

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.02.024

# 马铃薯超声强化远红外辐射干燥特性及神经网络模型研究

## Drying characteristics and neural network model of ultrasound strengthened far-infrared radiation drying on potato

席慧涵<sup>1</sup> 刘云宏<sup>1,2</sup> 王琦<sup>1</sup> 李慧洋<sup>1</sup> 李功伟<sup>1</sup> 赵兰馨<sup>1</sup>

XI Hui-han<sup>1</sup> LIU Yun-hong<sup>1,2</sup> WANG Qi<sup>1</sup> LI Hui-yang<sup>1</sup> LI Gong-wei<sup>1</sup> ZHAO Lan-xin<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 农产品干燥装备河南省工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Henan Engineering Technology Research Center of Agricultural Product Drying Equipment, Luoyang, Henan 471023, China)

**摘要:**为研究马铃薯直触超声强化远红外辐射干燥规律, 利用超声远红外辐射干燥设备, 探讨超声功率及远红外辐射温度对马铃薯干燥特性和有效水分扩散系数的影响, 并构建了 Elman、RBF、BP 3 种神经网络模型。结果表明: 提高超声功率及辐射温度能够改善物料内部传质和传热状况, 进而减少干燥时间及提升干燥速率; 超声的强化效果随超声功率的增大而加强, 随着物料含水量的降低而逐渐减弱, 随辐射温度升高先加强后减弱; 有效水分扩散系数  $D_{\text{eff}}$  值为  $1.15 \times 10^{-10} \sim 3.18 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , 提高远红外辐射温度及超声功率均能促使水分流动与扩散, 从而提高  $D_{\text{eff}}$  值; 3 种神经网络模型均有较好的预测性能, 其中使用优化算法的 BP 网络模型的预测值与真实值拟合精度最高, 能够快速准确地预测马铃薯超声强化远红外辐射干燥过程中的含水率。

**关键词:** 马铃薯; 干燥; 超声; 远红外辐射; 神经网络

**Abstract:** In order to study drying characteristics of contact ultrasound strengthened far-infrared radiation drying on potato slices, a far-infrared radiation with ultrasound assistance was applied to study the effects of different ultrasound power and far-infrared radiation drying temperature on drying process and effective

moisture diffusivity values of potato. The results showed that the rise of both ultrasound power and radiation temperature could promote the mass and heat transfer in the material, shorten the drying time, and enhance the drying rate effectively of potato slices. The enhancing effect of ultrasound is weakened gradually with the decrease of water content of material and strengthened with the increase of ultrasonic power. The ultrasound strengthening phenomenon of first strengthening and then weakening with the increase of radiation temperature indicates that excessive radiation temperature will weaken the internal mass transfer effect. The effective moisture diffusion coefficient values are in the range of  $1.15 \times 10^{-10} \sim 3.18 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , and the increases of both ultrasound power and radiation temperature could promote the flow and diffusion of water, and therefore, improve the corresponding  $D_{\text{eff}}$  values. According to the drying process of potato, three neural network models, Elman, RBF and BP, were constructed to predict the material moisture content. The results showed that all the three neural networks could achieve good prediction performance. The BP network model, which using the optimization algorithm could reach the highest fitting precision between the predicted and real values, which indicates that the model could quickly and accurately predict the moisture content of potato during ultrasonic enhanced far-infrared radiation drying process.

**Keywords:** potato; drying; ultrasound; far-infrared radiation; network

**基金项目:** 河南省高校科技创新人才资助计划 (编号: 19HASTIT013); 河南省高校青年骨干教师资助计划 (编号: 2015GGJS-048); 国家大学生创新训练计划 (编号: 201810464010); 河南科技大学 SRTP 项目 (编号: 2018151)

**作者简介:** 席慧涵, 女, 河南科技大学在读本科生。

**通信作者:** 刘云宏 (1975—), 男, 河南科技大学副教授, 博士。

E-mail: beckybin@haust.edu.cn

**收稿日期:** 2018-09-03

马铃薯是老少皆宜的蔬菜之一<sup>[1]</sup>。马铃薯含有丰富的多酚类、维生素、矿物质等营养物质, 具有抗衰老、抗氧化、补气养血、健脑益智等功效<sup>[2-3]</sup>。然而, 马铃薯储存

不当会发生褐变甚至腐败,从而造成营养成分大量损失,因此,将马铃薯进行干燥是目前提高其经济价值的措施之一<sup>[4]</sup>。热风干燥是较常见的马铃薯干燥方法<sup>[5]</sup>,该方法虽然成本低廉、操作方便,但有干燥时间过长、热效率低、营养成分损失严重等缺点。由于马铃薯内部组织结构致密、水分扩散较难,干燥脱水速率主要取决于内部传热传质过程,因此,采取有效措施来促进内部传质和传热,减小水分扩散阻力并改善热量传递状况,将有利于提高脱水速率、缩短马铃薯的干燥时间。

