DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.01.005

# 基于BP神经网络—遗传算法的咖啡壳炭化工艺参数优化

张霞[1,2], 苏盼杰[1,2], 朱静哲[1,2], 王伊洋[1,2], 黄峻伟[1,2*]

(1. 云南农业大学机电工程学院,云南昆明,650500;
2. 云南省教育厅高原特色现代农业节能减碳重点实验室,云南昆明,650201)

**摘要:**生物炭是一种针对生物质能高效开发的多功能材料,随着对生物质能高效开发的关注,生物炭的应用范围逐渐扩展,其中炭基肥作为生物炭的一个重要应用方向,因其优良的缓释性能和对土壤负担小的特点,受到广泛关注。生物炭的理化性质受到制备过程中的炭化温度、炭化时间和升温速率等工艺参数的显著影响,不同炭化工艺不仅决定了生物炭的理化性质,还直接影响其作为炭基肥的缓释性能。传统的实验方法往往需要大量的时间和资源投入,因此,探索更加高效的优化方法成为了研究的热点。本研究采用了BP神经网络与遗传算法相结合的优化方法,针对咖啡壳生物炭的炭化过程中的炭化温度、炭化时间和升温速率3个关键工艺参数进行预测和优化。研究结果表明,采用BP神经网络—遗传算法优化后的炭基肥,其最佳工艺参数为炭化时间2.8 h、炭化温度780.7 ℃和升温速率15.1 ℃/min。在此工艺条件下制备的咖啡壳生物炭基肥,其7 d养分累计释放率为45.9%,表明缓释性能得到了显著提升。综上所述,本研究提出了一种基于BP神经网络和遗传算法的生物炭炭化工艺参数优化方法,能够有效提高炭基肥的缓释性能。该方法不仅为生物炭制备工艺的优化提供了新的技术路径,也为相关领域的研究提供了重要参考,对推动高性能炭基肥的发展具有积极意义。

**关键词:**生物炭;BP神经网络;遗传算法;炭基肥;工艺参数优化

**中图分类号:**S225.5+2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2025)01-0051-08

张霞, 苏盼杰, 朱静哲, 王伊洋, 黄峻伟. 基于BP神经网络—遗传算法的咖啡壳炭化工艺参数优化[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(1): 51-58

ZHANG Xia, SU Panjie, ZHU Jingzhe, WANG Yiyang, HUANG Junwei. Optimization of coffee shell carbonization parameters based on BP neural network-genetic algorithm [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(1): 51-58

## 0 引言

近年来,随着国家“碳达峰”与“碳中和”的战略目标的提出,降碳技术和新能源开发成为各领域研究的重点[1]。同时,党的二十大报告指出生态环境保护是“三农”工作中突出的问题之一,明确提出全面推进乡村振兴,加快农业农村现代化,提高农业质量效益和竞争力[2]。

在此背景下,我国农村农业中丰富的生物质资源,引起人们对生物质能利用的关注[3]。生物质能是一种太阳能以化学形式储存在生物质中的能源,在农业和林业领域较为常见,两者的资源废弃物是主要的生物质资源。生物炭是一种可由废弃资源通过生物质热解转换而来的多功能材料。生物炭不仅具有稳定的碳架结构、较强的阳离子交换能力和多数官能团[4-6],且比表面积与孔隙结构较大[7-10],能够改善土壤肥力和提高土壤固碳能力,达到增加农作物产量和减少土壤温室气体排放的目的[11-12]。生物炭常作为一种化肥缓释剂,一般将生物炭和常规肥料通过各种方法相结合,得到具有缓释功能和养分足够的生物炭基肥。因此,生物炭研究作为对环境友好、成本低廉和效果优异的生物质能开发和利用,在农业和能源领域得到广泛的推崇[13-15]。

生物炭的吸附性能和活化效率取决于其物理化学性质,这些性质会随炭化过程中不同工艺参数的改变会产生很大的影响。炭化温度、炭化时间和升温速率是制备工程中影响生物炭物理化学性质和结构特征的

收稿日期:2024-03-04 修回日期:2024-06-19
基金项目:国家自然科学基金(52166010,51706195);云南省基础研究计划面上项目(202101AT070202)
第一作者:张霞,女,1972年生,云南蒙自人,硕士,教授;研究方向为生物质能源。E-mail: zhxia8056@163.com
*通信作者:黄峻伟,男,1983年生,吉林松原人,博士,副教授;研究方向为生物质能源。E-mail: oldin230@163.com

