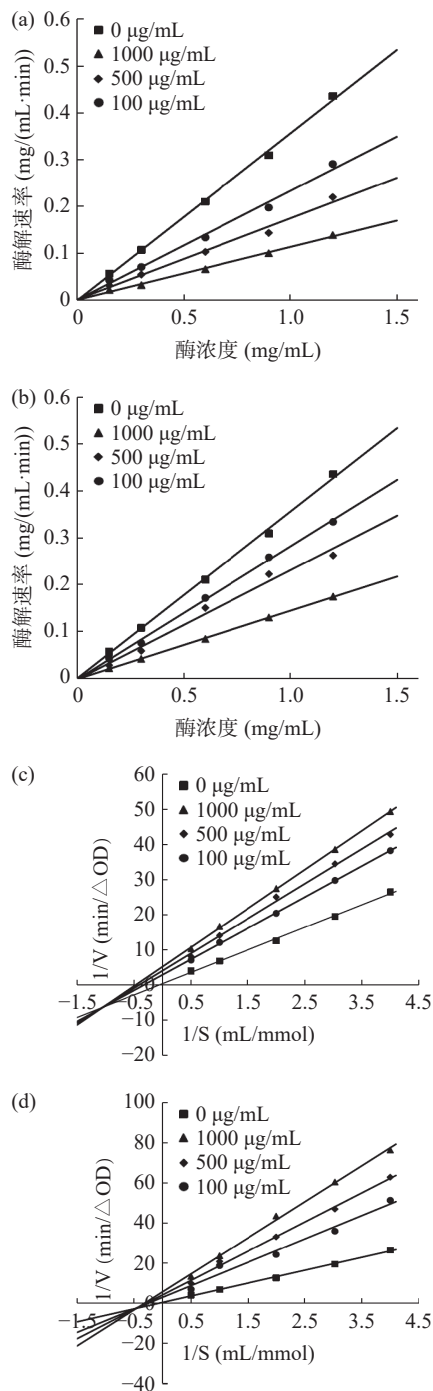
不同 UF 和 EUF 浓度下,以酶浓度(mg/mL)和酶解速率(mg/(mL·min))为横纵坐标作图,如图 3a、图 3b 所示,所得结果为一组经过原点的直线,存在较好的线性关系。比较可得,添加 UF 和 EUF 的直线斜率均小于空白对照的直线斜率,随着多糖浓度增加,直线斜率逐渐减小,表明 UF 和 EUF 的添加在没有改变酶数量的前提下降低了酶活性,使酶分解底物的能力降低,因此 UF 和 EUF 对 α -淀粉酶的抑制类型为可逆抑制,这种抑制类型特点是抑制物与酶的结合方式为非共价键结合,通过物理方法可使酶恢复活性^[26-30]。

抑制剂对酶的抑制类型可分为可逆抑制与不可逆抑制,可逆抑制类型又可分为 4 类,分别为竞争性抑制、非竞争性抑制、反竞争性抑制、混合型抑制,混合型抑制类型有竞争性与非竞争性混合型^[31]。通过 α -淀粉酶抑制动力学实验,进一步探究 UF 和 EUF 对 α -淀粉酶的抑制类型。

UF 和 EUF 对 α -淀粉酶抑制动力学的 Line-weaver-Burk 双倒数图如图 3c、图 3d 所示,抑制动力学参数如表 6 所示, LB 直线交于第三象限,随着 UF 和 EUF 浓度增加,酶促反应最大反应速率 $V_{\max}$ 减小,米氏常数 K_m 减小,因此 UF 和 EUF 对 α -淀粉酶的抑制类型均为反竞争性抑制作用类型^[32-34],作用原理是与酶-底物的络合物相结合,使其不能催化反应,但不能与游离的酶结合并抑制其活性^[35]。Kim 等^[31]发现一种硫酸基含量为 20.60%,分子量为 63.7 kDa 的 FUC,可抑制 α -淀粉酶活性,推测 FUC 可能通过静电作用与 α -淀粉酶结合,改变其在溶液中的构象,从而抑制其活性,这与本研究的结果相似。

2.4 UF 与 EUF 对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型分析

不同 UF 和 EUF 浓度下,酶浓度(U/mL)对酶解速率(mmol/(L·min))的线性关系如图 4a、图 4b 所示,所得结果为一组经过原点的直线,添加 UF 和 EUF 的直线斜率均小于未添加多糖直线斜率,随着

图 3 α -淀粉酶的抑制类型与抑制动力学趋势图Fig.3 Trend plot of type of α -amylase inhibition versus inhibition kinetics

注:(a)~(d)分别为 UF 的 α -淀粉酶抑制类型、EUF 的 α -淀粉酶抑制类型、UF 的 α -淀粉酶抑制动力学趋势、EUF 的 α -淀粉酶抑制动力学趋势。

表 6 UF 与 EUF 对 α -淀粉酶的抑制动力学参数Table 6 Kinetic parameters of UF and EUF on α -amylase inhibition

