

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2024.03.005

基于 BP 神经网络算法的延胡索农药减施增效技术研究

李佳宁, 吴宇炼, 肖朋, 金伟锋, 范慧艳

浙江中医药大学 药学院, 杭州 310053

摘要: 通过 BP 神经网络结合遗传算法, 对植物免疫诱抗剂保康灵 1 号在延胡索农药减施增效技术中的应用策略进行优化. 选择产量、发病率、苯丙氨酸解氨酶活性和延胡索乙素含量作为评价指标, 用遗传神经网络算法对试验结果进行目标寻优, 获得植物免疫诱抗剂在延胡索栽培中的最佳施药策略. BP 神经网络结合遗传算法处理分析得到的优化结果为: 保康灵 1 号稀释 325 倍, 噬菌酯稀释 1 374 倍, 施药间隔为每周 1 次, 预测结果与 27 个试验组中的施药效果最优组(即保康灵 1 号稀释 300 倍, 噬菌酯稀释 1 500 倍, 施药时间为每周 1 次)相近且优于其他组. BP 神经网络结合遗传算法应用于延胡索农药减施增效技术研究的方法可靠有效, 可以为植物免疫诱抗剂在中药材栽培的应用提供新思路.

关键词: 植物免疫诱抗剂; 延胡索; 减施增效;

BP 神经网络; 遗传算法

中图分类号: S661

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2024)03-0043-08

Study on *Corydalis yanhusuo* Cultivation Techniques of Reducing Application and Increasing Efficiency of Pesticides Based on Genetic Neural Network Algorithm

LI Jianning, WU Yulian, XIAO Peng,

JIN Weifeng, FAN Huiyan

School of Pharmaceutical Sciences, Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 310053, China

收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 国家青年科学基金项目(82003890); 浙江省基础公益研究计划项目(LGN20C140003); 浙江中医药大学 2023 年校级教育教学改革项目(CY23007)。

作者简介: 李佳宁, 硕士研究生, 主要从事中药学研究。

通信作者: 范慧艳, 讲师。

Abstract: Optimize the application strategy of plant immune inducer Bao Kang Ling No. 1 in the technology of reducing use and increasing efficiency of pesticide for *Corydalis yanhusuo* cultivation through the combination of BP neural network and genetic algorithm. Using a three-factor and three-level experimental design, four indicators were measured, yield, incidence of plant disease, phenylalanine aminolyase activity and tetrahydropalmatine content. The genetic neural network algorithm was used to optimize the experimental results, obtaining the optimal application strategy of plant immune inducer in the cultivation of *C. yanhusuo*. The optimized results obtained from the analysis using the BP neural network combined with genetic algorithm indicated that Bao Kang Ling No. 1 should be diluted 325 times, and azoxystrobin should be diluted 1,374 times, with an application interval of once a week. The predicted results of these three factors, which is 300 times dilution of Bao Kang Ling No. 1, and 1,500 times dilution of azoxystrobin, with an application interval of once a week, are close to, and better than the best-performing group among the 27 experimental groups, surpassing the previous experimental results. **Conclusion:** The method of applying the BP neural network combined with genetic algorithm to the research on pesticide reduction and efficiency increase cultivation technology for *C. yanhusuo* is reliable and effective. It can provide a new idea for the application of plant immune inducers in the cultivation of traditional Chinese medicinal plants.

Key words: plant immune inducer; *Corydalis yanhusuo*; reduction of use and increase of efficiency; BP neural network; genetic algorithm

植物免疫诱抗剂能够使植物获得或增强对病原菌的抗性,提高植物的抗逆性,且不易产生抗药性,具有防治谱广的特点,一般可以分为寡糖和有机酸类等^[1].壳寡糖能增强植物的防御反应,同时也是一种良好的天然抗菌剂^[2],已广泛应用于多种植物,如长春花等^[3-4].保康灵1号是3%壳寡糖水剂型高效广谱免疫诱抗剂,作为一种新型绿色生物农药,具有用量少而效果优、环境相容性好的特点.目前的研究表明,该制剂对浙贝母、小白菜、草莓、葡萄等栽培植物的生长与抗病能力均有良好效果^[5-9].

