

# 基于 NRBO 优化的 BP 神经网络草莓农残检测系统\*

杜文斌 王 伟

(中北大学信息与通信工程学院 太原 030051)

**摘 要:**目前,我国草莓种植的主要方式为设施栽培,由于土壤连作、温湿度调控不当等问题极易造成病虫害发生,种植户用药明显增多,草莓中农药残留问题较为突出。为此,设计了一种快速检测草莓上残留农药的电子鼻系统。针对残留农药挥发气味浓度低且易受到草莓本身气味的影响,电子鼻识别效果差的问题,对电子鼻系统进行改进。结构上,借鉴人体鼻腔结构特点,设计了一款仿生气室。采用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)模拟对仿生气室的结构进行了优化,保证采集端信号的质量。算法上,建立了基于陷阱规避算子(trap-avoidance operator,TAO)改进的牛顿-拉弗森优化算法(Newton-Raphson based optimizer,NRSR)优化反向传播(BP)神经网络的分类模型(NRBO-BP),提高分类算法对低浓度信号识别效果。采用电子鼻对含有多菌灵和吡虫啉及其混合农药的草莓进行检测实验。结果表明,基于仿生气室电子鼻的NRBO-BP分类模型的准确率为93.44%,召回率为94.16%,准确度总体高于粒子群算法(PSO)优化BP模型的88.33%和BP神经网络的83.33%,能够准确检测草莓上残留的农药,可以作为草莓质量安全的快速评价方法。

**关键词:**农药残留;电子鼻;计算流体力学;仿生气室

**中图分类号:** TP212      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.10

## BP neural network strawberry pesticide residue detection system based on NRBO optimization

Du Wenbin Wang Wei

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** At present, the main way of strawberry planting in our country is facility cultivation. Due to soil continuous cropping, improper temperature and humidity control and other problems, it is easy to cause diseases and pests, and the use of drugs by farmers has increased significantly, and the problem of pesticide residues in strawberries is more prominent. In this paper, an electronic nose system for detecting pesticide residues on strawberries was designed. The electronic nose system was improved to address the problem of poor recognition of the electronic nose due to the low concentration of the volatile odor of the residual pesticide and its susceptibility to the odor of the strawberry itself. Structurally, a bionic air chamber is designed by drawing on the structural characteristics of the human nasal cavity. The structure of the bionic gas chamber was optimized using computational fluid dynamics (CFD) simulations to ensure the quality of the signal at the acquisition end. Algorithmically, a classification model based on the trap-avoidance operator (TAO) improved Newton-Raphson based optimizer (NRBO) optimizing back-propagation (BP) neural network was established to improve the classification algorithm's effect on the recognition of low-concentration signals. Strawberry containing carbendazim and imidacloprid and their mixed pesticides were detected by electronic nose. The results showed that the NRBO-BP classification model based on the bionic air chamber electronic nose had an accuracy of 93.44% and a recall of 94.16%. NRBO-BP classification model was generally higher than the 88.33% of the PSO-BP model and the 83.33% of the BP neural network, and was able to accurately detect pesticide residues on strawberries. It can be used as a rapid method for the evaluation of strawberry quality and safety.

**Keywords:** pesticide residues; electronic nose; computational fluid dynamics; bionic air chamber

收稿日期:2024-06-17

\* 基金项目:山西省自然科学基金面上项目(202203021221117)、山西省高等学校教学改革创新项目(J20230779)、山西省研究生科研创新项目(2023KY607)资助

## 0 引言

草莓在全球经济作物中具有非常重要的地位,近年来,我国草莓产业发展迅速,种植面积和产量均居世界第一位<sup>[1]</sup>。目前,我国草莓种植方式以设施栽培为主,但大棚中高温高湿条件下长期栽培容易产生病虫害<sup>[2]</sup>,如果在发病后控制,常常会导致效果不好,因此很多种植户会按照药剂的推荐方法科学喷药提前预防,此时残留在草莓上的农药都是在安全剂量范围内的,是可被人体接受的。但部分种植户为追求产量、品相盲目用药,他们更关注病虫害是否得到有效控制,而忽视了草莓质量安全以及对环境的污染,结果造成防治过度,草莓中农药残留超标问题较为突出,有必要进行监测以控制其含量<sup>[3]</sup>。

草莓病虫害主要有灰霉病、白粉病、蚜虫和红蜘蛛等<sup>[4]</sup>。多菌灵是一种苯并咪唑类广谱杀菌剂,通过干扰病原菌有丝分裂中纺锤体的形成,影响细胞分裂,起到杀菌作用,可用于防止草莓灰霉病和白粉病两大病害,是草莓生产中最常用的一种保护性杀菌剂<sup>[5]</sup>。吡虫啉是一种新型烟碱类杀虫剂,通过抑制昆虫神经系统烟碱型乙酰胆碱受体,从而使昆虫神经麻痹致死<sup>[6]</sup>。2020年,10%吡虫啉可湿性粉剂首次登记可适用于防治草莓虫害。在种植草莓过程中,多菌灵和吡虫啉是最常用的农药之一,可以有效防止草莓遭受病虫害,在中国被广泛使用,但是其在草莓中过量残留会对人体健康造成极大危害。

