

模糊数学模型结合响应面法优化萌发藜麦乳工艺设计

周一鸣¹, 陆灏钰¹, 陈杰圣¹, 周小理^{1,2*}

(1. 上海应用技术大学香料香精化妆品学部, 上海 201418)

(2. 上海应用技术大学美丽中国与生态文明研究院上海高校智库, 上海 201418)

摘要: 模糊数学综合评价法是基于模糊数学建立的一种理想化评价模型。该研究以山西静乐黑藜麦为原材料, 探讨其在不同萌发阶段的关键营养物质含量的变化, 并运用单因素、响应面法与模糊数学综合评价法相结合, 经过萌发、调配等配方及工艺优化制得一款萌发藜麦乳。试验结果表明, 相较于未萌发藜麦, 萌发 36 h 后藜麦蛋白质含量增加了 11.65%, 达到 16.2 g/100 g, 灰分含量降低了 24.78%, 脂肪、淀粉含量均持续下降, 分别下降了 26.16% 和 27.9%。黄酮含量持续增加, 在 36 h 达到 3.83 mg/g, 是未萌发藜麦黄酮含量的 2.5 倍。综合分析可知, 藜麦最佳萌发时长为 36 h, 且萌发藜麦乳的最佳配方添加量为: 50.50% 萌发藜麦汁, 0.10% 甜菊糖苷, 0.20% 复配乳化稳定剂 (结冷胶:蔗糖酯=2:1), 此时感官评分为 87.26 分, 所制得的萌发藜麦乳整体色泽均匀、甜度适中、赋有藜麦自然清香。

关键词: 藜麦; 萌发; 模糊数学法; 响应面分析; 工艺设计

文章编号: 1673-9078(2023)09-223-232

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.9.0798

Optimization of the Process Design for Germinated Quinoa Milk Drink by Fuzzy Mathematical Model Combined with Response Surface

Methodology

ZHOU Yiming¹, LU Haoyu¹, CHEN Jiasheng¹, ZHOU Xiaoli^{1,2*}

(1. School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

(2. University Think Tank of Shanghai Municipality, Institute of Beautiful China and Ecological Civilization, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: The Fuzzy mathematics comprehensive evaluation method is an ideal evaluation model based on fuzzy mathematics. In this study, the black quinoa from the Jingle town, Shanxi Province was used as the raw material for studying the changes of its key nutrients at different germination stages of quinoa. A germinated quinoa-based milk drink was prepared after the optimization of quinoa germination and milk drink formulation and processing by the single factor experiments and response surface tests combined with fuzzy mathematics comprehensive evaluation method. The experimental results showed that compared with ungerminated quinoa, the protein content of the germinated quinoa increased by 11.65% after germination for 36 h (up to 16.2 g/100 g), whilst the ash content decreased by 24.78%, and the fat and starch contents decrease steadily (by 26.16% and 27.9%, respectively). The flavonoid content increased continuously, reaching 3.83 mg/g after 36 h (which was 2.5 times that of the ungerminated quinoa). The comprehensive analysis revealed that the optimal germination time for black quinoa was 36 h, and the optimized formula of quinoa milk was: germinated quinoa juice, 50.50%; stevioside, 0.10%; composite emulsion

引文格式:

周一鸣, 陆灏钰, 陈杰圣, 等. 模糊数学模型结合响应面法优化萌发藜麦乳工艺设计[J]. 现代食品科技, 2023, 39(9): 223-232

ZHOU Yiming, LU Haoyu, CHEN Jiasheng, et al. Optimization of the process design for germinated quinoa milk drink by fuzzy mathematical model combined with response surface methodology [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 223-232

收稿日期: 2022-06-23

基金项目: 上海市科委“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目 (22010504000); 上海市自然科学基金项目 (20ZR1455800); 国家现代农业产业体系建设专项 (CARS-07-E-2)

作者简介: 周一鸣 (1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与功能性食品, E-mail: zhouyimsit@163.com

通讯作者: 周小理 (1957-), 女, 学士, 教授, 研究方向: 食品新资源深度开发与利用, E-mail: zhouxlsit@163.com

stabilizer (gellan gum: sucrose ester = 2 : 1), 0.20%. The sensory score of such drink was 87.26, and the germinated quinoa milk had a uniform color, moderate sweetness and natural quinoa fragrance.

Key words: quinoa; germination; fuzzy mathematics; response surface analysis; process design

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.), 是一种起源于玻利维亚和秘鲁安第斯地区的四倍体植物, 对不同环境具有良好的适应性, 种植、食用历史悠久^[1,2]。与传统作物相比, 藜麦具有更高的营养价值, 也被认为是一种非常有前途的世界性栽培品种。藜麦蛋白质含量丰富, 氨基酸比例均衡, 包含人体日常生活需要的全部必需氨基酸, 其中赖氨酸和蛋氨酸是植物蛋白最易缺乏的两种氨基酸^[3]。藜麦蛋白主要由 2S 白蛋白 (35%) 和 11S 球蛋白 (37%) 两种可溶性蛋白组成, 而不溶性蛋白 (谷蛋白和醇溶蛋白) 含量较少, 其中, 可溶性蛋白中所含的二硫键不但对蛋白质的空间结构有稳定作用, 还对蛋白质生物活性的维持及调节具有十分重要的意义^[4-6]。藜麦与目前市面上绝大多数的谷物不同, 其蛋白质的品质可媲美蛋类、肉类等动物性蛋白质, 是一种优质且具有可持续性的植物蛋白资源, 可作为新食品原料代替小麦蛋白、大豆蛋白等应用到加工食品中, 甚至在制药行业中也具有作为蛋白质替代品的潜力。研究表明, 藜麦蛋白可以降低常见疾病的患病风险并促进人体健康^[7-9]。同时, 藜麦蛋白质中无乳糜泻相关序列, 是麸质食物敏感者的合理膳食选择^[10]。此外, 目前已有研究表明萌发是改善谷物品质的一种既有效又经济的方法, 适当的萌发可生成多种生物活性物质, 提高种子的营养价值^[11-13]。

