

低糖营养强化型炼乳的代糖配方优化与品质分析

汪雪莲¹ 董艺凝¹ 董 慧¹ 郭铭菲¹ 徐 升² 周 颀¹

(1. 滁州学院生物与食品工程学院, 安徽 滁州 239000; 2. 安徽达诺乳业股份有限公司, 安徽 滁州 239000)

摘要: [目的] 针对传统炼乳高糖、高热量带来的食用健康隐患, 以低甜度益生元为主要成分, 通过复配糖醇和高倍甜味剂对蔗糖进行替代, 对传统炼乳进行减糖和营养强化双重技术改良。[方法] 以低甜度益生元(低聚半乳糖、低聚果糖)为主, 复配糖醇(赤藓糖醇、麦芽糖醇)及高倍甜味剂(甜菊糖苷、罗汉果甜苷), 采用模糊数学感官评价结合 D-最优混料设计优化代糖配比, 并分析其对炼乳感官品质、质构特性和褐变度的影响。[结果] 最优代糖组合为低聚半乳糖 9.35%、低聚果糖 0.59%、赤藓糖醇 0.04%、迷迭香酸 0.02%, 该代糖口感与蔗糖的相似度达 87.20%。添加 25% 代糖的炼乳质构参数稳定, 褐变度仅 1.23 ± 0.03 , 显著低于传统炼乳 ($P < 0.05$)。[结论] 该代糖方案在保持炼乳质构特性的同时有效降低了褐变反应, 兼具工艺可行性与健康优势。

关键词: 代糖炼乳; 模糊数学感官评价; 混料设计; 质构特性; 褐变度

Sugar substitute formula optimization and quality analysis of low-sugar nutrient-fortified condensed milk

Wang Xuelian¹ Dong Yining¹ Dong Hui¹ Guo Mingfei¹ Xu Sheng² Zhou Di¹

(1. School of Biological Science and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China;
2. Anhui Danuo Dairy Industry Co., Ltd., Chuzhou, Anhui 239000, China)

Abstract: [Objective] To address health risks associated with the high sugar and calorie content in traditional condensed milk, and to reduce sugar content and fortify nutrients of traditional condensed milk by replacing sugar with low-sweetness prebiotics as the primary component, compounded with sugar alcohols and high-intensity sweeteners. [Methods] Low-sweetness prebiotics (galacto-oligosaccharides and fructo-oligosaccharides) are used as the main ingredients in sugar substitutes, compounded with sugar alcohols (erythritol and maltitol) and high-intensity sweeteners (stevioside and mogrosides). Then, the optimal substitute ratio is optimized through fuzzy mathematics sensory evaluation combined with D-optimal mixture design. Additionally, the effect on the sensory quality, texture characteristics, and browning degree of condensed milk is analyzed. [Results] The optimal sugar substitute formulation is composed of 9.35% galacto-oligosaccharides, 0.59% fructo-oligosaccharides, 0.04% erythritol, and 0.02% rosmarinic acid, demonstrating 87.20% similarity in taste profile to sucrose. At a sugar substitute content of 25%, the condensed milk maintains stable texture characteristics, with a browning degree of only 1.23 ± 0.03 , significantly lower than that of conventional condensed milk ($P < 0.05$). [Conclusion] This sugar substitute solution effectively reduces browning reactions while maintaining the texture characteristics of condensed milk, demonstrating both process feasibility and health advantages.

Keywords: sugar-substituted condensed milk; fuzzy mathematics sensory evaluation; mixture design; texture characteristics; browning degree

炼乳是将鲜乳浓缩至原体积的 25%~40%, 并添加浓度高达 40% 以上蔗糖制成的高糖、高热量乳制品^[1]。其凭借较长的保质期和便于贮藏运输等优势, 在烘焙、糖果

及饮料等食品加工领域被广泛应用, 然而, 长期摄入高糖高热量饮食易诱发糖尿病、肥胖和龋齿等健康问题^[2-3]。世界卫生组织表示减少糖摄入可降低相关疾病发生率,

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 31301523); 国家重点实验室开放课题(编号: M2023-14); 安徽省教育厅重点研究项目(编号: KJ2021A1071); 滁州市科技计划项目(编号: 2024YF003)

通信作者: 董艺凝(1980—), 女, 滁州学院教授, 博士。E-mail: dong_yining@163.com

收稿日期: 2025-04-27 **改回日期:** 2026-04-20

引用格式: 汪雪莲, 董艺凝, 董慧, 等. 低糖营养强化型炼乳的代糖配方优化与品质分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 162-170.

Citation: Wang Xuelian, Dong Yining, Dong Hui, et al. Sugar substitute formula optimization and quality analysis of low-sugar nutrient-fortified condensed milk[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 162-170.

并建议成人每天糖摄入量不超过总能量的10%,以25 g左右为宜^[4]。因此,“减糖”已成为大健康发展趋势对炼乳产业提出的新要求。在此背景下,陈娟等^[5]以鲜牛乳为原料,赤藓糖醇为辅料,开发了低糖低热量的风味酸奶; Delgado-Fernández等^[6]将功能性低聚糖加入到发酵乳中,分析了其质构、风味变化。

随着人们健康意识和饮食品质要求的不断提高,如何降低高糖饮食风险的同时保持消费者习惯的甜味口感以及食用功能性是炼乳行业减糖的技术难题。针对这一共性技术需求,试验拟通过代糖复配,协调各组分之间的优缺点,达到最佳效果。低聚半乳糖与低聚木糖均是益生元,前者可促进肠道益生菌增殖^[7],后者的生物稳定性较好,二者甜度均为蔗糖的40%;低聚果糖口感清凉,热值低,甜度为蔗糖的60%^[8-9]。赤藓糖醇是最受欢迎的糖醇,具有热量低、异味少、不龋齿、加热不褐变的优点。麦芽糖醇的甜度与蔗糖类似,成本低、不易被口腔细菌代谢,并在乳制品中被广泛采用^[10]。甜菊糖苷是天然甜味剂,热量仅为蔗糖的1/300,甜度却为蔗糖的300倍,且质地好、耐高温、不易发生美拉德褐变^[11]。罗汉果甜苷为天然甜味剂,甜度是蔗糖的300倍,无热量、苦味少,尾味持久^[12]。