电子鼻具有快速、无损、操作简便和批量检测等优点,是最好的无损检测方法之一,其已被证明很好的取代了传统的食品气味检测方法<sup>[7-8]</sup>。气室是用于在电子鼻系统中放置气体传感器阵列的空间,合理的气室设计结构可以确保气体样品的完整性,增强传感器的响应与恢复,进而提高电子鼻性能。Wu等<sup>[9]</sup>提出了传感器气室的圆柱形设计,出气口位于中心,进气口位于气室侧面,优化后减少了气流的湍流区域。Annanouch等<sup>[10]</sup>研究了气室的尺寸和形状对气流流体动力学和传感器响应的影响,设计了一种船型气室,有效减少了气室流动再循环和死体积,提高了传感器响应。

使用合适的模式识别算法对数据进行处理。Amkor等<sup>[11]</sup>使用自制设计的电子鼻,使用主成分分析法与支持向量机法相结合的混合方法,成功检测和识别分别含有两种杀虫剂 Decis、Malyphos 和无杀虫剂的薄荷样本。Tang等<sup>[12]</sup>采用 PEN3 电子鼻结合偏最小二乘法和反向传播(BP)神经网络技术对茶叶中的拟除虫菊酯类农药进行检测和定量分析。

迄今为止,鲜有使用电子鼻检测草莓中残留农药的研究。主要有两个问题,一是残留农药挥发气味浓度低且易受到草莓本身气味的影响,识别效果差;二是现有识别算法在性能和泛化性方面仍有改进空间,对低浓度信号识别准确率较低。针对上述问题,本文研究设计一套适用于检

测农残气味的传感器阵列及其气室,确保高质量的原始信号;提出一种基于陷阱规避算子(trap-avoidance operator, TAO)改进的牛顿-拉弗森优化算法(Newton-Raphson based optimizer, NRBO)优化 BP 神经网络的分类模型(NRBO-BP)对草莓上常见的两种农药(即多菌灵和吡虫啉)进行检测,提高模型对农残气味的分类性能,避免漏检现象。

## 1 电子鼻传感器室设计

参考人体鼻腔结构特征,提出一种仿生电子鼻气室设计方法。仿生气室的几何模型如图1所示,其中左侧为进气口,右侧为出风口。推拉隔板关闭气室,传感器和隔板之间会留出一小块空隙。在组装好的装置中,进气口通过管道与气泵相连,当隔板关闭时,气泵抽取空气从进气口进入气室,流经传感器阵列后由出风口排出。

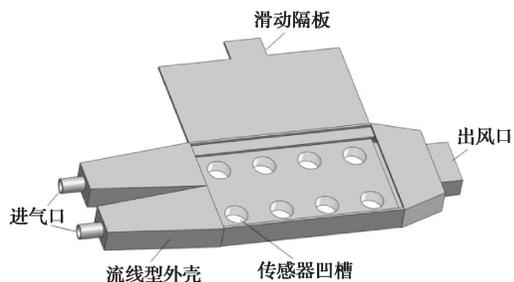


图1 仿生气室几何模型

Fig. 1 Geometric model of bionic gas chamber

在隔板关闭状态下,仿生气室可以靠近待测样品,隔板将传感器与待测样品隔开。此时,泵打开,抽取空气清洁传感器阵列,从而可以确定传感器测量电压的基线状态。

当隔板打开时,泵关闭,使传感器与待测气味充分接触。在本文的实验中,将电子鼻仿生气室安装在放置草莓的样品罐上方。样品罐在两次测量之间保持封闭,并且在其中,气味是集成的。由于传感器气室中的空气体积很小,因此被测气体仅被轻微稀释。与其他常见的电子鼻结构相比,这是一个重要的区别。在其他电子鼻结构中,是用流动空气将样品中的挥发性成分“吹扫”出来,通过专用气动系统输送到传感器室中,而持续几分钟的测量需要大量的转移气体,这些气体会被干净的空气稀释导致气味浓度在短时间内显著下降。新气室的优点是能够对挥发气味浓度低的气体样品进行测量,无需通过气动系统输送样品,保证样品气味不会被载气稀释。另一方面,该结构允许在各种样品的测量周期之间进行高效的传感器清洁。

## 2 基于流体力学的气室仿真

在本文设计的气室结构中,气流仅用于建立传感器基线响应的可重复条件并清洁传感器气室。要保证气室中

所有传感器的有效清洁,应避免涡流区域,在这些区域中,清洁空气无法有效传输,传感器无法有效清洁,或者清洁需要更长的时间;应满足层流条件,此时流体表现为一种有序的流动形态,流速的变化是连续且平稳的,这有助于实现传感器气室的清洁。

为了验证所设计的结构是否能有效地清洁传感器区域,使用 COMSOL 软件的计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模块对不同气室结构内的流体特性进行了仿真。采用维纳-斯托克斯方程来描述层流流体的动量守恒,除进口和出口外,整个气室均设置无滑移边界条件,流出边界条件设为绝对压力值 1atm、温度为 300 K,气室入口处平均速度为 0.5 m/s。

关闭隔板状态下对方形气室结构进行的气流模拟结果如图 2、3 所示。从图 2 可以观察到,空气涡流的出现。结合图 3 可以发现,位于气室不同位置的传感器会经历不同的压力和流动气体条件,这可能导致噪声增加和测量结果的不稳定性。