重要因素,对其碳含量的影响尤为重要。CHEN 等[16]发现炭化温度的上升还会加速生物炭内孔隙结构的生成,有利于比表面积的增加。ZHAO 等[17]研究发现随着炭化温度升高,生物炭表面的醚键、羰基、甲基、亚甲基等酸性官能团会随着温度的升高逐渐消失,pH 值也会随之升高。总体而言,炭化温度的升高,加大了原料中挥发性成分释放,使得生物炭产量降低。炭化时间对炭化过程的影响与炭化温度有关,WILLIAMS 和 BESLER[18]指出在炭化温度低于 400 ℃时,生物炭中的碳含量随着炭化时间延长而增加。当炭化温度大于 500 ℃时,生物炭的形成过程在短时间内达到最大,此时生物炭的性质不再随炭化时间的变化而变化。因此,为得到理化性能优良的生物炭,精准调控生产过程中炭化参数尤为重要。

生物质热解炭化后与肥料混合得到炭基肥,改变生物炭制备过程任意工艺参数,就会对炭基肥缓释性能产生较大的影响。若将所有工况条件考虑在内则需要进行大量的试验,在实际过程中操作烦琐易错且可靠性不高,为此学者提出了诸多工艺优化方式和研究。在如今信息技术的发展和人工智能的开发中,诞生了许多用于优化复杂工艺的智能算法,例如人工神经网络[19]、机器学习[20]和遗传算法[21-22]等。

研究构建了一种基于 BP 神经网络—遗传算法的炭化工艺参数优化算法,构建咖啡壳生物炭炭化工艺参数与炭基肥缓释性能之间的关系,预测了炭基肥缓释性能最优时的最佳炭化工艺参数,并与试验数据进行对比验证,为生物炭制备工艺优化提供了有效的方法和思路。

## 1 生物炭基肥的制备工艺

### 1.1 材料与试剂

生物炭制备原料为云南小粒咖啡壳;试验土壤为云南山原红壤,取自云南农业大学后山试验田。化学试剂包括过硫酸钾($K_2S_2O_8$)、氢氧化钠(NaOH)、36%~38% 盐酸和尿素(氮元素质量分数大于 46.20%)。试验用水均为超纯水;其余试剂均为分析纯。

### 1.2 咖啡壳生物炭的制备

制备生物炭的原料为咖啡壳,咖啡壳在管式炉中氮气气氛下高温炭化制备。咖啡壳原料首先进行一定的预处理,将咖啡壳粉碎过 0.425 mm 孔径网筛,并在干燥箱中在 105 ℃的温度下干燥 24 h。预处理后,制备咖啡壳生物炭,将干燥后的咖啡壳粉末装入坩埚,送入管式炉内,管式炉通入氮气,流速为 200 mL/min。待排尽空气后,管式炉设置炭化工艺参数,以控制炭化过程的温度、时间和升温速率,管式炉在规定的时间内进行炭化过程,待样品冷却至室温后,关闭氮气阀门,打开管式炉取出生物炭样品,并保存至密闭容器中。

### 1.3 生物炭基肥的制备

本试验生物炭基肥采用生物炭吸附熔融尿素的制备方法,参照 AIHUA 等[23]研究中的制备方法,并进行改进。制备方法如下:将咖啡壳生物炭和尿素按 1∶1 的比例混合后,装入试管中,用橡胶塞塞紧试管口,并将装有肥料和生物炭的试管插入装有石英砂的烧杯中,放在烘箱加热至 140 ℃,在 140 ℃下加热 60 min 后,取出试管,自然冷却后取出炭基肥。

### 1.4 生物炭基肥养分淋溶试验

利用土壤柱淋溶试验评价缓释肥中的养分释放性能是常见的一种研究方法。本试验设置多组淋溶装置的平行试验,测试炭基肥中的尿素释放特性[24]。选用长度 30 cm,内径 3.2 cm 的聚氯乙烯管为淋溶装置中的土壤淋溶管,用 100 目的纱布包裹在聚氯乙烯管的底部。通过烘箱将土壤在 105 ℃的温度下干燥并过 0.6 mm 孔径筛网。然后将 10 g 的石英砂和 80 g 的土壤依次放入淋溶柱中,再向每个土柱中加入 70 mL 的水,待 48 h 土壤水分平衡后,往土柱中依次加入生物炭基肥和 5 g 土壤,最后覆盖上 10 g 石英砂,以防止进水时扰动土层。每天向各个土壤柱中加入 30 mL 的水,收集其浸出液,采样 7 d。利用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定浸出液中总氮含量,并计算 7 d 内生物炭基肥养分释放率。土壤淋溶柱如图 1 所示。生物炭基肥养分累计释放率计算公式如式(1)所示。

$$F=\frac{\sum_0^i M_i}{M_t} \tag{1}$$

式中:$F$——养分释放率,%;