延胡索为罂粟科植物延胡索(*Corydalis yanhusuo* W.T.Wang)的干燥块茎^[10],具有较高的药用价值.随着国家对中医药产业的大力发展,延胡索的市场需求与品质要求也逐渐上升.目前,在延胡索种植过程中主要使用化学农药来应对菌核病、霜霉病等病害侵袭.然而,长期使用化学农药会导致延胡索块茎农药残留.而绿色环保的生物农药保康灵1号可通过调节植物的新陈代谢,激活植物的免疫系统和生长系统,从而增强植物抗病和抗逆能力,在提高作物产量和品质方面有显著成效.保康灵1号在使用过程中安全、无毒、无残留,可以为延胡索等农作物的高质量栽培提供可靠保障.

人工神经网络是机器学习模型之一,在处理高度非线性数据关系时具有较大优势.它能根据输入、输出数据确定两者之间的函数模型.该模型已应用于中药材的提取和炮制工艺优选、处方筛选等研究^[11-13].本试验以延胡索产量、延胡索乙素含量、发病率和苯丙氨酸解氨酶活性为评价指标,采用遗传神经网络算法探求保康灵1号对延胡索的最佳施用策略,以提高延胡索的产量和品质.

1 材料与方法

1.1 试验仪器及试剂

Waterse 2695 高效液相色谱仪; Waters 2998 PDA Detector 高效液相检测器; 色谱柱: 填料: Hypersil ODS2 5 μm ; JJ124BC 型分析天平; 电子天平; 0.22 μm 微孔滤膜.

3%壳寡糖水剂(保康灵1号),购自浙江绿神天敌生物技术有限公司;25%噁菌酯悬浮液(阿米西达),购自先正达生物科技(中国)有限公司;延胡索乙素标准品,购自上海源叶生物科技有限公司;甲醇(色谱纯),购自天津市科密欧化学试剂有限公司;无水乙醇(分析纯),购自杭州龙山精细化工有限公司;磷酸(分析纯),购自天津市科密欧化学试剂有限公司;三乙胺(分析纯),购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 供试作物

试验所用延胡索品种为延胡索1号,种植于浙江省杭州市富阳区泗洲村试验大田,经浙江中医药大学药学院张水利教授鉴定为罂粟科植物延胡索(*Corydalis yanhusuo* W. T. Wang)^[14]。

1.3 试验时间及试验地概况

试验于2020年10月在浙江省杭州市富阳区泗洲村试验大田进行。经GPS定位,试验地位于北纬30°5'15",东经119°53'44",海拔21 m,年平均气温16.1℃,春夏雨热同步,降水充沛,年平均降水量1501 mm,属于亚热带季风气候。试验地土壤肥力较好。

1.4 试验设计

采用3因素3水平排列试验设计,共设27个处理组,每个处理组面积为15 m²(1 m×15 m),种植密度为20株/m²。保康灵1号施药稀释倍数分别为300,400,500倍,25%噁菌酯药剂稀释倍数分别为1000,1500,2000倍,两者混合喷施。喷施间隔时间为7,10,14 d,每天各喷施4次。共有27组试验组和一组清水对照组。施药当日天气晴朗,药液稀释后进行喷雾,均匀周到。

1.5 测定项目及方法

1.5.1 延胡索产量测算

各处理组分别按株挖取延胡索植株,称量延胡索的鲜质量,计算产量。

1.5.2 发病率调查

2021年4月19日,对延胡索霜霉病发病率进行调查,发病率计算公式为:

$$\text{发病率}(\%) = \frac{\text{病株数}}{\text{调查总数}} \times 100\% \quad (1)$$

1.5.3 苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性的检测

盒试剂法:精确称取0.1 g延胡索植株组织,加入0.9 mL提取液,冰浴,研成匀浆,10 000 r/min离心10 min,取上清液,分别加入粗酶液40 μL,R2缓冲液1480 μL,R3缓冲液400 μL,混合均匀,30℃标准水浴30 min,再加入R4终止液80 μL,混匀,静置10 min后,在290 nm下测量吸光度。计算公式如下:

$$\text{PAL}(U/g_{\text{鲜质量}}) = \Delta A / 0.1 \div (W/V_{\text{样总}} \times V_{\text{样}}) \times V_{\text{反总}} \div T = 16.6 \times \Delta A \div W \quad (2)$$

