

基于遗传算法的南瓜联合干燥工艺优化

Process parameter optimization of pumpkin combined drying based on genetic algorithm

吴绍锋¹ 强 华¹ 张 欣² 白云娇¹ 武时会¹

WU Shaofeng¹ QIANG Hua¹ ZHANG Xin² BAI Yunjiao¹ WU Shihui¹

(1. 重庆人文科技学院机电与信息工程学院, 重庆 401524; 2. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

(1. Chongqing College of Humanities, Science & Technology, College of Electromechanical and Information Engineering, Chongqing 401524, China; 2. Southwest University, College of Engineering and Technology, Chongqing 400715, China)

摘要:[目的]优化南瓜热风—真空联合干燥最佳工艺参数。[方法]对南瓜进行热风干燥、真空干燥及热风—真空联合干燥试验,以单位能耗、复水比及色差为评价指标,对比其干燥特性,以 BP 神经网络模型结合遗传算法,基于熵权结合加权评分法对南瓜热风—真空联合干燥进行多目标综合优化。[结果]同等条件下,热风干燥效率最高;当干燥温度为 55℃,含水率转换点为 30%时,联合干燥时间比真空干燥缩短了 52.63%;真空干燥单位能耗最低;热风干燥的复水性能最差;真空干燥的色泽最好;结合 BP 神经网络模型的遗传算法得到最优干燥参数为热风干燥温度 65℃,转换点含水率 50%,真空干燥温度 56.050 9℃,此时单位能耗、复水比和色差值与验证实验值的平均相对误差分别为 2.5%, 5.53%, 4.84%, 均 < 6%。[结论]南瓜热风—真空联合干燥兼具热风干燥和真空干燥的优点,且结合 BP 神经网络遗传算法模型可以优化其工艺参数。

关键词:南瓜;联合干燥;热风干燥;真空干燥;遗传算法;熵权法

Abstract: [Objective] To improve the drying quality of pumpkins. [Methods] This study conducted experiments on hot air drying, vacuum drying, and combined hot air-vacuum drying, these drying characteristics were evaluated and compared based on unit energy consumption, rehydration ratio, and color difference indicators. Combining BP neural network model with genetic

algorithm, combined with entropy weight and weighted scoring method, a multi-objective comprehensive optimization was carried out for the combined hot air-vacuum drying of pumpkins. [Results] Under the same conditions, the highest drying efficiency was hot air drying; And the findings revealed that at drying temperatures was 55℃, with a moisture content transition point of 30%, the combined drying method reduced the drying time by 52.63%, compared to vacuum drying. The lowest unit energy consumption was vacuum drying; The worst rehydration performance was hot air drying. The best color was vacuum drying. The optimal drying parameters determined by the genetic algorithm combined with a BP neural network model were a hot air drying temperature of 65℃, conversion point moisture content of 50%, and vacuum drying temperature of 56.050 9℃. Verification experiments demonstrated that the average relative errors between the genetic algorithm optimized values and the experimental values for unit energy consumption, rehydration ratio, and color difference were 2.5%, 5.53%, and 4.84%, respectively, all lower than 6%. [Conclusion] The combined hot air-vacuum drying of pumpkin integrates the advantages of both hot air drying and vacuum drying, and combined with BP neural network genetic algorithm model can optimize the process parameters for pumpkin hot air vacuum drying.

Keywords: pumpkin; combined drying; hot air drying; vacuum drying; genetic algorithm; entropy weight method

基金项目:重庆人文科技学院项目(编号:CRKZK2023002);重庆市教委科学技术研究重点项目(编号:KJZD-K202201801);重庆市高等教育教学改革研究项目(编号:223441)

作者简介:吴绍锋,男,重庆人文科技学院讲师,硕士。

通信作者:强华(1976—),女,重庆人文科技学院教授,硕士。

E-mail: qianghua420@qq.com

收稿日期:2024-03-10 **改回日期:**2024-06-27

中国是南瓜主产国^[1]。2020 年,中国南瓜种植面积 28.8 万 hm²,产量 1 126 万 t,居世界第一位^[2]。南瓜果肉含有丰富的营养物质,包括蛋白质、维生素、膳食纤维、β-胡萝卜素、番茄红素和丰富的微量元素^[3],具有极高的营养、保健与药用价值,其中微量元素具有降血压、降血糖等功效^[4]。南瓜果肉的水分含量高达 90%,极易发生微

生物侵染或机械损伤,导致腐烂变质^[5]。因此,对新鲜南瓜进行干燥,降低其含水率,可以延长贮藏时间^[6]。

代亚萍等^[7]以太阳能—热泵联合干燥方式,研究了南瓜片干燥过程中水分变化规律;汤尚文等^[8]以红外干燥方式研究了南瓜水分的变化规律;王军等^[9]以热风—微波联合干燥方式,研究了 6 种南瓜片的干燥数学模型,并进行了南瓜色泽和能耗对比;欧阳梦云^[10]以热风干燥方式,研究了南瓜片色泽变化的原因;Ando 等^[11]采用烫漂和冷冻预处理,以热风干燥方式,研究了南瓜片干燥过程中水分扩散系数和细胞结构的关系;Igbozulike 等^[12]以热风干燥方式,研究了南瓜籽的干燥特性;Benseddik 等^[13]以气流干燥(AFD)、冷冻干燥(FD)等干燥方式,研究了南瓜粉的理化性质;Sabanci 等^[14]利用阈值法研究了南瓜片对流、微波联合干燥机的收缩特性。

综上,南瓜干燥试验仍以正交试验为主,南瓜干燥评价方式仍以单项指标评价为主,南瓜干燥特性规律仍以传统数学模型为主,且对于南瓜的热风—真空联合干燥研究尚未见报道。研究拟采用热风—真空联合干燥方式对南瓜进行干燥,对比其与热风及真空干燥的区别,采用响应面试验方法,以单位能耗、色差、复水比多个指标评价南瓜干燥特性,并以熵权法结合加权评分法的方式确定综合指标,利用 BP 神经网络模型结合遗传算法优化南瓜热风—真空联合干燥工艺参数,旨在为南瓜联合干燥生产提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料

新鲜南瓜:品种为蜜本南瓜,产自重庆合川,挑选个头适中,外表无损伤的南瓜,购回后于 $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 冷藏,并根据 GB 5009.3—2016 测得初始含水率为 86.01%。