近年来,远红外辐射因具有显著的热效应,相关干燥技术得到了广泛应用。远红外辐射具有一定的穿透性,可实现内部加热,从而加快物料水分从内部向外扩散与蒸发。有关紫薯<sup>[6]</sup>、红枣片<sup>[7]</sup>、胡萝卜<sup>[8]</sup>等远红外辐射干燥的研究表明,与传统干燥技术比较,远红外辐射干燥技术具有加热均匀、干燥速度快、产品品质好等优点<sup>[9-10]</sup>。此外,由于超声波明显的传质强化效应,超声强化干燥技术逐渐成为果蔬干燥研究的热点<sup>[11-13]</sup>,其中,直触超声强化干燥技术尤为引人注目。直触式超声是将超声波及其能量直接传入物料内部,从而促进水分传递及提高能量效率。Liu 等<sup>[14]</sup>、Schössler 等<sup>[15]</sup>探讨了直触式超声在干燥过程中的强化作用,结果表明,接触式超声可有效缩短物料干燥时间,提高干燥速率。综上可知,远红外辐射干燥技术具有改善物料内部传热的优点,直触式超声技术能够促进内部传质进程,因此,将超声强化与远红外辐射干燥相结合,理论上可改善物料的传热与传质状况,从而有效提高干燥速率。但目前未见直触超声强化远红外干燥马铃薯的研究报道。

物料含水率是体现干燥进程的重要参数,也是调节干燥参数的主要依据。但因干燥过程中含水率具有非线性和时变性的特点,并且常规的模型预测精度不高,存在局限性<sup>[16-17]</sup>。近些年,神经网络因其具有较高的非线性映射能力、很强的适应性<sup>[18]</sup>,已广泛应用于农产品干燥领域。Nadian 等<sup>[19]</sup>建立神经网络模型来预测苹果片在干燥中的色泽、水分变化。白竣文等<sup>[20]</sup>将神经网络应用于南瓜的真空脉动干燥,预测干燥过程中的含水率。但目前未见将神经网络用于超声强化远红外辐射干燥的研究报道。

本试验拟将直触式超声强化技术与远红外辐射干燥联合应用,研究超声功率及远红外辐射温度对马铃薯片干燥特性及有效水分扩散系数的影响,并采用 Elman、RBF、BP 3 种神经网络来建立马铃薯超声强化远红外辐射干燥过程的数学模型,确定最佳模型构建方法,以期对超声强化远红外辐射干燥技术及马铃薯干燥加工研究提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

马铃薯:购于河南洛阳。采用 105 °C<sup>[14]</sup>烘箱法测量

并计算得到新鲜马铃薯的初始干基含水率为(567±8)%。

### 1.2 仪器与设备

超声强化远红外辐射干燥装置:河南科技大学自制,具体结构和参数见文献<sup>[21]</sup>;

切片机:SHQ-1 型,德州天马机械有限公司;

电子天平:Scout SE 型,美国 OHAUS 公司。

### 1.3 干燥方法

干燥开始前,将马铃薯洗净去皮,切成直径 40 mm、厚度 3 mm 的薄片,每次取 10 片[(55±1)g]进行干燥试验。为有效抑制干燥时的酶促褐变,在干燥前,先进行沸水漂烫 2 min 的钝酶杀青处理,取出沥水后,平铺在超声振动盘上并放入超声联合远红外辐射干燥机中进行干燥。每隔 30 min 进行称重,直至干燥结束。

在研究过程中,将干燥介质温度、风速、辐射板距物料的距离分别固定为 30 °C、1 m/s、10 cm,并维持干燥初始物料量与物料厚度不变,分别设定红外辐射板温度为 200,240,280,320 °C,超声功率为 0,30,60 W,研究远红外辐射温度和超声功率对马铃薯干燥特性的影响。每组干燥试验均重复 3 次。

### 1.4 干燥指标计算

1.4.1 干基含水率 参照文献<sup>[21]</sup>。

1.4.2 干燥速率 参照文献<sup>[22]</sup>。

1.4.3 有效水分扩散系数 参照文献<sup>[23]</sup>。

### 1.5 神经网络模型建立的数据采集和预处理

对于本试验的干燥过程,其主要参数是超声功率、远红外辐射温度和干燥时间,物料水分比(MR)从初始到干燥结束共得到 162 组数据,随机选取 140 组作为神经网络训练数据,剩余 22 组作为预测数据。分别采用 Elman、RBF、BP 3 种神经网络来建立马铃薯超声强化远红外辐射干燥过程的数学模型。在进行网络训练前需先对数据进行归一化处理,将其控制在[-1,1]之内,这是为了避免因数据量纲和范围的差异影响拟合精度。