式中:W为样本质量(g);V_{样总}为提取粗酶液的总体积(mL);V_样为测定时粗上样体积(mL);V_{反总}为反应体系总体积(mL);T为反应时间(min)。

1.5.4 延胡索乙素含量测定

色谱条件:色谱柱为Hypersil ODS2(4.6 mm×250 mm,5 μm)。流动相A:甲醇,流动相B:0.1%的磷酸溶液,用三乙胺调pH值至6.0;检测波长为280 nm;柱温为30℃;进样量为10 μL。

标准溶液的制备:精确称取延胡索乙素标准品20 mg,置于50 mL容量瓶中,加入甲醇(色谱纯)溶解并定容至刻度,摇匀,配制成质量浓度为0.4 mg/mL的延胡索乙素标准品溶液。

供试品溶液的制备:精确称取延胡索样品1.000 0 g,置于锥形瓶中,加入25 mL甲醇(色谱

纯),称定质量后放入超声频率 40 kHz 的超声清洗机,50 ℃中超声 48 min,超声结束后再次称定质量,用甲醇补足失重,待冷却到室温后,过滤,取滤液,0.22 μm滤膜滤过,即得供试品溶液。

1.6 人工神经网络—遗传算法筛选最优提取工艺

1.6.1 构建神经网络模型

1.6.1.1 规范化处理

由于各参数的单位和取值范围不一致,在相同标准下,不能分别得到各参数对产量、延胡索乙素含量、苯丙氨酸解氨酶(PAL)酶活性和发病率的影响,因此,将样本数据归一化处理,将数据转化为[0, 1]的数,加快神经网络的训练速度。

本文采取的规范化方法为 max-min 归一化法,其函数形式为

$$X_k = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

式中: X_k 是标准化数据, X_{\min} 是数据中最小的数; X_{\max} 是数据中最大的数。

1.6.1.2 确定输入层节点

选取保康灵 1 号稀释倍数、噬菌酯稀释倍数、施药间隔天数 3 个变量作为神经网络的输入变量,详情见表 1。

1.6.1.3 确定输出层节点

根据评判延胡索增产提质的指标确定输出层节点,在此神经网络中以产量、延胡索乙素含量、苯丙氨酸解氨酶活性和发病率赋权后计算得到的综合目标 Y 为输出变量。

1.6.1.4 确定隐藏层节点

在神经网络模型中,模型的误差、精度和运行速度与隐含层层数有关,不同神经元数目下训练集和验证集的均方误差(MAE_{train}和 MAE_{test})见表 2。由表 2 可知神经元数目越高,误差值越低,但神经元数量过多会增加神经模型学习时间甚至降低准度。

以均方误差为性能判定,分别选择 3~5 个隐藏神经元进行 500 次训练神经网络训练,25 次遗传算法训练,结果见表 2。其中神经元数目为 4 时,训练集和验证集的均方误差差值最小,所以选用 3×4×1 的网络结构。

表 1 神经网络输入变量

水平	保康灵 1 号稀释倍数(X_1)	25%噬菌酯稀释倍数(X_2)	施药间隔天数(X_3)/d
1	300	1000	7
2	400	1500	10
3	500	2000	14

表 2 神经元数目对 MAE_{train} 和 MAE_{test} 的影响

网络结构	MAE _{train}	MAE _{test}
3×3×1	0.032 0	0.035 0
3×4×1	0.002 1	0.001 8
3×5×1	0.016 0	0.026 0

