

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2023.05.021

# 基于人工神经网络优化黑木耳红枣发酵乳及其抗氧化分析

张剑林, 张亮亮, 姜露熙, 裴龙英, 王寒博, 孙博, 梁睿武, 房丹丹\*  
(新疆理工学院 食品科学与工程学院, 新疆 阿克苏 843100)

**摘要:** 该研究基于人工神经网络和遗传算法, 对黑木耳红枣发酵乳发酵工艺进行优化, 在此基础上分析其抗氧化特性。在单因素试验的基础上, 通过 Box-Behnken 试验设计不同因素条件下黑木耳红枣发酵乳的酸度, 以此构建人工神经网络优化模型, 其模型拟合度达到 0.991 12。结合遗传算法对黑木耳发酵乳进行 127 次迭代后, 求得其最佳工艺条件为黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比 3 : 2.1、发酵温度 38.8 °C、发酵时间 36.6 h、接种量 6.70%, 此条件下酸度最佳为 75.12 °T, 试验预测值与实际值无显著差异, 表明网络模型结果准确; 此条件下, 黑木耳红枣发酵乳的 DPPH 自由基、羟基自由基清除率比发酵前分别提高 12.04%、13.52%。

**关键词:** 黑木耳红枣发酵乳; Box-Behnken 试验设计; 拟合模型; 神经网络; 抗氧化

## Optimization of Fermented Milk of Black Fungus and Red Jujube Based on Artificial Neural Network and Its Antioxidant Analysis

ZHANG Jian-lin, ZHANG Liang-liang, JIANG Lu-xi, PEI Long-ying,  
WANG Han-bo, SUN Bo, LIANG Rui-wu, FANG Dan-dan\*

(College of Food Science and Engineering, Xinjiang University of Technology, Aksu 843100, Xinjiang, China)

**Abstract:** In this study, based on artificial neural network and genetic algorithm, the fermentation process of the fermented milk of black fungus and red jujube was optimized, and its antioxidant properties were analyzed on this basis. On the basis of single factor, the acidity of the fermented milk of black fungus and red jujube under different conditions was designed by Box-Behnken experiment to construct an artificial neural network optimization model, and the model fitting degree reached 0.991 12. After 127 iterations of the black fungus fermented milk combined with the genetic algorithm, the optimal process conditions were obtained as follows. The ratio of the addition of black fungus and red jujube juice to the milk addition was 3 : 2.1, and the fermentation temperature and time were 38.8 °C and 36.6 h, the inoculum amount was 6.70%, and the acidity was optimal at 75.12 °T. Under these conditions, the predicted value of the test and the actual value had no significant difference, proving that the results of the network model were accurate. Under these conditions, 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and hydroxyl radical scavenging rates of the fermented milk of black fungus and red jujube were 12.04% and 13.52%, respectively, higher than those before fermentation.

**Key words:** fermented milk of black fungus and red jujube; Box-Behnken test design; fitting model; neural network; anti-oxidation

引文格式:

张剑林, 张亮亮, 姜露熙, 等. 基于人工神经网络优化黑木耳红枣发酵乳及其抗氧化分析[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(5): 141-147.

ZHANG Jianlin, ZHANG Liangliang, JIANG Luxi, et al. Optimization of Fermented Milk of Black Fungus and Red Jujube Based on Artificial Neural Network and Its Antioxidant Analysis[J]. Food Research and Development, 2023, 44(5): 141-147.

基金项目: 校级科研项目(ZQ202207); 自治区教育厅高校科研计划项目(XJEDU2020Y047); 国家级大学生创新创业项目(202113558006); 校级平台项目(PT202101)

作者简介: 张剑林(1996—), 男(汉), 助教, 硕士, 研究方向: 食品加工与安全。

\* 通信作者: 房丹丹(1987—), 女(汉), 讲师, 硕士, 研究方向: 食品加工与安全。

发酵乳是以鲜牛乳或乳制品为主要发酵原料,经一定时间及温度发酵而成的乳产品,其风味独特、营养丰富<sup>[1]</sup>。发酵乳中含有大量益生菌,能够有效地阻止有害细菌的繁殖,以此降低人体肠道内有害细菌及有毒物质含量,起到调节人体肠道菌群及增强人体自身免疫力的作用<sup>[2]</sup>。黑木耳作为食用菌,将其作为调味品加入乳品、饮料中等,可提升产品营养价值与抗氧化特性,并伴有更多的味觉感受<sup>[3-5]</sup>。红枣作为鼠李科枣属植物,富含有机酸、多糖、环磷腺苷(cyclic adenosine monophosphate, cAMP)等活性物质,具有补气血、健脾益胃的功效<sup>[6-8]</sup>。黑木耳与红枣相结合,能促进总抗氧化能力系数的提高<sup>[9]</sup>。人工神经网络在发酵乳研究中未见报道。因此,黑木耳红枣发酵乳通过乳酸菌发酵,结合响应面设计和人工神经网络优化能够简单且快速地获得模型最佳值,以此制成一款新型高附加值且独特风味的发酵乳饮料<sup>[10-11]</sup>。