混料设计已被广泛应用于农业、工业及食品领域^[13]。传统感官评价中,加糖炼乳可根据RHB 301—2004《全脂加糖炼乳感官质量评鉴细则》中的感官分析评价依据进行评定,但该方法易受主观因素影响^[14]。因此,试验拟采用模糊数学感官评价结合D-优化组合设计,建立以感官评分为响应值的回归模型优化代糖配比,用层次分析法将感官评分、黏性和浓稠度3个指标分为3个层次,建立炼乳减糖工艺评价层次结构模型得到综合评分。通过3种功能性低聚糖复配2种糖醇以及2种高倍甜味剂替代炼乳中高浓度蔗糖,采用模糊数学感官评价结合D-最优混料设计优化炼乳代糖配比,分析其替代蔗糖后对炼乳感官品质、质构特性及褐变度的影响,为炼乳产业的健康发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

全脂乳粉:安徽达诺乳业股份有限公司;

低聚半乳糖、麦芽糖醇、赤藓糖醇、罗汉果甜苷、甜菊糖苷、蔗糖:食品级,河南万邦化工科技有限公司;

低聚木糖、低聚果糖:食品级,山东百龙创园生物科技股份有限公司;

试验用水均为纯净水。

1.1.2 主要仪器设备

数显恒温水浴锅:HWS-12型,上海尚仪仪器设备有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-91010OSA型,上海三发科学仪器有限公司;

质构仪:TA.XT Plus型,英国Satble Micro Systems公司;

酶标仪:SpectraMax Plus384型,美谷分子仪器(上海)有限公司;

酸度计:P901型,上海佑科仪器仪表公司;

分析天平:FA2204型,上海越平科学仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 模拟代糖炼乳的制备 将全脂乳粉称重后定量加入纯净水中,55℃水浴搅拌溶解,制得模拟炼乳体系。将代糖组分按比例配制溶解后,根据所需浓度添加至炼乳中,室温下充分溶解,搅拌均匀制得模拟代糖炼乳。

1.2.2 模糊数学感官综合评价法的建立 参照文献^[15]的方法。

(1) 因素集和评语集的确:以代糖溶液甜度强度、后余味、色泽、气味为评价指标,作为评价因素组成评价子集,即 $U=\{U_1, U_2, U_3, U_4\}=\{\text{甜度强度, 后余味, 色泽, 气味}\}$ 。评语集用集合 V 表示, $V=\{V_1, V_2, V_3\}=\{\text{优, 良, 差}\}$,设对应分值集 $V=\{85, 75, 65\}$ 。

(2) 权重集的确:采用强制决定法确定权重集,根据参加评价因素重要程度一对一进行比较。0代表不重要,1代表重要。因素自身之间不对比,记为1分^[16]。根据最终得分算出权重,得到代糖溶液权重集 $W=\{0.40, 0.30, 0.10, 0.20\}$ 。

(3) 模糊关系综合评判集的确:对代糖溶液进行感官评价,考察甜味强度、后余味、色泽、气味4个评价因素,将各因素在每个质量等级中的票数统计后进行归一化处理,得到代糖溶液的感官评价模糊关系矩阵 T 。根据模糊变换原理,采用矩阵乘法计算代糖溶液各因素模糊感官综合评判结果向量。每种代糖溶液的感官评分为结果矩阵与各等级分值乘积之和。

1.2.3 甜度测定 以10%蔗糖溶液为标准甜度对照,低聚半乳糖和低聚木糖甜度均为0.4,低聚果糖甜度为0.6,赤藓糖醇甜度为0.7^[17],麦芽糖醇甜度为0.9^[18],罗汉果甜苷和甜菊糖苷甜度均为300。根据甜度测定方法^[19],按式(1)、式(2)分别计算高倍、低倍甜味剂甜度。

$$S = \frac{10\%}{C}, \quad (1)$$

$$S = \frac{2\%}{C}, \quad (2)$$

式中:

S ——甜度;

C ——样品浓度, %。

1.2.4 最优混料设计试验 对低聚半乳糖、低聚木糖、低聚果糖、赤藓糖醇、麦芽糖醇、罗汉果甜苷和甜菊糖苷7个因素进行混料设计,以综合评分为响应值,且约束条件: $\sum(A \sim G) = 100\%$ 。为得到与10%蔗糖溶液口感相似的代糖配比,采用Design-Expert 13软件中D-最优混料算法,设样品甜度与浓度为约束条件

$$0 \leq 0.4A + 0.4B + 0.6C + 0.7D + 0.9E + 300F +$$

$300G \leq 1,$ (3)

$$0 \leq \frac{2\%}{0.4}A + \frac{2\%}{0.4}B + \frac{2\%}{0.6}C + \frac{2\%}{0.7}D + \frac{2\%}{0.9}E + \frac{10\%}{300}F + \frac{10\%}{300}G \leq 10.$$
 (4)

1.2.5 感官评价和理化指标测定

(1) 感官评定:代糖溶液感官评价以 10% 蔗糖溶液作为对照,即称取 10 g 蔗糖加入水中,搅拌溶解得蔗糖含量为 10% 的溶液。取不同代糖配比与纯净水制成 100 mL 代糖溶液体系。邀请 30 位经过食品感官培训的食品专业人员将代糖溶液按优、良、差 3 个质量等级所对应分值进行评分,感官评定表见表 1。参与感官评定的人员男女各 15 名,所有评价人员均接受过专业训练,通过感官分析测试并且合格。评价前 1 h 内,评价人员不得饮酒、进食或吸烟,不使用香水和化妆品,且在评价过程中不得相互交换意见^[20]。

将最优代糖配比以不同浓度添加到炼乳中,即炼乳中代糖配比浓度分别达炼乳总浓度的 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 与 40 g/100 mL 蔗糖炼乳进行感官对比试验。

(2) 黏度测定:将 50 mL 炼乳样品倒入容器中,使用主轴数 2(LV2)在主轴转速为 30 r/min 下测量黏度 30 s^[21]。每组炼乳样品平行测定 3 次,结果取平均值。

(3) 浓稠度测定:使用 AB/E 圆柱型塑料探头,直径 45 mm,测前、中、后速度均为 1.0 mm/s,压缩深度 15 mm,触发类型 Auto-0.049 N^[22]。

