

人工神经网络在风干腊肠加工过程模拟控制中的应用

徐亮^{1,2}, 程镜蓉^{1,2}, 张业辉¹, 唐道邦¹, 刘学铭¹, 林耀盛¹, 陈智毅¹

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

(2. 华南理工大学生物科学与工程学院, 广东广州, 510610)

摘要: 为了实现对自然条件下风干腊肠品质的快速检测和评价。本文通过模拟自然条件, 比较不同风速、温度及湿度条件下加工得到的腊肠在理化指标、脂肪氧化、蛋白质氧化等的变化差异, 利用人工神经网络模型的方法, 对腊肠加工条件构建神经网络模型, 实现对自然条件下加工腊肠品质的预测和模拟。结果表明当风干风速为 0.80 m/s, 日间温度为 23.60 °C, 日间湿度 40.42%, 夜间温度 16.89 °C, 夜间湿度 54.21% 时, 可得到低脂高蛋白 (蛋白含量为 38.65%, 脂肪含量为 16.06%) 的腊肠。所建立的人工神经网络模型 r 值都在 0.99 以上, 且 $rmse$ 值在 0.4 以下, 表明该模型能够进行较准确的预测, 可以实现最优加工条件的预测。该方法可为阐明加工条件对风干腊肠品质的影响, 为风干腊肠规模化加工建立人工气候和质量安全控制提供理论依据。

关键词: 加工条件; 广式腊肠; 人工神经网络; 理化指标; 氧化特性

文章编号: 1673-9078(2018)11-151-156

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.11.024

Application of Artificial Neural Networks for Process Simulation and Quality Control of Dry-sausage

XU Liang^{1,2}, CHENG Jing-rong^{1,2}, ZHANG Ye-hui¹,

TANG Dao-bang¹, LIU Xue-ming¹, LIN Yao-sheng¹, CHEN Zhi-yi¹

(1. Sericultural and Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Guangdong Province agricultural products processing, Guangzhou 510610, China)

(2. South China University of Technology, School of biological sciences and engineering, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The purpose of this study was to achieve rapid detection and evaluation of the quality of air-dried sausage under natural conditions. In this paper, different processing conditions (such as wind speed, temperature, humidity) were used through simulating the natural conditions, and the resulting physicochemical indices, lipid oxidation and protein oxidation of dried sausage were compared. Then an artificial neural network modelling method was used to construct a neural network model for predicting and simulating the processing conditions for dry sausage production. The obtained results showed that sausages with low fat and high protein (protein content 38.65% and fat content 16.06%) were obtained under the following processing conditions: wind speed 0.80 m/s, daytime temperature 23.60 °C, daytime humidity 40.42%, night-time temperature 16.89 °C, and night-time humidity 54.21%. The established artificial model r values above 0.99 and $rmse$ values below 0.4, indicating that the model can make highly accurate predictions and can predict the optimal sausage processing conditions. Therefore, this method can describe the effect of processing conditions on the quality of air-dried sausage and provide a theoretical basis for the establishment of an artificial climate and quality and safety control for large-scale processing of air-dried sausage.

Keywords: processing conditions; cantonese sausage; artificial neural network; physicochemical indices; oxidation properties

收稿日期: 2018-06-25

基金项目: 广东省自然基金项目 (2015A030313569; 2018A030313202); 广东省科技计划项目 (2017A040405036); 广州市科技计划项目 (201704020054; 201807010080; 201806040007)

作者简介: 徐亮 (1994-), 男, 硕士研究生, 农产品深加工及功能食品开发

通讯作者: 唐道邦 (1973-), 男, 研究员, 农产品深加工及功能食品开发

广式腊味具有营养丰富、风味独特、易贮存等特点, 深受人们喜爱^[1]。烘烤和风干是广式腊肠干制的二种方法, 干制过程为广式腊肠形成其独特的风味和色泽提供了必要的温度、湿度等条件, 使得原辅料中各种成分在复杂的广式腊肠体系中不断进行着脂质的氧化和水解, 蛋白质和蔗糖的水解及相互作用等一系列复杂而重要的物理化学变化^[2]。自然晾晒风干是广