1.1.2 试验仪器与设备

电热恒温干燥箱:202-00 型,上海光地仪器设备有限公司;

真空干燥箱:DZF-2AS 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

旋片式真空泵:KW-2 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

薄层干燥试验台:BC-2 型,长春吉大仪器股份有限公司;

电子天平:YP-6002B 型,精度 0.01 g,上海力辰仪器科技有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-2 型,精度 0.1 $^{\circ}\text{C}$,常州越新仪器制造有限公司;

多功能色差仪:NR60CP 型,深圳市三恩时科技有限公司;

电力监测仪:KAL-10A 型,上海希崖电子有限公司;

游标卡尺: SJ-455515 型,海宁上匠工具有限公司;

切片机: GZM-2100 型,任丘市格芝美电子商务有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 南瓜干燥工艺 选择颜色均匀、表皮光滑无明显缺陷的南瓜,试验前将南瓜于常温放置 30 min,使其温度与室温一致,称取 (100.0 ± 0.5) g 南瓜,切片,按图 1 进行干燥。

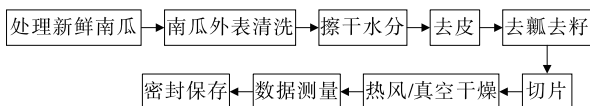


图 1 南瓜干燥工艺流程图

Figure 1 Pumpkin drying process flow chart

1.2.2 热风干燥 参照黄敏等^[15]的方法并修改。预热热风干燥设备 30 min,固定热风风速 1.5 m/s,切片厚度 4 mm,采用 3 组不同的热风干燥温度(55, 60, 65 $^{\circ}\text{C}$)进行干燥,每隔 15 min 称重,直至含水率 $\leq 10\%$ 。

1.2.3 真空干燥 参照李官丽等^[16]的方法并修改。预热真空干燥箱 30 min,固定真空度 0.05 MPa,切片厚度 4 mm,于不同温度(55, 60, 65 $^{\circ}\text{C}$)下进行真空干燥。

1.2.4 热风—真空联合干燥 参照樊梦珂等^[17]、盛韶阳等^[18]的方法并修改。预热热风干燥设备 30 min,固定切片厚度 4 mm,热风风速 1.5 m/s,采用不同的温度(55, 60, 65 $^{\circ}\text{C}$),不同的转换点含水率(30%, 40%, 50%)进行干燥,每隔 15 min 称重,到达设定的转换点含水率后,放入预热好的真空干燥箱中进行干燥,固定真空度为 0.05 MPa,真空干燥温度与热风干燥温度相同。

1.2.5 响应面试验 选择热风干燥温度、转换点含水率和真空干燥温度作为试验因素,以单位能耗、复水比和色差作为响应指标,进行三因素三水平的 Box-Behnken 响应面试验优化南瓜热风—真空联合干燥工艺参数。

1.3 试验指标测定

1.3.1 干基含水率 按式(1)计算干基含水率^[19]。

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d}, \quad (1)$$

式中:

M_t ——试样在 t 时刻的干基含水率, g/g;

m_t ——试样在 t 时刻的质量, g;

m_d ——试样的绝干物质质量, g。

1.3.2 水分比(MR) 按式(2)计算水分比^[20]。

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (2)$$

式中:

M_R ——试样在 t 时刻的水分比;

M_e ——试样达到平衡时的干基含水率, g/g;

M_0 ——试样的初始干基含水率, g/g。

1.3.3 干燥速率(DR) 按式(3)计算干燥速率^[21]。

$$D_R = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t}, \quad (3)$$

式中:

D_R ——试样在 t 时刻的干燥速率, $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{min})$;

$M_{t+\Delta t}$ ——试样在 $t + \Delta t$ 时刻的干基含水率, g/g 。

1.3.4 单位能耗 单位能耗是指每蒸发干燥物料一个单位质量水分所消耗的电能,按式(4)进行计算^[22]。

$$E = \frac{Q}{m}, \quad (4)$$

式中:

E ——单位能耗, $(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{kg}$;

Q ——干燥过程消耗总电能, $\text{kW} \cdot \text{h}$;

m ——干燥物料质量, kg 。

1.3.5 复水比 参照丁俊雄等^[23-25]的方法并修改。将 $(6.0 \pm 0.5) \text{ g}$ 南瓜样品放入 640 mL 水中,保持 40°C 恒温,复水 30 min ,取出沥干,并用吸水纸擦干表面水分,称重。按式(5)计算复水比。

$$W_r = \frac{W_t}{W_d}, \quad (5)$$

式中:

W_r ——复水比, g/g ;

W_t ——复水后质量, g ;

W_d ——复水前质量, g 。

1.3.6 色差 随机抽取 3 片新鲜南瓜,在每片南瓜的两面随机取 3 个点进行测量,并按式(6)计算色差^[26]。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}, \quad (6)$$

式中:

ΔE ——色差;

L^* 、 a^* 、 b^* ——干燥后南瓜的色泽参数值;

L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——新鲜南瓜的色泽参数值。

1.4 神经网络模型

1.4.1 熵权法 熵权法是一种客观的加权方法,用于衡量指标的离散程度,离散程度越大,该指标对综合指标的影响越大^[27]。首先对数据进行归一化处理,分别按式(7)、式(8)计算越大越优型指标和越小越优型指标^[28]。

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (7)$$

$$X'_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (8)$$

式中:

X_{ij} ——第 i 次试验时第 j 个评价指标的值;

$X_{\min}$ ——第 j 个评价指标的最小值;

$X_{\max}$ ——第 j 个评价指标的最大值;

X'_{ij} ——第 i 次试验时第 j 个评价指标的归一化值。

代入式(9)得到标准化数据。

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n), \quad (9)$$

式中:

P_{ij} ——第 i 次试验时第 j 个评价指标的标准化值。

根据式(10)得到第 j 个评价指标的信息熵。

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}, \quad (10)$$

式中:

H_j ——第 j 个评价指标的信息熵;

$$k = \frac{1}{\ln m};$$

m ——项目数。

按式(11)计算第 j 个评价指标的熵权值。

$$w_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)}, \quad (11)$$

式中:

w_j ——第 j 个评价指标的熵权值;

n ——评价指标数。

1.4.2 归一化处理 将单位能耗、复水比和色差值转换为无量纲的纯数值,使其数值分布在 $[0, 1]$,并按式(12)进行计算^[29]。

$$U_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (12)$$

式中:

U_i ——归一化后的指标值;

X_i ——原始指标值;

$X_{\min}$ ——原始指标中的最小值;

$X_{\max}$ ——原始指标中的最大值。

1.4.3 加权评分法 为了将多个指标转化为单个综合指标,根据各指标不同的权重值按式(13)进行综合计算^[30]。

$$Y = \lambda_1 U_1 + \lambda_2 U_2 + \lambda_3 U_3 + \dots + \lambda_n U_n, \quad (13)$$

式中:

Y ——综合指标值;

U_n ——第 n 个指标归一化后的指标值;

λ_n ——第 n 个指标的权重值。

1.4.4 BP 神经网络模型 BP 神经网络试验模型选取一个隐含层,神经网络模型输入层神经元与试验影响因素保持一致,即热风干燥温度、转换点含水率以及真空干燥温度作为输入层神经元,3 个评价指标经赋权计算后得到的综合指标作为输出层神经元,即输入层神经元数为 3,输出层神经元数为 1。隐含层的神经元个数按式(14)进行确定^[31]。

$$m = \sqrt{a+b} + n, \quad (14)$$

式中:

m ——隐含层节点数;

a ——输入层节点数;

b ——输出层节点数;
 n ——1~10 的常数。

1.4.5 基于遗传算法的多目标优化 遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是一种全新的全局搜索方法, 它基于自然选择和遗传机制的随机非线性优化, 并且遗传算法结合 BP 神经网络模型的方法可以避免陷入局部最优解的问题, 更适合得到全局最优的设计^[32]。

遗传算法优化的基本流程: 初始化种群^[33], 随机生成一组初始解作为种群; 通过适应度值评估个体的优劣; 选择优秀个体作为父代; 通过交叉操作产生新个体, 交换父代基因; 通过基因突变引入新的基因片段; 新个体加入到种群中; 若满足终止条件, 则输出最优解, 否则返回第 3 步重新开始^[34]。

1.5 数据处理

试验数据均为 3 次重复试验的平均值, 采用 Design-Expert 12 软件进行响应面试验设计, 采用 Matlab 2021a 软件进行 BP 神经网络模型建立, 采用 Origin2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 干燥特性对比

由表 1 和图 2 可知, 3 种干燥温度下, 真空干燥的持续时间最长, 远超过热风干燥和联合干燥的。当干燥温度分别为 55, 60, 65 ℃, 转换点含水率为 30% 时, 联合干燥时间分别比真空干燥的缩短了 52.63%, 56.25%, 59.17%; 转换点含水率为 40% 时, 联合干燥时间分别比真空干燥的缩短了 52.89%, 58.33%, 62.50%; 转换点含水率为 50% 时, 联合干燥时间分别比真空干燥的缩短了

63.16%, 60.42%, 67.50%, 说明联合干燥方式可提高真空干燥效率。

由图 2 可知, 热风干燥及联合干燥的升速及降速干燥阶段较真空干燥明显, 主要是因为热风干燥中, 热量和风直接作用于南瓜表面, 影响南瓜表面的热交换和空气流动, 从而快速去除南瓜表面水分, 且干燥水分以自由水为主; 而到干燥中后期, 南瓜内部水分扩散速度小于表面水分蒸发速度^[35], 水分扩散到表面的阻力增大, 且结合水较难蒸发, 所以干燥速率下降; 真空干燥中, 南瓜始终处于真空干燥箱内, 无风速等外界因素干扰, 南瓜表面的水分受热汽化, 被真空设备排除, 南瓜表面的水分逐渐减少, 在南瓜内部与表面之间形成湿度差, 内部的水分在湿度差的作用下, 不断向表面扩散, 到达表面后汽化, 且在真空干燥过程中, 同时存在着压力差, 使得被汽化的水分子加速向真空空间移动。到了干燥后期, 即南瓜含水量减少到一定程度, 从南瓜中蒸发出来的水分显著减少, 若加热量不变, 则南瓜整体温度开始升高, 蒸发表面与空间

表 1 不同温度下 3 种干燥方式的干燥时间

Table 1 Drying time of three drying methods at different temperatures

干燥方式 及条件	干燥时间/min		
	55 ℃	60 ℃	65 ℃
热风干燥	300	285	210
真空干燥	855	720	600
联合干燥-30%	315	285	195
联合干燥-40%	360	300	225
联合干燥-50%	405	315	245