(4) 综合评分:采用层次分析法^[23]。利用 Yaahp V10.3 应用软件,将感官评分、黏性和浓稠度 3 个指标分为 3 个层次,建立炼乳减糖工艺评价层次结构模型,考虑到消费者习惯的甜味口感,故感官评分占比最大;炼乳的黏性和黏稠度是其重要的质构特性,直接影响其在食用过程中的口感、溶解性、稳定性、加工性能和营养吸收。适当的黏性和黏稠度可以提升炼乳的食用功能性,故黏性与浓稠度占比相同。因此,最终按照感官评分>黏性=浓稠度的优先顺序,根据 Yaahp V10.3 软件中两两比较重要性的相对评分规则,建立判断矩阵,获得各指标的权重系数。判断矩阵一致性比率<0.1,表明判断矩阵一致性较好,求得的权重系数合理有效、无逻辑混乱。感官评价权重为 0.6,黏性和浓稠度权重为 0.2,并按式(5)计算综合评分值。

$$R = (0.6X/X_{\max} + 0.2Y/Y_{\max} + 0.2W/W_{\max}) \times 100.$$
 (5)

式中:

R——综合评分;

X、Y、W——感官评分、黏性、浓稠度;

X_{max}、Y_{max}、W_{max}——感官评分、黏性、浓稠度的最大值。

表 1 感官质量评定标准

Table 1 Sensory quality evaluation criteria			
样品	感官属性	特征	分值
代糖溶液	甜度强度	甜度接近 10% 蔗糖溶液	85
		甜度与 10% 蔗糖溶液不同	75
		甜度与 10% 蔗糖溶液差别大	65
	后余味	无苦涩后味,感觉良好	85
		苦涩后味轻,感觉一般	75
		苦涩后味中,感觉难受	65
	色泽	色泽接近 10% 蔗糖溶液	85
		色泽与 10% 蔗糖溶液不同	75
		色泽与 10% 蔗糖溶液差别大	65
	气味	气味接近 10% 蔗糖溶液	85
		气味与 10% 蔗糖溶液不同	75
		气味与 10% 蔗糖溶液差别大	65
炼乳	滋味(30 分)	甜度纯正,具有明显牛乳滋味	30
		口感甜酸不匀,牛乳气味平淡	29~23
		甜度较轻,具有不纯的牛乳滋味	22~17
	气味(30 分)	奶香味特征明显,无不纯异味	30
		奶香味特征一般,异味平淡	29~23
		奶香味特征不明显,具有明显异味	22~17
	组织质地(7 分)	组织细腻,质地均匀	7
		组织较细腻,质地较均匀	6~5
		脂肪不细腻,质地不均匀	4~2
	脂肪上浮(7 分)	无脂肪上浮	7
		脂肪轻度上浮	6~5
		脂肪上浮明显	4~2
	黏度(7 分)	黏度正常呈叠带状	7
		黏度较稠或较稀	6~5
		黏度变化大,有变厚或呈软膏状	4~2
乳糖晶体颗粒感(7 分)	乳糖晶体颗粒感	乳糖晶体颗粒感细小且均匀	7
		乳糖晶体颗粒感稍大,舌尖微感粉状	6~5
		乳糖晶体颗粒感大,舌感砂状	4~2
钙盐沉淀(7 分)	有微量沉淀	有微量沉淀	7
		有少量沉淀	6~5
		有大量沉淀	4~2
色泽(5 分)	呈乳白(黄)色,色泽均匀,有光泽	呈乳白(黄)色,色泽均匀,有光泽	5
		色泽有轻度变化	4~3
		色泽有明显变化(肉桂色或淡褐色)	2~1

综合评分越高表示代糖炼乳工艺越好。

1.2.6 质构分析 采用质构仪测定不同浓度代糖溶液及相应代糖炼乳的质构特性。使用直径为 40 mm 的 AB/E 圆柱型塑料探针,测前、测试、回程速度均为 1.0 mm/s,触发类型为 Auto-0.049 N,压缩深度 15 mm。记录样品的硬度、浓稠度、黏性和内聚性。

1.2.7 褐变度和 pH 测定 将添加不同代糖配比的炼乳置于电热恒温干燥箱中,100 ℃加热 90 min,迅速冷却后

稀释 500 倍,采用酶标仪测定 420 nm 处吸光度值^[24]。室温下采用酸度计测定代糖炼乳 pH 值。

1.3 数据处理

采用 Design-Expert 13、Excel 2016 软件进行数据处理及作图。各试验均平行重复 3 次,结果以平均值±标准差表示。采用 Yaahp 软件进行层次分析和综合评价。

2 结果与分析

2.1 代糖配比模糊数学感官评判结果

感官评定结果和统计数据见表 2。根据感官评价表中各等级评价人数占总评价人数的比例,采用模糊评定矩阵计算代糖溶液的 25 个模糊矩阵:

$$T_g = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \\ t_{i1} & t_{i2} & t_{i3} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:

T_g ——模糊矩阵;

t_{i1} 、 t_{i2} 、 t_{i3} 、 t_{i4} ——第 i 个评价指标所占比例。

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.9 & 0.1 & 0.0 \end{bmatrix}, \quad \text{依次可得} \quad T_{25} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 & 0.0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 \\ 0.1 & 0.4 & 0.5 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}。$$

已知代糖溶液权重集为 $W = \{0.40, 0.30, 0.10, 0.20\}$, 则

$$Y_1 = W_1 \times T_1 = [0.40 \quad 0.30 \quad 0.10 \quad 0.20] \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.9 & 0.1 & 0.0 \end{bmatrix} = \{0.53 \quad 0.42 \quad 0.05\},$$

1 号代糖溶液感官评分 $Y_1 = 0.53 \times 85 + 0.42 \times 75 + 0.05 \times 65 = 79.8$ 。

同理,其他样品的感官评分分别为 $Y_2 = 78.7$, $Y_3 = 78.5$, $Y_4 = 77.8$, $Y_5 = 77.0$, $Y_6 = 75.0$, $Y_7 = 77.5$, $Y_8 = 74.0$, $Y_9 = 79.4$, $Y_{10} = 78.5$, $Y_{11} = 77.0$, $Y_{12} = 77.2$, $Y_{13} = 76.7$, $Y_{14} =$