样品	浓度(μ g/mL)	拟合方程	决定系数	斜率	米氏常数 K_m (mmol/L)	最大反应速率 $V_{\max}$ (mmol/min/mg)
UF	0	$y=6.4263x+0.3006$	0.9974	6.4263	21.3782	3.3267
	1000	$y=11.066x+5.1390$	0.9996	11.066	2.1533	0.1946
	500	$y=9.9196x+3.9930$	0.9960	9.9196	2.4842	0.2504
	100	$y=8.8636x+2.8172$	0.9996	8.8636	3.1462	0.3550
	1000	$y=17.973x+5.5550$	0.9974	17.9730	3.2355	0.1800
EUF	500	$y=14.553x+4.0239$	0.9952	14.5530	3.6166	0.2485
	100	$y=11.657x+2.8308$	0.9715	11.6570	4.1179	0.3533

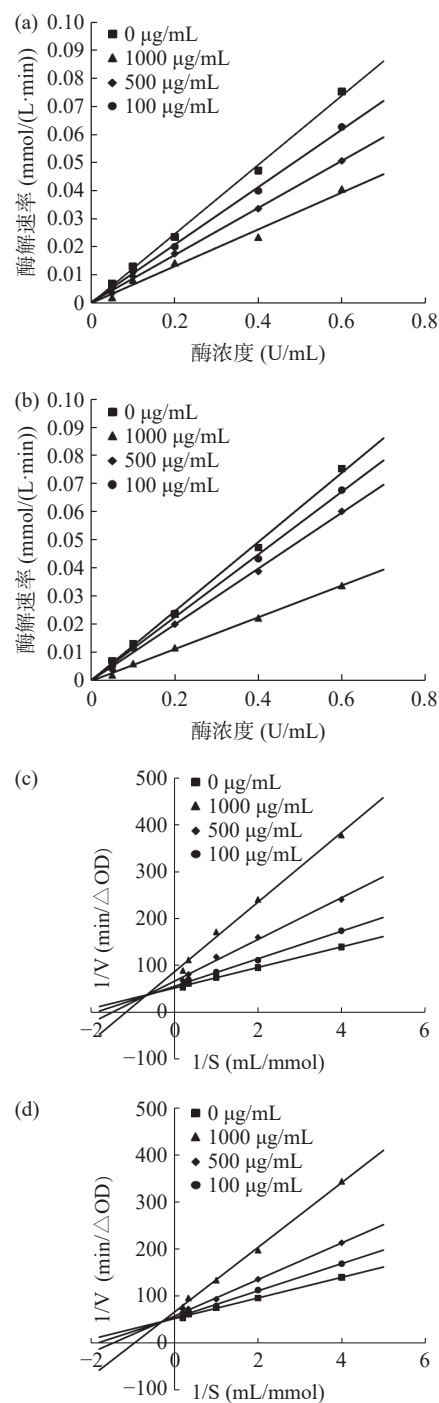


图 4 α -葡萄糖苷酶的抑制类型与抑制动力学趋势图

Fig.4 Trend plot of type of α -glucosidase inhibition versus inhibition kinetics

注: (a)~(d)分别为 UF 的 α -葡萄糖苷酶抑制类型、EUF 的 α -葡萄糖苷酶抑制类型、UF 的 α -葡萄糖苷酶抑制动力学趋势、EUF 的 α -葡萄糖苷酶抑制动力学趋势。

表 7 UF 与 EUF 对 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学参数

Table 7 Kinetic parameters of UF and EUF on α -glucosidase inhibition						
样品	浓度($\mu\text{g/mL}$)	拟合方程	决定系数	斜率	米氏常数 $K_m(\text{mmol/L})$	最大反应速率 $V_m(\text{mmol/min/mg})$
UF	0	$y=43.777x+35.337$	0.9815	67.5294	1.9110	0.0283
	1000	$y=102.13x+69.951$	0.9968	141.1783	2.0182	0.0143
	500	$y=73.78x+52.655$	0.9925	97.5708	1.8530	0.0190
	100	$y=51.077x+36.968$	0.9946	49.2339	1.3318	0.0271
	1000	$y=79.163x+56.829$	0.9899	122.2131	2.1505	0.0176
EUF	500	$y=67.498x+51.738$	0.9757	121.7011	2.3330	0.0193
	100	$y=60.568x+44.412$	0.9754	104.1153	2.3443	0.0225

多糖浓度增加,直线斜率逐渐减小,因此 UF 和 EUF 对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型属于可逆抑制。

UF 和 EUF 对 α -葡萄糖苷酶抑制动力学的 Lineweaver-Burk 双倒数图如图 4c、图 4d 所示,抑制动力学参数如表 7 所示。LB 直线交于第二象限,随着 UF 和 EUF 浓度增加,酶促反应最大反应速率 $V_{\max}$ 减小、米氏常数 K_m 增大,符合竞争性与非竞争性的混合型抑制类型的特点,因此 UF 和 EUF 对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型均为竞争性与非竞争性的混合型抑制类型。Shen 等^[36]从青核桃壳中提取出的儿茶素、金丝桃苷和槲皮素表现出显著的 α -葡萄糖苷酶抑制活性, IC_{50} 值分别为 12.78、77.24 和 92.87 $\mu\text{g/mL}$ 。抑制动力学分析表明,儿茶素和槲皮素是竞争性抑制剂,而金丝桃苷是非竞争性抑制剂。与本研究结果较为一致,说明不同来源的 FUC 也能在活性表现上展现出相似性。