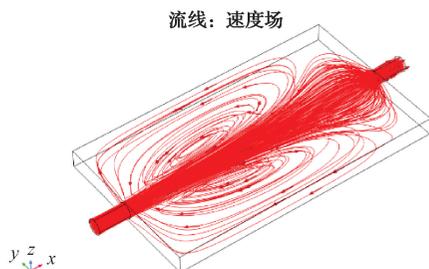


图 2 方形气室空气速度分布  
Fig. 2 Air velocity distribution in square air chamber

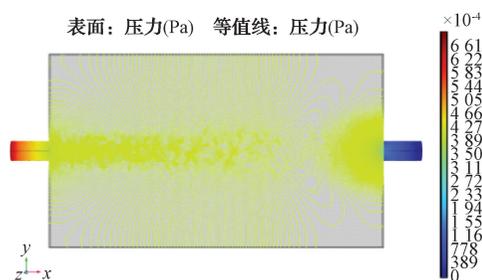


图 3 方形气室空气压力分布  
Fig. 3 Air pressure distribution in square air chamber

关闭隔板状态下对仿生气室结构进行的气流模拟结果如图 4、5 所示。从图 4 可以看出,整个气室阵列内部的空气速度分布是均匀的。此外,由图 5 可以看出,直线且垂直于气室壁的恒定压力线。这确保了高效传感器室清洁的目标得以实现。

### 3 实验中使用的电子鼻装置

#### 3.1 传感器和控制电路

电子鼻系统主要由:微控制器、传感器阵列、仿生气

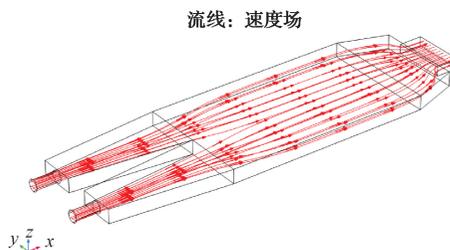


图 4 仿生气室空气速度分布  
Fig. 4 Air velocity distribution in bionic air chamber

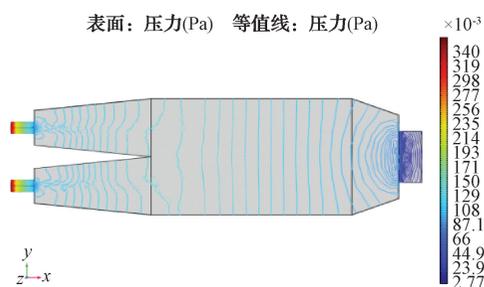


图 5 仿生气室空气压力分布  
Fig. 5 Air pressure distribution in bionic air chamber

室、真空泵及其控制电路、笔记本电脑组成。

该设备使用 Arduino mega 2560 微控制器,可控制传感器和计算机之间的所有通信,使用多路复用逐个读取测量值或传感器的电阻,延迟为几毫秒,因此可以假设它们代表了传感器在同一时刻的状态。传感器读取周期每 1 s 重复一次,所有数据都发送到计算机并存档在文本文件中。仿生气室如图 6 所示,电子鼻装置如图 7 所示。

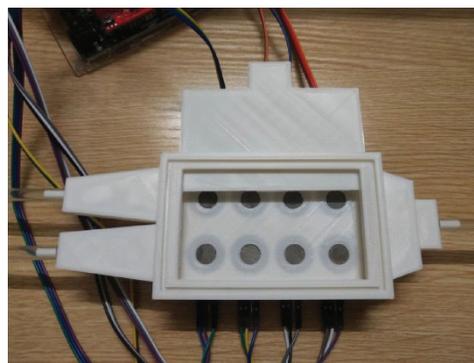


图 6 仿生气室实物  
Fig. 6 Physical picture of bionic air chamber

传感器阵列由 8 种不同的金属氧化物传感器 (MOS) 组成。各传感器的性能描述如表 1 所示。传感器工作电压为直流 5 V,支持双路信号输出,模拟量输出及 TTL 电平输出。目标气体浓度越大,导电率越大,输出的电阻越低,输出的模拟信号越大。

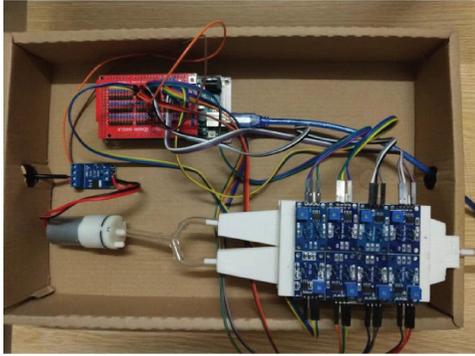


图7 电子鼻实物

Fig. 7 Electronic nose physical picture

表1 传感器阵列

Tbale 1 Sensor array

传感器型号	目标气体	测量范围/( $\times 10^{-6}$ )
MQ2	可燃气体、烟雾	300~10 000
MQ4	甲烷	300~10 000
MQ5	天然气、煤气	300~10 000
MQ6	液化石油气、甲烷	300~10 000
MQ8	氢气	100~1 000
MQ9	一氧化碳	20~2 000
MQ135	氨气、硫化物、苯	10~1 000
MQ136	硫化氢	1~100

### 3.2 气室性能测试

采用无水乙醇作为气味源,分别对搭配方形气室和仿生气室的电子鼻进行响应测试实验来验证气室的清洁能力。

将0.5 mL无水乙醇注射到样品罐中静置60 s,打开隔板,此时样品罐中的无水乙醇自然挥发与传感器阵列充分接触20 s,最后关闭隔板,开启气泵对传感器进行清洁,使其恢复到初始基线状态。对两种气室分别进行了3轮测试,以确保测试结果的准确性。选取基线回复速率来表征清洁效率,如下:

基线回复速率=1/(回复至基线时间-最大响应电压时间) (1)

基线回复速率柱状图如图8所示,搭配仿生气室的传感器阵列基线回复速率整体高于方形气室,仿生气室基线回复速率平均值为0.003 41,方形气室基线回复速率平均值为0.001 65,与方形气室相比,仿生气室清洁效率提升了100%。