表 2 代糖溶液感官评价指标数统计

Table 2 Sensory evaluation indicator statistics of sugar substitute solution

试验号	甜味强度			后余味			色泽			气味		
	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
1	4	5	1	5	5	0	4	5	1	9	1	0
2	4	4	2	7	2	1	5	3	2	6	2	2
3	1	6	3	8	2	0	3	5	2	9	1	0
4	3	5	2	6	2	2	5	4	1	5	4	1
5	1	5	4	6	3	1	6	3	1	7	2	1
6	1	2	7	4	3	3	7	3	0	7	3	0
7	1	6	3	6	3	1	6	4	0	6	4	0
8	0	3	7	3	6	1	6	2	2	6	2	2
9	2	6	2	7	3	0	9	1	0	8	1	1
10	2	5	3	7	2	1	6	3	1	8	2	0
11	1	6	3	7	1	2	5	5	0	6	2	2
12	1	6	3	6	3	1	5	5	0	6	3	1
13	0	4	6	6	4	0	6	1	3	10	0	0
14	3	6	1	5	3	2	7	3	0	7	3	0
15	0	7	3	8	2	0	4	5	1	9	1	0
16	1	5	4	5	5	0	2	7	1	9	1	0
17	1	5	4	6	2	2	2	5	3	8	2	0
18	0	7	3	8	2	0	5	4	1	8	1	1
19	0	8	2	6	3	1	2	8	0	9	1	0
20	1	7	2	7	1	2	5	5	0	8	2	1
21	0	6	4	6	4	0	3	6	1	9	1	0
22	0	6	4	7	3	0	2	6	2	9	1	0
23	2	4	4	4	1	5	2	6	2	8	1	1
24	2	7	1	3	5	2	3	5	2	9	1	0
25	2	8	0	6	2	2	1	4	5	8	1	1

78.8, $Y_{15}=78.3$, $Y_{16}=77.2$, $Y_{17}=76.5$, $Y_{18}=78.0$, $Y_{19}=77.7$, $Y_{20}=78.0$, $Y_{21}=77.2$, $Y_{22}=77.3$, $Y_{23}=75.3$, $Y_{24}=77.6$, $Y_{25}=78.0$ 。

2.2 D-最优混料设计代糖配比

2.2.1 D-最优混料设计 以代糖溶液的感官评分为响应值,根据 D-最优混料设计原理,采用 Design-Expert 13 软件设计响应面试验,研究低聚半乳糖、低聚木糖、低聚果糖、赤藓糖醇、麦芽糖醇、罗汉果甜苷和甜菊糖苷 7 个参数对代糖溶液感官评分的影响,结果见表 3。通过对比方差分析中 F 值大小剔除不显著因素,得到回归方程:

$$Y=73.07A+71.50B+74.93C+77.05D+78.49E-532.22F+158\ 288G+8.79AB+10.07AC+4.21AD+4.94AE+3\ 348.26AF+8.79BC+8.81BD+12.90BE+1\ 715.83BF+5.23CE。$$
 (7)

由表 4 可知,模型 $P<0.000\ 1$,极显著。相关系数 $R^2=98.19\%$,表明模型能解释 98.19% 的响应值变异。校正后的判定系数 $R^2_{Adj}=94.58\%$,表明模型拟合程度良好,可较好地反映低聚半乳糖、低聚木糖、低聚果糖、赤藓糖

醇、麦芽糖醇、罗汉果甜苷和甜菊糖苷对模糊数学感官评分的影响。失拟项 $P=0.268\ 6>0.05$,不显著,表明该模型可拟合和推测实际情况。

2.2.2 响应面分析 等高线的椭圆形状表示两个因素之间有明显的相互作用,而圆形表示两个因素之间的相互作用不明显^[25]。由图 1 可知,各因素交互作用接近于椭圆形,表明各因素之间交互作用显著。由回归方程系数可知,各因素影响大小依次为甜菊糖苷、赤藓糖醇、麦芽糖醇、低聚果糖、低聚半乳糖、低聚木糖、罗汉果甜苷。

2.2.3 最优配比验证 采用 Design-Expert 13 软件中 Numerical 响应面优化功能设定感官评价期望值,设置区间为 74.0~79.8,重要性为 3,得到最优代糖配比,并对其中评分预测值最高的 5 组进行感官验证,结果见表 5。其中,第 4 组与第 2 组感官评分预测值均为最高值 78.71,但前者感官验证评分高于后者,故最优代糖配比为第 4 组,即低聚半乳糖 93.53%、低聚果糖 5.84%、赤藓糖醇 0.43%、罗汉果甜苷 0.20%。将其配制为与 10% 蔗糖溶液对照组相当浓度的代糖溶液,其中,低聚半乳糖 9.35%、低聚果糖

表 3 代糖溶液主料配比优化 D-最优混料设计与结果

Table 3 D-optimal mixture design and results for main ingredient ratio optimization of sugar substitute solution