UF 及其降解产物 EUF 是一种有效的天然 α -葡萄糖苷酶抑制剂,对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型均为竞争性与非竞争性的混合型抑制,由于 UF 与 EUF 为混合多糖,其各组分的抑制类型还需要进一步深入研究^[37-39]。

结果表明,UF 和 EUF 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶均有一定程度的抑制能力。UF 和 EUF 对 α -淀粉酶的 IC_{50} 值分别为 13.916、9.188 mg/mL ,对 α -葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值分别为 1.734、1.118 mg/mL ,这说明 EUF 对两种酶的抑制能力均强于 UF,并且 UF 和 EUF 对 α -葡萄糖苷酶的抑制能力要强于对 α -淀粉酶的抑制能力。本研究的结果与 Lakshmana 等^[40]的研究结果相似,从拟小叶喇叭藻 (*Turbinaria conoides*)中提取了 FUC,并研究其对 α -淀粉酶和 α -D-葡萄糖苷酶的体内、体外抑制特性,结果表明,拟小叶喇叭藻 FUC 对两种酶均有较好的抑制能力,对 α -淀粉酶和 α -D-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值分别为 1.07 和 0.68 $\mu\text{mol/L}$; Kim 等^[31]的研究表明,从墨角藻中 (*Fucus vesiculosus*)提取的 FUC 在 5 和 0.05 mg/mL 时分别对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶有抑制作用,说明 FUC 对 α -淀粉酶的抑制能力低于其对 α -葡萄糖苷酶的抑制能力,这与本研究的结果相似。