## 4 草莓农残检测实验

### 4.1 样品与材料

根据《食品安全国家标准食品中农药最大残留限量》

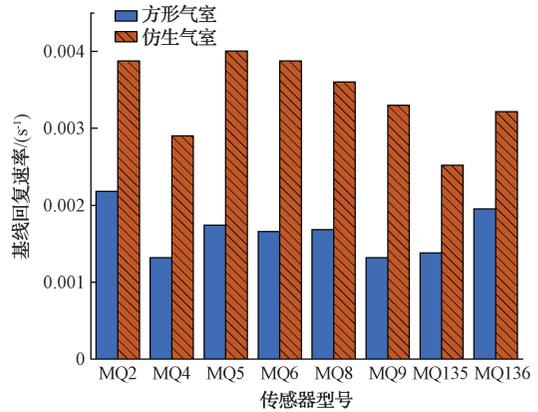


图8 基线回复速率

Fig. 8 Baseline recovery rate

(GB2763—2021),草莓中吡虫啉和多菌灵的最大允许残留量均为0.5 mg/kg<sup>[13]</sup>。实验挑选表皮无破损,形状均匀,单果质量在15~20 g的300颗新鲜红颜草莓,在密闭、局部通风的环境下进行农药喷洒,经过6 h达到最佳药效后进行气味检测。

1)草莓在无农药、吡虫啉0.5 mg/kg、多菌灵0.5 mg/kg以及混合农药(0.5 mg/kg吡虫啉:0.5 mg/kg多菌灵=1:1)喷洒的情况下,分别用电子鼻采集数据,每个小组设30个草莓样本平行。

2)草莓分别在不同浓度(0.5、1、2、3 mg/kg)吡虫啉喷洒下用电子鼻采集数据,每个小组设30个草莓样本平行。

3)草莓分别在不同浓度(0.5、1、2、3 mg/kg)多菌灵喷洒下用电子鼻采集数据,每个小组设30个草莓样本平行。

### 4.2 实验过程

在使用电子鼻系统进行测量前预热3 min,保证电子鼻达到稳定工作状态。在每次测量开始时,将传感器气室隔板关闭放置在打开的样品罐上,此时传感器暴露在清洁空气中,持续30 s,收集传感器的基线响应。然后打开隔板,让传感器与待测气体充分接触180 s,8个传感器同时测量样本气体得到数据,并由电子鼻系统记录。接着关闭隔板,开启气泵120 s,使清洁空气从仿生气室入口快速流向传感器阵列对其进行清洁,为下一次的检测做好准备。

对采集到的气味数据进行绘制,得到经过不同浓度与配比农药处理后草莓散发的气味特征变化如图9~12所示。从图9~12可以看出,无农残草莓样品传感器响应值小于有农药残留的草莓,MQ2和MQ8传感器响应变化幅度最大,MQ135传感器响应变化幅度最小。由此可得,MQ2和MQ8传感器的相互作用可能对草莓样品气味特征的分化起重要作用。在短暂的传感器初始阶段后,电子鼻传感器的响应信号逐渐增加,170 s时各传感器信号趋于稳定,可以考虑进行电子鼻数据分析。

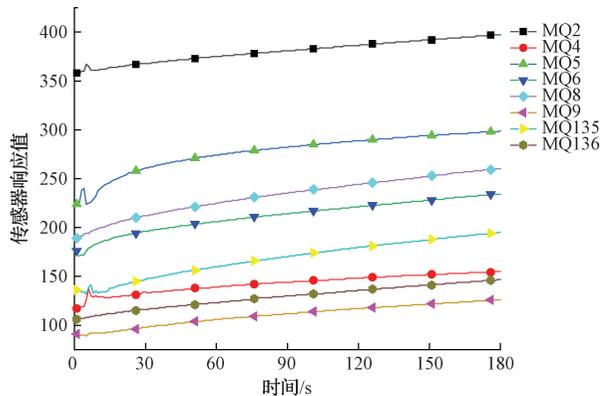


图9 无农残草莓的气味特征变化  
Fig. 9 Changes in odor characteristics of pesticide-free strawberries

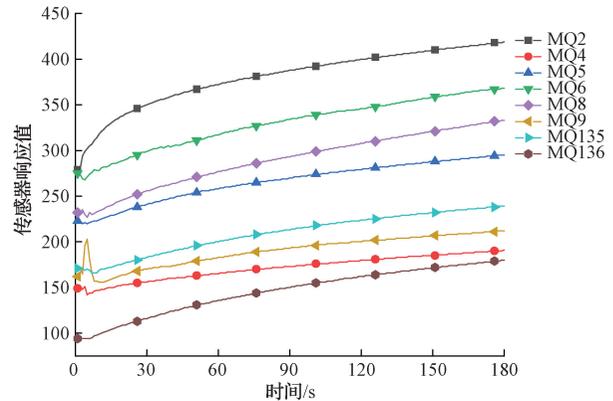


图12 用混合农药(0.5 mg/kg 吡虫啉:0.5 mg/kg 多菌灵=1:1)处理的草莓气味特征变化  
Fig. 12 Changes in odor characteristics of strawberries treated with a pesticide mixture (0.5 mg/kg imidacloprid: 0.5 mg/kg carbendazim=1:1)