人工神经网络通过调整输入层、输出层、隐含层中有关联的相关神经元所对应的阈值,反映相互之间的非线性关系<sup>[12-15]</sup>。由于发酵乳产品成分及工艺的多元性,且发酵工艺参数与产品各属性指标间的关系大多是非线性的,因而人工神经网络能够较好适用于发酵乳产品属性的模拟。因此,本研究以酸度为衡量指标,研究多因素条件作用下的黑木耳红枣发酵乳工艺条件,应用人工神经网络建立并拟合发酵乳工艺,通过模型建立筛选、验证最佳发酵工艺参数,以期对发酵乳的高附加利用提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

红枣:新疆阿克苏市温宿县;鲜牛乳:新疆天润生物科技股份有限公司;黑木耳、M30 乳杆菌:新疆理工学院实验 3 号楼 502 实验室;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)试剂:上海源叶生物科技有限公司;无水乙醇:北京化工厂;硫酸亚铁:天津市光复科技发展有限公司;过氧化氢:开原化学试剂一厂;水杨酸:天津市华东试剂厂。以上试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

BPH-9402 精密恒温培养箱:上海一恒科学仪器有限公司;UV759 紫外可见分光光度计:上海佑科仪器仪表有限公司;LDZM-80L 立式高压蒸汽灭菌器:上海申安医疗器械厂;JMS-50 胶体磨:廊坊市冠通机械有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 工艺流程

红枣汁、黑木耳粉、牛乳→复配→黑木耳红枣乳→胶体磨处理→巴氏杀菌→接菌发酵→黑木耳红枣发酵乳

#### 1.3.2 黑木耳红枣汁的制备

选择新鲜、无机械损伤及虫蛀、色泽光亮的当年季灰枣。将红枣于温水中加一定量蔗糖洗去表面灰尘,再用水清洗 1 遍,沥干后去核,切成小碎块<sup>[16]</sup>。添加 3 倍水煮沸 30 min 后过滤备用,将粉碎过 80 目筛的黑木耳粉加 4 倍红枣汁过滤后制成黑木耳红枣汁。

#### 1.3.3 发酵

将 M30 乳杆菌固体培养基从冰箱取出,在 MRS 肉汤培养基中接入挑取的单菌落,37 °C 培养 48 h,经过多次活化使总活菌数为  $2.7 \times 10^7$  CFU/mL,留作接种液备用。黑木耳红枣乳杀菌后,接入 M30 乳杆菌,设定不同恒温温度后在培养箱中培养一定时间,测定发酵液酸度及相应指标。

#### 1.3.4 单因素试验

以酸度、活菌数、蛋白质含量作为评价指标,分别考察接种量(2.5%、4.5%、6.5%、8.5%、10.5%)、发酵时间(24、30、36、42、48 h)、发酵温度(30、33、36、39、42 °C)、黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比(3:1、2:1、3:2、1:1、1:2)对黑木耳红枣发酵乳的影响。

#### 1.3.5 黑木耳红枣发酵乳工艺参数优化

选用酸度作为黑木耳红枣发酵乳的考察指标,选择接种量、发酵时间、发酵温度、黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比作为黑木耳红枣发酵乳工艺影响因素进行优化试验,各参数水平如表 1 所示。

表 1 黑木耳红枣发酵乳因素与水平

Table 1 Coding table of factors and levels of the fermented milk of black fungus and red jujube

水平	接种量/%	发酵温度/°C	发酵时间/h	黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比
-1	4.5	36	30	2:1
0	6.5	39	36	3:2
1	8.5	42	42	1:1

#### 1.3.6 遗传算法寻优设计

通过遗传算子,选择、交叉、变异,采取 MATLAB 遗传算法工具箱进行遗传算法以进行全局多点寻优<sup>[17]</sup>。人工神经网络模拟运算对黑木耳红枣发酵乳过程中的 4 个因素(接种量、发酵温度、发酵时间、黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比)在各自加入量范围内采取人工神经网络模拟运算,以此模型的输出值构建个体适应度函数进行整体寻优。酸度值的浮动变化对个体适应度值的影响较大。通过实际情况进行初始种群数、变异概率、交叉概率和进化代数的选取,相关参数的设定根据实际而定<sup>[18-19]</sup>。黑木耳红枣发酵乳神经网络模型示意图见图 1。