$M_i$——第 $i$ 天养分释放量,g;

$M_t$——炭基肥养分总量,g。

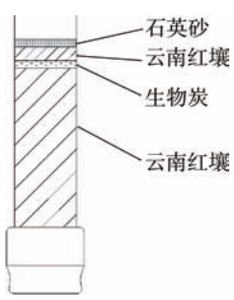



**图 1 土壤柱淋溶装置**

Figure 1 Soil column eluvial device

## 2 咖啡壳生物炭热解工艺参数智能优化

### 2.1 试验设计

试验方案中选择炭化时间(1~4 h)、炭化温度

(600 ℃～900 ℃)和升温速率(5～20 ℃/min)为自变量，每个变量在工艺参数范围内选择4个水平，并设计总组数为4×4×4的试验设计表，从64组试验中选取20组工况进行试验，在试验选取工况下对咖啡壳进行热解炭化，并制备炭基肥，炭基肥在土壤柱中测试养分累计释放率，试验在每个水平下分别重复3次试验，并求取平均值，以探究炭化时间、炭化温度和升温速率对炭基肥缓释性能的影响。

### 2.2　BP神经网络

BP神经网络(back propagation neural network，BPNN)是一种按误差反向传播训练的多层前馈网络，基本思想是梯度下降法，利用梯度搜索技术，以使网络的实际输出值和期望输出值的误差均方差为最小。BP神经网络结构包括输入层、隐含层和输出层，信号传播包括正向传播和反向调整两个过程。正向传播时，输入信号通过隐含层作用于输出节点，经过非线性变换，产生输出信号，若实际输出与期望输出不相符，则转入误差的反向传播过程。反向传播调整是将输出误差通过隐含层向输入层逐层反传，并将误差分摊给各层所有单元，以从各层获得的误差信号作为调整各单元权值的依据。BP神经网络工作流程如图2所示。导入数据后，首先需要对BP的权重和阈值进行初始化，使用mapminmax函数对训练集和测试集的输入和输出数据进行归一化处理，将数据缩放到[0,1]的范围内。

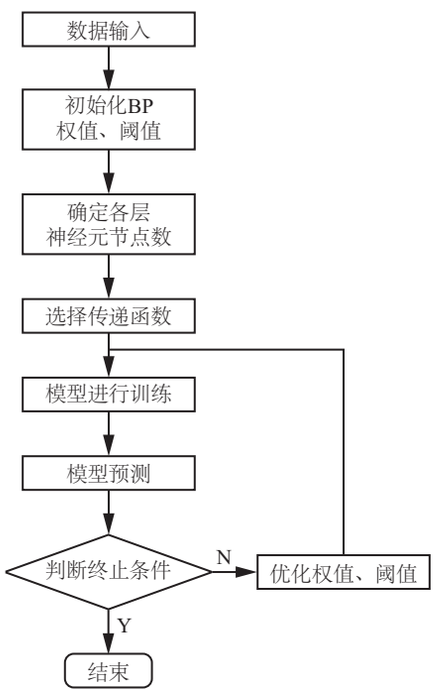



**图2　BP神经网络工作流程图**

Figure 2　BP neural network flow chart

设置最大迭代次数为500，学习率设置为0.01，在BP神经网络训练过程中，利用反向传播算法来进行误差反向传递和权重更新，达到最大训练次数结束训练。

### 2.3　遗传算法

遗传算法(genetic algorithm，GA)是基于达尔文进化论中自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。遗传算法模拟了生物群体的特征进化和自然选择过程中的基因选择、基因交叉和基因突变现象。遗传算法步骤如下。

1)编码。遗传算法不能直接处理问题空间的参数，必须要通过编码将要求解的问题表示成遗传空间的染色体或者个体。因此，遗传算法编码是将问题的解在编码过程中转换为相应的基因，称作问题的表述。

2)适应度函数。遗传算法的适应度函数也称为评价函数，用于判断种群中的个体的优劣程度的指标，根据所求问题的目标函数来进行评估的。遗传算法中，个体染色体能否进入到新种群中的概率是由适应度决定。适应度函数将问题转化为个体的适应度值，作为所寻求优化值与目标值之间的桥梁，因此将网络模型的误差函数作为适应度值，将种群进化描述为误差减小过程。