2.5 低 GI 乳粉制备单因素实验结果

脱脂乳粉和全脂乳粉的比值对乳粉的淀粉水解曲线的影响如图 5a 所示,由于乳粉添加比例的不同,

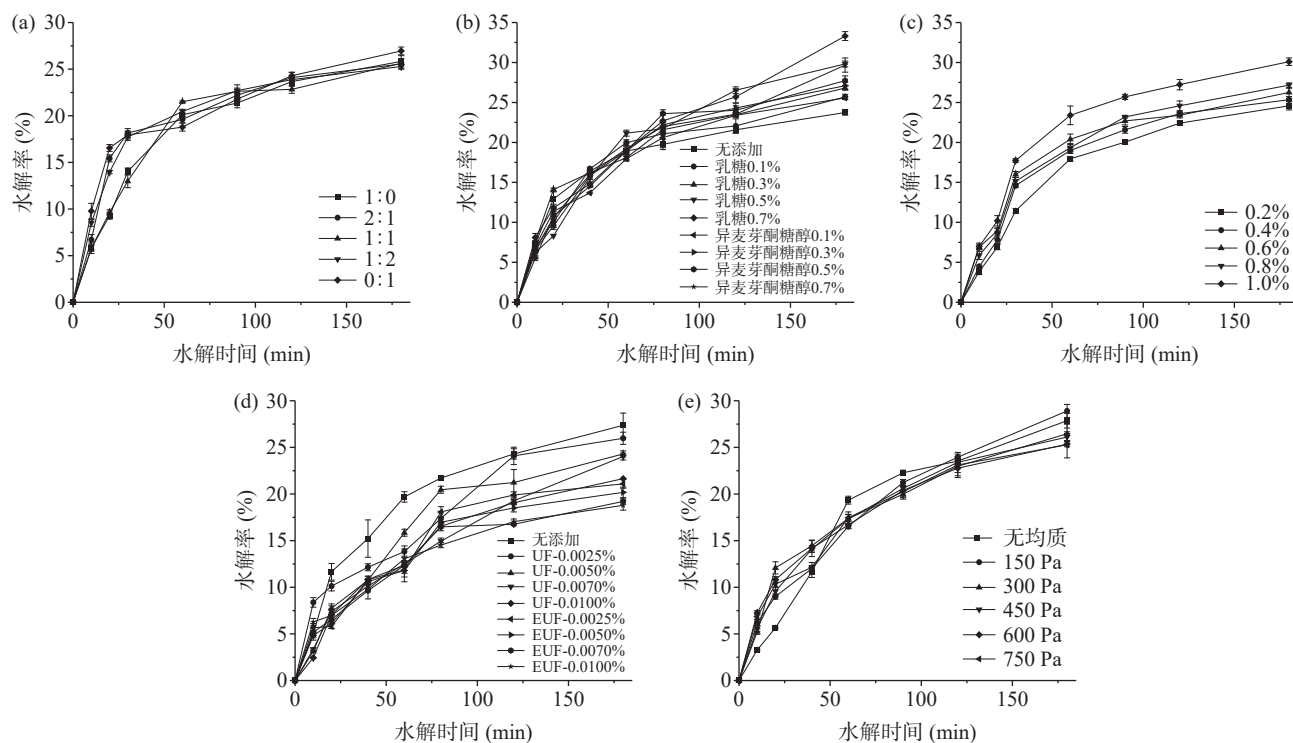


图5 淀粉单因素实验水解曲线图

Fig.5 Hydrolysis curves of starch in one-factor experiment

注: (a)~(e)分别为乳粉不同添加比例、碳水化合物的不同添加量、菊粉的不同添加量、UF与EUF的不同添加量及不同均质压力的淀粉水解曲线。

使得对应的成品乳粉在水解趋势上展现出两种不同的趋势,可以观察到,在一定范围内提高脱脂乳粉的比例更有利于降低乳粉的GI值。各组的感官评价及GI值如图6所示,在GI值中,脱脂乳粉和全脂乳粉的比例为1:0和1:1的两组的GI值显著低于其他三组($P<0.05$),两组GI值没有显著差异;而综合感官评价及GI值的实验结果并无明显规律性,因此在低GI值的两组中选择感官评价得分更好的1:0组作为最适乳粉配比。

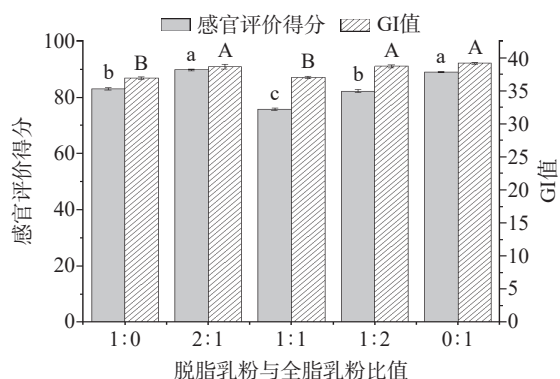


图6 不同配比的脱脂乳粉和全脂乳粉对感官评价与GI值的影响

Fig.6 Effects of different ratios of skimmed milk powder and whole milk powder on sensory evaluation and GI values

注: 小写字母代表感官评价得分组间差异, 大写字母代表GI值或油脂析出率组间差异, 其中有相同字母表示两组间无显著性, 不同字母表示两组间具有显著性差异($P<0.05$), 图7~图11同。