试验号	A 低聚半乳糖/%	B 低聚木糖/%	C 低聚果糖/%	D 赤藓糖醇/%	E 麦芽糖醇/%	F 罗汉果甜苷/%	G 甜菊糖苷/%	感官评分	黏性/ N	浓稠度/ (s·N)	综合评分	排序
1	0.00	49.90	0.00	0.00	49.98	0.00	0.12	79.80	0.11	2.34	97.69	1
2	24.97	24.97	0.00	24.98	24.98	0.05	0.05	78.70	0.08	2.11	90.76	10
3	0.00	0.00	0.00	99.90	0.00	0.00	0.10	78.50	0.10	2.11	93.86	3
4	0.00	49.90	49.93	0.00	0.00	0.00	0.17	77.80	0.07	2.34	90.03	18
5	0.00	0.00	33.29	33.30	33.32	0.09	0.00	77.00	0.09	2.14	91.01	8
6	33.33	66.60	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	75.00	0.07	2.36	88.64	24
7	0.00	66.53	0.00	0.00	33.32	0.15	0.00	77.50	0.08	2.39	92.31	6
8	0.00	0.00	99.87	0.00	0.00	0.13	0.00	74.00	0.07	2.35	86.91	25
9	33.27	0.00	33.29	0.00	33.32	0.00	0.12	79.40	0.08	2.16	92.20	7
10	66.53	0.00	33.29	0.00	0.00	0.00	0.18	78.50	0.08	2.19	90.38	13
11	0.00	66.53	0.00	33.30	0.00	0.10	0.07	77.00	0.08	2.34	90.77	9
12	9.99	59.94	9.99	9.99	10.00	0.02	0.07	77.20	0.07	2.30	89.98	19
13	0.00	0.00	0.00	99.95	0.00	0.05	0.00	76.70	0.10	2.11	92.51	5
14	66.53	33.27	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	78.80	0.07	2.26	90.60	11
15	24.97	24.97	0.00	24.98	24.98	0.05	0.05	78.30	0.08	2.11	90.46	12
16	33.27	0.00	33.29	33.30	0.00	0.14	0.00	77.20	0.08	2.11	89.37	22
17	0.00	33.27	33.29	33.30	0.00	0.14	0.00	76.50	0.08	2.18	89.03	23
18	66.53	0.00	33.29	0.00	0.00	0.11	0.07	78.00	0.08	2.18	89.95	20
19	0.00	0.00	66.58	33.30	0.00	0.00	0.12	77.70	0.08	2.23	90.08	17
20	33.33	0.00	0.00	0.00	66.66	0.00	0.01	78.00	0.13	2.27	96.84	2
21	33.33	0.00	0.00	66.63	0.00	0.00	0.04	77.20	0.09	2.09	90.23	15
22	33.27	0.00	33.29	33.30	0.00	0.14	0.00	77.30	0.08	2.10	90.11	16
23	0.00	66.60	0.00	33.33	0.00	0.07	0.00	75.30	0.08	2.34	89.49	21
24	9.99	59.94	9.99	9.99	10.00	0.02	0.07	77.60	0.08	2.27	90.26	14
25	0.00	0.00	0.00	66.63	33.33	0.00	0.04	78.00	0.09	2.12	92.63	4

表4 回归模型的方差分析[†]

来源	平均和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	42.56	16	2.66	27.18	<0.000 1	**
线性项	37.96	6	6.33	64.65	<0.000 1	**
AB	0.48	1	0.48	4.91	0.057 6	
AC	0.58	1	0.58	5.90	0.041 2	*
AD	0.36	1	0.36	3.65	0.092 3	
AE	0.29	1	0.29	2.99	0.121 8	
AF	2.66	1	2.66	27.21	0.000 8	**
BC	1.22	1	1.22	12.43	0.007 8	**
BD	0.99	1	0.99	10.13	0.012 9	*
BE	1.58	1	1.58	16.12	0.003 9	**
BF	0.50	1	0.50	5.13	0.053 4	
CE	0.32	1	0.32	3.27	0.108 3	
残差	0.78	8	0.10			
失拟项	0.62	5	0.12	2.25	0.268 6	
净误差	0.17	3	0.06			
总和	43.34	24				

† **表示极显著($P<0.01$);*表示显著($P<0.05$)。

0.59%、赤藓糖醇0.04%、罗汉果甜苷0.02%，该代糖配比与蔗糖相似度达87.20%。通过回归模型影响力系数可知，在最优代糖组分中，罗汉果甜苷影响最小，赤藓糖醇影响最大，低聚半乳糖与低聚果糖影响居中。这种组成比例也与代糖的甜度特征基本相符。其中，罗汉果甜苷甜度虽高，但略带后余味，最优代糖配比中添加量较低(0.02%)，对甜度影响较小，对感官评价的总体影响也相对较小。相比之下，赤藓糖醇可以改善口感，包括掩盖涩味和部分甜味剂的余味影响，在与其他甜味剂复合时能够发挥显著甜度效应^[26]，因此其在配方中的含量对感官评价结果影响较大。在低倍甜味剂中，低聚半乳糖相对较甜，不影响溶液色泽，因此其在最优代糖配比中添加量

最高(9.35%)。最优配比中低聚果糖含量较低(0.59%)，可能是其甜度适中，当与其他甜味剂复配时，模型为了平衡整体甜度和风味，特别是为了减少罗汉果甜苷的余味并充分发挥赤藓糖醇的口感修饰作用，最终将低聚果糖的比例确定在一个相对较低的水平^[27]。

2.3 代糖添加对炼乳品质的影响

2.3.1 感官分析 由图2可知，当代糖配比浓度为25%时，即低聚半乳糖23.38%、低聚果糖1.46%、赤藓糖醇0.11%、罗汉果甜苷0.05%，炼乳感官评分最高为88，此时炼乳甜味纯正、无不良异味。当代糖溶液浓度为40%时，即低聚半乳糖37.41%、低聚果糖2.34%、赤藓糖醇0.17%、罗汉果甜苷0.08%，炼乳感官评分最低为66，因含糖量过高，此时炼乳过于甜腻、乳糖晶体颗粒感明显、出现砂砾口感、且产生肉眼可见沉淀。因此，最优炼乳代糖配比为25%。

2.3.2 质构分析 由图3可知，代糖溶液的硬度、浓稠度、黏性和内聚性与代糖溶液浓度呈正相关，且呈前期平稳上升，后期显著增大趋势。当代糖溶液浓度为25%时，硬度为(0.243 0±0.032 6) N，浓稠度为(2.265 0±0.123 6) s·N，黏性为(0.219 7±0.030 4) N，内聚性为(0.164 8±0.097 7) s·N，该添加浓度对代糖溶液质构影响较小。

由图4可知，代糖炼乳的硬度、浓稠度、黏性和内聚性与代糖配比浓度成正比。当代糖溶液浓度为25%时，硬度为(0.240±0.020) N，浓稠度为(2.377±0.175) s·N，黏性为(0.291±0.022) N，内聚性为(0.241±0.159) s·N。与未添加代糖的对照组相比，硬度相差0.139 N；浓稠度相差0.474 s·N；黏性相差0.228 N；内聚性相差0.142 s·N。

由图3和图4可知，除黏性外，代糖炼乳其余质构特性指标均较相应浓度代糖溶液有不同程度增加，表明代糖溶液是影响代糖炼乳质构特性的重要因素。代糖添加量与代糖炼乳质构指标增幅之间非线性对应。周頔等^[28]研究表明，添加少量低聚半乳糖即会引起浓缩乳制品增稠现象，而试验所得最优代糖配比中低聚半乳糖含量最