3)选择算子。种群进行选择操作的目的为选择基因较优个体，繁衍下一代，达到群体进化。具有良好适应度的个体属于优秀个体，最终被保留下来。本研究选择轮盘赌方法计算选择操作时个体被选中的概率。

4)交叉变异。交叉操作是采用两两配对的方式在特定条件下两个个体交换部分基后，获得两个新的个体。突变是指染色体上的基因变化而产生的新染色体。遗传算法运算时个体的选择概率通常受到个体适应度的限制，开始具有较高适应度的个体将在整体中处于主导地位，最初的最佳个体之间通过交叉和突变也产生了新个体。在遗传进化的后期阶段，种群中的个体都可能具有优异的适应度值，此时进化效率会降低。

在研究中，生成了100个个体的初始种群。每个个体生成相应的灰度图像，以预测与碳化条件相对应的生物炭基肥的累积养分释放速率。目标是通过经过训练的BP神经网络模型最小化输出并计算适应度。种群经过选择、交叉和突变操作，选择最优种群以创建下一代种群，计算在50代后停止。

### 2.4　GA-BP优化工艺参数

本研究通过BP神经网络耦合遗传算法，优化影响咖啡壳生物炭性能的重要工艺参数，提高咖啡壳生物炭基肥的缓释性能。在Matlab中基于BP神经网络，将炭化温度、炭化时间和升温速率这3个炭化工况输入层，养分累计释放率作为输出层，对BP神经网络进行训练，得到最优适应模型，将建立的神经网络模型作为适应度函数，应用遗传算法寻找输入工艺参数的最

优组合,并预测出各组工艺参数对应的参数预测值和实际值。具体优化流程如图3所示。

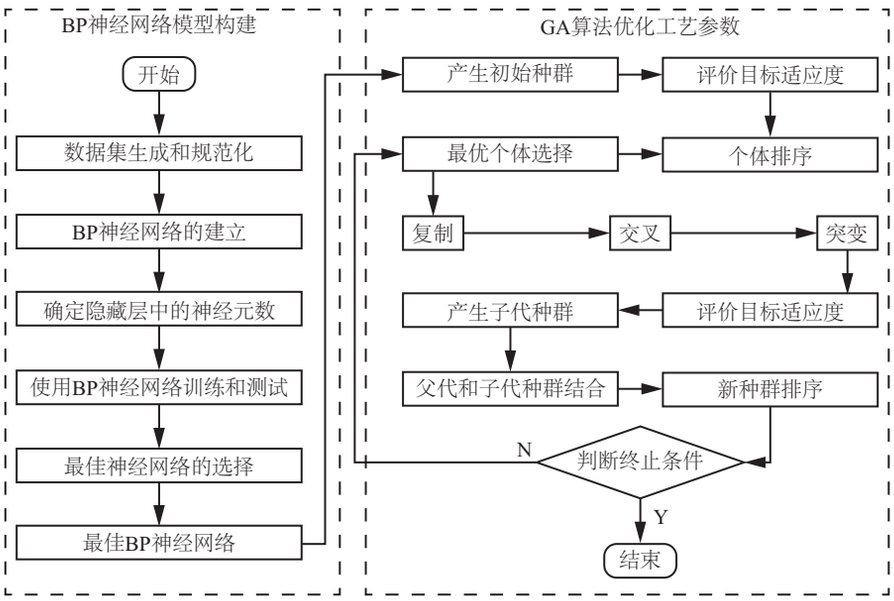



**图3 BP-GA工艺参数优化流程图**

Figure 3 BP-GA parameters optimization flow chart

利用BP神经网络对试验数据进行预测,遗传算法(GA)对咖啡壳炭化工艺参数进行优化,以减缓炭基肥养分释放速率为优化目标,将咖啡壳炭化工艺参数优化问题抽象为式(2)~式(3)所示的代理模型[22],优化变量和约束条件

$$\min \sigma(\theta)=g(t,v,T) \tag{2}$$

$$s.t=\begin{cases}1\leqslant t\leqslant 4\\600\leqslant T\leqslant 900\\5\leqslant v\leqslant 20\end{cases} \tag{3}$$

式中:$t$——炭化时间,h;

$T$——炭化温度,℃;