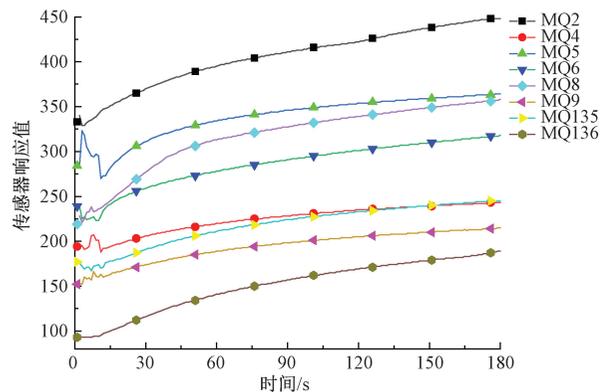


图10 用0.5 mg/kg 吡虫啉处理的草莓气味特征变化  
Fig. 10 Changes in odor characteristics of strawberries treated with 0.5 mg/kg imidacloprid

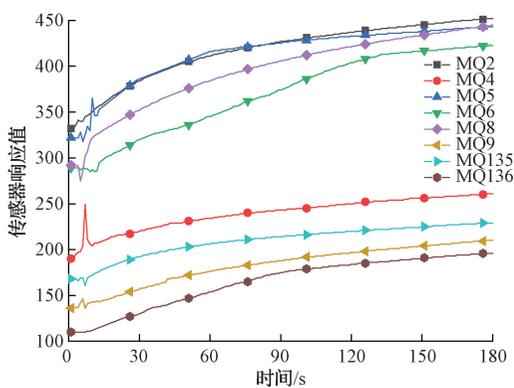


图11 用0.5 mg/kg 多菌灵处理的草莓气味特征变化  
Fig. 11 Changes in odor characteristics of strawberries treated with 0.5 mg/kg carbendazim

## 5 草莓农残气味识别模型设计

由于神经网络的映射能力,利用神经网络进行数据分类问题引起了广泛关注<sup>[14-17]</sup>。但是,它的收敛速度慢、精度低。2024年,Ravichandran等<sup>[18]</sup>提出一种用于连续优化问题的基于种群的NRBO算法,将所提出的NRBO与7种最先进的优化算法进行了比较,结果表明,NRBO具有勘探开发平衡度高、收敛率高、局部最优能力有效规避等特点。

本文提出一种将NRBO与BP相结合的新算法NRBO-BP神经网络,来处理农残气味分类中低浓度信号识别效果差的问题。采用牛顿-拉弗森搜索规则(NRSR),提高BP神经网络的探测能力,提高收敛率,达到更好的搜索空间位置。TAO帮助NRBO避免局部最优陷阱。通过NRBO对神经网络的权重和阈值进行优化,得到更好的分类模型,克服了使用BP神经网络求解分类问题时收敛精度低、容易陷入局部最小值等缺点。

实验搭建草莓农残气味识别模型对草莓上农药残留气味进行检测分类,将电子鼻在178~180 s时间点的稳态信号的平均值作为分类模型的输入值。实验共采集300组草莓气味数据,每组数据包含8个特征值,共采集2400个气味特征。为了加快模型的收敛速度,避免局部最优解,首先使用mapminmax方法对样本数据在[0,1]范围内进行归一化处理。

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: $x$ 是样本气味数据; $x_{\min}$ 是气味数据最小值; $x_{\max}$ 是气味数据最大值。

实验中,使用NRBO不断迭代寻找最优解优化BP神经网络的初始权重和阈值,提高模型的计算能力和预测精度。建立NRBO-BP神经网络模型的步骤如下。

1)输入层设计,实验中农残气味识别模型输入值为气体传感器浓度测量值,共有8种气味特征,因此输入层节点数为8。

2)输出层设计,实验将不同浓度与配比的农药类型作为神经网络的输出,共10类,所以输出层节点数为10。

3)隐藏层层数的设计,基于神经网络的结构特性及其训练机制,结合科尔莫哥洛夫(Kolmogorov)的普遍性定理,选择隐层层数为1的网络结构,一个三层神经网络,可以以任意小的误差逼近连续函数。

4)隐藏层节点数的确定,利用Kolmogorov神经网络理论,推导隐藏层神经元个数的上界或下界,公式如下:

$$L = \sqrt{m+n} + a \quad (3)$$

式中: $L$ 是节点数; $m$ 是输入层的节点数; $n$ 是输出层的节点数; $a$ 是系数,取值1~10。计算可知, $L$ 的取值范围为4~14,通过多次试验得出NRBO-BP最佳隐含层数 $N$ 为14。

5)神经元激活函数的确定,Sigmoid函数具有连续可导、平滑性好的特点,且计算相对简单,适用分类问题和增强模型表达能力,使用其作为激活函数,公式如下:

$$Sigmoid(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4)$$

6)模型结构的确定,基于上述步骤计算的参数,搭建的BP神经网络的结构为8-14-10。

7)权重和阈值的初始设置,为了确保网络模型训练过程的有效性和避免陷入局部最小值,需要在网络中为权重和阈值设定一个合理的初始范围。实验中NRBO-BP算法的参数设置如表2所示。

表2 NRBO-BP算法参数

Table 2 Parameters of the NRBO-BP algorithm

模型参数	数值
最大训练次数	1 000
最小误差	0.000 001
学习率	0.01
最大迭代次数	50
初始种群数量	10
TAO决定因素	0.6

8)采用NRSR来近似求解使误差最小的权重和偏置更新量,优化公式如式(5)所示。

$$x_n^{IT+1} = r1 \times (r1 \times X1_n^{IT} + (1-r1) \times X2_n^{IT}) + (1-r1) \times X3_n^{IT} \quad (5)$$