式腊肠的传统干制工艺,因干燥工艺简单、设备投资率低、产品风味独特而被人们沿用至今,尤其在广东韶关、清远及河源部分地区广为流传^[3]。然而该工艺需要低温低湿的环境,脱水时间长,产品在晾晒过程还容易受蚊蝇叮咬,若是遇上下雨天,还可能致整批产品长霉变质,严重影响产品的品质稳定性和经济效益。烘烤干燥则是利用燃煤、蒸汽等热源控制干燥过程中物流的温度、风速和湿度,对产品进行加温脱水,制得的产品质量相对稳定,成为广式腊味产业化生产普遍选择的干燥模式。然而研究表明烘烤干燥得到的腊肠往往色泽亮丽,然而风味却不及风干腊肠^[4]。

已有研究表明,模拟建立特定人工气候是肉制品人工发酵的重要条件^[5]。风干腊肠从分类上归属于自然发酵肉制品,与人工发酵肉制品的差别在于制作过程中微生物来源于原料和环境中的杂菌形成的优势菌群及发酵条件(气候因素)的不确定性^[6]。人工神经网络是模拟生物神经系统的一种仿生算法。它是一种机器学习算法,具有非线性、自适应、并行性等特点^[7~11]。20世纪80年代Rumelhart^[12]提出了多层神经网络权值修正的反向传播人工神经网络算法,已经成为了人工神经网络众多算法中应用最为广泛的一种模型。利用反向传播学习算法可使人工神经网络模型从大量学习样本(训练集合)中找出统计规律,并能对新样本进行预测,已被广泛应用到食品加工过程模拟控制中^[13~21]。基于此,本研究模拟自然风干条件,研究加工条件与风干腊肠的品质关系,通过MATLAB软件中的人工神经网络平台,利用反向传播人工神经网络算法,建立腊肠规模化加工的神经网络模型,实现了对自然条件的预测和模拟,并优化其工艺参数,以期对风干腊肠规模化加工建立人工气候和质量安全控制提供基础数据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂、仪器

实验所用的瘦肉、肥肉、蔗糖、食盐、味精、白糖、肠衣等均购于广州华润万家超市;实验所采用的化学试剂如亚硝酸钠、硫代巴比妥酸等均为分析纯。

1.2 仪器与设备

TJ16-H型绞肉机,广东恒联食品机械有限公司;GCH-5型灌肠机,广东恒联食品机械有限公司;DZ-280/2SD多功能真空封口机,东莞市金桥科技电器制造有限公司;DHG-9240A型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏试验设备有限公司;DF-101S集热式恒温加

热磁力搅拌器,郑州长城科工贸有限公司;HWS26型电热恒温水浴锅,上海一恒科学仪器有限公司;BS124S分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司;酸式滴定管、碱式滴定管,广州精科仪器有限公司;TD6离心机,长沙湘智离心机仪器有限公司;UV-1800紫外分光光度计,日本Shimadzu公司。

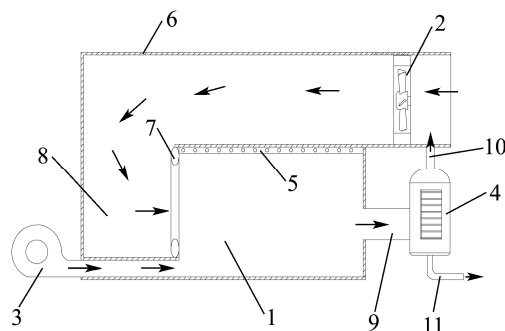


图1 改装后的调温调湿干燥箱

Fig.1 constant temperature and humidity drying oven after refitted

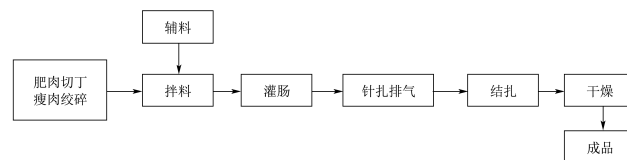
调温调湿干燥箱:由GHRH-20型热泵干燥机(广东省农业机械研究所干燥设备制造厂)改装,增加了超声波加湿器、调控风速的变频调速器,主要部件为:干燥腔体(1)、风机(2)、超声波加湿器(3)、调控风速的变频调速器和用于进行气体除湿处理的冷凝除湿装置(4)、加热装置(5)、风道(8)、冷凝水出口(11)、干燥后的空气入口(10);采用PLC控制,为对设定好的腔体内温度、湿度进行自动调节。

1.3 方法

1.3.1 风干腊肠的制作

配方:瘦肉:肥肉质量比8:2,辅料以肉总重计,亚硝酸钠0.01%(W/W),白砂糖12%(W/W),52°白酒2%(W/W),味精0.2%(W/W),食盐3.0%(W/W)。