$V$——升温速率,℃/min。

## 3 结果与分析

### 3.1 咖啡壳试验结果

本研究共进行了如表1所示的20组试验,依据设计的炭化工艺参数条件,系统开展了咖啡壳生物炭基肥的制备及养分淋溶试验。首先,按照设计的炭化工艺参数制得咖啡壳生物炭,随后通过吸附熔融尿素,制备得到生物炭基肥。为进一步评估炭基肥的缓释性能,研究在土壤柱中进行了7 d的淋溶试验,并测定炭基肥的养分累计释放率。每个工况下均进行了3组平行试验,最终取其平均值作为试验结果。结果显示,在所有设计的20组工况下,不同炭化工艺条件对生物炭基肥养分释放率有显著影响。所得到的生物炭基肥在7 d内的养分累计释放率范围为46.5%~76.8%。炭化工艺的不同对生物炭基肥的养分释放性能具有重要影响,且其缓释性能可根据实际需求进行调控。

**表1 生物炭制备试验设计方案**

Table 1 Design test scheme for biochar preparation

| 处理 | 炭化时间/h | 炭化温度/℃ | 炭化速率/(℃·min$^{-1}$) | 养分累计释放率/% |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 600 | 10 | 60.3 |
| 2 | 3 | 600 | 10 | 59.6 |
| 3 | 4 | 600 | 10 | 63.6 |
| 4 | 1 | 600 | 10 | 68.4 |
| 5 | 1 | 600 | 5 | 76.8 |
| 6 | 1 | 600 | 10 | 68.4 |
| 7 | 1 | 600 | 15 | 60.5 |
| 8 | 1 | 600 | 20 | 65.4 |
| 9 | 2 | 700 | 10 | 56.5 |
| 10 | 3 | 700 | 20 | 54.7 |
| 11 | 4 | 700 | 15 | 55.6 |
| 12 | 1 | 700 | 10 | 59.7 |
| 13 | 2 | 800 | 10 | 48.7 |
| 14 | 3 | 800 | 15 | 46.5 |
| 15 | 4 | 800 | 20 | 48.6 |
| 16 | 1 | 800 | 5 | 50.4 |
| 17 | 2 | 900 | 15 | 52.7 |
| 18 | 3 | 900 | 10 | 52.9 |
| 19 | 4 | 900 | 15 | 50.8 |
| 20 | 1 | 900 | 10 | 54.7 |

### 3.2　咖啡壳炭化工艺参数预测

针对表1中的试验结果组合，自变量为3个炭化工艺参数，因变量为养分累计释放率。在Matlab中基于BP神经网络，将炭化温度、炭化时间和升温速率这3个炭化工况输入层，隐含层节点数选择7，养分累计释放率作为输出层。利用BP神经网络对工艺参数进行回归拟合，并预测出各组工艺参数对应的参数预测值和实际值。验证和测试结果如图4～图6所示。

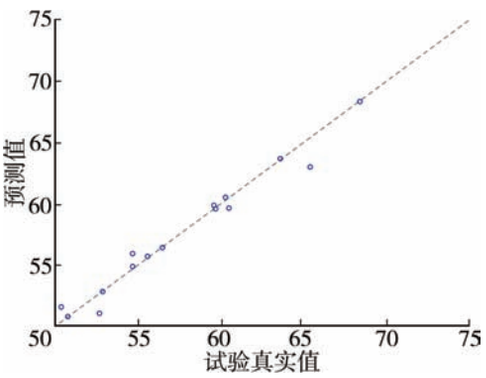



**图4　训练集真实值与预测值回归图**

Figure 4　Regression plot of actual and predicted values

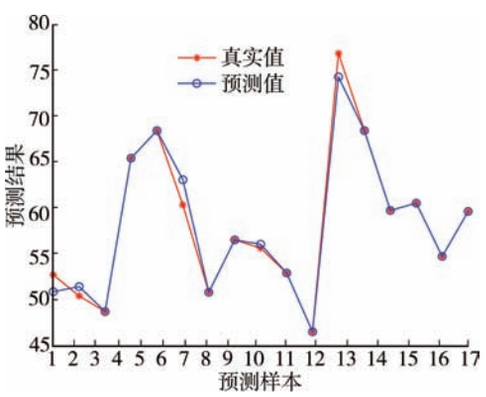



**图5　训练集试验数据与模型预测结果对比**

Figure 5　Comparison of experimental data and model prediction results

结果表明，实际试验值与神经网络预测的输出值之间具有很高的相关性。选择试验中前17组数据作为训练集，训练结果如图4和图5所示，试验与预测结果基本一致，最大误差为3.49%，平均误差为0.8%，对应的指标参数的预测结果也较好结果证明通过神经网络算法对试验结果进行回归拟合，预测值与试验值很接近，回归系数$R^2$为0.982 1，预测误差较小，证明对生物炭制备工艺参数模型预测有较高的准确性。