早在 90 年代藜麦就已经被引入我国, 但直到近几年, 随着种植范围的扩大和产量的逐年增长才逐渐走入人们的视线。目前, 藜麦的食用方式多为煮熟拌入沙拉, 或是磨成粉用于制作面包、饼干等烘焙食品^[14,15], 更多产品的研发还存在空白, 亟需进一步探索。

感官评价作为一种最直接地描述和判断产品质量的指标, 在质量控制、产品研究和开发方面发挥着重要的作用。传统意义上的食品感官评价往往会由于主体的个人因素对结果造成影响, 属性界限不清晰导致评价不易实现量化, 且权重设定方式较为刻板, 局限性大。模糊感官是一种能够减轻因人类行为复杂性而导致的不确定性、不精确性的重要工具, 它可以通过算法知晓人们对某种食物的接受范围、偏好顺序以及强、弱属性等。人的感知通常是模糊的, 评价者的意见也常常以语言形式出现。因此在模拟感官模型中, 使用语言变量 (如不满意、好、优秀等) 通常被用于描述独立变量 (如颜色、香气、味道、口感、便利等) 和依赖变量 (如接受、拒绝、排名) 代替数值更为现

实^[16,17], 其具有结果清晰、客观科学、系统性强等特点, 因而这种方法在现代食品的感官评定中广为推崇^[18,19]。

本文选用来自“中国藜麦之乡”-山西省静乐县的黑藜麦, 经萌发、液化、糖化和稳定性调配等工艺制得萌发藜麦乳, 然后通过建立模糊数学评价模型对萌发藜麦乳的可接受程度进行了研究, 结合响应面试验结果分析最终得到萌发藜麦乳的最佳配方, 制得一款营养与风味俱佳的萌发藜麦乳。本研究不仅可为藜麦市场开拓提供新产品, 同时也为藜麦高值化提供理论依据, 促进当地农户增收。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑藜麦, 购自山西忻州静乐县; α -淀粉酶 (酶活力 50 000 U/g)、糖化酶 (酶活力 50 000 U/g), 均购自山东隆科特酶制剂有限公司; 食品级甜菊糖苷、蔗糖酯、柠檬酸、柠檬酸钠, 均购自柳州爱格富食品科技股份有限公司; 食品级结冷胶, 购自帝斯曼润邦 (内蒙古) 生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

PT-20C 型管板组合式杀菌机, 上海沃迪智能装备股份有限公司; Lab-1B-80 型真空冷冻干燥机, 北京博医康试验仪器有限公司; GYB500-15S 型高压均质机, 上海东华高压均质机厂; ATN-100 型凯氏定氮仪, 上海洪纪仪器设备有限公司; KDN-04D 型消化炉, 上海洪纪仪器设备有限公司等。

1.3 方法

1.3.1 藜麦萌发及其营养成分测定

分别将萌发 0、12、24、36、48、60 h 的藜麦冻干、磨粉并过 60 目筛后, 测定不同萌发时间蛋白质、灰分、脂肪、淀粉以及黄酮等藜麦关键营养成分含量的变化。根据营养成分的重要性进行权重的分配, 对蛋白质、黄酮等对人体有益的生物活性成分分别赋予 35% 的权重, 而灰分、脂肪、淀粉等常规营养物质分别赋予 10% 的权重, 最终依据加权平均分筛选出藜麦的最佳萌发时间。

其中, 蛋白质含量参照 GB 5009.5-2016 《食品中蛋白质的测定-凯氏定氮法》^[20]进行测定, 灰分含量参

照 GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定-食品中总灰分的测定》^[21]进行测定,脂肪含量参照 GB 5009.6-2016《食品中脂肪的测定-索氏抽提法》^[22]进行测定,淀粉含量参照 GB 5009.9-2016《食品中淀粉的测定-酸水解法》^[23]进行测定;黄酮含量测定方法参照李金辉等^[24]。

具体提取方法为:称取 0.5 g 样品,采用 $\varphi=75\%$ 乙醇溶液定容至 10 mL,65 °C 水浴提取 30 min,5 500 r/min 条件下离心 10 min 后取上清液制得黄酮提取液进行测定。

1.3.2 萌发藜麦乳工艺流程

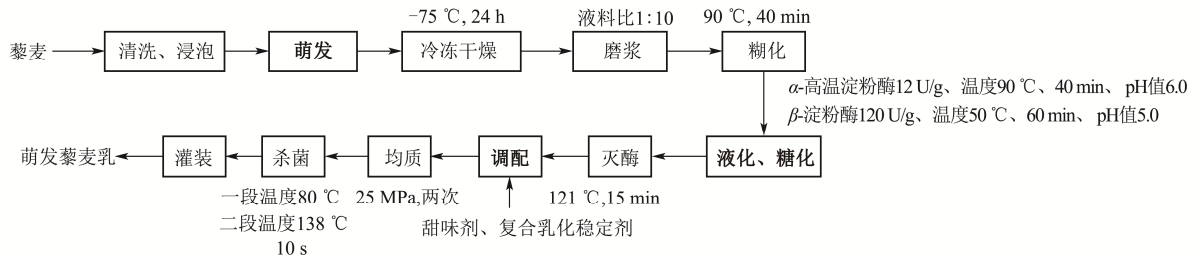


图 1 萌发藜麦乳工艺流程图

Fig.1 Germinated quinoa-based beverage process flowdiagram

1.4 模糊数学综合感官评价法模型建立

1.4.1 评价因素集 U 的确定

以萌发藜麦乳的外观、气味、滋味、组织状态为评价因素集 U, $U=\{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ 。

U_1 =外观:色泽 U_{11} , 颜色均匀度 U_{12} ;

U_2 =气味:香气 U_{21} , 异味 U_{22} ;

U_3 =滋味:颗粒感 U_{31} , 甜味 U_{32} ;