#### 1.3.7 抗氧化能力测定

参照文献[20-21]的方法对 DPPH·清除率、羟基自

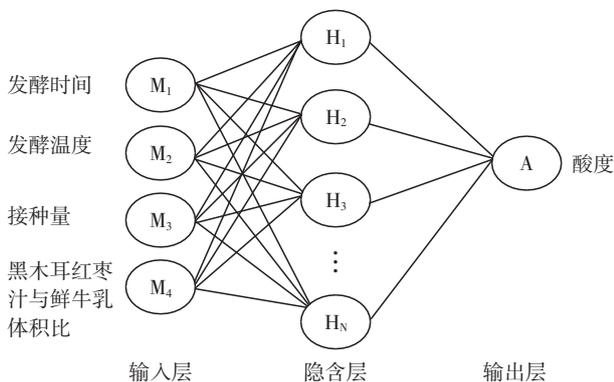


图1 黑木耳红枣发酵乳神经网络模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of neural network model of the fermented milk of black fungus and red jujube

由基清除率进行测定。

### 1.3.8 活菌数和酸度的测定

参考文献[22-23]对活菌数和酸度进行测定。

### 1.4 统计分析

采用 Origin 2018 对单因素图表进行绘制, 通过 Design-Expert 8.0 设计 27 组试验, 且每一组做 3 次平行试验, 采用 Matlab 2017b 进行模型构建。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同因素条件对黑木耳红枣发酵乳的影响

接种量对黑木耳红枣发酵乳的影响见图 2。

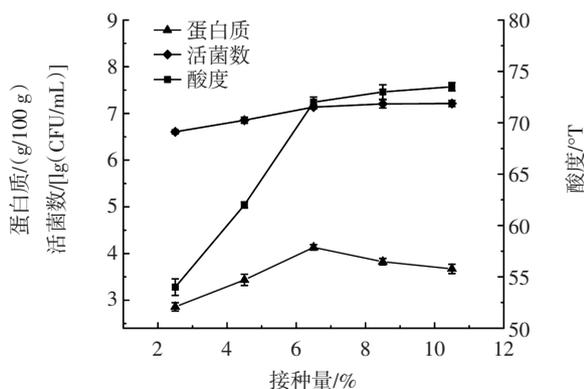


图2 接种量对黑木耳红枣发酵乳的影响

Fig.2 Effect of inoculation amount on the fermented milk of black fungus and red jujube

由图 2 可知, 当其它条件不变时, 从总体上看酸度变化趋势呈先上升后趋于平稳的趋势, 活菌数无明显变化, 蛋白质含量略有起伏, 其现象原因可能是 M30 乳杆菌接种量的多少与反应环境中菌体生长相关性较大, 当发酵乳的接种量大于 6.5% 时, 发酵乳所能利用的活菌数是有限的, 致使酸度几乎无明显增长。因此, 选择最适接种量为 6.5%。

发酵时间对黑木耳红枣发酵乳的影响见图 3。

由图 3 可知, 随着发酵时间的延长, 酸度变化呈先

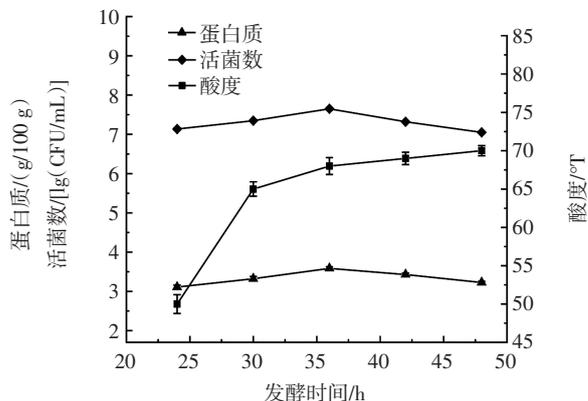


图3 发酵时间对黑木耳红枣发酵乳的影响

Fig.3 Effect of fermentation time on the fermented milk of black fungus and red jujube

上升后趋于平缓的趋势, 可能是由于 M30 乳杆菌的接入使菌体大量生长繁殖促使酸度增大, 当发酵至 36 h 时, M30 乳杆菌的生长消耗了大量的碳源使乳酸菌的生长受到阻碍, 导致活菌数变化减少。因此, 选择最适发酵时间为 36 h。

发酵温度对黑木耳红枣发酵乳的影响见图 4。

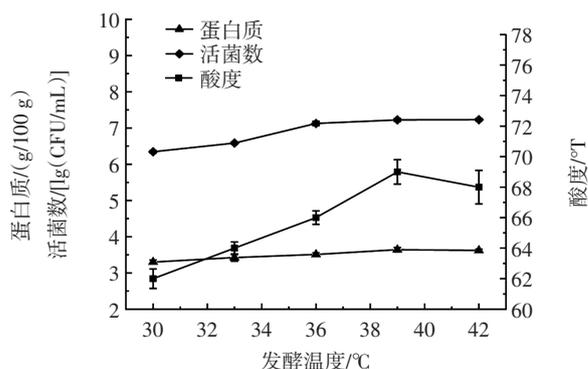


图4 发酵温度对黑木耳红枣发酵乳的影响

Fig.4 Effect of fermentation temperature on the fermented milk of black fungus and red jujube