### 1.6 数据处理与分析

采用 Origin 8.5 统计软件进行数据处理,利用 MATLAB(R2014a)进行数学模型计算。选用决定系数  $R^2$  和均方根误差 RMSE 作为拟合评价指标, $R^2$  越大、RMSE 越小,则拟合精度越高<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 马铃薯超声强化远红外辐射干燥特性

在辐射温度分别为 200,240,280,320 °C 及超声功率为 0,30,60 W 的条件下,进行马铃薯片干燥试验,对应的干燥曲线及速率曲线如图 1 所示。

由图 1 可知,在所有的辐射温度下,提高超声功率均能缩短干燥时间、提高干燥速率。以 240 °C 辐射温度为例,与未施加超声的干燥时间(540 min)相比,施加超声功

率为 30,60 W 后的干燥时间分别缩短至 420,330 min,减少幅度分别达到 22.2%和 38.9%,对应的平均干燥速率分别为 1.34%/min 和 1.70%/min,与 0 W 时的 1.04%/min 相比,提高幅度分别为 28.8%和 63.5%。可见,在马铃薯

远红外辐射干燥过程施加超声,能够获得显著的强化效果,并且超声功率越大,强化作用越显著。由于超声的高频振动导致内部组织快速、反复压缩和扩张,使其产生大量的微细空泡,气泡瞬间爆裂后产生强大的动能和压缩