工艺流程:



研究内容:不同风速、温度、湿度对广式腊肠风干过程品质的影响。

条件1:模拟日间温度25℃,湿度为35%,烘烤12h;模拟夜间温度15℃,湿度为45%,烘烤12h,整个过程风速控制在0.5m/s,连续烘烤至水分为20%以下,得成品。

条件2:日间温度为25℃,湿度为35%,烘烤12h;夜间温度降至15℃,湿度为45%,烘烤12h,风速控制在1.0m/s,连续烘烤至水分为20%以下,得

成品。

条件 3: 日间温度在 30 ℃, 湿度为 40%, 烘烤 12 h; 夜间温度降至 20 ℃, 湿度为 40%。风速控制在 1 m/s, 连续烘烤至水分为 20%以下, 得成品。

条件 4: 日间温度在 30 ℃, 湿度为 40%, 烘烤 12 h; 夜间温度降至 20 ℃, 湿度为 50%。风速控制在 1 m/s, 连续烘烤至水分为 20%以下, 得成品。

自然晾晒法 (空白对照): 采用自然干燥法 (广州 1~2 月份), 白天温度 12~30 ℃, 湿度 30%~55%, 夜晚温度 12~18 ℃, 湿度 40%~55%, 风速 0.3~1.0 m/s。连续干燥至水分为 20%以下, 得成品。

备注: 本研究选取的 4 组腊肠加工条件为课题组在前期研究中得到的, 对腊肠品质影响最为显著的代表性的因素组合。

1.3.2 腊肠营养成分的测定

pH 值参照 GB/T 9695.5-2008 测定; 蛋白质测定根据 GB 5009.5-2010 测定; 脂肪含量根据 GB/T 14772-2008 测定。

1.3.3 酸价的测定

参照 GB/T 5009.44 规定的方法, 重复测定 3 次。

1.3.4 过氧化物值的测定

参照 GB/T 5009.44-2005 和 GB/T5009.37 对样品处理和测定, 重复测定 3 次。

1.3.5 TBA 的测定

参照参考文献^[2]。

1.4 建模过程

根据广东当地气候特征, 本文模拟设计冬季气候, 选取不同温度、湿度及风速条件探讨加工条件对广式腊肠品质的影响。测试样品重复 3 次实验。神经网络模型数据用 MATLAB 软件进行处理。反向传播人工神经网络由输入层、输出层和 1 个或者多个隐含层组成, 而 3 层的人工神经网络模型足以应付大多数的食品加工过程模拟控制问题。

因此本文采用 3 层的反向传播人工神经网络^[22,23]。利用 MATLAB 中的 Neural Network Toolbox 系统仿真环境, 设计了一个 3 层反向传播人工神经网络结构, 由输入层、隐含层和输出层三部分组成^[24]。如表 1 和 2 所示, 以 pH 值、蛋白质、脂肪、过氧化物值、酸价和 TBA 为输入变量; 以风速 (m/s)、日间温度 (℃)、日间湿度 (%), 夜间温度 (℃) 和夜间湿度 (%) 为输出变量; 中间隐层的层数为 5, 使用了默认的 “transig” 函数, 输出层的函数为默认的 “purelin”。激励函数为 “Sigmoid”。此外, 如表 1 和 2 所示, 我们将数据分为建模集和验证集, 以实现模型准确性的验证。

表 1 人工神经网络的输入变量

Table 1 Input variables of artificial neural network

项目	pH 值	蛋白质/%	脂肪/%	过氧化物值/(10 ⁻² g/g)	酸价/(mg/g)	TBA/(mg/kg)
建模集	5.84±0.05	32.38±1.25	16.06±0.11	0.020±0.001	2.14±0.05	0.83±0.02
	5.93±0.05	35.65±1.42	17.42±0.07	0.016±0.001	3.74±0.01	0.60±0.02
	5.72±0.03	38.65±2.01	8.93±0.05	0.010±0.001	3.00±0.02	0.52±0.02
验证集	5.87±0.01	33.25±1.12	15.89±0.45	0.025±0.001	2.63±0.06	0.90±0.03

表 2 人工神经网络的输出变量

Table 2 Input variables of artificial neural network

项目	风速/(m/s)	日间温度/℃	日间湿度/%	夜间温度/℃	夜间湿度/%
建模集	0.5	25	35	15	45
	1	30	40	20	40
	1	30	40	20	50
验证集	1	25	35	15	45

