



移动扫码阅读

郝博天, 刁云飞, 魏涯, 等. 城市污泥共水热液化高产生物原油模型优化 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(2): 192-200.

HAO Botian, DIAO Yunfei, WEI Ya, et al. Model Optimization for High-Yield Biocrude in Co-Hydrothermal Liquefaction of Municipal Sludge [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(2): 192-200.

城市污泥共水热液化高产生物原油模型优化

郝博天, 刁云飞, 魏涯, 徐东海*

(西安交通大学能源与动力工程学院热流体科学与工程教育部重点实验室, 陕西西安710049)

摘要: 随着全球城市化和工业化的快速发展, 城市污泥处理量迅速增加, 如何快速高效地进行城市污泥处理和处置成为能源环境领域研究的重点。城市污泥共水热液化是一种有前景的湿生物质生产生物原油的技术, 可以增加生物原油产率并提高其质量, 同时降低生物质水热液化成本, 有利于实现工业化应用。采用了 Box-Behnken 方法进行了 29 个实验组的设计, 首次利用响应面法 (RSM) 和人工神经网络 (ANN) 2 种数学模型对城市污泥和微藻共水热液化工艺参数进行了建模和优化, 探究了典型共水热液化操作参数对生物原油产率的影响。研究表明, ANN 模型和 RSM 模型对共水热液化的预测具有较高的准确性和可靠性, 其中 ANN 模型的拟合度可达 0.998 9。反应温度和生物质/水比率对城市污泥和微藻共水热液化生物原油产率有显著的促进作用。最后, 采用遗传算法结合人工神经网络模型, 对城市污泥和微藻共水热液化的最佳工艺条件进行了预测, 结果显示最大的生物原油产率可达 32.2%。

关键词: 共水热液化; 城市污泥; 人工神经网络; 响应曲面法; 生物原油产率

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)02-0192-09

Model Optimization for High-Yield Biocrude in Co-Hydrothermal Liquefaction of Municipal Sludge

HAO Botian, DIAO Yunfei, WEI Ya, XU Donghai*

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science & Engineering, Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With accelerating global urbanization and industrialization, the continuous expansion of urban population size and industrial production capacity leads to increasingly severe challenges in municipal sludge (MS) treatment. Traditional disposal methods such as landfill and composting face bottlenecks including land resource constraints, greenhouse gas emissions, and heavy metal contamination, while incineration suffers from technical issues such as high energy consumption and dioxin pollution. In this context, developing sludge valorization technologies that are both environmentally friendly and economically feasible has become a critical research focus. Hydrothermal liquefaction (HTL) technology is regarded as one of the most promising sludge treatment technologies due to its ability to directly process biomass with high moisture content (80% - 90%). This study innovatively adopts the co-HTL strategy that combines municipal sludge and microalgae, achieving synergy through a feedstock formulation strategy. This approach increases biocrude yields, improves

收稿日期: 2024-03-30

修回日期: 2024-06-17

接受日期: 2024-06-19

DOI: 10.20078/j.eep.20240619

基金项目: 国家重点研发资助项目(2021YFE0104900)

第一作者: 郝博天(1997—), 女, 山西太原人, 博士研究生, 主要研究方向为生物质水热转化。E-mail: hbt1997@stu.xjtu.edu.cn

*通讯作者: 徐东海(1984—), 男, 安徽萧县人, 教授, 主要研究方向为生物质水热转化、煤/生物质热解气化、金属材料高温腐蚀与防控。

E-mail: xudonghai@mail.xjtu.edu.cn

product quality, and reduces the cost of biomass HTL technology, thus facilitating industrial-scale application. The Box-Behnken Design (BBD) was used to develop a three-factor, three-level response surface model, selecting reaction temperature (280 - 340 °C), residence time (15 - 45 min), and biomass-to-water mass ratio (1 : 5 - 1 : 15) as key variables. Through 29 sets of experiments, the influence mechanisms of process parameters on biocrude yield were systematically investigated. This study introduces a novel dual-model comparative analysis framework, integrating response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). The RSM established a predictive model based on a second-order polynomial equation, achieving an R^2 value of 0.983 3 and demonstrating excellent linear fitting capability. In contrast, the ANN employed a three-layer topological structure (3-node input layer, 10-node hidden layer, and 1-node output layer). After training with the Levenberg-Marquardt algorithm, the model's R^2 significantly improved to 0.998 9, demonstrating the superiority of neural networks in modeling nonlinear complex systems. An increase in temperature significantly promotes biomass decomposition, but secondary reactions (condensation/gasification) above 325 °C lead to a decline in biocrude yield. Prolonged residence time results in only marginal yield improvement, while excessive residence time under high-temperature conditions tends to induce side reactions. At lower temperatures, a longer residence time is required to ensure complete reactions, whereas at higher temperatures, the optimal residence time is shorter. Increasing the biomass-to-water ratio from 0.08 to 0.25 g/mL enhances yield by 5% - 7%, yet excessively high ratios may reduce intermediate solubility and inhibit oil phase formation. High sludge ratios significantly suppress yield, primarily because the high ash content (59.1%) dilutes the organic biomass concentration. Finally, a genetic algorithm combined with an ANN was used to predict the optimal process conditions for the co-HTL of MS and microalgae, achieving a maximum biocrude yield of 32.2%. This study offers an innovative solution for sludge resource utilization, and its process optimization framework can be applied to other fields involving the collaborative conversion of organic solid wastes.