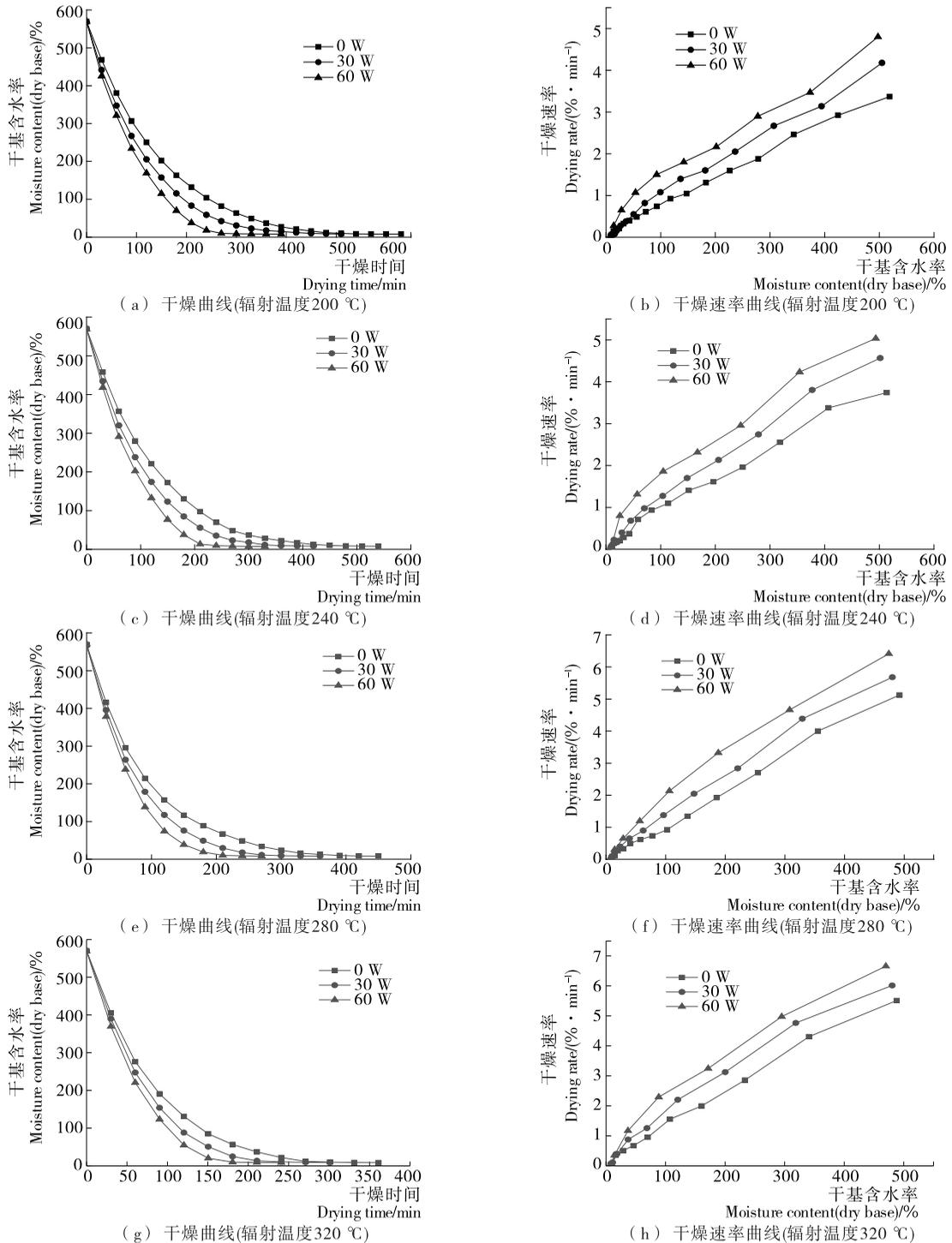


图 1 不同超声功率和辐射温度下马铃薯片干燥的干燥曲线与干燥速率曲线

Figure 1 Drying curves and drying rate curves of potato slices dried at different ultrasound powers and radiation temperatures

能<sup>[24]</sup>,这些能量使得原本与微细管壁紧密结合的水分子附着力降低,增强水分子的流动性并加快其扩散与迁移。另一方面,超声也会影响物料内部孔隙结构,增大微孔道的尺寸和连通度,可显著提高水分转移速率<sup>[25]</sup>。Ortuño 等<sup>[26]</sup>研究了超声技术在橘子皮对流干燥中的应用,发现超声可显著提高干燥传质系数和水分扩散能力,这与本研究所得的超声可有效提升干燥速率的结论相符。超声功率增加,物料内部振动加强,超声波能够产生更强的机械效应与空化效应,有利于水分湍动与扩散,从而能够快速完成干燥,提高干燥速率。

此外,由图 1 的干燥速率曲线还可知,随着水分含量的不断减少,干燥速率呈下降趋势,表明马铃薯干燥属于降速干燥过程。随着干燥的进行,不同超声功率下的干燥速率差异在不断缩小,在干燥末期,所有干燥速率曲线几乎重合。上述现象表明,超声波的强化效应与水分含量密切相关,且随含水率的降低而减弱。这是由于在马铃薯干燥的初始阶段,物料含水率较高,大量的自由水有利于超声的传递,超声波的衰减系数较小,内部传递阻力较小,有利于超声波穿入物料内部并产生较好的强化效应<sup>[14]</sup>,并且超声功率增大,相应产生的空化效应和机械效应更强,进一步加快水分脱除速率。但随着干燥的进行,物料内部水分含量不断减少,超声波衰减加剧,用于强化传质的超声能量利用率降低。

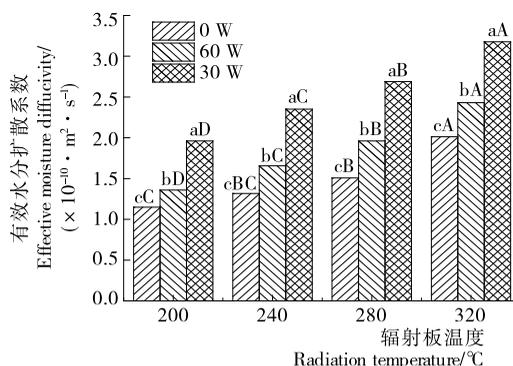
图 1 还表明了远红外辐射温度对马铃薯干燥时间及干燥速率的影响。在相同超声功率下,提高远红外辐射温度也能够明显地减少干燥时间、增大干燥速率。以超声功率 30 W 时为例,辐射温度分别为 200, 240, 280, 320 °C 时,对应的干燥时间分别为 510, 420, 360, 300 min, 对应的平均干燥速率为 1.10%/min, 1.34%/min, 1.55%/min, 1.87%/min。在远红外辐射干燥过程中,采用热电偶测量马铃薯片表面温度,在远红外辐射温度为 200, 240, 280, 320 °C 时,最终产品温度分别达到 (51.0±1.5), (60.0±1.0), (66.0±2.0), (71.0±0.8) °C。这表明提高辐射温度会导致物料表面温度的升高,有利于物料内部水分子运动及水分蒸发。远红外辐射板发射的能量传至物料内部并转化为热能,致使水分子运动加剧,提高水分子的能量及水分流动性,从而促进水分扩散。提高辐射板温度会产生更多的辐射能量,物料对能量的吸收率随之提高。因此增加远红外辐射温度,有利于加快内部的水分扩散与汽化,显著缩短干燥时间,提高产品速率。

从图 1 中还可看出,超声功率在不同辐射温度条件下对马铃薯干燥速率影响不同,在未施加超声时,辐射温度分别为 200, 240, 280, 320 °C 对应的平均干燥速率为 0.89%/min, 1.04%/min, 1.25%/min, 1.56%/min, 当施加 60 W 的超声功率时,平均干燥速率分别提高到 1.44%/min, 1.70%/min, 2.08%/min, 2.34%/min, 与未