U_4 =组织状态:流动性 U_{41} ; 沉淀 U_{42} 。

1.4.2 评价指标集权重系数 X 的计算

参照王玉宁、刘士伟等^[25,26]的方法并稍作修改,本文采用专业人员调查及大众问卷调查相结合的方法进行权重系数的计算。由于两类人群的经验及认知不同,因此首先采取强制决策法将不同的权重占比分配给这两类人群,专业人员为 0.6,普通人员为 0.4。其中专业人员为经过培训的品评人员,共 10 人,普通人员为随机挑选的大众品评员,共 50 人。专业人员与普通人员的男女人数分别占总人数的一半。每两份样品品评之间均需漱口,每位品评员在独立房间进行品评打分,确保不会影响各自的判断,权重的计算公式如下。

$$X_i = \frac{\sum(a_j \times n_{ij})}{N \sum a_j} \quad (1)$$

式中:

X_i ——第 i 个指标的权重;

a_j ——指标重要程度赋值;

n_{ij} ——选择第 i 个指标的重要程度为 j 的人数;

N ——参加调查的总人数。

1.4.3 评价对象集 M 的确定

M 为评价对象集, $M=\{M_1, M_2, M_3, \dots, M_j\}$, M_j 代表响应面设计中各组样品的综合评价,其中 $j=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17$ 。

1.4.4 评语集 V 的确定

拟定合适的分值区域,并使之与评语集 V 一一对应,最终可将不同人群的评价结果量化为具体分值。将萌发藜麦乳的感官评价评语集设定为: $V=\{V_1, V_2, V_3, V_4\}$; V_1 =优秀, V_2 =良好, V_3 =一般, V_4 =不佳。依照清晰质量等级边界模糊化法,为了使分值区域实现清晰化,取每段分值区域的中间值作为相对应的分值,见表 1。

表 1 评语集与分值对应表

Table 1 The corresponding table of evaluation sets and score

areas				
评语集	优秀	良好	一般	不佳
分值区域	90~100	80~90	60~80	0~60
边界清晰化	95	85	70	30

1.4.5 模糊矩阵的形成

按照 GB/T 16291.1-2012《感官分析选拔、培训与管理评价员一般导则第 1 部分:优选评价员》^[27]、GB/T 16291.2-2010《感官分析选拔、培训和管理评价员一般导则第 2 部分:专家评价员》^[28]对感官评价人员进行培训、考核与筛选,最终确定由 10 名品评员(5 男 5 女)组成专业模糊综合品评小组。

感官评价人员分别从以上评价因素集的各方面进行评价。将个人评价结果汇总于评价指标集权重计算结果表中,将相同评语的评价人数除以参与评价的总人数算得评语隶属度 r_{ij} ,构成评价矩阵 R_{ij} 。

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{pmatrix} \quad (2)$$

1.4.6 模糊评判方法

参考刘赵、刘敏等^[29,30]的方法并稍作修改, 依据模糊变换原理: "M=X·R"。其中, M 为上述样品的综合评价集; X 为权重集; R 为评价矩阵。

$$M_i = (X_1 X_2 \cdots X_n) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:

$$M_i = (X_1 \times r_{i1}) + (X_2 \times r_{i2}) + \dots + (X_n \times r_{ij})$$

最后依照表 1 中每个评语集所对应的边缘清晰化分值, 计算出萌发藜麦乳最终的综合评价分值 $Z=M \cdot V$ 。

1.5 萌发藜麦乳配方响应面优化试验

1.5.1 单因素试验

以感官评价为指标, 初步探究萌发藜麦汁、甜菊糖苷、复配乳化稳定剂三因素对萌发藜麦乳感官评价的影响。探究萌发藜麦汁添加量(质量分数为 30%、40%、50%、60%、70%)时, 甜菊糖苷及复配乳化稳定剂添加量分别固定为 0.10%、0.20%, 复配乳化稳定剂添加比例为结冷胶:蔗糖酯=1:1; 探究甜菊糖苷添加量(质量分数为 0.06%、0.08%、0.10%、0.12%、0.14%)时, 萌发藜麦汁及复配乳化稳定剂添加量分别固定为 50%、0.20%, 复配乳化稳定剂添加比例为结冷胶:蔗糖酯=1:1; 探究复配乳化稳定剂添加量(质量分数为 0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%)时, 萌发藜麦汁及甜菊糖苷添加量分别固定为 50%、0.10%, 复配乳化稳定剂添加比例为结冷胶:蔗糖酯=1:1。探究复

配乳化稳定剂添加比例(3:1、2:1、1:1、1:2、1:3)时, 萌发藜麦汁、甜菊糖苷及复配乳化稳定剂添加量分别固定为 50%、0.10%、0.20%。每一项试验均进行三次重复, 以确定各因素的适当范围。

1.5.2 响应面试验

表 2 响应面试验因素水平设计

Table 2 Response surface test factor level design

因素	水平		
	-1	0	1
A 萌发藜麦汁/%	40	50	60
B 甜菊糖苷/%	0.08	0.10	0.12
C 复配乳化稳定剂/%	0.15	0.20	0.25

以单因素试验结果为基础, 依照 Box-Behnken 设计的基本原理, 该因素水平设计如表 2, 以萌发藜麦汁添加量(A)、甜菊糖苷添加量(B)以及复配乳化稳定剂添加量(C)3个因素作为自变量, 以外观 U_1 、气味 U_2 、滋味 U_3 、组织状态 U_4 的模糊数学感官评分 Z 为响应变量进行响应面回归分析, 通过回归分析, 得到萌发藜麦乳的最佳工艺设计。

1.6 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 22 进行单因素 ANOVA 检验, 采用 Origin 2018 处理数据并作图。所有试验均重复三次, 数据用平均值±标准差表示, $P < 0.05$ 为差异性显著。

2 结果与讨论

2.1 藜麦最佳萌发时间的确定

表 3 萌发各阶段藜麦关键营养物质含量的变化

Table 3 Changes of key nutrient contents of quinoa at different germination stages