由图 4 可知, 当发酵温度高于 39 °C 时, 酸度浮动变化减缓, 原因可能是 M30 乳杆菌的生长对较高温度的耐受性较低, 不利于其生长, 从而会影响产酸特性。故选择最适发酵温度为 39 °C。

黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比对黑木耳红枣发酵乳的影响见图 5。

由图 5 可知, 黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比对酸度影响较为明显, 当黑木耳红枣汁的占比减少时, 酸度呈先上升后趋于稳定的趋势, 而活菌数总体呈小幅上升的趋势, 可能是牛乳中的营养物质更有利于 M30 乳杆菌的生长。因此, 选择最适黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比为 3 : 2。

### 2.2 酸度试验结果

各参数下黑木耳红枣发酵乳酸度如表 2 所示。共

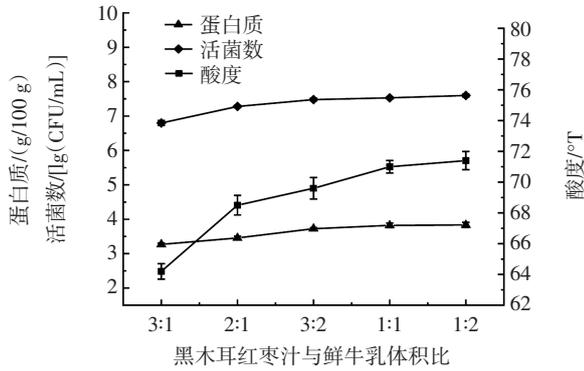


图5 黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比对黑木耳红枣发酵乳的影响  
Fig.5 Effect of the ratio of black fungus and red jujube juice to fresh milk on the fermented milk of black fungus and red jujube

计29组试验,每组做3组平行,用于人工神经网络模型的构建。

表2 不同参数下黑木耳红枣发酵乳的酸度

Table 2 Acidity of the fermented milk of black fungus and red jujube under different parameters

试验号	发酵温度	发酵时间	接种量	黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比	酸度均值/°T	标准偏差
1	-1	-1	0	0	62.98	0.15
2	1	-1	0	0	74.33	0.21
3	-1	1	0	0	73.93	0.18
4	1	1	0	0	74.24	0.26
5	0	0	-1	1	67.75	0.11
6	0	0	1	1	72.31	0.32
7	0	0	-1	-1	68.04	0.29
8	0	0	1	-1	68.21	0.21
9	-1	0	0	1	69.50	0.26
10	1	0	0	1	72.94	0.18
11	-1	0	0	-1	71.59	0.34
12	1	0	0	-1	74.27	0.16
13	0	-1	-1	0	63.67	0.12
14	0	1	-1	0	68.45	0.10
15	0	-1	1	0	70.15	0.17
16	0	1	1	0	74.13	0.22
17	-1	0	-1	0	65.74	0.18
18	1	0	-1	0	70.28	0.16
19	-1	0	1	0	71.08	0.23
20	1	0	1	0	72.54	0.24
21	0	-1	0	1	66.62	0.23
22	0	1	0	1	73.22	0.31
23	0	-1	0	-1	71.65	0.35
24	0	1	0	-1	73.83	0.25
25	0	0	0	0	71.99	0.28
26	0	0	0	0	73.93	0.33
27	0	0	0	0	73.80	0.21
28	0	0	0	0	75.56	0.29
29	0	0	0	0	73.13	0.24

2.3 误差反传(error back propagation, BP)神经网络模型的构建

2.3.1 BP神经网络模型参数

神经网络模型的训练及构建使用 Matlab 2017b 软件完成。通过工具箱对神经网络训练的每一过程的迭代次数中训练数据集采取 70%、15%、15% 随机归类为训练部分、验证部分和测试部分进行迭代训练<sup>[24-25]</sup>。通过建模选择隐藏神经元个数为 10,神经网络模型构建较好。

神经网络预测值和期望值之间的误差采用均方误差(mean-square error, MSE)函数表示,公式如下。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

式中:n 为参与评价的样本个数;y<sub>i</sub> 为第 i 个神经网络的输出值; $\bar{y}_i$  为该输出值对应的期望值。

黑木耳红枣发酵乳的研究中,通过每组试验的实际值及神经网络输出的预测值,来评价酸度在神经网络预测中准确度,若模型预测性能越好,则期望值和预测值越接近。

2.3.2 神经网络模型构建的均方误差评估

神经网络模型构建的准确性建立在 MSE 评估的基础上。MSE 值越小,所建立的模型越成功,试验数据所表现出的精确度越高<sup>[26-27]</sup>。黑木耳红枣发酵乳神经网络模型的 MSE 值见图 6。