将表1中第18～20组仿真工艺参数输入网络进行测试，得到对应的养分释放速率，试验和预测结果对比如图6所示，神经网络的预测结果与试验结果较为接近，证明了咖啡壳炭化工艺参数与养分累计释放率的BP神经网络代理模型的准确性[25]。

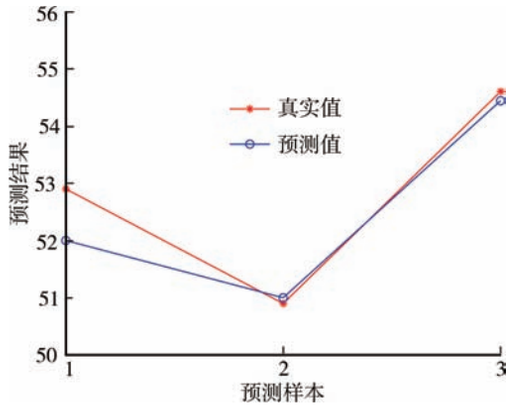



**图6　测试集试验数据与模型预测结果对比**

Figure 6　Comparison of experimental data and model prediction results in the test set

### 3.3　咖啡壳炭化工艺参数优化

将建立的神经网络模型作为适应度函数，应用遗传算法寻找输入工艺参数的最优组合，遗传算法设置种群为30，遗传代数50。寻优过程中最优个体适应度变化曲线如图7所示，迭代开始，适应度值迅速下降，在迭代30次之后保持不变，达到最小值，说明适应度图在30代后逐渐向最终最右收敛。经BP神经网络耦合遗传算法优化后，此时输出养分累计释放率最小值为45.58%，其对应的工艺参数输入为：炭化时间2.8 h；炭化温度780.7 ℃；升温速率15.1 ℃/min，为最优工艺参数组合，在此条件下，制备得出的生物炭缓释性能更好。

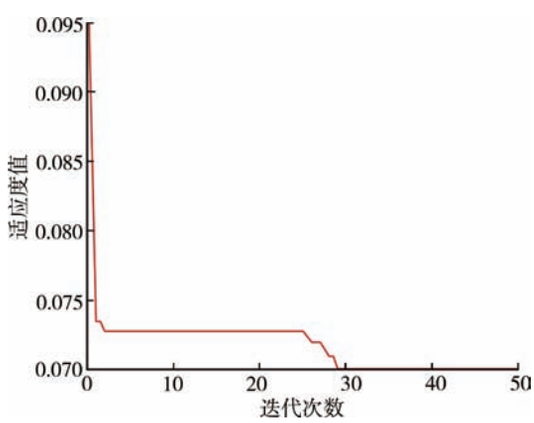



**图7　遗传算法迭代进化适应度图**

Figure 7　Genetic algorithm iterative evolution fitness graph

### 3.4　结果检验

根据预测得到的最佳工艺参数，对咖啡壳进行热解炭化，并制备炭基肥，将制备所得生物炭基肥进行淋溶试验，进行3组平行试验，7 d后平均养分释放率为44.06%，与预测最佳工艺参数下养分累计释放率45.58%相比，误差结果为3.45%，与预测结果相近。因此，预测工艺参数较为准确，在预测的最佳工艺参数下，制备的咖啡壳生物炭基肥的缓释性能有显著提升。

## 4 结论

本研究将咖啡壳通过不同炭化温度、炭化时间和升温速率制备成多组生物炭,利用淋溶试验研究在不同工艺参数下制备的生物炭基肥的缓释特性,并基于遗传算法优化BP神经网络的算法优化了咖啡壳生物炭制备工艺参数。主要结论如下:

1)基于BP神经网络—遗传算法预测和优化,其最佳炭化参数为:炭化时间2.8 h,炭化温度780.7 ℃,升温速率15.1 ℃/min,7 d内,炭基肥养分累计释放率最低,为45.58%,炭基肥缓释性能明显提升。

2)基于BP神经网络—遗传算法预测和优化,通过较少的试验组数,能更加精确地调控生物炭高温炭化过程的炭化工艺参数,使得制备的生物炭基肥具有更高效的缓释性能。

3)研究对生物炭制备过程中工艺参数的优化方法,为炭化过程中多种工艺参数的调控与优化提供新的思路和理论支撑,使得生物炭制备工艺更加精确、高效。

### 参 考 文 献


[1] YANG J, WANG L Y, HU P D, et al. Economic dispatching of CCHP microgrid considering grid-connected revenue [C]// 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG). IEEE, 2019: 657－660.