施加超声时相比,提高幅度分别为 61.80%, 63.46%, 66.40%, 50.00%。上述现象表明,提高远红外辐射温度在一定程度上可增强超声的强化作用,但过高的加热温度又会削弱超声强化作用。这是由于随着远红外辐射温度的升高,马铃薯片吸收的能量随之增加,物料内部水分蒸发扩散能力也随之增强,并且超声波发射的能量直接传到物料内部之后,能够产生较强的空化效应和机械效应,进一步加剧水分子运动,提升其扩散速率。然而过高的辐射温度又会使物料中水分温度过高,相应的蒸汽分压升高到一定程度<sup>[21]</sup>,将会增加超声在物料内部产生微泡的难度,微泡爆破力也会有所下降。因此,过高的远红外辐射温度虽然能够实现良好的传热,但在一定程度会削弱超声的传质强化效果。

2.2 马铃薯干燥的有效水分扩散系数(D<sub>eff</sub>值)

马铃薯在不同超声功率和辐射温度下的有效水分扩散系数变化规律如图 2 所示,D<sub>eff</sub>值为 1.15×10<sup>-10</sup>~1.80×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s。图 2 中表明,D<sub>eff</sub>值随远红外辐射温度的升高而增大,以超声功率为 30 W 时为例,辐射温度 200 °C 时,D<sub>eff</sub>值为 1.36×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s,升高辐射温度分别到 240, 280, 320 °C 时,对应的 D<sub>eff</sub>值分别为 1.66×10<sup>-10</sup>, 1.96×10<sup>-10</sup>, 2.43×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s,提升幅度分别为 22.06%, 44.12%, 78.68%。由上述现象可知,远红外辐射温度升高,产生热效应更强烈,因此加快物料表面和内部的微细管道扩张并增加其数量,水分子扩散能力随之增强,相应的 D<sub>eff</sub>值就会提高。这一现象与 Sharma 等<sup>[27]</sup>的研究结果相同。此外,从图 2 中还可看出,D<sub>eff</sub>值随超声功率的增加而增大,以辐射温度为 200 °C 为例,施加 30, 60 W 的超声功率时,对应的 D<sub>eff</sub>值分别为 1.36×10<sup>-10</sup>, 1.96×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s,与未施加超声时相比,增加比率分别为 18.26%, 70.43%。这是由于增加超声功率可显著增强其产生的空化效应和机械效应,2种效应共同作用能够有效



不同字母表示在 95% 的置信水平有显著差异;小写字母表示超声功率,大写字母表示辐射温度

图 2 马铃薯超声强化远红外辐射干燥的 D<sub>eff</sub>值

Figure 2 The D<sub>eff</sub> values of ultrasound strengthened far-infrared radiation drying of potato

降低传质阻力,增强物料内部水分湍动并减弱物料组织结构对水分的吸附力和束缚力,有利于促进水分流动与扩散,从而提高有效水分扩散系数。

### 2.3 马铃薯干燥过程的神经网络模型建立

**2.3.1 Elman 神经网络模型** Elman 神经网络是一种反馈型网络,结构一般为 4 层:输入层、隐含层、承接层和输出层<sup>[28]</sup>。将干燥过程中的 3 个重要参数作为输入层的神经元,物料水分比(MR)作为输出层的神经元。从理论上讲,Elman 神经网络隐含层神经元数目可以任意选定,但是神经元数目越多,可以解决更复杂的问题,相应的精度和速度也会提高。经过多次尝试,隐层神经节点数为 30 时有最佳效果。进行权值修正时采用 BP 算法,该算法训练函数为默认值 traingdx,选择 tansig 作为输入层与隐含层之间的传输函数,purelin 作为隐含层与输出层之间的传输函数,mse 作为性能函数。按照上述结构建立网络模型,训练结果如图 3 所示,网络的目标误差达到 0.000 5 时,训练步数为 205。

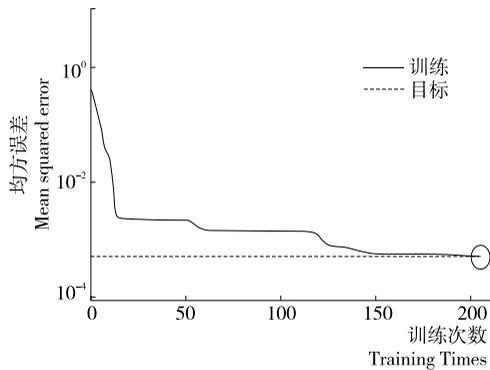


图 3 Elman 神经网络模型训练误差曲线  
Figure 3 Training error curve of Elman neural network model