式中: $r1$ 是随机数; $X1_n^{IT}$ 、 $X2_n^{IT}$ 和 $X3_n^{IT}$ 是探索过程中寻找到的最新向量位置,不断重复迭代过程,直到满足预设的精度要求或达到最大迭代次数。

9)在NRSR迭代过程中,使用TAO来检测并避免陷入局部最优解。当检测到陷入局部最优时,TAO通过结合最优向量位置和当前向量位置来找到更优的解,以跳出

局部最优解,如式(6)所示。

$$X_{TAO}^{IT} = \begin{cases} X_n^{IT+1} + \theta1 \times (\mu1 \times x_b - \mu2 \times X_n^{IT}) + \theta2 \times \delta \times (\mu1 \times Mean(X^{IT}) - \mu2 \times X_n^{IT}), & \mu1 < 0.5 \\ x_b + \theta1 \times (\mu1 \times x_b - \mu2 \times X_n^{IT}) + \theta2 \times \delta \times (\mu1 \times Mean(X^{IT}) - \mu2 \times X_n^{IT}), & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\theta1$ 和 $\theta2$ 分别是(-1,1)和(-0.5,0.5)之间的均匀随机数, $\mu1$ 和 $\mu2$ 为随机参数, $\delta$ 为平衡勘探与开发的自适应系数, $X_n^{IT}$ 为当前向量位置, $X_n^{IT+1}$ 为下一次迭代期间的新向量位置。

10)更新神经网络中最优向量位置,检验NRBO优化的BP神经网络模型的训练效果是否满足要求,如果预测结果满足停止需求,则保存相关参数的最优组合。NRBO-BP神经网络分类模型流程如图13所示。

建立NRBO-BP神经网络模型后,将归一化数据引入模型进行训练,使用随机数值将数据集随机分为240个训练集和60个测试集。训练集用于构建模型结构、初始化模型参数和训练模型。训练后,使用测试集验证模型的性能,并收集结果进行统计分析。同时引入粒子群算法(PSO)优化BP算法和单个BP神经网络进行比较分析,以验证NRBO-BP算法的优越性。

使用BP、PSO-BP和NRBO-BP模型在训练集和测试集的分类结果如图14~16所示。NRBO-BP模型在训练集和测试集的准确率分别为95.41%和93.44%,PSO-BP和BP神经网络训练集准确率分别为88.33%和83.33%,可以发现NRBO-BP模型在分类准确度上明显高于其他模型。由于含有吡虫啉0.5 mg/kg、多菌灵0.5 mg/kg以及混合农药(0.5 mg/kg吡虫啉:0.5 mg/kg多菌灵=1:1)的草莓样本,挥发香气具有相似的成分,导致它们在验证过程中被划分为错误的类别。

针对本文实验模型,采用精确率、召回率和F1值作为模型性能的评价标准,结果如表3所示。从表3可以看出,基于NRBO-BP的分类模型有良好的综合性能,其中整体精确率为94.04%,分别比PSO-BP、BP高出8.41%、10.06%。实验证明了无论是对各个类别的分类性能,还是模型的整体分类性能,NRBO-BP分类模型相比PSO-BP和BP神经网络模型都有了较大幅度的提升,能够准确、稳定地检测草莓上残留的不同农药,可以作为草莓质量安全的快速评价方法。

表3 不同模型的整体预测性能对比

Table 3 Comparison of overall prediction performance of different models

分类模型	准确率/%	精确率/%	召回率/%	F1分数
NRBO-BP	93.44	94.04	94.16	0.938 7
PSO-BP	88.33	85.63	89.11	0.846 8
BP	83.33	83.98	85.33	0.836 1