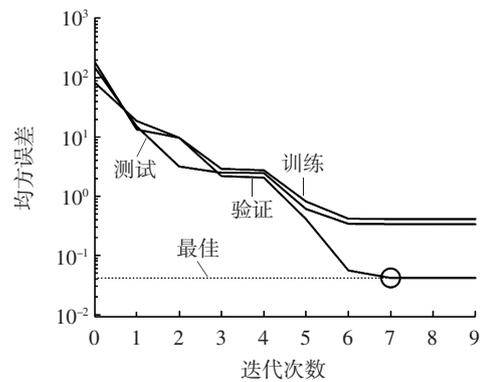


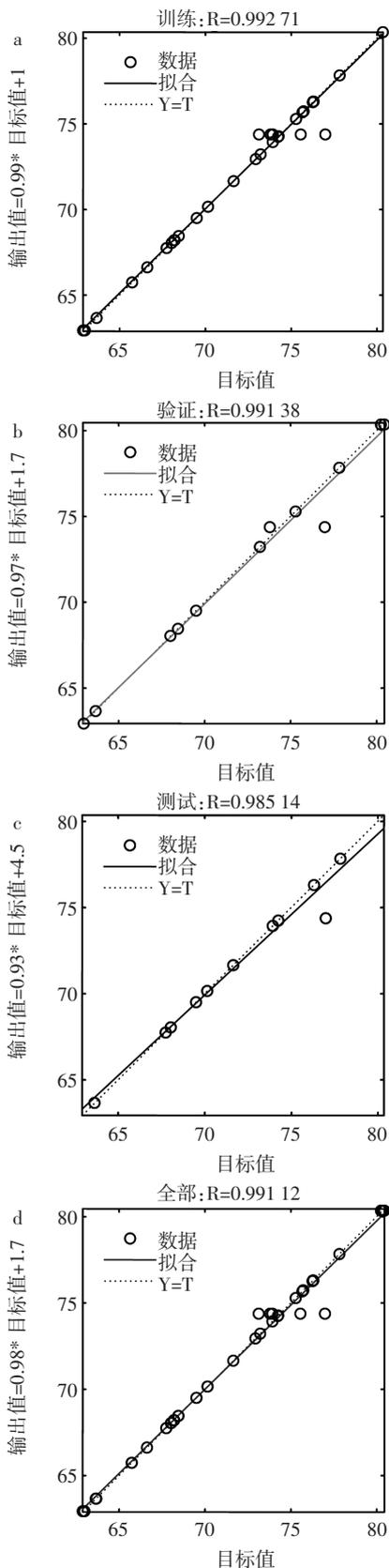
图6 黑木耳红枣发酵乳神经网络模型的 MSE 值  
Fig.6 MSE value of the fermented milk of black fungus and red jujube with neural network model

如图 6 所示,随着训练步数的增加,MSE 误差逐渐趋近于最佳值,对应误差为 0.041 569,同时验证误差也趋于最佳值,当神经网络模型迭代至第 7 次时,训练结果趋于平稳,说明该模型达到拟合要求<sup>[28-29]</sup>,可用于黑木耳红枣发酵乳工艺拟合研究。

2.3.3 神经网络模型相关系数的评估

黑木耳红枣发酵乳模型构建的相关系数指标见图 7。

如图 7 所示,通过统计训练、验证、测试及所有数



a.训练集;b.验证集;c.测试集;d.全部。

图7 黑木耳红枣发酵乳模型构建的相关系数指标

Fig.7 Correlation coefficient index for model construction of the fermented milk of black fungus and red jujube

据的目标值和输出值,并计算出相关系数<sup>[30-31]</sup>。各组数据的相关系数R、目标值及神经网络模型的输出值呈显著的正相关关系,进一步确定了神经网络模型构建的成功。

#### 2.4 神经网络模型性能测试

通过对所构建的神经网络模型选择收集的9组试验数据进行预测值与实际值随机验证<sup>[32-33]</sup>。以试验测得的实际酸度与神经网络预测的值进行比较,结果见图8。

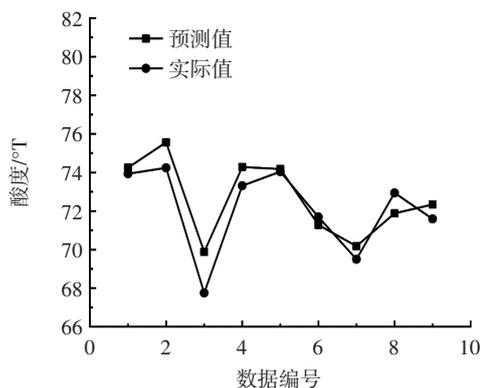


图8 构建黑木耳红枣发酵乳模型性能的验证

Fig.8 Validation of the model of the fermented milk of black fungus and red jujube