1.5 建模过程

试验数据处理由 Xcalibur 软件完成, 未知化合物经计算机检索的同时与 NIST11 谱库和 Wiley 谱库相匹配, 只有当匹配度均大于 800 (最大值为 1000) 的鉴定结果才予以确认。测试样品重复 3 次实验, 所有数据采用 SPSS 19.0 软件进行统计。

2 结果与分析

2.1 模型预测能力的可靠性分析

对所建立的人工神经网络模型有必要对其预测能力进行可靠性分析, 主要考察检验样本的预测值和实验值之间的相对误差是否在合理范围内。

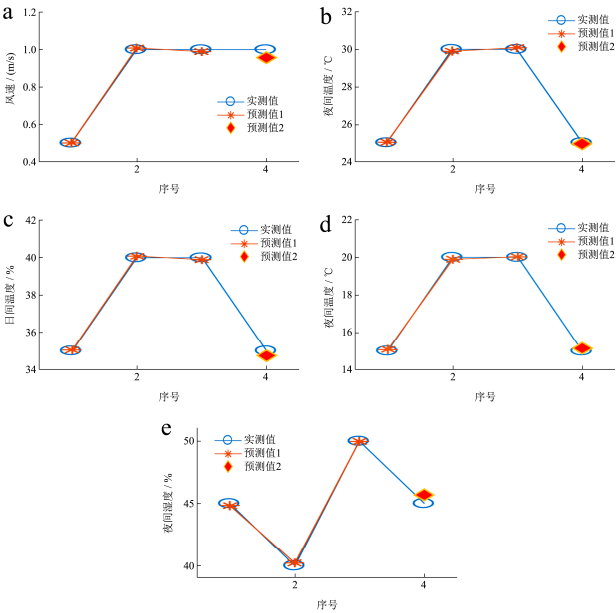


图2 神经网络预测的结果

Fig.2 Prediction of the artificial neutral network

采用建模集的自预测和对验证集的预测以实现对

模型预测能力的可靠性分析。神经网络结果如图2所示, 预测值1是建模样品结果, 预测值2是验证样品结果。

由图2可知, 无论是建模集的自预测还是对验证集的预测, 风速、日间温度、日间湿度、夜间温度和夜间湿度的预测值与实测值比较接近, 结果表明该模型是准确的, 该方法具有较高的预测精度, 可以用于下一步的自然条件的模拟和最优条件的选择。为了精确评价神经网络方法的预测结果, 我们采用相关系数(r)和均方根误差($rmse$)为模型效果评定标准[25,26]。结果列与表3中, r 值越接近于1, 而 $rmse$ 值接近于0, 则表明所建立模型效果越好。从表3可以看出, 所建立的人工神经网络模型 r 值都在0.99以上, 且 $rmse$ 值在0.4以下, 表明该模型能够进行较准确的预测。综上所述, 本研究得到的人工神经网络模型对食品加工过程模拟控制的预测能力是稳定和可靠的, 预测结果的准确度较好, 可以用于自然条件的模拟和最优条件的选择。

表3 神经网络的预测结果

Table 3 Predictive results of artificial neural network

项目	风速/(m/s)	日间温度/°C	日间湿度/%	夜间温度/°C	夜间湿度/%
r	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$rmse$	0.02	0.07	0.15	0.10	0.37

2.2 自然条件的模拟和最优参数的选择

采用所建立的人工神经网络模型, 我们以自然条件为指标, 预测应采用的人工风干参数。表4为自然条件指标, 结果表明, 当采用风速为0.81 m/s, 日间温度为30.82 °C, 日间湿度39.75%, 夜间温度20.09 °C, 夜间湿度41.80%时, 我们可以模拟自然晾晒风干, 并得到与自然风干一致的风干腊肠品质。该方法可以为风干腊肠规模化加工建立人工气候和质量安全控制提供理论依据。

此外, 我们对pH值、蛋白质、脂肪、过氧化物质、酸价和TBA进行了进一步的优化, 选择脂肪、

过氧化值、酸价和TBA指标低于自然风干的结果, 但蛋白质含量高于自然风干的结果, 选择了相对应的最优指标(表4中的设计条件), 并以这些指标为神经网络算法的输入值, 采用建立的模型预测得到了最优参数(表5)。结果表明, 当采用风速为0.80 m/s, 日间温度为23.60 °C, 日间湿度40.42%, 夜间温度16.89 °C, 夜间湿度54.21%时, 可得到低脂高蛋白(蛋白含量为38.65%, 脂肪含量为16.06%)的腊肠, 且产品呈现出较自然风干腊肠更低的酸价和TBA值。因此, 该方法可以为风干腊肠规模化加工建立人工气候和质量安全控制提供理论依据。