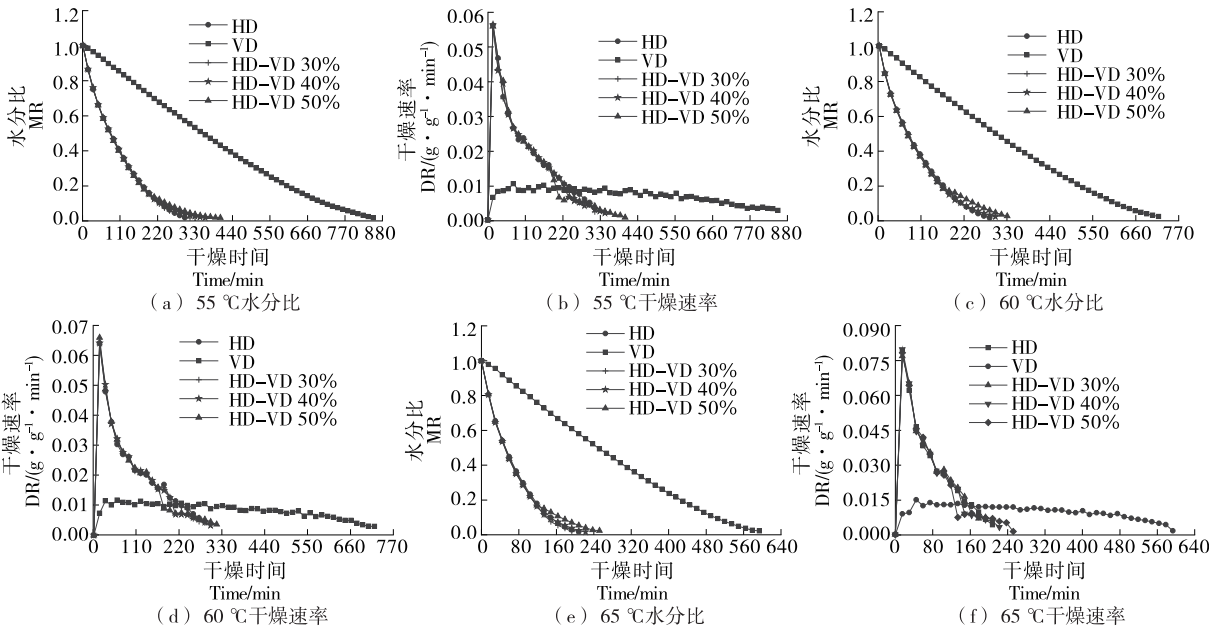


图 2 不同温度下 3 种干燥方式的水分比和干燥速率曲线图

Figure 2 Moisture ratio and drying rate curve of three drying methods at different temperatures

压力差减小,干燥进入减速阶段^[36];此外,南瓜中富含糖类、蛋白质等胶体性物质,具有胶体毛细管的多孔性组织结构,对南瓜内部水分的迁移存在着较强的阻滞作用^[37],在南瓜表面水分蒸发强烈时,干燥速率受到内部水分扩散的制约。

2.2 单位能耗对比

由图3可知,相同干燥温度下,热风干燥的单位能耗最高,真空干燥的最低,单位能耗主要受功率和时间的影 响,热风干燥设备的功率相较于真空干燥设备的更高,因此,联合干燥的单位能耗处于热风干燥和真空干燥之间,相较于热风干燥,联合干燥可以降低干燥能耗。

2.3 复水比对比

由图4可知,真空干燥的复水比高于热风干燥的。这是因为真空度增大了物料的内外压差,使物料膨胀性增强^[38],有利于物料干制品结构呈多孔疏松状态,从而增大复水比;热风干燥中,热量直接作用于物料表面,且温度越高,果蔬内部细胞组织越容易被破坏^[39],物料会失去原有完整的结构,果蔬毛细管收缩较大,从而使水分进入组织的阻力增大^[40],降低其吸水性能,因此复水性能下

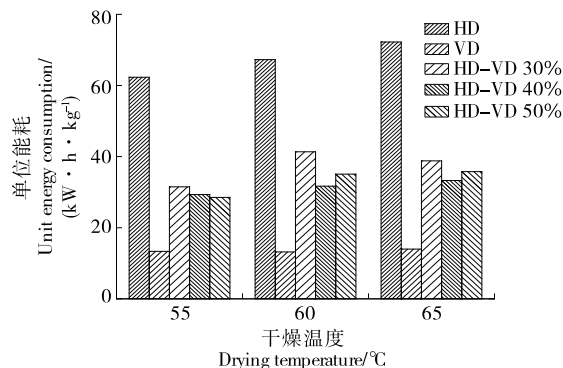


图3 不同干燥条件下单一干燥和联合干燥的单位能耗
Figure 3 Unit energy consumption of single drying and combined drying at different drying conditions

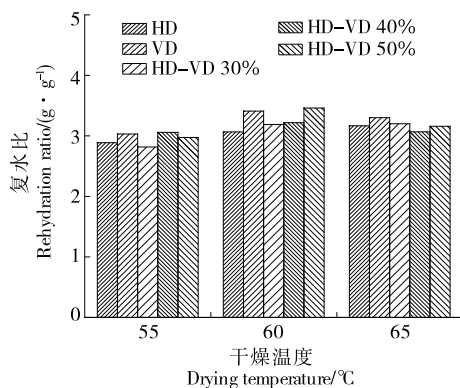


图4 不同干燥条件下单一干燥和联合干燥的复水比
Figure 4 Rehydration ratio of single drying and combined drying at different drying conditions

降。联合干燥中,南瓜复水比受温度、风速、含水率转换比及真空度的综合影响,只有在适宜的干燥参数下,其制品品质相对于热风干燥才会提升,需结合数学模型进一步分析。

2.4 色差对比

由图5可知,干燥温度55,65℃下的南瓜色差均高于60℃下的,这是因为干燥温度为55℃时,热风干燥时间较长,导致对南瓜内部的营养成分破坏较大,而干燥温度为65℃时,美拉德反应较为剧烈,使得南瓜片颜色加深^[41]。

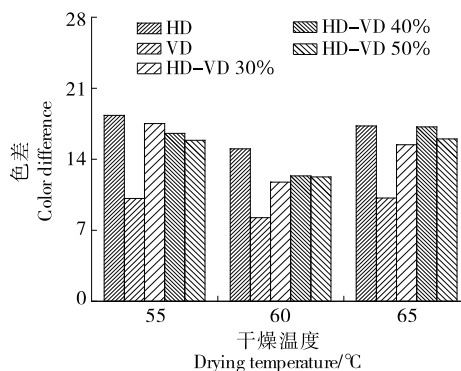


图5 不同干燥条件下单一干燥和联合干燥的色差
Figure 5 Color difference of single drying and combined drying at different drying conditions

相同干燥温度下,真空干燥的色差值最小,热风干燥的最大。热风干燥过程中,南瓜内部会发生各种生化反应,如对南瓜抗坏血酸、类胡萝卜素、酚类物质等产生影响^[42],从而使南瓜色泽发生变化;真空干燥过程中,真空干燥状态下水分沸点降低,蒸发速率加快,使得南瓜内部水分在低温下被蒸发,降低了高温对南瓜内部营养物质的破坏,得到的南瓜干色差值较小。同等试验条件下,南瓜真空干燥的色差值小于热风干燥的,说明真空干燥对南瓜抗坏血酸、类胡萝卜素、酚类物质等的影响较小。

综上,在联合干燥中,热风干燥温度、含水率转换点及真空干燥温度,对单位能耗、复水比及色差3个指标的影响规律不能直接得到,需采用熵权结合加权评分法的综合指标进一步分析。