如图5b所示, 添加了乳糖或异麦芽酮糖醇的各组的水解曲线均高于未添加的组, 但为了改善产品口味需探究对水解率影响最小且提升口感最优的辅料配方。对比可以发现乳糖的添加提高了淀粉的水解率, 而异麦芽酮糖醇不同添加量的各组其水解趋势相对平缓。另外各配方组的感官评价及GI值如图7所示, 根据GI值的显著性分析表明, 异麦芽酮糖醇各组整体较乳糖组偏低, 尤其在高剂量添加组有对比差异; 异麦芽酮糖醇添加量为0.3%、0.5%、0.7%时, GI值随着添加量的提升无显著性变化, 而感官评价随着添加量的提升而提高, 当异麦芽酮糖醇添加量为0.7%时其感官评价得分最高, 这可能是因异麦芽

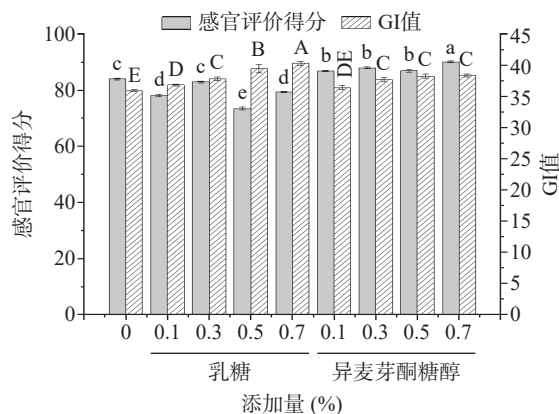


图7 不同添加量的乳糖和异麦芽酮糖醇对感官评价与GI值的影响

Fig.7 Effects of different added amounts of lactose and isomalt ketone sugar alcohols on sensory evaluation and GI values

酮糖醇的甜味缓和、纯正,较其它产品的甜味延续时间长,所以其整体的感官评价优于乳糖。综上选择异麦芽酮糖醇的添加量为 0.7%。

如图 5c 表示,菊粉添加量与乳粉的淀粉水解率成正相关。如图 8 所示,菊粉添加量为 0.4% 时,乳粉的感官评价得分最高;随着添加量的增加,乳粉的 GI 值显著增加($P<0.05$)。作为低 GI 食品的原材料,适量摄入菊粉,可有效降低血清总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇,提高高密度脂蛋白与低密度脂蛋白比率,改善血脂状况^[41]。但随着菊粉添加量的增加,感官评价得分也随之降低,因此应该在保持口感的前提下限制菊粉的添加量。结合 GI 值及感官评价得分,选择 0.4% 的菊粉添加量为最适条件。

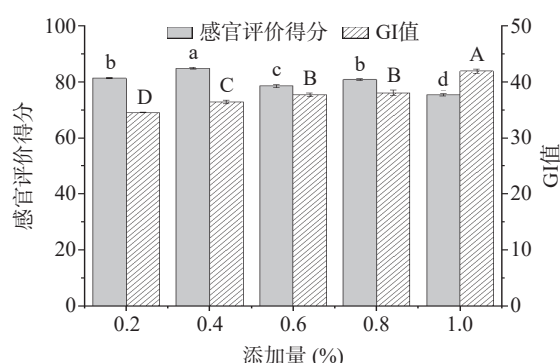


图 8 不同添加量的菊粉对感官评价与 GI 值的影响

Fig.8 Effects of different added amounts of inulin on sensory evaluation and GI values