**2.3.2 RBF 神经网络模型** RBF 神经网络(径向基网络)是一种 3 层前向网络。与其他前向型神经网络最大的区别在于,隐含层是采用局部响应的高斯函数作为激励函数,正因如此,RBF 网络具有训练时间短,能够逼近任意非线性函数的优势。RBF 网络中需要设定的参数只有分度密度 Spread,其值越大,函数越平滑,但太大又会造成传递函数的作用域扩大到全局,误差较大,丧失原本网络局部收敛的优势。经过多次尝试和误差对比,当 Spread=3 时,网络预测性能最好。

**2.3.3 BP 神经网络模型** BP 神经网络是一种典型的多层前向型网络,网络结构与 RBF 网络相同。BP 网络隐含层神经元个数不是固定的,需采用经验公式和多次训练选取最优值,根据 Kolmogorov 定理<sup>[29]</sup>和不断检验,隐含层节点数为 7 时有最佳的训练效果。模型选用优化的 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[30]</sup>,训练函数为 trainlm,BP 网

络模型中其他参数与 Elman 网络保持一致。按照上述算法建立 3-7-1 结构的 BP 神经网络模型,训练误差曲线如图 4 所示,网络的目标误差达到 0.000 5 时,训练步数为 151。

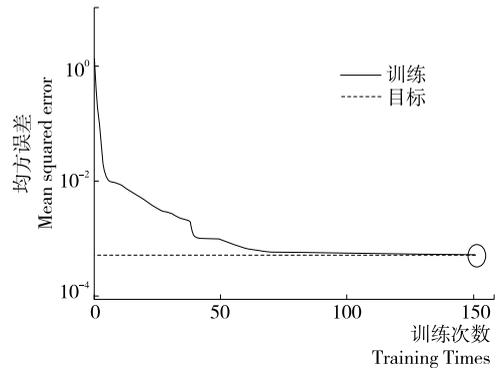


图 4 BP 神经网络模型训练误差曲线  
Figure 4 Training error curve of BP neural network model

**2.3.4 模型预测结果分析** 训练完成后,将剩余的 22 组数据用于网络预测,与试验所得的水分比(MR)作对比,结果如图 5 所示,可明显看出 BP 神经网络的预测值与真实值更为接近,预测性能高于其他 2 个神经网络模型。采用决定系数( $R^2$ )和均方根误差(RMSE)作为评价指标,对比结果如表 1 所示,3 种神经网络的  $R^2$  均在 99% 以上,预测性能较好,但使用优化算法的 BP 神经网络拟合

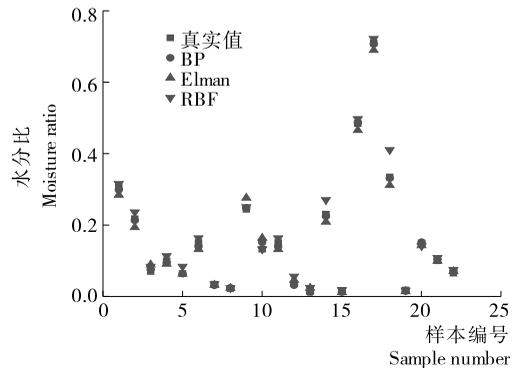


图 5 不同神经网络预测值对比  
Figure 5 Comparison of prediction results of different neural networks

表 1 RBF、Elman 和 BP 3 种神经网络模型结果比较  
Table 1 Comparison among RBF, Elman and BP models

模型	$R^2$	RMSE
RBF	0.991 7	0.021 2
Elman	0.992 4	0.016 3
BP	0.998 6	0.006 5

精度最高,  $R^2=0.9986$ ,  $RMSE=0.0065$ 。因此, BP 神经网络逼近能力更强, 误差更小, 能够很好地拟合马铃薯直触超声强化远红外辐射干燥过程。

### 3 结论

在马铃薯片超声强化远红外辐射干燥过程中, 超声功率增加、远红外辐射温度升高均可有效促进物料内部的传质与传热, 从而缩短干燥时间, 加快干燥速率。随着干燥的进行及水分含量逐渐减少, 超声波产生的强化效应不断减弱, 表明水分减少会导致超声传播衰减增大。在远红外辐射干燥过程中, 超声强化效果随温度升高呈先增加后下降的趋势, 表明过高的远红外辐射温度会减弱超声的传质强化效果。提高超声功率及远红外辐射温度可增加  $D_{eff}$  值, 表明两者均能促进干燥过程中的水分流动与扩散。针对不同超声功率、远红外辐射温度、干燥时间对马铃薯含水率的影响, 分别构建了 Elman、RBF、BP 3 种神经网络模型。3 种神经网络模型均有较好的预测性能, 其中使用优化算法的 BP 网络模型预测值与真实值最为接近, 能够快速准确地进行马铃薯超声强化远红外辐射干燥过程中含水率的预测。

本试验研究结果证实了将超声的传质强化和远红外辐射的良好传热性能相结合, 可以实现优势互补, 从而显著加快干燥进程、缩短干燥时间。然而, 超声对远红外辐射干燥过程的传质强化机理与品质保护机制需要进一步的研究。此外, 虽然本研究利用神经网络实现了马铃薯超声强化远红外辐射干燥过程的模拟, 但所建模型并未从微观角度来深入揭示干燥过程的质热传递机理, 因此, 超声强化远红外辐射干燥的质热传递解析也是未来研究的重要方向。

### 参考文献

[1] SHEWRY P R. Tuber storage proteins [J]. *Annals of Botany*, 2003, 91(7): 755-769.