2.5 南瓜热风—真空联合干燥工艺参数优化

2.5.1 Box-Behnken 响应面试验 在单因素试验基础上,选择热风干燥温度、转换点含水量和真空干燥温度为因素,以单位能耗、复水比和色差为评价指标,采用三因素三水平响应面试验对南瓜热风—真空联合干燥工艺进行优化,试验因素水平见表2,试验设计方案及结果见表3。

2.5.2 基于熵权结合加权评分法的综合指标 在南瓜热风—真空联合干燥的3个评价指标中,单位能耗和色差值为越小越优型指标,复水比为越大越优型指标,分别代

入式(7)~式(11)中,得到单位能耗 Y_1 、复水比 Y_2 和色差 Y_3 的权重系数见表 4。

根据式(12)和式(13)计算得到单位能耗 Y_1 、复水比 Y_2 和色差 Y_3 的综合指标值如表 5 所示。

2.5.3 BP 神经网络模型的建立 以热风干燥温度、转换点含水率和真空干燥温度为试验因素,以综合指标值为评价指标,南瓜热风—真空联合干燥的神经网络模型输入层的节点数为 3,输出层的节点数为 1,选择单隐含层建立 BP 神经网络模型。

表 2 Box-Behnken 响应面试验因素水平表
Table 2 Box-Behnken response surface experimental factor level table

编码	X ₁ 热风干燥 温度/℃	X ₂ 转换点 含水率/%	X ₃ 真空干燥 温度/℃
−1	55	30	55
0	60	40	60
1	65	50	65

表 3 Box-Behnken 响应面试验设计及结果
Table 3 Box-Behnken response surface experimental design and results

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	单位能耗 Y_1 / (kW · h · kg ^{−1})	复水比 Y_2 / (g · g ^{−1})	色差 Y_3
1	0	−1	−1	32.985	3.352	18.004
2	0	−1	1	34.852	2.790	20.885
3	0	0	0	32.052	3.209	13.010
4	1	1	0	30.332	3.768	14.148
5	1	0	1	33.262	3.068	17.192
6	1	0	−1	32.843	3.435	14.739
7	0	0	0	32.107	3.119	12.890
8	1	−1	0	36.981	3.546	15.924
9	−1	0	1	32.340	2.574	21.582
10	−1	−1	0	34.188	3.173	19.413
11	−1	1	0	28.262	3.369	15.976
12	0	1	−1	27.082	3.428	14.019
13	−1	0	−1	29.320	3.058	16.554
14	0	0	0	31.168	3.324	12.416
15	0	0	0	31.684	3.218	12.362
16	0	0	0	31.323	3.253	12.860
17	0	1	1	27.892	3.185	18.406

表 4 熵权法计算结果
Table 4 Calculation result of entropy weight method

评价指标	单位	信息熵 H_j	信息效用值	权重 w_j
单位能耗 Y_1	(kW · h)/kg	0.952 3	0.047 7	0.323 9
复水比 Y_2	g/g	0.960 3	0.039 7	0.269 0
色差 Y_3		0.940 0	0.060 0	0.407 3

由式(14)确定该 BP 神经网络模型的隐含层节点数为 3~12。为满足 BP 神经网络模型训练需要的大量样本数据,除使用南瓜热风—真空联合干燥试验的试验数据外,采用虚拟样本,在每个实际样本的各变量增加一个 $\pm \Delta i$ 值生成虚拟样本^[43], Δi 取 0.2%,根据 $L_8(2^7)$ 正交设计表,使每个实际样本产生 8 个虚拟样本,共有 136 个虚拟样本,加上 17 个实际样本,共有 153 个样本参加 BP

表 5 综合指标值
Table 5 Comprehensive index value

试验号	综合指标	试验号	综合指标
1	0.464 1	10	0.322 2
2	0.149 1	11	0.712 0
3	0.764 1	12	0.850 4
4	0.815 0	13	0.581 8
5	0.426 9	14	0.666 2
6	0.602 0	15	0.683 0
7	0.723 4	16	0.700 8
8	0.468 9	17	0.575 4
9	0.151 9		

神经网络模型训练和测试,不同隐含层节点数下的 BP 神经网络模型训练结果显示,当隐含层神经元个数为 7 时,相关系数最高,均方根误差值最小,所以确定隐含层节点数为 7。

在 17 组试验样本中去掉综合指标最高值和最低值,从剩余的 15 组中每组随机抽取 2 个样本,故该 BP 神经网络模型共有 30 个验证样本。由图 6 可知,经计算,预测值和试验值的最大误差为 7.97%, $<10\%$,说明该神经网络模型能够对不同试验因素和综合指标值进行非线性映射,具有良好的可预测性和较高的准确性。

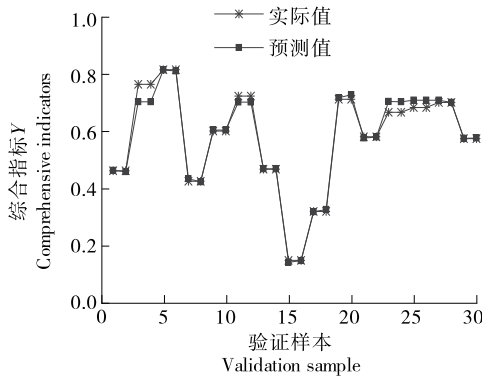
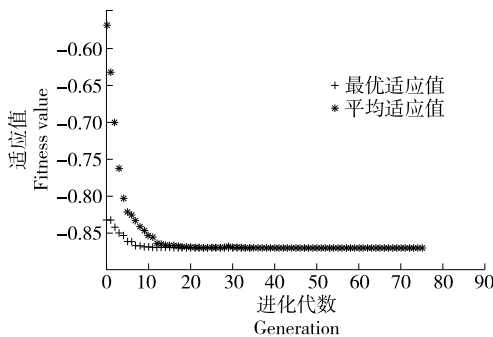


图 6 神经网络模型预测值与实际值对比图

Figure 6 Comparison between predicted value and actual value of neural network model

2.5.4 基于 BP 神经网络模型结合遗传算法寻优 将遗传算法与 BP 神经网络模型相结合,以找到南瓜热风—真空联合干燥过程的最佳试验参数组合,以熵权法为 3 个评价指标赋权得到的综合指标作为优化对象,遗传算法中设置的参数为种群大小 50,最大进化代数 200,得到适应度曲线如图 7 所示。由图 7 可知,最优综合指标为 0.870 3,此时热风干燥温度为 65℃,转换点含水率为 50%,真空干燥温度为 56.050 9℃,单位能耗为 29.992 (kW·h)/kg、复水比为 3.715 g/g,色差为 14.592。