萌发时间/h	营养物质				
	蛋白质/(g/100 g)	灰分/(g/100 g)	脂肪/(g/100 g)	淀粉/(g/100 g)	黄酮/(mg/g)
0	14.51±0.17 ^b	3.39±0.06 ^a	6.27±0.11 ^a	61.19±0.04 ^a	1.52±0.15 ^f
12	9.26±0.83 ^c	3.18±0.06 ^b	5.85±0.12 ^b	57.87±0.26 ^b	2.06±0.04 ^e
24	13.37±0.10 ^d	2.82±0.91 ^c	5.59±0.06 ^c	54.65±0.09 ^c	2.38±0.04 ^d
36	16.20±0.15 ^a	2.55±0.72 ^d	5.51±0.09 ^c	48.20±0.09 ^d	3.83±0.03 ^e
48	14.42±0.16 ^b	2.61±0.35 ^d	5.12±0.09 ^d	45.84±0.19 ^e	4.05±0.05 ^a
60	13.93±0.17 ^c	2.65±0.91 ^d	4.63±0.14 ^e	44.12±0.07 ^f	3.42±0.11 ^b

注: 表中数值为平均值±标准差 ($n=3$), 同列右肩不同的小写字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

从表 3 中可以看出, 藜麦中所含蛋白质在萌发期间会经历一个先降低后升高, 最后再降低的过程。当藜麦的萌发时间达到 36 h 时, 其蛋白质含量达到峰值 16.24 g/100 g。按照谷物萌发规律将萌发阶段分为三个时期, 初期、中期和后期。萌发初期 (0~12 h),

藜麦中的蛋白质分解以提供能量, 因此蛋白质含量降低。藜麦萌发的中期阶段 (12~36 h), 贮藏在籽粒中的蛋白质在对应蛋白酶的激活作用下, 被分解为小分子氨基酸等含氮物质, 这些物质在运输至新芽的过程中合成了新的蛋白质, 从而使蛋白质含量升高。萌发

后期 (36~60 h), 为了维持芽的生长, 蛋白酶的活性加强, 导致蛋白质水解的速度大于氨基酸重新合成新蛋白质的速度, 蛋白质含量逐渐下降^[31]。这与苏艳玲等^[32]认为藜麦萌发过程中蛋白质含量始终呈上升趋势的结果存在一些差异, 可能是由于藜麦生长环境及萌发条件不同所导致的。Piuel 等^[33]发现三种不同颜色藜麦的蛋白质含量均随着萌发天数的增加先升高后降低, 尽管各品种之间蛋白质含量存在一些差异, 但是藜麦萌发过程中蛋白质含量的变化趋势大体相似, 这与本文的研究结果基本吻合。

藜麦中的灰分含量在未萌发时最高, 萌发至 36 h 降低了 24.78%。导致这个变化的原因可能是铁、钠、钾等矿物质元素在萌芽期间从化合物状态转变为单一游离的元素状态, 在发芽时连续喷水导致矿物元素溶解于水中造成大量流失, 从而使这些游离矿物质元素的含量随之降低, 最终造成总灰分的含量降低^[34]。藜麦中的脂肪和淀粉含量均与萌发时间呈负相关, 可能

是由于藜麦在发芽过程中, 脂肪酶及淀粉酶活性增强, 通过水解使其含量降低^[35]。Suárez-estrella 等^[36]也发现萌发 12~48 h 的藜麦籽粒中的 α -淀粉酶活性显著增加。藜麦萌发过程中黄酮含量持续上升, 并在 48 h 时含量达到未萌发时的 2.7 倍 (4.05 mg/g), 这可能是由于藜麦在萌发过程中呼吸作用加强, 使得黄酮生物合成的关键酶苯丙氨酸氨基裂解酶含量显著上升, 促进了黄酮的合成^[37]。

最终得到加权平均分排序为: 36 h>0 h>48 h>24 h>60 h>12 h。据此筛选出藜麦的最佳萌发时间为 36 h。

2.2 模糊数学综合感官评价模型的建立

2.2.1 模糊数学综合评价因素 U 及对应权重 X 的确定

通过对各项数据的整理与统计分析, 确定萌发藜麦乳感官评价的多级因素及其所对应的权重占比、感官评价的具体指标, 如表 4。

表 4 权重计算结果及感官评价具体标准

Table 4 Weight calculation results and specific sensory evaluation criteria

一级因素 (权重占比)	二级因素 (权重占比)	具体指标	评语集
外观 U_1 (0.23)	色泽 U_{11} (0.55)	乳白色, 有光泽	优秀
		乳白色, 较有光泽	良好
		浅黄色, 无光泽	一般
		异常色, 无光泽	不佳
	颜色均匀度 U_{12} (0.45)	颜色均匀度强	优秀
		颜色均匀度较强	良好
		颜色均匀度较弱	一般
		颜色浑浊不均匀	不佳
气味 U_2 (0.28)	香气 U_{21} (0.43)	藜麦清香	优秀
		藜麦香气淡	良好
		几乎无藜麦香气	一般
		完全无藜麦香气	不佳
	异味 U_{22} (0.57)	无异味	优秀
		无明显异味, 略微豆腥味	良好
滋味 U_3 (0.33)	颗粒感 U_{31} (0.41)	有异味, 较重豆腥味	一般
		严重异味	不佳
		无颗粒感	优秀
	甜味 U_{32} (0.59)	几乎无颗粒感	良好
		有颗粒感	一般
		颗粒感较重	不佳
		甜味适中	优秀
		稍微偏甜或偏淡	良好
		偏甜或偏淡	一般
		过甜或过淡	不佳

续表 4

一级因素 (权重占比)	二级因素 (权重占比)	具体指标	评语集
组织状态 U_4 (0.16)	流动性 U_{41} (0.52)	流动性好	优秀
		流动性较好	良好
		流动性较差	一般
		流动性差	不佳
组织状态 U_4 (0.16)	沉淀 U_{42} (0.48)	底部无沉淀	优秀
		底部沉淀较少	良好
		底部沉淀较多	一般
		底部沉淀严重	不佳