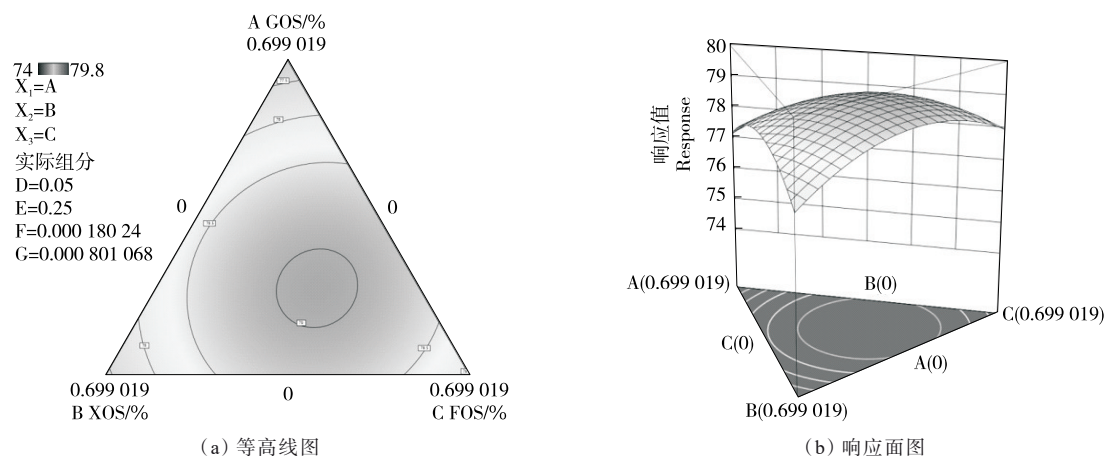


图1 各因素对感官评分影响的等高线图和响应面图

Figure 1 Contour and response surface plots showing effects of various factors on sensory scores

表 5 混料设计试验优化

Table 5 Mixture design experiment optimization

试验号	A/%	B/%	C/%	D/%	F/%	相似度/%	感官评分预测值	感官评分验证值
1	99.80	0.00	0.00	0.00	0.20	88.40	78.54	78.67
2	94.88	4.73	0.00	0.19	0.20	87.80	78.71	77.82
3	96.68	2.68	0.40	0.04	0.20	88.20	78.67	78.38
4	93.53	0.00	5.84	0.43	0.20	87.20	78.71	78.93
5	95.29	4.27	0.14	0.10	0.20	88.00	78.70	78.79

高(9.35%)。因此,低聚半乳糖浓度可能是影响代糖炼乳黏度的主要因素。当代糖添加量超过一定范围时,浓稠度和黏性指标均出现较大增幅,可能与低聚半乳糖溶解度相对较低有关。与其他指标相比,黏性在代糖添加量>20%后出现大幅度升高,表明代糖炼乳中各组分之间相互作用增强。常翠华等^[29]研究表明,增加代糖溶液浓度可增强组分分子之间相互作用,形成更多胶凝结构,提高炼乳黏性和浓稠度。随着代糖溶液浓度的增加,炼乳组织空腔数量随之减少^[30],低聚糖类与乳蛋白之间形成的作用键数量增加,从而增加了硬度。综合感官评价和质构特性变化规律分析,最优代糖添加量以25%为宜,该添加浓度下炼乳不仅感官评分最高,且与对照组相比黏度相关特性变化较小。添加量继续增加,质构特性指

标均开始出现大幅度上升,特别是浓稠度和黏性过大不利于生产实践中产品在管线中的流动。因此,综合比较感官和流变学特性,最佳添加量为25%。

2.3.3 褐变度和pH 由图5可知,随着代糖溶液浓度的增加,炼乳褐变度呈前期稳定上升后期下降的趋势,在添加量30%时达到最大值;pH呈逐渐下降趋势。当代糖溶液浓度为25%时,褐变度(OD₄₂₀)为1.23±0.03,与未添加代糖的对照组相比提高了0.45;与30%添加量下最大褐变度相比降低了0.14,但pH相近。

炼乳中乳蛋白及糖类会在生产过程的高温环节发生美拉德褐变。根据食用需求,其作用影响是双向的,一些产品需要通过其增色增香,而有些产品则需要尽量保持原有色泽风味^[31]。低聚糖、糖醇和高倍甜味剂的分子结

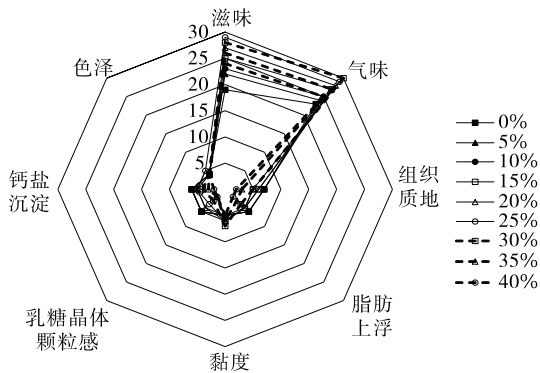


图2 代糖添加量对炼乳感官品质的影响
Figure 2 Effect of sugar substitute amount on the sensory quality of condensed milk