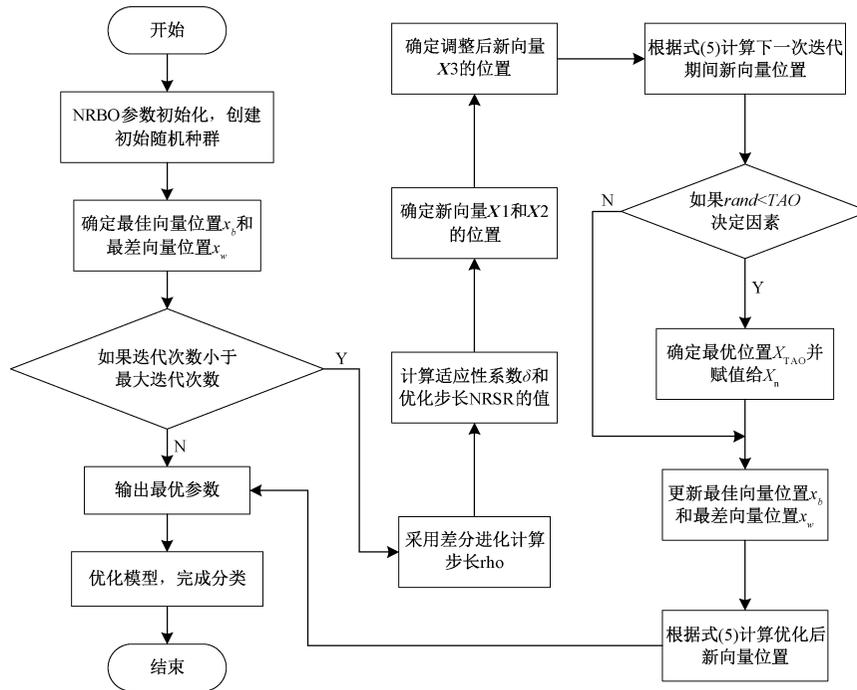


图 13 NRBO-BP 神经网络流程

Fig. 13 Flowchart of NRBO-BP neural network

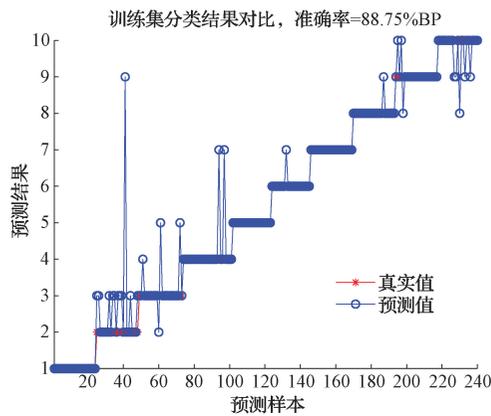


图 14 基于 BP 神经网络的分类和预测结果

Fig. 14 Classification and prediction results based on BP neural network

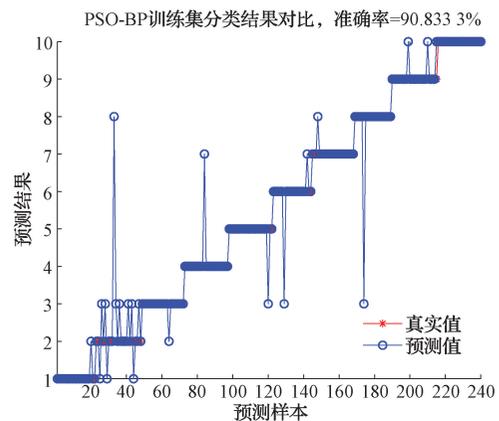
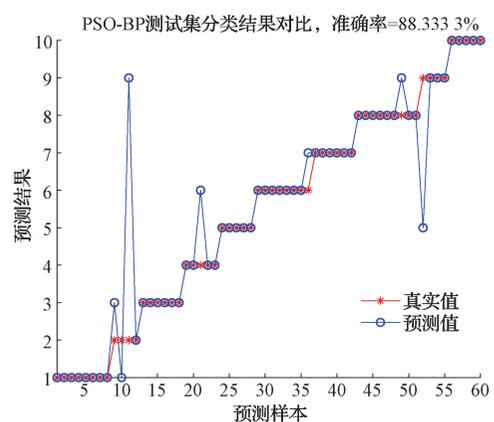
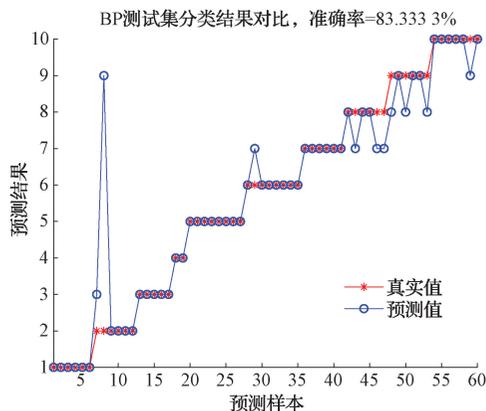


图 15 基于 PSO-BP 的分类和预测结果

Fig. 15 Classification and prediction results based on PSO-BP



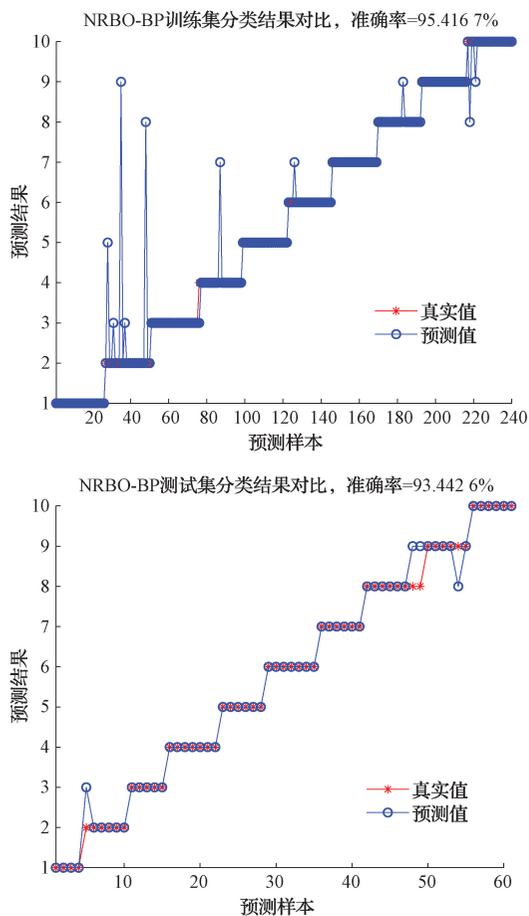


图 16 基于 NRBO-BP 的分类和预测结果

Fig. 16 Classification and prediction results based on NRBO-BP

## 6 结 论

本文针对农产品上农药残留超标的问题,选取草莓作为实验对象,研制了一套适用于检测农残气味的传感器阵列及其气室,通过 NRBO 优化的 BP 神经网络算法,完成对草莓上农药残留的快速检测。实验结果表明,所设计的仿生气室可以保证采集端信号的质量,具有更高的清洁效率,缩短了检测周期。提出的 NRBO-BP 神经网络分类算法具有准确度高,全局搜索寻优能力强等特点,在识别精确度、召回率和 F1 指标上显著优于其他方法,能够准确识别草莓上残留的农药。目前设计的电子鼻只检测了草莓上吡虫啉和多菌灵的残留情况,未来可以继续优化传感器阵列,采集不同农产品上农药残留的数据,建立对应的数据库以适用于其他水果和蔬菜的不同种类的农药及其残留物。

### 参 考 文 献

[1] 王鸣谦, 薛莉, 赵珺, 等. 世界草莓生产及贸易现状[J]. 中国果树, 2021(2): 104-108.