2.2.2 模糊评语隶属度的确定

通过 10 名专业品评员对 17 个响应面试样品的评价结果统计, 得出评语隶属度。其中以 1 号样品为例, 如表 5。其余 16 个样品按照相同的方式进行统计。

表 5 1 号样品各项指标及对应评语隶属度

Table 5 Membership degree of each index of sample 1

一级因素	权重	二级因素	权重	评语隶属度			
				优秀	良好	一般	不佳
U_1	0.23	U_{11}	0.55	0.5	0.5	0	0
		U_{12}	0.45	0.6	0.3	0.1	0
U_2	0.28	U_{21}	0.43	0.6	0.2	0.2	0
		U_{22}	0.57	0.5	0.3	0.2	0
U_3	0.33	U_{31}	0.41	0.6	0.2	0.1	0.1
		U_{32}	0.59	0.6	0.3	0.1	0
U_4	0.16	U_{41}	0.52	0.5	0.3	0.1	0.1
		U_{42}	0.48	0.5	0.3	0.1	0.1

2.2.3 评价结果计算

对于评价指标“外观” U_1 , 根据模糊变换法则, 计算出的评价结果为:

$$M_{U_1} = X_{U_1} \cdot R_{U_1} = (0.55 \quad 0.45) \cdot \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \end{pmatrix} = (M_1, M_2, M_3, M_4) \quad (4)$$

式中:

$$M_1 = (0.55 \times 0.5) + (0.45 \times 0.6) = 0.545$$

$$M_2 = 0.41, M_3 = 0.045, M_4 = 0$$

$$M_{U_1} = (0.545, 0.41, 0.045, 0)$$

同理计算 M_{U_2} 、 M_{U_3} 、 M_{U_4} , 分别归一化后得:

$$M_{U_2} = (0.543, 0.257, 0.2, 0), M_{U_3} = (0.6, 0.259, 0.1, 0.041),$$

$$M_{U_4} = (0.5, 0.3, 0.1, 0.1)$$

此时, M_{U_1} 、 M_{U_2} 、 M_{U_3} 、 M_{U_4} 组成一个全新的评语隶属度矩阵 R :

$$R = \begin{pmatrix} M_{U_1} \\ M_{U_2} \\ M_{U_3} \\ M_{U_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.545 & 0.41 & 0.045 & 0 \\ 0.543 & 0.257 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.259 & 0.1 & 0.041 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix}$$

用 U 的权重集 $X = (0.23, 0.28, 0.33, 0.16)$, 与之相乘, 得到评判结果:

$$M = X \cdot R = (0.23 \quad 0.28 \quad 0.33 \quad 0.16) \cdot \begin{pmatrix} 0.545 & 0.41 & 0.045 & 0 \\ 0.543 & 0.257 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.259 & 0.1 & 0.041 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix} = (0.555 \quad 0.3 \quad 0.115 \quad 0.03)$$

代入相应的评语集 $V = \begin{pmatrix} \text{优秀} \\ \text{良好} \\ \text{一般} \\ \text{不佳} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 95 \\ 85 \\ 70 \\ 30 \end{pmatrix}$ 计算, 可得

萌发藜麦乳得分 $Z = M \cdot V = 95 \times 0.555 + 85 \times 0.3 + 0 \times 0.115 + 0 \times 0.03 = 87.2$ (分)。

同理, 计算其他样品得分。

2.3 萌发藜麦乳工艺响应面优化

2.3.1 单因素试验结果

如图 2 所示, 萌发藜麦汁、甜菊糖苷、复配乳化稳定剂添加量的不断升高均分别导致萌发藜麦乳的感官评分先急速上升后迅速下降, 表明各个因素都对萌发藜麦乳的感官品质产生重大影响。萌发藜麦汁添加量从 30% 增加至 50% 时, 萌发藜麦乳的感官评分增加了 7.5%, 但是随着萌发藜麦汁添加量逐渐超过 50% 时, 感官评分却随之降低。这是因为萌发藜麦汁添加量的增加使萌发藜麦乳整体色泽更加明亮、均匀, 并具有自然的藜麦清香; 但若添加过量, 则会导致其豆腥味重, 色泽深, 从而影响感官评分。甜菊糖苷添加量达到 0.10% 时, 萌发藜麦乳的感官评分最高。适当添加甜菊糖苷有利于增强风味, 能够适当降低萌发藜麦乳的粘稠度, 延长货架期。然而若过量添加甜菊糖苷, 则会导致萌发藜麦乳的甜苦味浓重, 掩盖了藜麦的独特风味, 进而影响感官评分, 这一点与陆阳等^[38]的研究结果基本一致。

当结冷胶与蔗糖酯的添加比例在 3:1~2:1 之间时, 萌发藜麦乳的感官评分呈现出明显的上升趋势, 但在

达到最高值后, 感官评分随着结冷胶与蔗糖酯比例的降低逐渐降低, 可能是结冷胶与蔗糖酯比例为 2:1 时刚好使萌发藜麦乳达到稳定状态, 而随着比例的降低, 萌发藜麦乳过于浓稠导致感官评分降低。在萌发藜麦乳中添加 0.2% 的复配乳化稳定剂, 其感官评分最高。这是因为随着乳化稳定剂用量的增加, 萌发藜麦乳的稳定性变强, 不易分层, 产品的外观得到大大改善; 但是添加量过多则会导致其过于粘稠而影响口感及风味, 进而降低感官评分。黄玉坤等^[39]发现, 乳化稳定剂添加量过多会使产品过于黏腻、口感变差, 添加量过少则口感不细腻且不稳定, 这与本文的研究结果相符合。通过单因素试验方差分析, 复配乳化稳定剂比例对萌发藜麦乳的感官评分不显著 ($P>0.05$), 因此选取萌发藜麦汁添加量、甜菊糖苷添加量和复配乳化稳定剂添加量三个因素进行后续响应面试验。由于复配乳化稳定剂复配比例为结冷胶:蔗糖酯=2:1 时感官评分最高, 因此选择此条件进行后续试验。