[2] 李亮, 周磊, 郝建贺, 等. 党的二十大背景下的农业现代化竞争力研究——以江苏南京为例[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(4): 49－56.
LI Liang, ZHOU Lei, HAO Jianhe, et al. Research on the competitiveness of agricultural modernization under the background of the 20th National Congress of the Communist Party of China: Taking Nanjing, Jiangsu as an example [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(4): 26－32.

[3] 王冉冉, 李寒晓, 齐凯, 等. 基于"双碳目标"下养猪场多能互补系统设计与实现[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(4): 26－32.
WANG Ranran, LI Hanxiao, QI Kai, et al. Design and implementation of a multi energy complementary system for pig farms based on "dual carbon goals" [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(4): 26－32.

[4] CHOMA J, DZIURA A, JAMIOLA D, et al. Preparation of mesoporous carbons with high specific surface area and large pore volume [J]. Ochrona Srodowiska, 2012, 34: 3－7.

[5] 陈宏坤, 徐广飞, 高璐阳, 等. 缓控释肥包膜材料的研究进展[J]. 磷肥与复肥, 2016, 31(12): 19－21.
CHEN Hongkun, XU Guangfei, GAO Luyang, et al. Research advances of coated material of slowly controlled release fertilizer [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016, 31(12): 19－21.

[6] LI R, WANG J J, GASTON L A, et al. An overview of carbothermal synthesis of metal-biochar composites for the removal of oxyanion contaminants from aqueous solution [J]. Carbon, 2018, 129: 674－687.

[7] SHEN X, ZENG J, ZHANG D, et al. Effect of pyrolysis temperature on characteristics, chemical speciation and environmental risk of Cr, Mn, Cu, and Zn in biochars derived from pig manure [J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135283.

[8] LUO L, WANG G, SHI G, et al. The characterization of biochars derived from rice straw and swine manure, and their potential and risk in N and P removal from water [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 245: 1－7.

[9] ZHOU Y, LIU X, XIANG Y, et al. Modification of biochar derived from sawdust and its application in removal of tetracycline and copper from aqueous solution: Adsorption mechanism and modelling [J]. Bioresource Technology, 2017, 245: 266－273.

[10] TIAN R, LI C, XIE S, et al. Preparation of biochar via pyrolysis at laboratory and pilot scales to remove antibiotics and immobilize heavy metals in livestock feces [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19: 2891－2902.

[11] UCHIMIYA M, WARTELLE L H, KLASSON K T, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil [J]. Journal of agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(6): 2501－2510.

[12] 沈秀丽, 柳思远, 沈玉君, 等. 不同粒径生物炭包膜尿素缓释肥性能及缓释效果[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 159－166.
SHEN Xiuli, LIU Siyuan, SHEN Yujun, et al. Property and slow-release effect of coated urea with different particle-size biochar [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 159－166.

[13] 何红艳, 李贵平, 王文丹, 等. 酶促脱胶对咖啡品质影响研究[J]. 农产品加工, 2019(2): 37－40.
HE Hongyan, LI Guiping, WANG Wendan, et al. Effect of enzymatic degumming on coffee quality [J]. Farm Products Processing, 2019(2): 37－40.

[14] 何红艳, 程金焕, 王情雄, 等. 高效咖啡干豆脱壳机的应用研究[J]. 农产品加工, 2020(7): 79－80.
HE Hongyan, CHENG Jinhuan, WANG Qingxiong, et al. Study on the application of high efficiency coffee sheller [J]. Farm Products Processing, 2020(7): 79－80.

[15] 夏恩琴，杜华，何敏君，等. 无糖桑叶提取物咖啡的配方设计研究[J]. 农产品加工，2019(13)：5－8.
XIA Enqin，DU Hua，HE Minjun，et al. Formulation design of sugar-free coffee with *Morus alba* leaves extract [J]. Farm Products Processing，2019(13)：5－8.

[16] CHEN B，ZHOU D，ZHU L. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures [J]. Environmental Science & Technology，2008，42(14)：5137－5143.