[2] 吕巨智, 染和, 姜建初. 马铃薯的营养成分及保健价值[J]. *中国食物与营养*, 2009(3): 51-52.

[3] 木泰华, 李鹏高. 马铃薯中生物活性成分及其功能[J]. *食品科学*, 2016, 37(19): 269-276.

[4] FRÍAS A, CLEMENTE G, MULET A. Potato shrinkage during hot air drying[J]. *Food Science and Technology International*, 2010, 16(4): 337-41.

[5] FAISAL S, TABASSUM R, KUMAR V. Performance evaluation and process optimization of potato drying using hot air oven[J]. *Journal of Food Processing & Technology*, 2013, 4(10): 273-281.

[6] 易婕, 刘云宏, 李海登, 等. 紫薯远红外辐射干燥及品质特性[J]. *食品科学*, 2018, 39(7): 160-167.

[7] 万江静, 郑霞, 高振江, 等. 红枣片远红外辐射干燥的干燥特性及  $V_c$  变化[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(8): 110-115.

[8] TOGRUL H. Suitable drying model for infrared drying of

carrot[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(3): 610-619.

[9] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 549-582.

[10] NATHAKARANAKULE A, JAIBOON P, SOPONRONNARIT S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 170: 108-118.

[11] CARCEL J A, GARCIA-PEREZ J V, RIERA E, et al. Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon[J]. *Drying Technology*, 2007, 25(1): 185-193.

[12] OZUNA C, ALVAREZ-ARENAS T G, RIERA E, et al. Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(3): 1 235-1 243.

[13] FERNANDES F A N, RODRIGUES S, GARCIA-PEREZ J V, et al. Effects of ultrasound-assisted air-drying on vitamins and carotenoids of cherry tomatoes [J]. *Drying Technology*, 2016, 34(8): 986-996.

[14] LIU Yun-hong, SUN Yue, MIAO Shuai, et al. Drying characteristic of ultrasound assisted hot air drying of *Flos Lonicerae* [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(8): 4 955-4 964.

[15] SCHÖSSLER K, JÄGER H, KNORR D. Novel contact ultrasound system for the accelerated freeze-drying of vegetables[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 16(39): 113-120.

[16] 张京平, 王会. 神经网络和线性回归在苹果含水率预测中的应用[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(2): 198-200.

[17] 彭桂兰, 吴文福, 陈晓光, 等. 萝卜丝薄层干燥试验及其数学模型的建立[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(3): 79-81.

[18] POONNOY P, TANSAKUL A, CHINNAN M. Artificial neural network modeling for temperature and moisture content prediction in tomato slices undergoing microwave-vacuum drying [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 72(1): 42-47.

[19] NADIANM H, RAFIEE S, AGHBASHLO M, et al. Continuous real-time monitoring and neural network modeling of apple slices color changes during hot air drying [J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2015, 94: 263-274.

[20] 白峻文, 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.

[21] 刘云宏, 李晓芳, 苗帅, 等. 南瓜片超声-远红外辐射干燥特性及微观结构[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 277-286.

[22] KEK S P, CHIN N L, YUSOF Y A. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices[J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2013, 91(4): 495-506.

[23] CORREA J L G, BRAGE A M P, HOCHHEIM M, et al. The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe, and overripe bananas[J]. *Drying Technology*, 2012, 30(8): 817-826.

(下转第 152 页)