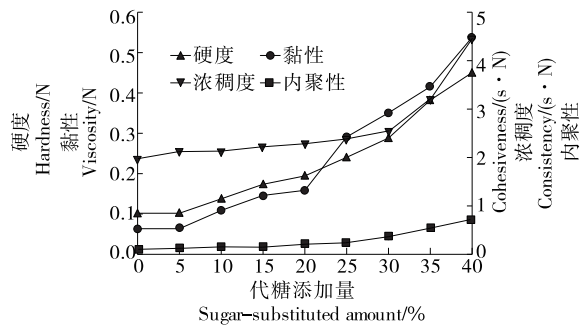


图3 代糖溶液质构特性
Figure 3 Texture characteristics of sugar substitute solution

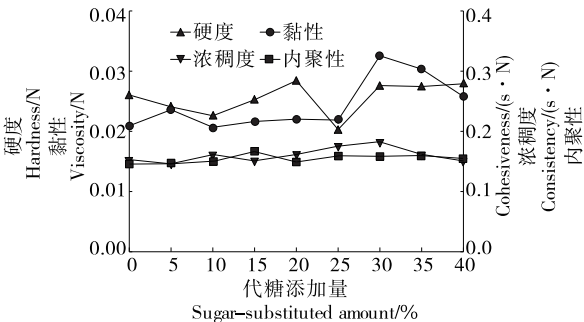


图4 代糖炼乳质构特性
Figure 4 Texture characteristics of sugar-substituted condensed milk

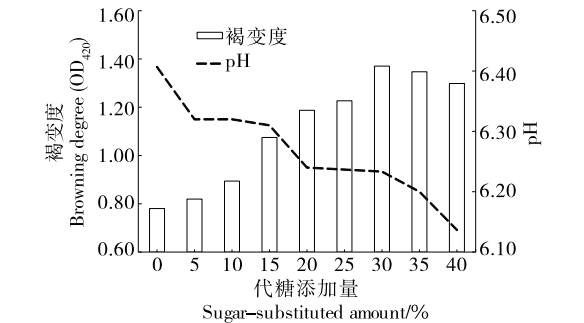


图5 代糖添加量对炼乳褐变度和pH的影响
Figure 5 Effects of sugar substitute amount on browning degree and pH of condensed milk

构均不同。其中,低聚糖由2~10个单糖分子组成,糖醇是糖分子中的醛基或酮基被还原后得到的多元醇类化合物,高倍甜味剂不含有还原糖的羟基或醛基。因此,与蔗糖和炼乳中原有的还原性二糖乳糖相比,代糖分子结构均不易发生美拉德褐变^[32]。Solaniilla等^[33-34]研究表明,羰-氨缩合具有pH依赖性,氨基在低pH体系中会质子化,不能进行亲核进攻,只有不带电的氨基能够与羰基缩合,因而酸性环境中羰-氨缩合速率较慢。试验发现25%的代糖溶液相比对照组可检出褐变,但在对产品形成相同pH影响条件下所产生的褐变程度较小,具有实际生产应用的优势和潜力。

3 结论

通过模糊数学感官评价结合D-最优混料设计优化得到的代糖配比为低聚半乳糖9.35%、低聚果糖0.59%、赤藓糖醇0.04%、罗汉果甜苷0.02%,在25%添加浓度下可使炼乳保持稳定的质构特性和较低褐变度,实现了炼乳减糖与营养强化的目标。试验通过D-最优混料设计与模糊数学结合,将低聚半乳糖添加到9.35%仍无可见沉淀,并将褐变增幅控制在可接受范围,修正了“低聚糖用量受限”的传统观点;同时证实0.02%罗汉果甜苷可协同掩盖高倍甜味剂后苦味,补充了天然抗氧化剂在代糖乳品中的感官修饰功能。但该研究未深入探讨代糖炼乳的长期稳定性及营养吸收效应,未来可通过加速试验和人体临床试验进一步验证产品品质与健康效益。

参考文献

- [1] Fang R S, Jiang H, Lin C Q, et al. Characterization and shelf stability of sweetened condensed milk formulated with different sucrose substitutes during storage[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134402.
- [2] Edwin Thanarajah S, Difeliceantonio A G, Albus K, et al. Habitual daily intake of a sweet and fatty snack modulates reward processing in humans[J]. Cell Metabolism, 2023, 35(4): 571-584.
- [3] 王林智,王春杨. 域外经验下高糖、高盐等食品健康税的立法研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 89-96.
Wang L Z, Wang C Y. Legislative research on health taxes on high sugar and high salt foods based on foreign experience[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 89-96.
- [4] Walton J, Bell H, Re R, et al. Current perspectives on global sugar consumption: definitions, recommendations, population intakes, challenges and future direction - CORRIGENDUM[J]. Nutrition Research Reviews, 2023, 36(1): 177-178.
- [5] 陈娟,何维彬,吕常旭,等. 赤藓糖醇玫瑰花风味酸奶的研制[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(6): 1959-1965.
Chen J, He W B, Lv C X, et al. Preparation of erythritol rose flavored yogurt[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(6): 1959-1965.
- [6] Delgado-Fernández P, Hernández-Hernández O, Olano A, et al.

- Probiotic viability in yoghurts containing oligosaccharides derived from lactulose (OsLu) during fermentation and cold storage[J]. International Dairy Journal, 2020, 102: 104621.
- [7] 姜毅康,董玲,刘鸿飞,等. 母乳低聚糖与婴幼儿健康关系研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 1-8.
Jiang Y K, Dong L, Liu H F, et al. Research advances on the association between human milk oligosaccharides and infant health[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 1-8.
- [8] Jouki M, Jafari S, Jouki A, et al. Characterization of functional sweetened condensed milk formulated with flavoring and sugar substitute[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(9): 5119-5130.
- [9] 刘少莉,雷霆,刘术明,等. 近红外光谱技术快速检测婴配乳粉GOS和FOS含量[J]. 核农学报, 2023, 37(12): 2434-2442.
Liu S L, Lei T, Liu S M, et al. Rapid determination of GOS and FOS content in infant milk powder by near infrared spectroscopy[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(12): 2434-2442.
- [10] 左齐乐,张文瑶,杨武龙,等. 糖醇类甜味剂的甜味与副味影响因素研究[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(3): 20-29.
Zuo Q L, Zhang W Y, Yang W L, et al. Study on factors of sweetness and side taste of sugar alcohol sweetener[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(3): 20-29.
- [11] 吉桂珍,石文杰,张莘莘,等. 近红外光谱法监测甜菊糖苷生产过程中乙醇浓度的应用研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(1): 300-305.
Ji G Z, Shi W J, Zhang P P, et al. Application of near infrared spectroscopy in monitoring ethanol concentration in stevia glycoside production[J]. China Food Additives, 2023, 34(1): 300-305.
- [12] 戴胜,汪惠丽. 天然甜味剂罗汉果甜苷的研究进展[J]. 中成药, 2023, 45(2): 503-509.
Dai S, Wang H L. Research progress on mogrosides as natural sweeteners[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(2): 503-509.
- [13] 王鹏,陈彦雄,赵圆圆,等. 基于模糊数学感官评价和混料设计对利口葡萄酒配方优化[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(2): 52-61.
Wang P, Chen Y X, Zhao Y Y, et al. Optimization of liqueur wine formula based on mixture design and fuzzy mathematics sensory evaluation[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2022, 58(2): 52-61.
- [14] 浙江熊猫乳品有限公司. RHB 301—2004 全脂加糖炼乳感官质量评鉴细则[S]. 北京:中国乳制品工业协会, 2004: 1-4.
Zhejiang Panda Dairy Co Ltd. RHB 301—2004 Sensory regulations of sweetened condensed milk[S]. Beijing: China Dairy Industry Association, 2004: 1-4.
- [15] 林子沁,吕芳娥,王宏宇,等. 基于模糊数学感官评价法优化燕麦怀山药复合饮料配方[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(10): 67-74.
Lin Z Q, Lü F E, Wang H Y, et al. Optimization of oat and Huai yam composite beverage formula based on fuzzy mathematical sensory evaluation method[J]. Storage and Process, 2025, 25(10): 67-74.
- [16] 付彩霞,钟洪浩,李军鹏,等. 基于模糊数学感官模型的低糖