[17] ZHAO B，O′CONNOR D，ZHANG J，et al. Effect of pyrolysis temperature，heating rate，and residence time on rapeseed stem derived biochar [J]. Journal of Cleaner Production，2018，174：977－987.

[18] WILLIAMS P T，BESLER S. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass [J]. Renewable Energy，1996，7 (3)：233－250.

[19] 王鹏军，陈永生，孙冬霞，等. 基于BP神经网络算法的固体有机肥撒施装置控制系统设计[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2021，2(1)：13－19.
WANG Pengjun，CHEN Yongsheng，SUN Dongxia，et al. Design of control system of solid organic fertilizer spreading device based on BP neural network algorithm [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English)，2021，2(1)：13－19.

[20] 王汝鹏. 基于机器学习技术的生物炭催化剂的定向合成设计[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2022.
WANG Rupeng. Machine learning informed rational design for biochar catalysts [D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2022.

[21] 余强，李雪妍，潘信佳，等. 基于改进遗传算法的电动拖拉机复合电源优化控制策略研究 [J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(3)：14－23.
YU Qiang，LI Xueyan，PAN Xinjia，et al. Research on the energy control optimized strategy of electric tractor composite power supply based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2023，4(3)：14－23.

[22] 夏焕雄，李康，高丰，等. 基于凝固前沿演变特征的熔铸装药成型工艺参数智能优化[J]. 兵工学报，2024，45(9)：2936－2950.
XIA Huanxiong，LI Kang，GAO Feng，et al. Intelligent optimization for forming quality of melt-cast explosives based on the evolution characteristics of solidification front [J]. Acta Armamentarii，2024，45(9)：2936－2950.

[23] XIANG A，QI R，WANG M，et al. Study on the infiltration mechanism of molten urea and biochar for a novel fertilizer preparation [J]. Industrial crops and products，2020，153：112558.

[24] 吕娟，任永志，王明峰，等. 淀粉胶生物质炭基氮肥制备及其缓释特性分析[J]. 农机化研究，2019，41(6)：175－180.
LÜ Juan，REN Yongzhi，WANG Mingfeng，et al. Biochar based nitrogen fertilizer preparation with starch as adhesive and its release property analysis [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，41 (6)：175－180.

[25] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor：The University of Michigan Press，1975.

# Optimization of coffee shell carbonization parameters based on BP neural network-genetic algorithm

ZHANG Xia[1，2]，SU Panjie[1，2]，ZHU Jingzhe[1，2]，WANG Yiyang[1，2]，HUANG Junwei[1，2*]

(1. *Yunnan Agricultural University*，*Kunming* 650500，*China*；
2. *Key Laboratory of Plateau Characteristic Modern Agriculture Energy Conservation and Carbon Reduction*，*Education Department of Yunnan Province*，*Kunming* 650201，*China*)

**Abstract:** Biochar is a multifunctional material efficiently developed from biomass. It is combined with fertilizers to prepare biochar-based fertilizers，which has excellent slow-release performance and minimal soil burden. The carbonization temperature，carbonization time，and heating rate during biomass carbonization process affect the physical and chemical properties of biochar. The biochar under different carbonization temperatures，carbonization times and heating rates have a

significant impact on the slow-release performance of biochar-based fertilizers. In this study, BP neural network coupled with genetic algorithm was used to predict and optimize key process parameters during the carbonization process of coffee shell biochar in order to improve the slow-release performance of biochar-based fertilizers. Results had shown that based on BP neural network-genetic algorithm, rapid prediction and optimization of the slow-release performance of coffee shell biochar-based fertilizer had been achieved through experiments. The optimal process parameters were: carbonization time of 2.8 h, carbonization temperature of 780.7 ℃, and the heating rate of 15.1 ℃/min. The seven-day cumulative nutrient release rate of the biochar-based fertilizer prepared under this process parameter was 45.9%, and the slow-release performance was improved. The study proposed a new method for optimizing the parameters of biochar carbonization process, which provided new ideas for the development of high-performance biochar preparation processes and had certain reference significance for improving the performance of biochar-based fertilizers.

**Keywords:** biochar; BP neural network; genetic algorithm; biochar-based fertilizer; parameter optimization

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (52166010, 51706195); Yunnan Provincial Project Fund (202101AT070202)

**First Author:** ZHANG Xia, E-mail: zhxia8056@163.com

* **Correspondence Author:** HUANG Junwei, E-mail: oldin230@163.com