WANG M Q, XUE L, ZHAO J, et al. Current situation of strawberry production and trade in the world [J]. *China Fruits*, 2021(2): 104-108.

- [2] 亢菊侠, 王壮, 仲颜怡. 设施草莓主要病虫害全程生物防控技术集成[J]. 现代园艺, 2023, 46(6): 64-65, 68.
- KANG J X, WANG ZH, ZHONG Y Y. Integration of biological control technology for major diseases and pests in strawberry [J]. *Modern Horticulture*, 2023, 46(6): 64-65, 68.
- [3] 杨秋菊, 黎小鹏, 陈楠, 等. 草莓中农药残留风险评估及分析[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(5): 1057-1059.
- YANG Q J, LI X P, CHEN N, et al. Risk assessment and analysis of pesticide residues in strawberry [J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63(5): 1057-1059.
- [4] 张传雷, 许大伟. 草莓病虫害的发生与防治技术探讨[J]. 果农之友, 2023(12): 84-86.
- ZHANG CH L, XU D W. Discussion on the occurrence and control technology of strawberry pests and diseases [J]. *Fruit Farmer's Friend*, 2023(12): 84-86.
- [5] 徐信焯, 施春雷. 多菌灵的毒性及风险评估研究进展[J]. 南方农业, 2019, 13(34): 40-44, 47.
- XU X Y, SHI CH L. Research progress on toxicity and risk assessment of carbendazim [J]. *Southern Agriculture*, 2019, 13(34): 40-44, 47.
- [6] 尼亚孜艾力·萨伊提, 张敏, 李倩. 吡虫啉毒性作用机制及治疗进展[J]. 沈阳医学院学报, 2023, 25(4): 419-422.
- NIYAZIALI S Y T, ZHANG M, LI Q. Mechanisms of toxic effects of imidacloprid and therapeutic progress [J]. *Journal of Shenyang Medical College*, 2023, 25(4): 419-422.
- [7] 王建伟, 叶升. 电子鼻在食品行业的应用进展[J]. 中国调味品, 2022, 47(10): 198-200, 205.
- WANG J W, YE SH. Application progress of electronic nose in food industry [J]. *Chinese Condiments*, 2022, 47(10): 198-200, 205.
- [8] 徐泽. 电子鼻在果蔬及肉类检测中的应用进展[J]. 食品安全导刊, 2023(16): 174-176.
- XU Z. Application of electronic nose in fruit, vegetable and meat detection [J]. *Food Safety Guide*, 2023(16): 174-176.
- [9] WU Z, ZHANG H, SUN W, et al. Development of a low-cost portable electronic nose for cigarette brands identification [J]. *Sensors*, 2020, 20(15): 4239.
- [10] ANNANOUCHE F, BOUCHET G, PERRIER P, et al. Hydrodynamic evaluation of gas testing chamber: Simulation, experiment [J]. *Sensors*

- Actuators; B. Chemical, 2019, 290: 598-606.
- [11] AMKOR A, BARBRI E N. A measurement prototype based on gas sensors for detection of pesticide residues in edible mint [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 15(1): 1-11.
- [12] TANG X, XIAO W, SHANG T, et al. An electronic nose technology to quantify pyrethroid pesticide contamination in tea [J]. Chemosensors, 2020, 8(2): 30.
- [13] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量:GB 2763—2021[S]. 北京:质检出版社,2021.  
National Health Commission of the People's Republic of China. National standard for Food Safety Maximum residue Limit of pesticides in food; GB 2763—2021 [S]. Beijing: Quality Inspection Press, 2021.
- [14] 余安安,吴雪菲,李栋,等. 基于神经网络的毫米波测云雷达云状识别研究[J]. 国外电子测量技术,2021, 40():82-86.  
YU AN AN, WU X F, LI D, et al. Research on cloud identification of millimeter wave cloud measurement radar based on neural network [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(4): 82-86.
- [15] 李帅,杨赫然,孙兴伟,等. 基于改进神经网络算法的数控钻攻中心进给轴热误差预测[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(9):234-242.  
LI SH, YANG H R, SUN X W, et al. Thermal error prediction of CNC drilling and tapping center feed axis based on improved neural network algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 234-242.
- [16] 郭绍陶,苑玮琦. 圆柱锂电池端面凹坑缺陷检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(3):230-239.  
GUO SH T, YUAN W Q. Research on the detection method of pit defects on the end face of lithium cylindrical batteries [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 230-239.
- [17] 董正琪,姜杰,赵雪成,等. Adam 优化的 BP 神经网络地铁空调环境模式检测[J]. 电子测量技术,2022, 45(24):111-117.  
DONG ZH Q, JIANG J, ZHAO X CH, et al. Adam optimized BP neural network metro air-conditioning environment mode detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(24): 111-117.
- [18] RAVICHANDRAN S, MANOHARAN P, PRADEEP J. Newton-Raphson-based optimizer: A new population-based metaheuristic algorithm for continuous optimization problems [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 128: 107532.

#### 作者简介

杜文斌,硕士研究生,主要研究方向为传感器阵列、气味识别。

E-mail: 571080094@qq.com

王伟(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、传感器阵列、气味识别等。

E-mail: cumtww@nuc.edu.cn