表4 自然条件以及最优设计条件指标

Table 4 Natural conditions and the optimal conditions designed

项目	pH值	蛋白质/%	脂肪/%	过氧化物质/(10 ⁻² g/g)	酸价/(mg/g)	TBA/(mg/kg)
设计条件	5.72	38.65	16.06	0.01	2.14	0.52
自然条件	5.66	35.68	26.13	0.01	4.58	0.75

表5 模型预测得到的最优参数

Table 5 Optimal parameters of the prediction model

项目	风速/(m/s)	日间温度/°C	日间湿度/%	夜间温度/°C	夜间湿度/%
设计条件	0.80	23.60	40.42	16.89	54.21
自然条件	0.81	30.82	39.75	20.09	41.80

3 结论

通过利用反向传播学习算法,建立腊肠规模化加工的神经网络模型,能够比较准确地预测对应于期望指标的操作条件,预测结果与真实值相近。该方法实现了对自然条件的预测和模拟,并预测得到了最优工艺参数。该方法阐明加工条件对风干腊肠品质的影响,以期为风干腊肠规模化加工建立人工气候和质量安全控制提供理论依据。建立准确的预测模型需要大量的实验数据,工艺中不断产生的数据可以进一步完善和优化模型,以实现更加准确的预测。

参考文献

- [1] Chen W, Rui H, Yuan H, et al. Analysis of dynamic chemical changes in Chinese cantonese sausage: Factors influencing content of nitrite and formation of flavor substances [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(4): 1191-1195
- [2] 赵谋明,孙为正,吴燕涛,等.广式腊肠脂质降解与氧化的控制研究[J].食品与发酵工业,2007,8:10-13
ZHAO Mou-ming, SUN Wei-zheng, WU Yan-tao, et al. Study on the control of lipolysis and oxidation in Chinese Cantonese sausage [J]. Food and Fermentation Industry, 2007, 8: 10-13
- [3] 刘倩,高澄宇,黄金发,等.鲍鱼冷风干燥和自然晾晒试验的比较分析[J].渔业现代化,2012,4:42-47
LIU Qian, GAO Cheng-yu, HUANG Jin-fa, et al. Comparison and analysis of cold-blast air drying and natural drying of abalone [J]. Fishery Modernization, 2012, 4: 42-47
- [4] 赵冰,李素,成晓瑜,等.广式腊肉挥发性风味物质分析[J].肉类研究,2013,10:12-16
ZHAO Bing, LI Su, CHENG Xiao-yu, et al. Analysis of volatile flavor compounds of cantonese-style bacon [J]. Meat Research, 2013, 10: 12-16
- [5] 彭斐,彭勇刚,韦巍.基于神经动态优化的人工气候箱温湿度模型预测控制[J].农业工程学报,2014,30(9):176-182
PENG Fei, PENG Yong-gang, WEI Wei. Model predictive control of temperature and humidity of artificial climate chest based on neuro dynamical optimization [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2014, 30(9): 176-182
- [6] 沈清武.发酵干香肠成熟过程中的菌相变化及发酵剂对产品的影响[D].北京:中国农业大学,2004
SHEN Qing-wu. Microbial succession during ripening and influence of starter culture on the quality of fermented dry sausages [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004
- [7] Haykin S. Neural networks: a comprehensive foundation [M]. Prentice Hall PTR, 1994
- [8] Ali J B, Fnaiech N, Saidi L, et al. Application of empirical mode decomposition and artificial neural network for automatic bearing fault diagnosis based on vibration signals [J]. Applied Acoustics, 2015, 89(3): 16-27
- [9] Brown W M, Gedeon T D, Groves D I, et al. Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2015, 47(4): 757-770
- [10] Guiné R P, Barroca M J, Gonçalves F J, et al. Artificial neural network modelling of the antioxidant activity and phenolic compounds of bananas submitted to different drying treatments [J]. Food Chemistry, 2015, 168: 454-459
- [11] Pan L, Zhang Q, Zhang W, et al. Detection of cold injury in peaches by hyperspectral reflectance imaging and artificial neural network [J]. Food Chemistry, 2016, 192: 134
- [12] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagating errors [J]. Cognitive modeling, 1988, 5(3): 1
- [13] 史德芳,高虹,程薇,等.人工神经网络在食品加工过程模拟控制中的应用[J].食品研究与开发,2009,30(1):176-179
SHI De-fang, GAO Hong, CHENG Wei, et al. Application of artificial neural network in food process simulation and quality control [J]. Food Research and Development, 2009, 30(1): 176-179
- [14] Liu J, Chang H, Hsu T Y, et al. Prediction of the flow stress of high-speed steel during hot deformation using a BP artificial neural network [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2000, 103(2): 200-205
- [15] Khajeh M, Barkhordar A. Modelling of solid-phase tea waste extraction for the removal of manganese from food samples by using artificial neural network approach [J]. Food Chemistry, 2013, 141(2): 712-717
- [16] Silva S F, Anjos C A, Cavalcanti R N, et al. Evaluation of extra virgin olive oil stability by artificial neural network [J]. Food Chemistry, 2015, 179: 35-43
- [17] Pan L, Zhang Q, Zhang W, et al. Detection of cold injury in peaches by hyperspectral reflectance imaging and artificial neural network [J]. Food Chemistry, 2016, 192: 134
- [18] 邓力,何腊平,姚翔,等.基于BP神经网络的玉米膳食纤维挤压改性预测模型[J].农产品加工学刊(下),2014,3:5-8
DENG Li, HE La-ping, YAO Xiang, et al. Prediction model of corn quality extruded by twin-screw extruder based on back propagation neural network [J]. Academic Periodical of