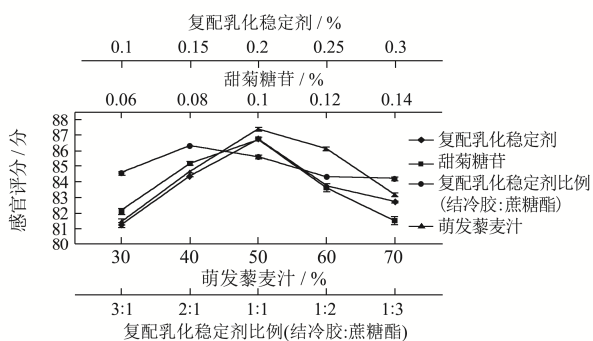


图 2 不同因素对萌发藜麦乳感官评分的影响

Fig.2 Impact of different factors on sensory scores of germinated quinoa-based beverage

2.3.2 响应面试验结果

将模糊数学模型计算出的感官评分填入表 6, 即为 Box-Behnken 试验设计所对应的结果。以萌发藜麦乳感官评价分值作为评价指标, 经响应面分析得出萌发藜麦乳的最佳工艺配方。其中, 响应面设计中 A 代表萌发藜麦汁添加量, B 代表甜菊糖苷添加量, C 代表复配乳化稳定剂添加量。

2.3.3 响应面试验数据处理及分析

通过响应面分析软件 Design-Expert 12 分析萌发藜麦乳工艺数据, 得到模糊数学综合感官评分与自变量 A、B、C 的多元拟合回归方程为:

$$Y=87.02+0.3225A-1.66B-0.1525C+0.655AB+1.04AC-0.31BC-1.45A^2-3.12B^2-1.88C^2$$

通过对萌发藜麦乳综合感官评分进行方差分析, 分析结果如表 7。其中, 模型的 $P<0.0001$, 达到了极显著水平, 失拟项 ($P=0.6636>0.05$) 不显著, 具

有较好的响应面回归方程拟合程度。由模型相关系数 $R^2=0.9902$, 校正系数 $R^2_{Adj}=0.9776$ 可知, 预测值和观察值具有高度的相关性, 可以用于分析和预测萌发藜麦乳配方中的最佳添加量^[40]。

表 6 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 6 Design and results of Box-Behnken experiments

试验号	因素			感官评分/分
	A	B	C	
1	0	0	0	87.2
2	1	-1	0	84
3	0	-1	-1	83.46
4	0	-1	1	83.85
5	-1	-1	0	84.29
6	-1	0	-1	84.78
7	1	0	-1	82.98
8	0	0	0	86.44
9	0	0	0	87.57
10	-1	0	1	82.33
11	0	0	0	86.86
12	0	0	0	87.05
13	1	0	1	84.67
14	0	1	1	79.96
15	0	1	-1	80.81
16	1	1	0	81.93
17	-1	1	0	79.6

根据 P 值大小可以看出, 一次项 B 对萌发藜麦乳感官评分的影响达到了极显著 ($P<0.01$), 因素 A 达到了显著水平 ($P<0.05$)。根据一次项 F 值的大小可以判断出各试验因素对萌发藜麦乳感官品质影响由大到小依次是: B (甜菊糖苷添加量) > A (萌发藜麦汁添加量) > C (复配乳化稳定剂添加量)。因素 AC 对萌发藜麦乳感官评分影响非常明显, 达到了极显著水平 ($P<0.01$), 可能是由于萌发藜麦汁和复配乳化稳定剂添加量交互作用, 起到加强饮料的稳定性的效果, 改善萌发藜麦乳的外观。因素 AB 对饮料感官品质的影响为显著水平 ($P<0.05$), 这是因为萌发藜麦汁添加量和甜菊糖苷添加量的交互作用, 能使萌发藜麦乳甜度适中、状态稳定, 提升萌发藜麦乳的口味; 而甜菊糖苷添加量和复配乳化稳定剂添加量的交互作用并不显著。

通过对响应面 3D 图和等高线图的分析, 可以直接观察到各因素之间的交互作用, 根据拟合出的二元回归方程绘制三维响应曲面和二维等高线图, 进一步分析萌发藜麦汁、甜菊糖苷、复配乳化稳定剂添加量对感官评分的相互作用^[41,42]。图 3、5 中分别随着萌发

藜麦汁和甜菊糖苷添加量、萌发藜麦汁和复配稳定乳
化剂添加量的增加,模糊感官评分首先呈现增加趋势,
随后又降低,可以看出此时的三维曲面坡度十分陡峭。

等高线接近椭圆形,说明在两组试验中两因素的交互
作用分别达到显著水平。

表 7 回归模型方差分析

Table 7 ANOVA for regression models

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	100.85	9	11.21	78.73	<0.000 1	**
A-萌发藜麦汁添加量	0.832 1	1	0.832 1	5.85	0.046 2	*
B-甜菊糖苷添加量	22.11	1	22.11	155.36	<0.000 1	**
C-复配稳定乳 化剂添加量	0.186 1	1	0.186 1	1.31	0.290 5	
AB	1.69	1	1.72	12.06	0.010 4	*
AC	4.28	1	4.28	30.11	0.000 9	**
BC	0.384 4	1	0.384 4	2.7	0.144 3	
A ²	8.85	1	8.85	62.16	0.000 1	**
B ²	40.97	1	40.97	287.89	<0.000 1	**
C ²	14.95	1	14.95	105.06	<0.000 1	**
残差	0.996 3	7	0.142 3			
失拟项	0.298 6	3	0.099 5	0.570 5	0.663 6	
纯误差	0.697 7	4	0.174 4			
总离差	101.85	16				

注: **表示影响极显著 ($P<0.01$); *表示影响显著 ($P<0.05$)。

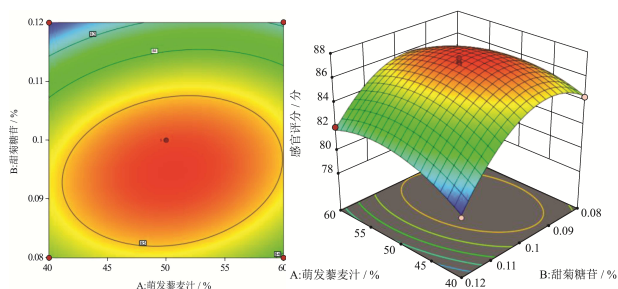


图 3 萌发藜麦汁、甜菊糖苷添加量交互对萌发藜麦乳感官评分的影响

Fig.3 Impact of interaction between germinated quinoa juice and stevioside addition on sensory scores of germinated quinoa-based beverage