为了验证所得最优参数的可靠性,取热风干燥温度



最优值-0.870 258;平均值-0.870 257

图 7 适应度曲线

Figure 7 Fitness curve

65℃,转换点含水率 50%,真空干燥温度 56℃进行 3 次平行实验,遗传算法所得最优值和验证实验值见表 6。由表 6 可知,各指标试验值与遗传算法优化值的平均相对误差分别为 2.50%,5.53%,4.84%,3 个指标的平均相对误差均 $<6\%$,说明 BP 神经网络模型结合遗传算法的预测精度较高,其对应的参数可作为南瓜片热风—真空联合干燥的最优工艺参数。

表 6 遗传算法优化值与验证实验值的对比

Table 6 Comparison of optimized values of genetic algorithm and actual values of validation test

指标	单位	验证实验值	遗传算法优化值	平均相对误差/%
单位能耗 Y_1	(kW·h)/kg	29.242	29.992	2.50
复水比 Y_2	g/g	3.510	3.715	5.53
色差 Y_3		15.298	14.592	4.84

3 结论

(1) 热风—真空联合干燥时间较真空干燥时间缩短,当干燥温度分别为 55,60,65℃时,联合干燥时间分别比真空干燥时间缩短了 52.63%,56.25%,59.17%;相同温度下,联合干燥单位能耗介于热风干燥和真空干燥之间;当干燥温度为 60℃时,联合干燥的色泽品质比热风干燥好;联合干燥的复水比只有在适宜的参数下优于热风干燥的。

(2) 经过遗传算法寻优得到的最优综合指标为 0.870 3,对应的试验条件为热风干燥温度 65℃,转换点含水率 50%,真空干燥温度 56.050 9℃,此时的单位能耗为 29.992 (kW·h)/kg、复水比为 3.715 g/g,色差为 14.592。单位能耗、复水比和色差验证实验值与遗传算法优化值的平均相对误差分别为 2.50%,5.53%,4.84%,均 $<6\%$ 。

(3) 结合 BP 神经网络模型的遗传算法模型可优化南瓜热风—真空联合干燥工艺参数。研究固定了热风风速和真空度,仅考虑了特定热风风速 1.5 m/s 及真空度 0.05 MPa 下的热风—真空联合干燥,且试验水平温度跨度为 5℃、转换点含水率跨度为 10%,因素水平不够细化,后续可在此方面进一步优化。

参考文献

[1] 郭玉萍. 南瓜粉的加工工艺及特性研究[D]. 厦门: 集美大学, 2019: 1-8.
GUO Y P. Study on processing technology and characteristics of pumpkin powder[D]. Xiamen: Jimei University, 2019: 1-8.
[2] 徐树来, 李柱刚, 李晓娟, 等. 我国南瓜加工现状、存在问题及发展对策[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 434-439.

- XU S L, LI Z G, LI X J, et al. The processing status, existing problems and development countermeasures of the pumpkin processing industry in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 434-439.
- [3] 王晓龙. 南瓜面条加工工艺及储存条件对其品质影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022: 1-8.
- WANG X L. Research on the effect of processing technology and storage conditions of pumpkin noodles on quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022: 1-8.
- [4] 任广乾, 杨世康, 卞世杰, 等. 基于相关性和主成分分析评价南瓜的营养品质[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(6): 37-42.
- REN G Q, YANG S K, BIAN S J, et al. Evaluation of pumpkin nutrient quality based on correlation and principal component analysis[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(6): 37-42.
- [5] CHE Q, LU Y, BI J, et al. Quality assessment and variety classification of seed-used pumpkin by-products: potential values to deep processing[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(12): 4 095-4 104.
- [6] ONWUDE D I, HASHIM N, JANUS R, et al. Color change kinetics and total carotenoid content of pumpkin as affected by drying temperature[J]. Italian Journal of Food Science, 2017, 29(29): 2 017-2 018.
- [7] 代亚萍, 邓凯波, 郑宝东. 南瓜片太阳能—热泵联合干燥特性及动力学模型[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(2): 259-265.
- DAI Y P, DENG K B, ZHENG B D. Drying characteristics and dynamic analysis of pumpkin slices using solar-assisted heat pump drying[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 48(2): 259-265.
- [8] 汤尚文, 马雪伟, 于博, 等. 南瓜红外干燥模型及关键参数计算[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(1): 124-129.
- TANG S W, MA X W, YU B, et al. Infrared radiation drying model and key parameters of pumpkin [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(1): 124-129.
- [9] 王军, 程晶晶, 余垒. 南瓜片热风—微波联合干燥特性及品质评价[J]. 食品工业, 2016, 37(4): 84-88.
- WANG J, CHENG J J, YU L. Characteristics of combined hot-air and microwave drying for pumpkin slice and quality evaluation[J]. The Food Industry, 2016, 37(4): 84-88.
- [10] 欧阳梦云. 南瓜片热风干燥过程中色泽变化及美拉德反应机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021: 16-34.
- OUYANG M Y. Research on color change and Maillard reaction mechanism of pumpkin slices during hot air drying[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021: 16-34.
- [11] ANDO Y, OKUNISHI T, OKADOME H. Influences of blanching and freezing pretreatments on moisture diffusivity and quality attributes of pumpkin slices during convective air-drying[J]. Food & Bioprocess Technology, 2019, 12(11): 1 821-1 831.
- [12] IGBOZULIKE A O, OYINLOYE G M, AMAMGBO N. Modelling of fluted pumpkin seed drying kinetics [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2020, 22(2): 272-278.
- [13] BENSEDDIK A, BENAHMED-DJILALI A, AZZI A, et al. Effect of drying processes on the final quality of potimarron pumpkin (*Cucurbita maxima*) powders[J]. Journal of Dispersion Science & Technology, 2022, 43(1): 136-146.
- [14] SABANCI S, TÜRKÖGLÜ T, DIRIM S N. Determination of shrinkage characteristics of pumpkin discs during convection, microwave, and combined drying using computer-aided technique: image processing application [J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(8): 1-10.
- [15] 黄敏, 甘婷, 易萍, 等. 芒果切片热风干燥特性及模型[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 179-186, 209.
- HUANG M, GAN T, YI P, et al. Hot air drying characteristics and model of Mango slices[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 179-186, 209.
- [16] 李官丽, 吴秋月, 陈锡霞, 等. 干燥方式对油茶粉品质及挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 210-216.
- LI G L, WU Q Y, CHEN X X, et al. Effects of drying methods on the quality and volatile flavor compounds of oil tea powder[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 210-216.
- [17] 樊梦珂, 陈鹏泉, 刘烨, 等. 高水分小麦热风干燥后品质的变化[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 139-145, 191.
- FAN M K, CHEN P X, LIU Y, et al. Study of quality changes in high moisture wheat after hot air drying[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 139-145, 191.
- [18] 盛韶阳, 吴敏, 胡纯秋, 等. 热风—真空复合工艺干燥玉米力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 476-482.
- SHENG S Y, WU M, HU C Q, et al. Mechanical properties of maize kernel dried by hot-air-vacuum compound process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 476-482.
- [19] 刘德成, 郑霞, 肖红伟, 等. 红枣片冷冻—红外组合干燥特性[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 128-135.
- LIU D C, ZHENG X, XIAO H W, et al. Characteristics of freeze-infrared combined drying of jujube slices[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 128-135.
- [20] NING X, LEE J, HAN C. Drying characteristics and quality of red ginseng using far-infrared rays[J]. Journal of Ginseng Research, 2015, 39(4): 371-375.
- [21] 赵红霞, 王应强, 马玉荷, 等. 微波干燥条件对杏脯干燥特性与品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 123-129.
- ZHONG H X, WANG Y Q, MA Y H, et al. Effects of different microwave drying conditions on drying characteristics and quality of preserved apricots[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 123-129.
- [22] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277-284.
- CHEN J K, LIN H T, LIN Y F, et al. Optimized technology of