如图 5d, 添加 UF 和 EUF 均能使淀粉水解趋势变得平缓,这可能与 UF 和 EUF 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的体外抑制活性有关,能够影响淀粉的水解。如图 9 所示,通过感官评价得分可知添加 EUF 的乳粉在口感风味上略强于 UF,这可能与发酵降解过程对海藻多糖腥味的脱除有一定的关联。另外在降低 GI 值的能力上, EUF 强于 UF,与未添加组相比, GI 值降低效果显著($P<0.05$)。综合以上指标,最合适的原料配比为添加 0.005% 的 EUF。

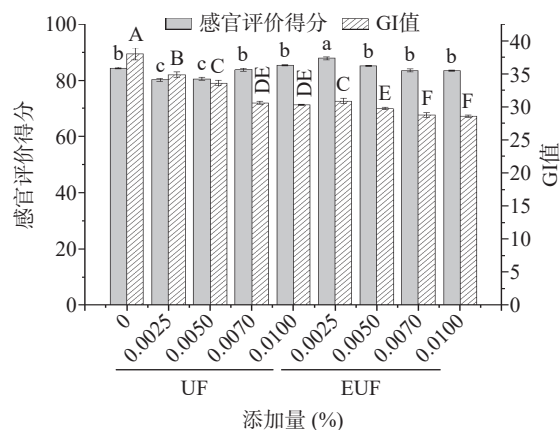


图 9 不同添加量的 UF 和 EUF 对感官评价和 GI 值的影响

Fig.9 Effects of different levels of added UF and EUF on sensory evaluation and GI values

图 5e 是不同的均值压力对乳粉的淀粉水解曲线的影响,如图所示,不同的均质压力对乳粉的淀粉水解率能造成一定程度的影响,但影响幅度有限。如图 10 所示,均质对乳粉的感官评价起到了极大影响,均质后的各组在感官评价得分上均显著高于未均质组($P<0.05$);与未均质组相比,虽然均质后的各组的 GI 值有一定程度的降低,但低于 600 Pa 的压力下并未表现出显著性($P>0.05$);均质会使乳粉的原材料更好的结合在一起,通过测定油脂析出率可知,均质后,乳粉的油脂析出率呈现了先增加后降低的趋势,在 600 Pa 时,乳粉的油脂析出率为 31.65%,与未均质相比显著降低($P<0.05$),达到最佳水平。综上,最佳的均值压力为 600 Pa。

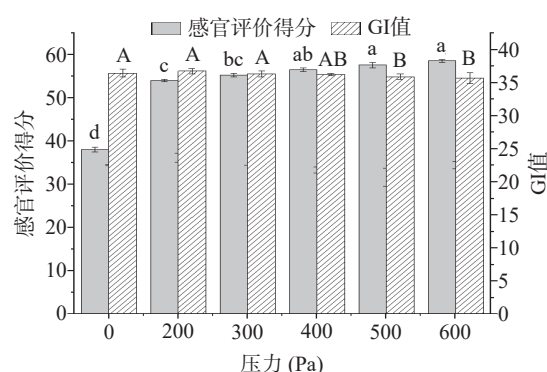


图 10 不同均质压力对感官评价与 GI 值的影响

Fig.10 Effects of different homogenising pressures on sensory evaluation and GI values

2.6 正交试验结果

正交试验分析了不同关键原材料配比对乳粉 GI 值的影响,正交试验结果见表 8。对 GI 值进行极差分析可知,4 个因素的影响能力顺序为 $A>B>D>C$,即菊粉>EUF>均质压力>异麦芽酮糖醇。菊粉对 GI 值的影响最大,随着添加量的增加, GI 值逐渐升高, EUF 对 GI 值的影响次之,随着 EUF 的添加量增大, GI 值逐渐降低,这与此前的单因素实验结果相吻合。根据 GI 值分析实验结果,理论优结果为 $A_2B_2C_3D_1$,该组 GI 值为 28.12,显著低于其他八组($P<0.05$),即最优的因素水平为菊粉添加量 0.4%、EUF 添加量 0.005%、异麦芽酮糖醇添加量 0.7% 和均质压力 500 Pa。根据表中 k 值以及结合验证试验结果的 GI 值 29.24 ± 0.13 分析,理论优结果组即为实际优结果 5 号实验组,与结果相符。

如图 11 所示,正交试验中 9 个实验组产品在感官评价上均有较好表现,其中最为突出的是第 5 组 and 第 8 组,说明这两个小组的配方具有良好的口感和风味;油脂析出率可以反映出乳粉中各种原材料的结合程度,以此来对不同分组间的稳定程度进行选择。正交试验的 9 个分组之间,油脂析出率并未发生显著变化($P>0.05$),说明 500~700 Pa 之间的均质压力并不会对乳粉的稳定性造成显著影响,因此,以 GI 值和感官评价得分作为优化工艺的选择标准。综