由图8可知,试验测定获取的酸度与神经网络模型预测值具有变化一致的趋势。因此,进一步说明通过此方式构建的神经网络模型所输出的预测值具有较高可行性。

#### 2.5 遗传算法寻优

黑木耳红枣发酵乳遗传算法的寻优结果见图9。

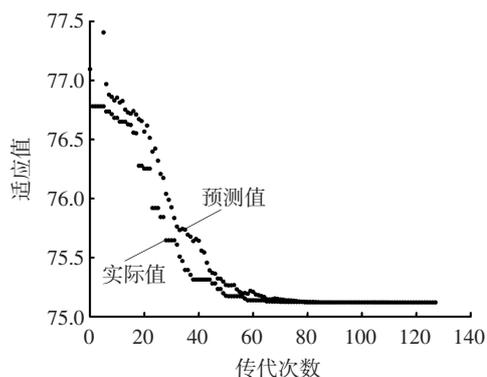


图9 黑木耳红枣发酵乳遗传算法的寻优结果

Fig.9 Optimal results of genetic algorithm for the fermented milk with black fungus and red jujube

由图9所示,通过采用 Matlab 2017b 软件对黑木耳红枣发酵乳进行工艺寻优,当遗传运算迭代至127次时,模型所对应的酸度预测值与实际值拟合度最佳,此时试验因素(黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比、发酵温度、发酵时间、接种量)编码分别为1.428、38.800、36.600、0.067,所对应黑木耳红枣发酵乳酸度理论值为 $75.12^{\circ}T$ ,与实际所测值无明显差异,该模型工艺优化

结果准确。

## 2.6 抗氧化结果分析

不同浓度黑木耳红枣发酵乳与未发酵组抗氧化性能的对比如图10。

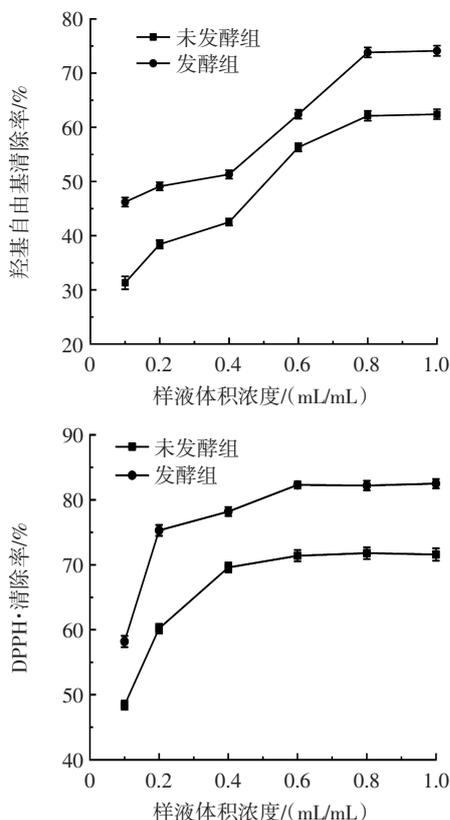


图10 不同浓度黑木耳红枣发酵乳与未发酵组抗氧化性能的对比如图10。  
Fig.10 Comparison of antioxidant properties of the fermented milk of black fungus and red jujube and unfermented milk with different concentrations

如图10所示,黑木耳红枣发酵乳未发酵组、发酵组的DPPH自由基、羟基自由基清除率随样液体积浓度的变化均呈先增长后趋于平稳的趋势。对于黑木耳红枣发酵乳发酵组而言,经过不同梯度的处理后,当样液体积浓度分别为0.6、0.8 mL/mL时,黑木耳红枣发酵乳的DPPH自由基清除率、羟基自由基清除率分别为81.30%、73.42%,均达到较高的清除效果,较发酵前分别提高了12.04%、13.52%,其发酵前后差异明显,在发酵过程中,抗氧化性有所增强,其可能原因是由于乳酸菌在发酵过程中使游离态酚类物质的占比增加<sup>[34]</sup>,进一步增强黑木耳红枣发酵乳抗氧化性。

## 3 结论

本试验以黑木耳粉、红枣汁、鲜牛乳为原料,通过乳酸菌发酵制成黑木耳红枣发酵乳,采用DPPH自由基、羟基自由基清除率评价发酵制品的抗氧化能力。根据发酵温度、发酵时间、黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比、接种量4个影响因子为单因素试验,结合Box-

Behnken试验的因素水平和响应值,将黑木耳红枣发酵乳的4个因素及对应酸度通过Matlab 2017b软件构建神经网络拟合其之间的非线性关系,模型预测性和准确性较高,能够反映发酵温度、发酵时间、黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比、接种量与酸度之间的关系,通过与遗传寻优相结合,确定黑木耳红枣发酵乳的最佳工艺条件为发酵温度38.8℃、发酵时间36.6h、接种量6.70%、黑木耳红枣汁与鲜牛乳体积比为3:2.1,对应最佳酸度为75.12°T。在此条件下,黑木耳红枣发酵乳DPPH自由基、羟基自由基清除率分别为81.30%、73.42%,较发酵前分别提高了12.04%、13.52%,试验结果为黑木耳红枣发酵乳的综合开发利用提供参考。