1.6.2 神经网络模型训练

神经网络的建立使用 Python,不同影响因素样本共计 27 个,其中 24 个样本用于模型训练,3 个样本作为验证数据,神经网络结构搭建如图 1 所示。

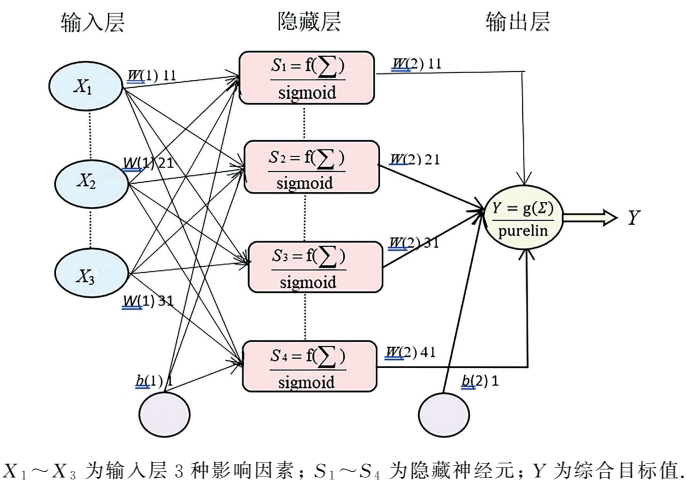


图 1 神经网络结构与构建流程图

2 结果与分析

2.1 试验设计结果

选用保康灵 1 号稀释倍数、啞菌酯稀释倍数、施药间隔天数 3 个因素,每个因素 3 设置个水平,以产量延胡索乙素含量、苯丙氨酸解氨酶酶活性、发病率为指标,试验测得的结果及通过熵权法赋权后计算得到的综合目标 Y 见表 3.

采用熵权法对各项指标的权重进行了确定,结果显示权重分配如下:产量权重为 0.169 6,延胡索乙素权重为 0.362 7,苯丙氨酸解氨酶酶活性权重为 0.217 0,发病率权重为 0.250 7.通过熵权法赋权后得出施药效果最好的组别为第 4 组,即保康灵 1 号稀释 300 倍,啞菌酯稀释 1 500 倍,施药时间为每周 1 次.

表 3 试验设计与结果

处理	保康灵 1 号 稀释倍数	25%啞菌酯 稀释倍数	施药间隔 天数/d	产量/ (kg · m ⁻²)	延胡索 乙素/%	PAL 酶活/ (u · g ⁻¹ · h ⁻¹)	发病 率/%	综合 目标 Y
1	300	1 000	7	0.610 0	0.06	27.985 0	0.710	0.339 7
2	300	1 000	10	0.790 0	0.06	25.585 0	0.705	0.410 9
3	300	1 000	14	0.450 0	0.06	26.260 0	0.740	0.212 9
4	300	1 500	7	1.110 0	0.04	47.390 0	0.720	0.663 5
5	300	1 500	10	0.370 0	0.05	35.770 0	0.775	0.191 3
6	300	1 500	14	0.870 0	0.05	32.725 0	0.805	0.374 8
7	300	2 000	7	0.620 0	0.09	33.615 0	0.740	0.427 8
8	300	2 000	10	0.660 0	0.07	37.195 0	0.720	0.439 6
9	300	2 000	14	0.540 0	0.09	37.345 0	0.710	0.448 5
10	400	1 000	7	0.690 0	0.08	33.095 0	0.735	0.428 0
11	400	1 000	10	0.590 0	0.10	34.655 0	0.690	0.499 4
12	400	1 000	14	0.680 0	0.09	34.990 0	0.600	0.644 9
13	400	1 500	7	0.570 0	0.08	31.950 0	0.720	0.387 8
14	400	1 500	10	0.520 0	0.07	33.810 0	0.700	0.362 4
15	400	1 500	14	0.570 0	0.09	27.495 0	0.685	0.424 8
16	400	2 000	7	0.700 0	0.07	20.985 0	0.725	0.327 9
17	400	2 000	10	0.760 0	0.07	25.825 0	0.655	0.482 0
18	400	2 000	14	0.430 0	0.09	25.950 0	0.595	0.457 5