表 8 正交试验结果

Table 8 Results of orthogonal experiment

试验号	A 菊粉 添加量	B EUF 添加量	C 异麦芽酮 糖醇添加量	D 均质 压力	GI 值
1	1	1	1	1	30.33±0.26 ^{bd}
2	1	2	2	2	29.66±0.12 ^e
3	1	3	3	3	30.56±0.15 ^{bd}
4	2	1	2	3	30.16±0.50 ^{ce}
5	2	2	3	1	28.12±0.23 ^f
6	2	3	1	2	30.29±0.17 ^{bd}
7	3	1	3	2	31.59±0.15 ^a
8	3	2	1	3	31.30±0.11 ^{ab}
9	3	3	2	1	31.05±0.20 ^{abc}
K ₁	89.92	91.48	90.99	88.93	
K ₂	88.31	88.47	90.36	90.74	
K ₃	93.18	91.46	90.06	91.74	
k ₁	29.97	30.49	30.33	29.64	
k ₂	29.44	29.49	30.12	30.25	
k ₃	31.06	30.49	30.02	30.58	
极差R	1.62	1.00	0.31	0.94	
主次顺序			A>B>D>C		
最优水平	A ₂	B ₂	C ₃	D ₁	
最优组合			A ₂ B ₂ C ₃ D ₁		

注:有相同字母表示两组间无显著性,不同字母表示两组间有显著性差异($P<0.05$)。

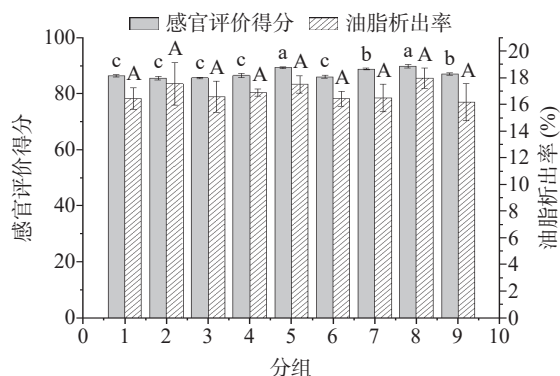


图 11 正交试验中不同分组的感官评价与油脂析出率

Fig.11 Sensory evaluation and centrifugal stability of different groups in orthogonal experiment

上,第五组在风味口感以及体外模拟消化得出的 GI 值都优于其他组别,因此选择第五组,即菊粉添加量 0.4%、EUF 添加量 0.005%、异麦芽酮糖醇添加量 0.7% 和均质压力 500 Pa 作为低 GI 乳粉的工艺条件。

3 结论

本研究使用酶法降解制备的 LMWF 和生牛乳等其他原辅料进行调配,经过优化实验得到最适配比及工艺,即脱脂乳粉与全脂乳粉的比例为 1:0、菊粉添加量 0.4%、EUF 添加量 0.005%、异麦芽酮糖醇添加量 0.7% 和均质压力 500 Pa,在此条件下产品的 GI 值为 28.12,且具有较好的感官特性。所得到的乳粉整体来看颜色佳、粉质细腻、口感好,添加了 LMWF 后使该奶粉除了具有奶粉固有的蛋白质等营

养物质外,还可以降低淀粉水解率,预测有降血糖等功效,具有较高营养价值。本研究通过探索海藻多糖与食品、饮品更加多样化的结合方式,给人们带来更加健康的生活选择,同时对 LMWF 进行合理利用,有助于推动海藻多糖的有效应用,同时也为广大消费者提供了更多选择。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] LIU J J, GURUNG R L, LIU S, et al. Associations of young onset age and genetic risk of beta cell dysfunction with glycaemic progression in individuals with type 2 diabetes[J]. *Diabetes & Metabolism*, 2021, 47(6): 1–23.
- [2] DUAN Y S, SUN H W, YAO Y M, et al. Serum concentrations of per-/polyfluoroalkyl substances and risk of type 2 diabetes: A case-control study[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147476.
- [3] SHAN X D, LIU X, HAO J J, et al. *In vitro* and *in vivo* hypoglycemic effects of brown algal fucoidans[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 82: 249–255.
- [4] MAK W, HAMID N, LIU T, et al. Fucoidan from New Zealand *Undaria pinnatifida*: Monthly variations and determination of antioxidant activities[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 95(1): 606–614.
- [5] SVETIANA E, ROZA S, MIN K S, et al. Fucoidans from brown seaweeds *Sargassum hornery*, *Eclonia cava*, *Costaria costata*: structural characteristics and anticancer activity[J]. *Applied biochemistry and biotechnology*, 2011, 164(6): 841–850.
- [6] WU Q Q, ZHANG M, WU K, et al. Purification and characteristics of fucoidanase obtained from *Dendryphiella arenaria* TM94[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2011, 23(2): 197–203.
- [7] 魏雪琴. 岩藻聚糖硫酸酯的纯化及其链结构和生物活性[D]. 武汉: 武汉大学 2017. [WEI X Q. Purification, chain structure and bioactivities of fucoidan[D]. Wuhan: College of Chemistry and Molecular Sciences, Wuhan University, 2017.]
- [8] HE S, PENG W B, ZHOU H L, et al. A combination of deep-sea water and fucoidan alleviates T2DM through modulation of gut microbiota and metabolic pathways[J]. *Pharmaceuticals*, 2023, 16(3): 1–20.
- [9] NAZIA T, FAZLURRAHMAN K, GYUN K M, et al. Inhibition of polymicrobial biofilms of *Candida albicans*-*Staphylococcus aureus*/*Streptococcus mutans* by fucoidan-gold nanoparticles[J]. *Marine Drugs*, 2023, 21(2): 1–16.
- [10] KENTARO K. The public health impact of hypertension and diabetes: a powerful tag team for the development of chronic kidney disease[J]. *Hypertension research: official journal of the Japanese Society of Hypertension*, 2023, 46(2): 339–340.
- [11] SUN L J, WANG Y Y, MIAO M. Inhibition of α -amylase by polyphenolic compounds: Substrate digestion, binding interactions and nutritional intervention[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 190–207.
- [12] MAPENGO C R, EMMAMBUX M N. Processing technologies for developing low GI foods – a review[J]. *Starch - Stä rke*, 2022, 74: 7–8.
- [13] OJO O, OJO O O, WANG X H, et al. The effects of a low GI diet on cardiometabolic and inflammatory parameters in patients with type 2 and gestational diabetes: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials[J]. *Nutrients*, 2019, 11(7): 1–17.
- [14] ARPITA D, ARUNKULAR P, KUMAR Y S, et al. Shelf - life, nutritional and sensory quality of cereal and herb based low gly-