- Pleurotus eryngii* by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(3): 277-284.
- [23] 丁俊雄. 香菇热风干燥特性预测模型建立及其工艺参数优化研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2021: 9-17.
- DING J X. Study on the characteristics prediction model of hot-air drying mushrooms and optimization of drying process parameters [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2021: 9-17.
- [24] 喻芬. 枸杞真空—压力脉动联合干燥工艺研究[D]. 南昌: 江西中医药大学, 2021: 6-23.
- YU F. Research on the vacuum-pressure pulsation combined drying process of wolfberry[D]. Nanchang: Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, 2021: 6-23.
- [25] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 光皮木瓜真空脉动干燥特性及神经网络模型[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 147-153.
- JU H Y, ZHAO S H, ZHAO H Y, et al. Drying characteristics of Chaenomeles sinensis with vacuum pulsed drying technology based on BP neural network mode[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 147-153.
- [26] 曲文娟, 凡威, 马海乐, 等. 核桃滚筒催化红外—热风干燥试验及能耗分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 163-168, 193.
- QU W J, FAN W, MA H L, et al. Experiment and energy consumption analysis of walnut drum catalytic infrared-hot air drying[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 163-168, 193.
- [27] 刘路路, 李可, 韦智江, 等. 基于响应面法和熵权法优化连翘叶中连翘酯苷 A、连翘苷和芦丁提取工艺[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 166-173.
- LIU L L, LI K, WEI Z J, et al. Optimization of extraction process of forsythoside A, forsythin and rutin from forsythia suspensa leaves based on response surface methodology and entropy weight method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 166-173.
- [28] 王玉霞, 武晓玉, 夏鹏飞, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型对经不同方法干燥的苦水玫瑰品质的综合评价[J]. 中成药, 2021, 43(5): 1 241-1 248.
- WANG Y X, WU X Y, XIA P F, et al. Entropy-based TOPSIS model for comprehensive evaluation of quality of differently dried Rosasertata×Rosa rugosa[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2021, 43(5): 1 241-1 248.
- [29] 王玲, 田冰, 彭林, 等. 热风—微波联合干燥青椒工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(18): 176-182.
- WANG L, TIAN B, PENG L, et al. Optimization of hot air-microwave combined drying of Zanthoxylum schinifolium[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(18): 176-182.
- [30] 邓建猛, 王红军, 黎邹邹, 等. 基于高光谱技术的马铃薯外部品质检测[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 122-125, 211.
- DENG J M, WANG H J, LI Z Z, et al. Detection of potato external quality based on hyperspectral technology[J]. Food & Machinery, 2016, 32(11): 122-125, 211.
- [31] 丁国超, 施雪玲, 胡军. 基于 CGA-BP 神经网络的好氧堆肥曝气供氧量预测模型[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 211-217.
- DING G C, SHI X L, HU J. Prediction model of the aeration oxygen supply for aerobic composting using CGA-BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(7): 211-217.
- [32] 郭利进, 乔志忠. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的粮食温度预测研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(1): 34-37.
- GUO L J, QIAO Z Z. Study on grain temperature prediction based on genetic algorithm optimized BP neural network[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(1): 34-37.
- [33] 李艳肖, 黄晓玮, 邹小波, 等. 蚁群和遗传算法优化花茶花青素近红外光谱预测模型的比较[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(6): 575-583.
- LI Y X, HUANG X W, ZOU X B, et al. Optimization of NIR spectroscopy based on ant colony optimization and genetic algorithm for the anthocyanin content in scented tea[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2015, 34(6): 575-583.
- [34] LUKIC N L, BOŽIN-DAKIC M, GRAHOVAC J A, et al. Multi-objective optimization of microfiltration of baker's yeast using genetic algorithm [J]. Acta Periodica Technologica, 2017(48): 211-220.
- [35] 白竣文, 周存山, 蔡健荣, 等. 南瓜片真空脉动干燥特性及含水率预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 290-297.
- BAI J W, ZHOU C S, CAI J R, et al. Vacuum pulse drying characteristics and moisture content prediction of pumpkin slices [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(17): 290-297.
- [36] 徐成海. 真空干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 48-51.
- XU C H. Vacuum drying technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 48-51.
- [37] 王武, 刘进杰, 方红美, 等. 南瓜片真空干燥过程失水特性的试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002, 25(5): 786-789.
- WANG W, LIU J J, FANG H M, et al. Experimental study of dehydrating properties of pumpkin chips in vacuum drying [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2002, 25(5): 786-789.
- [38] 张孙现. 鲍鱼微波真空干燥的品质特性及机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 83-89.
- ZHANG S X. Study on the microwave vacuum drying quality characteristics and mechanism of abalone [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013: 83-89.
- [39] 马先英, 赵世明, 林艾光. 不同干燥方法对胡萝卜复水性及品质的影响[J]. 大连水产学院学报, 2006(2): 158-161.
- MA X Y, ZHAO S M, LIN A G. Effects of different drying methods on rehydration and quality of carrots[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2006(2): 158-161.