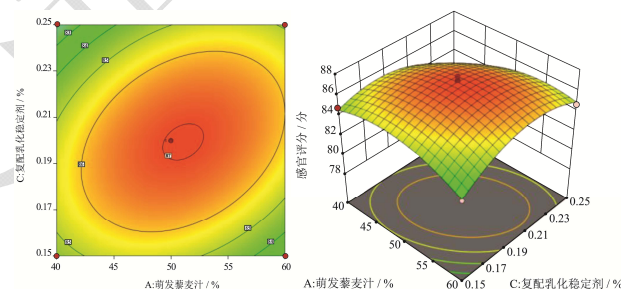


图 5 萌发藜麦汁、复配乳化稳定剂添加量交互对萌发藜麦乳感官评分的影响

Fig.5 Impact of interaction between the amount of germinated quinoa juice and compound emulsion stabilizer on sensory scores of germinated quinoa-based beverage

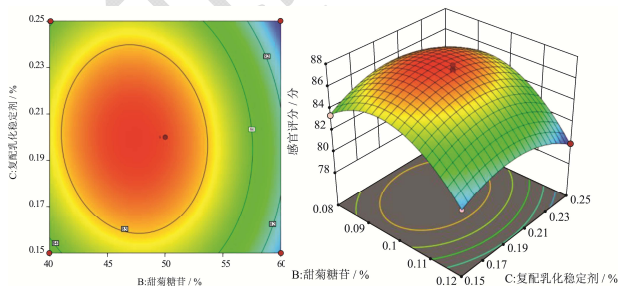


图 4 甜菊糖苷、复配乳化稳定剂添加量交互对萌发藜麦乳感官评分的影响

Fig.4 Impact of interaction of stevioside and compound emulsion stabilizer addition on sensory scores of germinated quinoa-based beverage

而图 4 中随着甜菊糖苷和复配稳定乳
化剂添加量的增加,模糊感官评分虽然总体也呈现先增加后减少
的趋势,但 3D 曲面坡度并不陡峭,反而较为平缓,
且等高线趋向于圆形,说明甜菊糖苷和复配稳定乳
化剂添加量有一定的交互作用,但对萌发藜麦乳感官评
分的影响并未达到显著水平。

2.3.4 验证试验

利用 Design-Expert 12 对萌发藜麦乳的感官评分
进行回归分析,根据回归模型得出萌发藜麦乳的配方
优化理论条件为:萌发藜麦汁添加量为 50.507%,甜
菊糖苷添加量为 0.095%,复配乳化稳定剂(结冻胶:
蔗糖酯=2:1)添加量为 0.20%。在此最佳添加量条件

下,感官评分预测值为 87.249 分。为了进一步验证预测值与实际值的拟合度以及回归方程的有效性,在软件优化得到的最佳工艺条件下进行验证试验。在试验中为了方便操作,将各因素的用量分别进行微调:萌发藜麦汁 50.50%,甜菊糖苷 0.10%,复配乳化稳定剂 0.20%,在此条件下进行三次验证试验,所得到的萌发藜麦乳模糊综合感官评分平均值为 87.26 分,非常接近模型预测值,进一步验证了该模型的可行性。

3 结论

试验以静乐黑藜麦为原料,通过萌发的方式提高其营养价值,并以模糊感官综合评分为响应值,通过单因素和响应面试验对影响萌发藜麦乳感官品质的萌发藜麦汁、甜菊糖苷和复配乳化稳定剂三个因素的添加量进行优化。结果表明,萌发藜麦乳的最佳原料为萌发 36 h 的黑藜麦,此时蛋白质含量为 16.2 g/100 g,灰分含量 2.55 g/100 g,脂肪含量 5.51 g/100g,淀粉含量 48.2 g/100 g,黄酮含量 3.83 mg/g。以此为原料制得萌发藜麦乳,其优化后的工艺配方为:萌发藜麦汁 50.50%、甜菊糖苷 0.10%、复配乳化稳定剂 0.20%。在此最佳添加量条件下,模糊感官评分为 87.26 分,回归模型得到的理论值与试验得出的实际值之间的相对偏差小于 0.2%。此时,萌发藜麦乳色泽明亮,状态稳定,具有藜麦特有的清香,口感顺滑,是一款非常具有市场前景的藜麦产品。本文所制备的藜麦萌发乳不仅为消费者提供了一个植物蛋白饮料新选择,也为探索藜麦精加工与解决藜麦原产地原料滞销问题提供新思路、新方法。