- caemic index foods for managing diabetes[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 46(1): 1–12.
- [15] LAI J T, XIE F, ZHENG W Y. Realization of meal replacement powder based on low GI food[J]. MEDS Chinese Medicine, 2021, 3(2): 88–91.
- [16] 桑跃, 刘治麟, 周晓娟, 等. 益生菌与骆驼乳辅助调节血糖的作用[J]. 中国奶牛, 2019(1): 38–40. [SANG Y, LIU Z L, ZHOU X J, et al. Effects of camel milk and probiotics in regulating diabetes[J]. China Dairy Cattle, 2019(1): 38–40.]
- [17] 白锦, 满青青, 刘刚. 复合降糖乳粉调节血糖实验研究[J]. 营养学报, 1999(2): 118. [BAI J, MAN Q Q, LIU G. Experimental study on blood glucose regulation by compound milk powder[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 1999(2): 118.]
- [18] WANG Q, SONG Y, HE Y, et al. Structural characterisation of algae *Costaria costata* fucoidan and its effects on CCl₄-induced liver injury[J]. Carbohydr Polym. 2014, 107, 247–254.]
- [19] HE S, CHOI D N, TANG W Y, et al. ZIF-8@SiO₂ based novel dispersive solid-phase filter extraction technique for the purification of laminarin and fucoidan from undaria pinnatifida[J]. Microchemical Journal, 2022, 180: 1–8.
- [20] 杨靖, 孙艳芳, 高红亮, 等. 一种快速测定微生物发酵体系酸化多糖的方法研究[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 250–255. [YANG J, SUN Y F, GAO H L, et al. Study on rapid determination of sulfated polysaccharides in microbial fermentation system[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(4): 250–255.]
- [21] 张田田, 董悦生, 侯洪波, 等. 紫皮石斛多糖酶解及其在发酵酒中的应用[J/OL]. 食品与发酵工业, 1–10 [2025-03-25]. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040079. [ZHANG T T, DONG Y S, HOU H B, et al. Enzymatic hydrolysis of polysaccharides of *Dendrobium devonianum* and its application in fermented wine[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1–10 [2025-03-25]. doi:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040079.]
- [22] YANG J C, LI H, WANG X L, et al. Inhibition mechanism of α -amylase/ α -glucosidase by silibinin, its synergism with acarbose, and the effect of milk proteins[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2021, 69(36).
- [23] 江建丽. 3, 5-二硝基水杨酸(DNS)法测定五味子还原糖含量的适宜条件[J]. 海峡药学, 2014, 26(1): 57–60. [JIANG J L. Optimum condition for determining reducing sugar content in Schisandra by DNS method[J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2014, 26(1): 57–60.]
- [24] 潘玥. 蓝莓叶多酚提取物对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用及其在低 GI 米糕中应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021. [PAN Y. Inhibitory effect of blueberry leaf polyphenols on α -amylase and α -glucosidase and its application in low GI[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.]
- [25] 王茜, 张艳丽, 杨洁钰, 等. 高膳食纤维竹笋代餐粉配方优化[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(1): 45–50. [WANG X, ZHANG Y L, YANG J Y, et al. Formula optimization of bamboo shoot meal replacement powder with high dietary fiber[J]. World Bamboo and Rattan, 2024, 22(1): 45–50.]
- [26] XIAO J, BAI X Q, LIAO L, et al. Hydrogen sulfide inhibits PCSK9 expression through the PI3K/Akt-SREBP-2 signaling pathway to influence lipid metabolism in HepG2 cells[J]. International Journal of Molecular Medicine, 2019, 43(5): 2055–2063.
- [27] HAAS M J, NAEM E, ALMDALLALEH S, et al. The effect of black seed (*Nigella sativa*) extract on lipid metabolism in HepG2 cells[J]. BBA - Molecular and Cell Biology of Lipids, 2022, 1867(8): 1–9.
- [28] 王瑞雪, 房一明, 郭娜, 等. 柠檬皮多酚对胰岛素抵抗的 HepG2 细胞葡萄糖消耗量的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(9): 161–165. [WANG R X, FANG Y M, GUO N, et al. Effects of lemon peel polyphenols on glucose consumption in insulin-resistant HepG2 cells[J]. The Food Industry, 2022, 43(9): 161–165.]
- [29] 柳卓, 田雪飞, 谭小宁, 等. 固脾消积饮对肝星状细胞共培养条件下 HepG2 细胞氨基酸代谢和能量代谢的影响[J]. 中国中医药信息杂志, 2023, 30(4): 94–99. [LIU Z, TIAN X F, TAN X N, et al. Effects of *Gupi Xiaoji* decoction on amino acid metabolism and energy metabolism of HepG2 cells under co-culture of hepatoma stellate cells[J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2023, 30(4): 94–99.]
- [30] 王茹, 袁雅倩, 曾敏, 等. 葛根总黄酮对胰岛素抵抗模型 HepG2 细胞糖代谢的改善作用及机制研究[J]. 华中科技大学学报(医学版), 2023, 52(1): 43–47. [WANG R, YUAN Y Q, ZENG M, et al. Effects of crude flavones of *Pueraria lobata* on the improvement of glycometabolism in insulin-resistant HepG2 cells and underlying mechanism[J]. Acta Medicinæ Universitatis Scientiæ et Technologiæ Huazhong, 2023, 52(1): 43–47.]
- [31] KIM K T, RIOUX L E, TURGEON S L. Alpha-amylase and alpha-glucosidase inhibition is differentially modulated by fucoidan obtained from *Fucus vesiculosus* and *Ascophyllum nodosum*[J]. Phytochemistry, 2014, 98: 27–33.
- [32] SMINA C S, LALITHA P, NAGABHUSHANA H, et al. Terminalia bellirica dried fruit and seed extract offers alpha-amylase inhibitory potential in tackling diabetes[J]. Applied Nanoscience, 2020, 10: 4325–4339.
- [33] TOKO F R, NGENGE T A, YAYA G A J, et al. In Vitro evaluation of α -amylase and α -glucosidase Inhibition of 2,3-Epoxyprocyanidin C1 and other constituents from *Pterocarpus erinaceus* Poir[J]. Molecules, 2022, 28(1): 1–15.
- [34] AUDERY K H S, LU J, ZHOU W B. Structural dependence of sulfated polysaccharide for diabetes management: fucoidan from *Undaria pinnatifida* inhibiting α -glucosidase more strongly than α -amylase and amyloglucosidase[J]. Frontiers in Pharmacology, 2020, 11: 1–9.
- [35] 潘玥, 刘小莉, 王英, 等. 蓝莓叶多酚对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的体外抑制活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2022, 34(4): 579–587. [PAN Y, LIU X L, WANG Y, et al. Inhibitory effect of polyphenols from blueberry leaves on the activity of α -amylase and α -glucosidase in vitro[J]. Natural Product Research and Development, 2022, 34(4): 579–587.]
- [36] SHEN H Y, WANG J, AO J F, et al. Inhibitory kinetics and mechanism of active compounds in green walnut husk against α -glucosidase: spectroscopy and molecular docking analyses[J]. LWT, 2022, 172: 397–407.
- [37] 李志鹏, 周晨熠, 潘书童, 等. 两种青稞多糖对胰 α -淀粉酶的抑制作用[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 192–199. [LI Z P, ZHOU C Y, PAN S T, et al. Inhibitory effects of two polysaccharides from highland barley on the activity of pancreatic α -amylase[J]. Food Science, 2023, 44(22): 192–199.]
- [38] PENG W, TANG C, LI Y, et al. Inhibitory effects of various ratios of polysaccharides/alkaloids from rhizome of *Coptis chinensis* franch on α -glucosidase[J]. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 2016, 15(2): 307–312.
- [39] GAYATHRI J, KASIPANDI M, LYDIA M A, et al. Understanding the bioaccessibility, α -amylase and α -glucosidase enzyme inhibition kinetics of *Allmania nodiflora* (L.) R. Br. Ex Wight polyphenols during in vitro simulated digestion[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 1–10.
- [40] LAKSHMANA S S, RAGHU C, ARJUN H A, et al. In vitro and in silico inhibition properties of fucoidan against-amylase and α -D-glucosidase with relevance to type 2 diabetes mellitus[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 209: 350–355.
- [41] 向岑, 荣耀, 迟明, 等. 菊粉生物学作用及机制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(19): 212–218, 224. [XIANG C, RONG Y, CHI M, et al. Advances in research on biological activity and mechanisms of inulin[J]. Food Research and Development, 2020, 41(19): 212–218, 224.]