## 参考文献:

- [1] 孙昕萌,袁惠萍,赵钜阳. 发酵乳风味及其分析技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(15): 6111-6117.  
SUN Xinmeng, YUAN Huiping, ZHAO Juyang. Research progress in flavor and analytical technology of fermented milk[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(15): 6111-6117.
- [2] 尹乐斌,邓鹏,何平,等. 基于遗传算法-神经网络及响应面法优化龙牙百合总黄酮提取工艺[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 105-113.  
YIN Lebin, DENG Peng, HE Ping, et al. Optimization of total flavonoid extraction from *Lilium brownii* based on genetic algorithm-neural network and response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 105-113.
- [3] 张介驰,陈鹤,孔祥辉,等. 黑木耳复合多糖口服制剂对小鼠免疫功能的效应[J]. 食药用菌, 2018, 26(6): 358-362.  
ZHANG Jiechi, CHEN He, KONG Xianghui, et al. Effects of *Auricularia auricula-judae* composite polysaccharides oral liquid on the immunological function of mice[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2018, 26(6): 358-362.
- [4] 薛依婷,白红霞,李明杰,等. 黑木耳多糖凝固型酸奶发酵工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 156-162.  
XUE Yiting, BAI Hongxia, LI Mingjie, et al. Optimization of fermentation process of set yogurt with *Auricularia auricular* polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(16): 156-162.
- [5] 秦丹丹,吴琼,白洋,等. 黑木耳多糖/壳聚糖可食性复合膜的制备及对鲜牛肉的保鲜效果[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 246-251.  
QIN Dandan, WU Qiong, BAI Yang, et al. Preparation of *Auricularia auricular* polysaccharide/chitosan edible composite film and its preservative effect on fresh beef[J]. Food Science, 2021, 42(5): 246-251.
- [6] 朱星宇,郭东起. 红枣关键功能成分及其生物活性的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(8): 197-201.  
ZHU Xingyu, GUO Dongqi. Research advancement on key functional components and biological activities of red jujubes[J]. Food Research and Development, 2021, 42(8): 197-201.
- [7] 邹立飞,郑鹏. 响应面法、BP神经网络优化薏仁米酒产氨基酸态氮[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(9): 121-130.  
ZOU Lifei, ZHENG Peng. Comparative study of response surface methodology and back-propagation neural network in optimizing amino acid nitrogen production from *Coix seed* wine[J]. Food Research and Development, 2021, 42(9): 121-130.
- [8] MORADINEZHAD F, SETAYESH F, MAHMOODI S, et al. Physicochemical properties and nutritional value of jujube (*Ziziphus jujuba* mill.) fruit at different maturity and ripening stages[J]. Journal of Horticultural Science, 2016, 3: 43-50.
- [9] 付亚玲,姚俊修,张仁堂. 响应面法优化黑化红枣三萜酸提取工