续表

处理	保康灵1号 稀释倍数	25%啞菌酯 稀释倍数	施药间隔 天数/d	产量/ (kg·m ⁻²)	延胡索 乙素/%	PAL酶活/ (u·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	发病率/%	综合 目标 Y
19	500	1 000	7	0.370 0	0.08	31.675 0	0.705	0.303 7
20	500	1 000	10	0.450 0	0.10	35.385 0	0.605	0.548 5
21	500	1 000	14	0.520 0	0.09	40.995 0	0.630	0.580 0
22	500	1 500	7	0.590 0	0.08	29.340 0	0.620	0.500 2
23	500	1 500	10	0.660 0	0.10	28.715 0	0.710	0.470 3
24	500	1 500	14	0.560 0	0.10	29.795 0	0.655	0.489 5
25	500	2 000	7	0.740 0	0.10	30.985 0	0.645	0.598 1
26	500	2 000	10	0.540 0	0.08	35.440 0	0.675	0.463 9
27	500	2 000	14	0.630 0	0.09	37.150 0	0.635	0.577 9

2.2 神经网络训练结果

通过 Python 软件编程建立基于遗传算法的 BP 神经网络模型, 对以产量、延胡索乙素含量、苯丙氨酸解氨酶酶活性和发病率加权后的综合目标进行预测, 将随机划分得到的 24 组样本数据输入到模型中得到输出结果, 第 6, 21, 23 组为测试数据。

由图 2 可知, 选择 $3 \times 4 \times 1$ 网络回归系数为 0.86 (回归系数为 1 时表示完全线性相关, 为 0 时无法确定是否线性相关)。该网络结构具有良好相关性, 能准确模拟影响植物免疫诱抗剂施药策略的 3 种因素与延胡索栽培品质之间的关系。

神经网络训练得到的综合目标实测值与预测值的对比折线图如图 3 所示; 实测数据与输出的预测数据之间的相对误差见表 4。整体来说, 二者相对误差较小, 预测结果较符合期望。

通过对 27 组样本的综合 Y 值进行赋分得到, 保康灵 1 号稀释 300 倍, 啞菌酯稀释 1 500 倍, 施药时间为每周 1 次的组别评分最高。

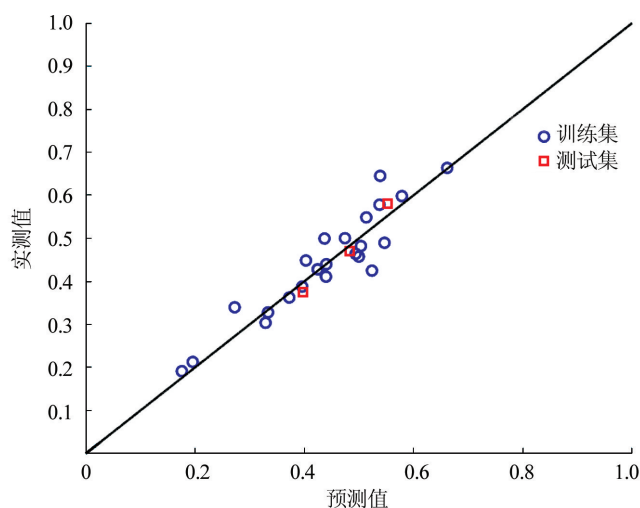


图 2 神经网络模型的预测值、实测值及其拟合效果

表 4 测试组综合目标实测值与预测值对比

编码(组)	实测值	预测值	相对误差
6	0.374 8	0.397 8	-0.023 0
21	0.580 0	0.552 0	0.028 0
23	0.578 0	0.537 6	0.040 4