- 柑橘果酱配方优化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(9): 157-163, 196.
- Fu C X, Zhong H H, Li J P, et al. Optimization of low-sugar citrus jam formulation based on fuzzy mathematical sensory model[J]. Food Research and Development, 2023, 44(9): 157-163, 196.
- [17] Mazi T A, Stanhope K L. Erythritol: an in-depth discussion of its potential to be a beneficial dietary component[J]. Nutrients, 2023, 15(1): 204.
- [18] 邓敏. 模糊数学评价结合响应面法优化麦芽糖醇桃酥配方[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(6): 46-50.
- Deng M. Formula optimization of maltitol walnut cake based on fuzzy mathematics evaluation and response surface method[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(6): 46-50.
- [19] 姚宇晨, 杨钊, 梁幼飞, 等. 甜味剂的甜度测量方法研究进展[J]. 甘蔗糖业, 2020, 49(4): 75-82.
- Yao Y C, Yang Z, Liang Y F, et al. Research progress on measurement methods of sweetness for sweeteners[J]. Sugarcane and Canesugar, 2020, 49(4): 75-82.
- [20] 吴芳彤, 曹倩荣, 吴广枫, 等. 基于模糊数学感官评价法和混料设计优化紫薯莜麦酒配方[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(17): 158-165.
- Wu F T, Cao Q R, Wu G F, et al. Optimized formulation of purple sweet potato and naked oats wine based on fuzzy mathematics sensory evaluation and mixture design[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(17): 158-165.
- [21] Khodashenas M, Jouki M. Optimization of stabilized probiotic Doogh formulation by edible gums and response surface methodology: assessment of stability, viability and organoleptic attributes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(9): 3 201-3 210.
- [22] 周颀, 徐升, 孙艳辉, 等. 紫薯对炼乳流变及质构特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(16): 97-103.
- Zhou D, Xu S, Sun Y H, et al. Effects of purple potato powder on rheological and textural properties of condensed milk[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(16): 97-103.
- [23] 姜雪峰, 毛娟, 徐巨涛, 等. 苹果品质评价模型的建立与验证[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(3): 69-77.
- Jiang X F, Mao J, Xu J T, et al. Establishment and verification of an evaluation model in apple quality[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(3): 69-77.
- [24] 吴爽, 王涵, 王展, 等. 米糠多糖—乳清分离蛋白美拉德反应及其产物表征[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 131-138.
- Wu S, Wang H, Wang Z, et al. Maillard reaction between rice bran polysaccharide and whey protein isolate and characterization of the reaction product[J]. Food Science, 2023, 44(4): 131-138.
- [25] 张敏, 布海丽且姆·阿卜杜热合曼, 姜露熙, 等. 基于模糊数学评价法优化黑木耳牛奶饅的工艺研究[J]. 发酵科技通讯, 2023, 52(1): 8-15.
- Zhang M, Buhlaqem A, Jiang L X, et al. Formula optimization of Auricularia auricula milk of Nang based on fuzzy mathematics evaluation[J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology, 2023, 52(1): 8-15.
- [26] Regnat K, Mach R L, Mach-Aigner A R. Erythritol as sweetener: wherefrom and whereto?[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(2): 587-595.
- [27] Mishra S, Mishra H N. Comparative study of the synbiotic effect of inulin and fructooligosaccharide with probiotics with regard to the various properties of fermented soy milk[J]. Food Science and Technology International, 2018, 24(7): 564-575.
- [28] 周颀, 徐登薇, 宋锐, 等. 低聚糖类益生元对炼乳品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(18): 5 887-5 894.
- Zhou D, Xu D W, Song R, et al. Effects of oligosaccharide prebiotics on the quality of condensed milk[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(18): 5 887-5 894.
- [29] 常翠华, 胡欣诺, 杨严俊. 蛋清蛋白颗粒填充对低脂酸奶物性特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 178-184.
- Chang C H, Hu X N, Yang Y J. Effect of egg white protein particle on physical properties of low-fat yogurt as filler[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 178-184.
- [30] Jafari S, Jouki M, Soltani M. Modification of physicochemical, structural, rheological, and organoleptic properties of sweetened condensed milk by maltodextrin, fructose, and lactose[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(4): 3 800-3 810.
- [31] 孙福犁, 徐慢, 崔和平, 等. 谷朊粉肽美拉德反应中间体的制备及风味形成能力研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 1-7.
- Sun F L, Xu M, Cui H P, et al. Preparation of Maillard reaction intermediates (MRIs) of gluten peptides-xylose and study on its flavor formation capacity[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 1-7.
- [32] Han D J, Lee B H, Yoo S H. Physicochemical properties of turanose and its potential applications as a sucrose substitute[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(3): 433-441.
- [33] Solanilla Duque J F, Carrera C, Patino J M R. Effect of pH on the interfacial and foaming properties of Maillard reaction-modified proteins[J]. Biophysical Chemistry, 2022, 291: 106906.
- [34] 邢贵鹏, 孙申宇, 黄卉, 等. 美拉德反应改良罗非鱼加工副产物熬煮液风味[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(5): 165-172.
- Xing G P, Sun S Y, Huang H, et al. Flavor improvement of tilapia-broth extraction by Maillard reaction[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(5): 165-172.