- 制低密度脂蛋白氧化修饰的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(16): 100-104.
- [11] 董学艳, 姜铁民, 刘继超, 等. 高通量快速检测母乳总蛋白、乳清蛋白和酪蛋白含量方法的比较研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(5): 308-310.
- [12] 岳晓霞, 张根生, 李志, 等. 水蒸气蒸馏提取丁香精油及其抑菌性研究[J]. 中国调味品, 2008, 33(9): 49-52.
- [13] LI Jing, WU Hai-qiang, LIU Zhi-gang. Acaricidal activity of clove bud oil against *Dermatophagoides farinae* (Acari: Pyroglyphidae)[J]. Chinese Journal of Parasitology & Parasitic Diseases, 2009, 27(6): 492-493, 497.
- [14] 江慎华, 蔡志鹏, 廖亮, 等. 丁香抗氧化活性物质提取及人工胃肠液对其活性的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 149-155.
- [15] 刘梦莹, 江慎华, 曲文娟, 等. 恒温超声辅助提取诃子 FRAP 类抗氧化活性物质的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(20): 238-243.
- [16] 熊一凡, 李文, 曲文娟, 等. 恒温超声辅助提取丁香总多酚工艺优化及其对低密度脂蛋白氧化修饰过程中荧光的抑制[J]. 食品工业科技, 2017, 38(16): 159-166.
- [17] CHEN C Y, MILBURY P E, CHUNG S K, et al. Effect of almond skin polyphenolics and quercetin on human LDL and apolipoprotein B-100 oxidation and conformation[J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2007, 18(12): 785-794.
- [18] YANG Qiong-yu, WAN Yan, JIANG Shen-hua, et al. The antioxidant inhibition of clove effective fraction on lipid, protein and spectra variation of LDL[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(1): 312-320.
- [19] COMINACINI L, GARBIN U, DAVOLI A, et al. A simple test for predisposition to LDL oxidation based on the fluorescence development during copper-catalyzed oxidative modification[J]. Journal of Lipid Research, 1991, 32(2): 349-358.
- [20] PICARD S, PARTHASARATHY S, FRUEBIS J, et al. Aminoguanidine inhibits oxidative modification of low density lipoprotein protein and the subsequent increase in uptake by macrophage scavenger receptors[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1992, 89(15): 6 876-6 880.
- [21] ESTERBAUER H, ZOLLERN H. Methods for determination of aldehydic lipid peroxidation products [J]. Free Radical Biology & Medicine, 1989, 7(2): 197-203.
- [22] 江慎华, 王书源, 马海乐, 等. 丁香活性物质提取工艺优化与抗氧化活性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 132-138.
- [23] 庄军辉. 丁香酚体内外抗氧化作用及其机制研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014: 20.
- [24] SUGANTHY N, NISHA S A, PANDIAN S K, et al. Evaluation of *gelidiella acerosa*, the red algae inhabiting South Indian coastal area for antioxidant and metal chelating potential[J]. Biomedicine & Preventive Nutrition, 2013, 3(4): 399-406.
- [25] 赵楠楠, 朱晓冉, 李德海. 红松壳多酚、黄酮和多糖含量及抗氧化活性相关性的研究[J]. 现代食品科技, 2017(12): 44-49.
- [26] 郭娟. 芦丁、丹参素体外抗氧化作用的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009: 23-24.
- [27] OLSZOWY Małgorzata, DAWIDOWICZ Andrzej L. Essential oils as antioxidants: their evaluation by DPPH, ABTS, FRAP, CUPRAC, and  $\beta$ -carotene bleaching methods[J]. Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly, 2016, 147(12): 1-9.
- [28] LIU Ting-ting, ZENG Yi, TANG Kun, et al. Dihydromyricetin ameliorates atherosclerosis in LDL receptor deficient mice[J]. Atherosclerosis, 2017, 262: 39-50.
- [29] CHANDRASEKARA A, SHAHIDI F. Antioxidant Phenolics of Millet Control Lipid Peroxidation in Human LDL Cholesterol and Food Systems[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2012, 89(2): 275-285.
- [30] 王丽丽, 赵新淮. 紫丁香叶提取物对低密度脂蛋白氧化修饰的抑制作用[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(5): 641-644.
- [31] 谢志勇, 谢丽琴, 江慎华, 等. 基于光谱学技术对丁香油与乙酸乙酯相抑制 LDL 非酶糖基化、氧化修饰能力的比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2): 518-527.
- [32] ANTHONY K K, GEORGE D S, SINGH H K B, et al. Reactive Oxygen Species Activity and Antioxidant Properties of Fusarium Infected Bananas [J]. Journal of Phytopathology, 2017, 165(4): 213-222.
- (上接第 128 页)
- [24] CHEMAT F, ZILLE HUMA, KHAN M K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 813-835.
- [25] GALLEGO-JUAREZ J A, RIERA E, BLANCO S D F, et al. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetable: processes and devices[J]. Drying Technology, 2007, 25(11): 1 893-1 901.
- [26] ORTUÑO C, PÉREZ-MUNUERA I, PUIG A, et al. Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying[J]. Physics Procedia, 2010, 3(1): 153-159.
- [27] SHARMA G P, VERMA R C, PATHARE P B. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67(3): 361-366.
- [28] 葛哲学. 神经网络理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 136-141.
- [29] 林喜娜, 王相友, 丁莹. 双孢蘑菇远红外干燥神经网络预测模型建立[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 110-114.
- [30] 陆琼瑜, 童学锋. BP 算法改进的研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(3): 648-650.