参考文献

- [1] 王洁,周思璇,常诗洁,等.不同品种藜麦营养与功能活性成分比较及应用[J].食品安全质量检测学报,2022,13(3):681-687.
- [2] Romano A, Ferranti P. Pseudocereals: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Reference Module in Food Science, 2023 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823960-5.00004-4>.
- [3] Jan R, Saxena D C, Singh S. Comparative study of raw and germinated chenopodium (*Chenopodium album*) flour on the basis of thermal, rheological, minerals, fatty acid profile and phytochemicals [J]. Food Chemistry, 2018, 269: 173-180.
- [4] Ahmed F A E, Emad M, Ayman M A T, et al. Seed quality and protein classification of some quinoa varieties [J]. Journal of Ecological Engineering, 2022, 23(1): 24-33.
- [5] Mufari J, Miranda-Villa P, Bergesse A, et al. Physico-chemical analysis and protein fraction compositions of different quinoa cultivars [J]. Acta Alimentaria, 2018, 47(4): 462-469.
- [6] Nisar A M, Charanjit S R, Sukhcham S. Rheological, structural and thermal characteristics of protein isolates obtained from album (*Chenopodium album*) and quinoa (*Chenopodium quinoa*) seeds [J]. Food Hydrocolloids for Health, 2021, 1: 100019.
- [7] 张文刚,杜春婷,杨希娟,等.不同加工方式对藜麦蛋白质结构与功能特性的影响[J].食品科学,2022,43(7):88-95.
- [8] Vilcacundo R, Hernández-ledesma B. Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Current Opinion in Food Science, 2017, 14: 1-6.
- [9] 于跃,顾音佳.藜麦的营养物质及生物活性成分研究进展[J].粮食与油脂,2019,32(5):4-6.
- [10] Alrosan M, Tan T, Rasa A M, et al. Recent updates on lentil and quinoa protein-based dairy protein alternatives: Nutrition, technologies, and challenges [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132386.
- [11] LE Liqing, GONG Xuxiao, AN Qi, et al. Quinoa sprouts as potential vegetable source: Nutrient composition and functional contents of different quinoa sprout varieties [J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129752.
- [12] Pathan S, Siddiqui R A. Nutritional composition and bioactive components in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) greens: A review [J]. Nutrients, 2022, 14(3): 558.
- [13] LIU Siyu, WANG Wei, LU Hongyun, et al. New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 187-197.
- [14] Vicente G J, Adelaida E, Teresa F M. Changes in the polyphenolic profile and antioxidant activity of wheat bread after incorporating quinoa flour [J]. Antioxidants, 2022, 11(1): 33.
- [15] Lucia T V O, Mariana L G, Viviana G L Y. Optimization study of pasta extruded with quinoa flour (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Cyta-Journal of Food, 2021, 19(1): 220-227.
- [16] Singh K P, Mishra Abhinav, Mishra H N. Fuzzy analysis of sensory attributes of bread prepared from millet-based composite flours [J]. LWT - Food Science and Technology, 2012, 48(2): 276-282.
- [17] Shrivastava C, Chakraborty S. Bread from wheat flour partially replaced by fermented chickpea flour: Optimizing the formulation and fuzzy analysis of sensory data [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 90: 215-223.
- [18] Mukhopadhyay S, Majumdar G C, Goswami T K. Fuzzy

- logic (similarity analysis) approach for sensory evaluation of chhanapodo [J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 53(1): 204-210.
- [19] 沙芮,丁洁,陈静,等.模糊数学感官评价法优化桑叶速溶固体茶配方[J].食品工业科技,2022,43(11):200-207.
- [20] GB 5009.5-2016,食品安全国家标准食品中蛋白质的测定[S].
- [21] GB 5009.4-2016,食品安全国家标准食品中灰分的测定[S].
- [22] GB 5009.6-2016,食品安全国家标准食品中脂肪的测定[S].
- [23] GB 5009.9-2016,食品安全国家标准食品中淀粉的测定[S].
- [24] 李金辉,翁贵英,朱淼,等.微波辅助提取猕猴桃果渣总黄酮及其抗氧化活性[J].食品研究与开发,2022,43(12):79-85.
- [25] 玉王宁,刘杰,刘士伟,等.模糊感官评价在双螺杆挤压杂粮工程米工艺优化中的应用[J].食品研究与开发,2018,39(11): 89-94,114.
- [26] 刘士伟,王成祥,段盛林,等.基于模糊数学感官评价的杂粮馒头配方优化及低 GI 验证[J].食品工业科技,2022,43(21): 375-380.
- [27] GB/T 16291.1-2012,感官分析选拔、培训与管理评价员一般导则第 1 部分:优选评价员[S].
- [28] GB/T 16291.2-2010,感官分析选拔、培训和管理评价员一般导则第 2 部分:专家评价员[S].
- [29] 刘赵,顾佳丽,钱程,等.基于模糊数学感官和响应面法研制豆渣麻花及品质分析[J].食品工业科技,2022,43(9):203-211.
- [30] 刘敏,谭书明,张洪礼,等.基于模糊感官评价对大米感官品质分析[J].食品工业科技,2017,38(21):247-251.
- [31] Rodriguez C, Frias J, Vidal-Valverde C, et al. Correlations between some nitrogen fractions, lysine, histidine, tyrosine, and ornithine contents during the germination [J]. Food Chemistry, 2008, 108(1): 245-252.
- [32] 苏艳玲,张谨华.藜麦种子萌发中营养物质变化的研究[J].食品工业,2019,40(2):208-210.
- [33] Piuell L, Boeri P, Zubillaga F, et al. Production of white, red and black quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd var. Real) protein isolates and its hydrolysates in germinated and non-germinated quinoa samples and antioxidant activity evaluation [J]. Plants, 2019, 8(8): 257.
- [34] 陈益胜,舒蓝萍,徐学明,等.3 种藜麦发芽过程中生物活性物质及其抗氧化活性的变化规律[J].食品与机械,2020,36(3):34-38,47.
- [35] Maryam S, Sadeghian F M S, Shohreh A, et al. The novel homologue of the human α -glucosidase inhibited by the non-germinated and germinated quinoa protein hydrolysates after in vitro gastrointestinal digestion [J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 46(1): e14030.
- [36] Suárez-estrella D, Bresciani A, Iametti S, et al. Effect of sprouting on proteins and starch in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2020, 75: 635-641.
- [37] 黄金,秦礼康,石庆楠,等.藜麦萌芽期营养与功能成分的动态变化[J].食品与机械,2017,33(5):54-58.
- [38] 陆阳.响应面法优化藜麦发酵饮料配方的研究[J].粮食加工, 2022,47(2):53-58.
- [39] 黄玉坤,奚晓鸿,田红媚,等.响应面法优化藜麦南瓜复合饮料加工工艺及其稳定性研究[J].食品研究与开发,2020, 41(19):112-118.
- [40] XU Baoguo, FENG Min, Tiliwa E S, et al. Multi-frequency power ultrasound green extraction of polyphenols from Pingyin rose: Optimization using the response surface methodology and exploration of the underlying mechanism [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 156: 113037.
- [41] YI Jianyong, HOU Chunhui, BI Jinfeng, et al. Novel combined freeze-drying and instant controlled pressure drop drying for restructured carrot-potato chips: Optimized by response surface method [J]. Journal of Food Quality, 2018, 3: 1-13.
- [42] 周婵,吴宏,刘娅,等.响应面法结合模糊数学优化南瓜籽酸奶发酵工艺[J].食品与生物技术学报,2021,40(11):84-89.