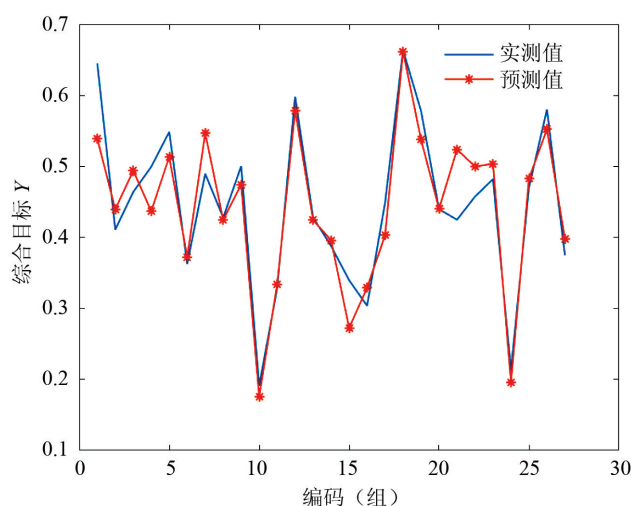


图3 综合目标实测值与预测值对比

2.3 遗传算法优选

选用训练好的遗传神经网络模型,采用遗传算法搜寻保康灵最佳施药方案.参数设定学习速率0.1,最大迭代次数为神经网络500次与遗传算法25次,得到最佳施药策略为保康灵1号稀释325倍,5%啞菌酯药剂稀释1374倍,施药间隔时间为每周1次,预测结果为0.71,预测得出的3个因素水平与27组样本中施药效果最好的组别相近,且优于其他组别的试验样本结果,说明采用神经网络模型和遗传算法寻优是可行的.

3 讨论

当作物受到外界刺激时,会自发产生免疫反应,而植物免疫诱抗剂作为一种生物农药,可以增强植物自身免疫力,提高其对致病因子的抵抗力^[15-16].植物免疫诱抗剂在农作物病害防治上作用显著,还可以提高作物品质.为了实现中药材的安全、有效及品质稳定,可将植物免疫诱抗剂应用于中药材病虫害绿色防控技术.

伴随着人工智能的发展,可以通过数学模型和算法寻找合适的施药策略.神经网络作为一种网络结构的数学模型具有优良的逼近能力,近年来已在众多领域中应用^[17-19].遗传算法是一种模拟生物进化过程的优化算法,通过“适者生存,优胜劣汰”的进化规律对神经网络权值进行选择,是一种全局优选的算法^[20-22].目前,神经网络已用于预测小麦、甜瓜等作物的质量或产量,以及农产品的分级分类、土壤肥效模型^[23-25]等领域的研究,但在作物栽培上的应用和研究较少,在中药材栽培领域更是鲜有报道.

《中华人民共和国药典》(2020年版)将延胡索乙素含量作为药材质量控制的指标,其含量高低会直接影响延胡索的品质^[26].同时,产量和抗病性也是评价延胡索栽培品质的重要指标,用产量、延胡索乙素含量、发病率和苯丙氨酸解氨酶活性进行赋权,能更好地体现减施增效作用.通过遗传算法优化的神经网络模型预测得到最佳条件,并预测得出3因素水平与27个组别中施药效果最好的组别相近,进一步证明了遗传算法的可靠性.本研究中通过遗传算法优化后的遗传神经网络模型预测结果也与试验结果相接近,表明通过该模型优选出的施药策略具有可信度,联用熵权法、归一法、遗传神经网络模型筛选植物免疫诱抗剂施药策略是合理可行的.

参考文献:

- [1] 刘艳潇,祝一鸣,周而勋.植物免疫诱抗剂的作用机理和应用研究进展[J].分子植物育种,2020,18(3):