- 艺及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 176-183.
- FU Yaling, YAO Junxiu, ZHANG Rentang. Optimization of extraction and antioxidant activities of triterpenic acids from blacked jujube by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 176-183.
- [10] 邢慧雅. 响应面法优化藜麦发酵浓浆发酵工艺研究[D]. 太原: 山西大学, 2019.
- XING Huiya. Optimization of fermentation process of quinoa fermented thick pulp by response surface methodology[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
- [11] 陈文璐, 刘妍妍, 巩燕妮. 响应面法优化干酪风味发酵乳的发酵工艺[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 235-242.
- CHEN Wenlu, LIU Yanyan, GONG Yanni. Optimization of fermentation processing of cheese flavor fermented milk by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 235-242.
- [12] 单金卉, 陈季旺, 刘言, 等. 基于人工神经网络模型预测油炸外裹糊鱼块的丙烯酰胺含量[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 249-255.
- SHAN Jinhui, CHEN Jiwang, LIU Yan, et al. Prediction of acrylamide content in fried battered and breaded fish nuggets using artificial neural network[J]. Food Science, 2019, 40(16): 249-255.
- [13] 迟雷, 王静雨, 侯俊超, 等. 基于人工神经网络和遗传算法的普鲁兰酶重组大肠杆菌高密度发酵工艺优化[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 73-78.
- CHI Lei, WANG Jingyu, HOU Junchao, et al. Artificial neural network-genetic algorithm-based optimization of high cell density cultivation of recombinant *Escherichia coli* for producing pullulanase[J]. Food Science, 2021, 42(10): 73-78.
- [14] VANI S. Prediction of sugar yields during hydrolysis of lignocellulosic biomass using artificial neural network modeling[J]. Bioresource Technology, 2015, 188: 128-135.
- [15] ZHENG Z Y, GUO X N, ZHU K X, et al. Artificial neural network - Genetic algorithm to optimize wheat germ fermentation condition: Application to the production of two anti-tumor benzoquinones[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 264-270.
- [16] 高云. 红枣乳酸菌饮料的研制[J]. 鞍山钢铁学院学报, 2001, 24(4): 256-261.
- GAO Yun. Fabrication of beverage with date and lactic acid bacteria [J]. Journal of Anshan Institute of Iron and Steel Technology, 2001, 24(4): 256-261.
- [17] 朱兰兰, 侯钟令, 崔亚菲, 等. 应用BP神经网络优化南极磷虾酶解工艺[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 121-126.
- ZHU Lanlan, HOU Zhongling, CUI Yafei, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of *Antarctic krill* by BP neural network[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(21): 121-126.
- [18] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用: 人工神经细胞、人工神经网络和人工神经系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- HAN Liqun. Theory, design and application of artificial neural networks[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [19] TIAN H, LIU C, GAO X D, et al. Optimization of auto-induction medium for G-CSF production by *Escherichia coli* using artificial neural networks coupled with genetic algorithm[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2013, 29(3): 505-513.
- [20] 彭惠惠, 李吕木, 钱坤, 等. 发酵芝麻粕中芝麻小肽的分离纯化及其体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2013, 34(9): 66-69.
- PENG Huihui, LI Lümu, QIAN Kun, et al. Isolation, purification and antioxidant activity of sesame peptide from solid-state fermentation[J]. Food Science, 2013, 34(9): 66-69.
- [21] SHYU Y S, HWANG L S. Antioxidative activity of the crude extract of lignan glycosides from unroasted Burma black sesame meal[J]. Food Research International, 2002, 35(4): 357-365.
- [22] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验: GB 4789.35—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard Microbiological examination of food Examination of lactic acid bacteria: GB 4789.35—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品酸度的测定: GB 5009.239—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission. National food safety standard Determination of food acidity: GB 5009.239—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [24] 续晓琪, 薛长湖, 常耀光. 基于神经网络的海参岩藻聚糖硫酸酯酶解模型建立及抗氧化活性研究[J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 20-27.
- XU Xiaoqi, XUE Changhu, CHANG Yaoguang. The model of enzymatic degraded sea cucumber fucoidans established by artificial neural network and studies on their antioxidant activity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(1): 20-27.
- [25] 朱金艳. 基于BP神经网络的电子鼻、电子舌和色差仪多信息融合技术预测蓝莓汁中花青素含量[J]. 食品科技, 2021, 46(9): 289-295.
- ZHU Jinyan. Using E-nose, E-tongue and colorimeter multi-information integration to predict the anthocyanin content in blueberry juice based on back propagation neural network[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(9): 289-295.
- [26] 孟庆龙, 冯树南, 谭涛, 等. 基于BP神经网络快速无损检测开阳枇杷糖度[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(13): 135-140.
- MENG Qinglong, FENG Shunan, TAN Tao, et al. Nondestructive detection of the sugar content of Kaiyang loquat based on BP neural network[J]. Food Research and Development, 2022, 43(13): 135-140.
- [27] TORRECILLA J S. Optimization of an artificial neural network for thermal/pressure food processing: Evaluation of training algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 101-110.
- [28] HAYKIN S S. Neural networks: A comprehensive foundation[M]. New York: MacMillan College Publishing Company, 1994.
- [29] POPESCU O, POPESCU D C, WILDER J, et al. A new approach to modeling and control of a food extrusion process using artificial neural network and an expert system[J]. Journal of Food Process Engineering, 2001, 24(1): 17-36.
- [30] 朱会霞, 王辉暖. 基于遗传神经网络的郫县豆瓣有机酸提取工艺研究[J]. 中国调味品, 2020, 45(5): 46-49.
- ZHU Huixia, WANG Huinuan. Study on extraction process of organic acid from Pixian broad bean paste based on genetic neural network[J]. China Condiment, 2020, 45(5): 46-49.
- [31] 蒋益虹, 冯雷. 人工神经网络方法在红曲杨梅果酒发酵工艺优化中的应用[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 140-143.
- JIANG Yihong, FENG Lei. Application of artificial neural network on the fermentation technology of *Monascus* waxberry wine optimization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2): 140-143.
- [32] 王云龙, 刘松, 堵国成, 等. 基于人工神经网络的L-天冬酰胺酶发酵培养基优化[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(8): 27-33.
- WANG Yunlong, LIU Song, DU Guocheng, et al. Optimization of L-asparaginase fermentation medium based on artificial neural network[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(8): 27-33.
- [33] 张建友, 柳敏, 王嘉文, 等. 基于因子分析及BP神经网络的鱼糜挤压膨化产品工艺[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(1): 124-129.
- ZHANG Jianyou, LIU Min, WANG Jiawen, et al. Optimization of surimi extrusion product by factor analysis and BP artificial neural network[J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(1): 124-129.
- [34] 陈树俊, 王婉榕. 响应面优化开菲尔藜麦发酵乳及其抗氧化分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 232-238.
- CHEN Shujun, WANG Wanrong. Optimization of quinoa fermented drink with kefir by response surface methodology and its antioxidant properties[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(20): 232-238.