- Farm Products Processing, 2014, 3: 5-8
- [19] 刘宁彰, 窦志浩, 何艾, 等. 正交与神经网络优化菠萝蜜最少加工保鲜工艺[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(7): 194-197
- LIU Ning-zhang, DOU Zhi-hao, HE Ai, et al. The orthogonal and neural network optimize the minimally processed jackfruit of preservation technology [J]. Food Research and Development, 2016, 37(7): 194-197
- [20] 刘海军, 刘伟, 张春芝, 等. 基于 BP 神经网络的微波真空膨化浆果脆片工艺参数优化[J]. 中国食品学报, 2016, 16(3): 103-108
- LIU Hai-jun, LIU Wei, ZHANG Chun-zhi, et al. Optimization of process parameters for microwave puffing berry snacks based on BP neural network [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(3): 103-108
- [21] 丁城, 刘璐, 胡勇. 基于 BP 神经网络模型的梨醋发酵产酸量的预测[J]. 食品科技, 2017, 2: 273-276
- DING Cheng, LIU Lu, HU Yong. Prediction of total acid from pear vinegar by artificial neural network [J]. Food Science and Technology, 2017, 2: 273-276
- [22] 詹映, 罗华平, 彭云发, 等. BP 人工神经网络南疆红枣颜色分级方法的研究[J]. 食品工业, 2015, 1: 165-167
- ZHAN Ying, LUO Hua-ping, PENG Yun-fa, et al. Research of the BP artificial neural network in southern jujube color classification method [J]. The Food Industry, 2015, 1: 165-167
- [23] 罗乐, 孙益民. 人工神经网络建模用于辣椒籽油提取工艺优化[J]. 食品科技, 2017, 4: 176-182
- LUO Le, SUN Yi-ming. Optimization of extraction on Capsicum oil with artificial neural networks [J]. Food Science and Technology. 2017, 4: 176-182
- [24] Hagenauer J, Helbich M. SPAWNN. A toolbox for spatial analysis with self-organizing neural networks [J]. Transactions in Gis, 2016, 20(5): 755-774
- [25] 范方辉, 唐书泽, 马强, 等. 基于计算机视觉和人工神经网络预测挤压食品的质构特征[J]. 食品工业科技, 2013, 34(21): 127-132
- FAN Fang-hui, TANG Shu-ze, MA Qiang, et al. Prediction of texture characteristics in extrusion food based on computer vision and artificial neural networks [J]. Science and Technology of Food Industry. 2013, 34(21): 127-132
- [26] 郑惠娜, 周春霞, 章超桦, 等. 基于人工神经网络的牡蛎蛋白酶解动力模型的构建[J]. 食品工业科技, 2014, 35(7): 53-56
- ZHENG Hui-na, ZHOU Chun-xia, ZHANG Chao-hua, et al. Modeling of the Alcalase hydrolysis of oyster proteins using an artificial neural network [J]. Science and Technology of Food Industry. 2014, 35(7): 53-56