- 1020-1026.
- [2] LIANG S, SUN Y, DAI X. A Review of the Preparation, Analysis and Biological Functions of Chitooligosaccharide [J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(8): E2197. [PubMed]
- [3] TANG W Z, LIU X Q, HE Y N, et al. Enhancement of Vindoline and Catharanthine Accumulation, Antioxidant Enzymes Activities, and Gene Expression Levels in *Catharanthus Roseus* Leaves by Chitooligosaccharides Elicitation [J]. *Marine Drugs*, 2022, 20(3): 188.
- [4] HE Y Q, BOSE S K, WANG M Y, et al. Effects of Chitosan Oligosaccharides Postharvest Treatment on the Quality and Ripening Related Gene Expression of Cultivated Strawberry Fruits [J]. *Journal of Berry Research*, 2019, 9(1): 11-25.
- [5] 陈敏洁, 杨超超, 汪晓菲, 等. 免疫诱抗剂对浙贝母生长与抗病的影响[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(12): 2865-2868.
- [6] 忻雅, 肖文斐, 阮松林, 等. 不同杀菌剂和诱导剂对草莓病害及产量的影响 [J]. *江西农业学报*, 2021, 33(1): 28-32.
- [7] 陈思思, 张青, 顾建强, 等. 保康灵 1 号对草莓植物学性状及抗病性的影响 [J]. *南方农业*, 2019, 13(25): 36-38.
- [8] 胡伟民, 肖文斐, 忻雅, 等. 免疫诱抗剂保康灵 1 号对鲜食糯玉米产量和抗病性的影响 [J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(4): 604-606.
- [9] 沈国正, 刘辉, 肖文斐, 等. 免疫诱抗剂保康灵 1 号对葡萄促生长与抗病的效应 [J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(8): 1193-1196.
- [10] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2020 版. 一部[S], 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 145-146.
- [11] 包绍印, 许守超, 陈天翔, 等. 基于遗传神经网络的衢枳壳中橙皮苷提取工艺优选的研究 [J]. *中药材*, 2018, 41(11): 2632-2635.
- [12] 郑凯旋, 赵永峰, 李文兵, 等. Box-Behnken 响应面法结合人工神经网络优选蜜炙川芎炮制工艺 [J]. *中药材*, 2017, 40(9): 2055-2059.
- [13] 李玲, 李时凤, 何宇新. 基于人工神经网络的白芷总香豆素缓释片处方筛选研究 [J]. *中药材*, 2014, 37(5): 875-880.
- [14] 汪群红. 延胡索的生药学鉴定 [J]. *海峡药学*, 2008, 20(12): 68-69.
- [15] 杨波, 王源超. 植物免疫诱抗剂的应用研究进展 [J]. *中国植保导刊*, 2019, 39(2): 24-32.
- [16] 刘艳潇, 祝一鸣, 周而勋. 植物免疫诱抗剂的作用机理和应用研究进展 [J]. *分子植物育种*, 2020, 18(3): 1020-1026.
- [17] 王巍, 杨武杰, 韩宇, 等. 正交实验结合 AHP 和 GA-BP 神经网络优化益黄散醇提工艺 [J]. *中国药房*, 2024, 35(3): 327-332.
- [18] 孙成玉, 焦龙, 闫春华, 等. 高光谱结合人工神经网络鉴别不同来源的丹参饮片 [J]. *理化检验-化学分册*, 2024, 60(3): 271-276.
- [19] 漆颖, 王艳, 肖蒙, 等. 基于神经网络的中药饮片识别系统的设计 [J]. *物联网技术*, 2024, 14(1): 46-47.
- [20] 杨银爱, 牛犇, 陈慧芝, 等. 基于 GA-BP 神经网络和遗传算法优化雪梨莲子银耳羹工艺与风味 [J]. *核农学报*, 2023, 37(12): 2395-2407.
- [21] 宋建忠, 陈盈盈, 杨婧, 等. 人工神经网络-遗传算法优化刺糖低聚糖提取工艺的研究 [J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(6): 1-7.
- [22] 黄鹏程, 金伟锋, 万海同, 等. 遗传神经网络与遗传算法优选黄芪皂苷微波提取工艺条件 [J]. *中草药*, 2019, 50(16): 3815-3823.
- [23] 朱瑞芬, 徐远东, 孙万斌, 等. 基于人工神经网络的狼尾草属牧草品质近红外光谱预测研究 [J]. *草地学报*, 2024, 32(2): 527-534.
- [24] 刘小英, 张健, 杨蜀秦. 基于人工神经网络与 VPMCD 的葡萄干等级检测方法研究 [J]. *现代电子技术*, 2016, 39(12): 18-21.
- [25] 矫亮, 李黎, 刘菲, 等. 基于 BP 神经网络人参栽培中土壤肥效模型的研究 [J]. *农业网络信息*, 2010(8): 16-18.
- [26] 徐珂, 晋小军, 李欠, 等. 延胡索品质与土壤养分的相关性分析 [J]. *中成药*, 2019, 41(7): 1635-1639.