(下转第 240 页)

- effects of acetylated mycelia polysaccharides from *Pleurotus djamor*[J]. *Molecules*, 2019, 24(15): 2 698.
- [79] 李顺峰, 许方方, 崔国梅, 等. 不同纯化程度香菇柄多糖的乙酰化修饰及降血糖活性[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(6): 127-133.
- LI S F, XU F F, CUI G M, et al. Acetylation modification and hypoglycemic activity of *Lentinus edodes* stipe polysaccharide with different purification degrees[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(6): 127-133.
- [80] PENG Y Y, ZHANG J H, YANG H L, et al. Acetylation modification and antioxidant activity of polysaccharides from *Agrocybe cylindracea* [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(3): 1 911-1 919.
- [81] REN Y Y, SUN P P, JI Y P, et al. Carboxymethylation and acetylation of the polysaccharide from *Cordyceps militaris* and their α -glucosidase inhibitory activities [J]. *Natural Product Research*, 2020, 34(3): 369-377.
- [82] 邓婕, 牟璐, 童宇航, 等. 硒多糖的制备、结构表征及抗氧化活性的研究进展[J]. *食品科技*, 2022, 47(10): 8-15.
- DENG J, MOU L, DONG Y H, et al. Research progress in preparation, structure characterization and antioxidant activity of selenium polysaccharides[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(10): 8-15.
- [83] SIMSEK M, ASIYANBI-HAMMED T T, RASDAQ N, et al. Progress in bioactive polysaccharide-derivatives: a review[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(3): 1 612-1 627.
- [84] 古佩娴, 尹惠双, 胡坤, 等. 硒化猴头菇多糖的制备、结构表征及抗增殖活性[J]. *食品科学*, 2022, 43(22): 68-73.
- GU P X, YIN H S, HU K, et al. Preparation, structural characterization and anti-proliferation activity of selenized *Hericium erinaceus* polysaccharide[J]. *Food Science*, 2022, 43(22): 68-73.
- [85] LI Q, ZHU L F, QI X P, et al. Immunostimulatory and antioxidant activities of the selenized polysaccharide from edible *Grifola frondosa*[J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(4): 1 289-1 298.
- [86] 林怡辰. 黑木耳多糖硒对酒精性肝损伤的预防作用及其机制探究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022: 30-77.
- LIN Y C. Preventive effect of *Auricularia auricula* Selenium polysaccharide on alcoholic liver injury and its mechanism [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022: 30-77.
- [87] DONG Z, DONG G, LAI F R, et al. Purification and comparative study of bioactivities of a natural selenized polysaccharide from *Ganoderma lucidum* mycelia[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 190: 101-112.
- YOU L R, ZHAO Y, SHANG H Y, et al. Effects of beta-hydroxy-beta-methylbutyrate supplementation on protein synthesis in skeletal muscle of aged mice[J]. *Journal of Capital University of Physical Education and Sports*, 2018, 30(5): 466-472.
- [24] HAN X J, GOH K Y G, WEN X L, et al. The importance of mtorc1-autophagy axis for skeletal muscle diseases [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 24(1): 297.
- [25] 夏志, 赵艳, 丁孝民, 等. 抗阻训练改善骨骼肌衰老的关键基因与信号通路鉴定[J]. *中国体育科技*, 2021, 57(12): 92-100.
- XIA Z, ZHAO Y, DING X M, et al. Identification of crucial differentially expressed genes and signaling pathways in ameliorating skeletal muscle aging by resistance training[J]. *China Sport Science and Technology*, 2021, 57(12): 92-100.
- [26] 尤莉蓉, 赵艳, 尚画雨, 等. β -羟基- β -甲基丁酸对衰老小鼠腓肠肌蛋白质合成的影响研究[J]. *首都体育学院学报*, 2018, 30(5): 466-472.
- [27] ASADI A, ARAZI H, SUZUKI K. Effects of β -hydroxy- β -methylbutyrate-free acid metabolism on strength, power and adaptability following resistance training [J]. *Nutrients*, 2017, 9(12): 1 316-1 329.
- [28] ARAZI H, TAATI B, SUZUKI K. A review of the effects of leucine metabolite (β -hydroxy- β -methylbutyrate) supplementation and resistance training on inflammatory markers: A new approach to oxidative stress and cardiovascular risk factors[J]. *Antioxidants (Basel)*, 2018, 7(10): 148.
- [40] 胡庆国, 张慙, 杜卫华, 等. 不同干燥方式对颗粒状果蔬品质变化的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2006, 25(2): 28-32.
- HU Q G, ZHANG M, DU W H, et al. Effect of different drying methods on the quality changes of the granular fruits and vegetables[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2006, 25(2): 28-32.
- [41] 张裕仁. 板栗热风—真空分段联合干燥的干燥动力学及工艺优化[D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 25-36.
- ZHANG Y R. Drying kinetics and process optimization of the persimmon combined hot air and vacuum drying [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019: 25-36.
- [42] OUYANG M Y, CAO S, HUANG Y Q, et al. Phenolics and ascorbic acid in pumpkin (*Cucurbita maxima*) slices: effects of hot air drying and degradation kinetics [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15: 247-255.
- [43] 钟旭美, 陈铭中, 庄婕, 等. BP神经网络结合遗传算法优化玫瑰茄火龙果固体饮料工艺条件[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19): 173-179.
- ZHONG X M, CHEN M Z, ZHUANG J, et al. Optimization of solid beverage process of rosette and dragon fruit by BP neural network combined with genetic algorithms [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(19): 173-179.