Keywords: Co-hydrothermal liquefaction; Municipal sludge; Artificial neural network; Response surface method; Biocrude yield

0 引言

世界人口增加、经济快速发展、工业化和城市化的快速推进导致城市污泥迅速增加^[1-2]。根据世界银行的预测,到2050年,全球废物产生量将增加到34亿t,且至少33%的垃圾不会以无害环境的方式处理^[3]。因此,通过绿色技术实现城市污泥的无害化处置和资源化利用,是实现经济和生态可持续的关键任务之一。城市污泥通过热化学转化可以将生物质转化为燃料,其中利用水热液化工艺可以将高含水率、低热值的城市污泥转化为高热值的生物原油,并且反应条件较温和(270~350 °C, 5~20 MPa),无需高能量的干燥过程^[4-6]。

共水热液化是将2种或多种原料合并进行水热液化的方法^[7]。污泥与废弃报纸、秸秆或微藻共水热液化,可以获得较高的生物原油产率和转化效率^[8-12],这可能是因为城市污泥中灰分促进了

有机物质的最大转化,抑制了固体残渣的生成。然而目前城市污泥和微藻共水热液化的最佳操作参数尚未达成共识,可能归因于单一变量方法的应用以及参数之间相互作用的忽视^[13]。

本研究使用响应曲面法(RSM)和ANN 2方法对共水热液化过程建立数学模型,探究4个关键操作参数(反应温度、停留时间、生物质/水比率,污泥/生物质比率)对城市污泥和微藻共水热液化生物原油产率的影响。

1 实验部分

1.1 材料

微藻(小球藻)购自西安金恒化工有限公司,城市污泥取自西安邓家村污水处理中心。表1为微藻和城市污泥基于干燥基的理化性质。高纯度二氯甲烷(DCM)购自天津红岩化学试剂厂,用于分离萃取生物原油。新鲜去离子水在实验室中制备。

表 1 邓家村污水处理厂城市污泥和微藻的理化性质
Table 1 Physicochemical properties of microalgae and municipal sludge from Dengjia Village wastewater treatment plant in China

材料	w_C	w_H	w_O	w_N	w_S	w_{Ash}	%
微藻	44.47	6.61	40.71	7.70	0.51	3.60	
城市污泥	45.66	7.02	38.64	6.70	1.98	59.10	

实验中使用的 5.0 mL 微型反应釜是由 316 不锈钢接头、堵头、不锈钢管以及高压气阀 4 部分组装而成。通过熔盐浴加热反应釜,熔盐浴由硝酸钠和硝酸钾以 4:5 的质量比组成,使用比例-积分-微分控制器温度控制器将温度保持在所需的反应温度。

1.2 实验流程

在共水热液化实验中,反应温度为 300、325、350 °C,停留时间为 20、40、60 min,生物质/水比率为 0.08、0.17、0.25 g/mL,污泥/生物质比率为 0.2、0.5、0.8。将预定量的污泥、微藻和水装填后,反应器放入盐浴中,反应器加热时间约 5 min。在反应温度下达到停留时间,立即将反应器从盐浴中取出,放入水浴中快速降温以停止反应。打开反应器,加入 5 mL 的 DCM 充分萃取反应釜中的生物原油,并将所有产物转移到离心管以

3 500 r/min 离心 20 min。随后,将水相转移至玻璃瓶中,过滤分离二氯甲烷相与固体,玻璃瓶以及滤纸均预先称重。将盛放有 DCM 和生物原油的玻璃瓶放至氮吹扫仪,通过流动的 N_2 吹扫 1 h 后获得生物原油。

1.3 实验设计

1.3.1 响应曲面法 (RSM)

Box Behnken Design (BBD) 方法被用于设计城市污泥和微藻共水热液化反应温度(A)、停留时间(B)、生物质/水比率(C)和污泥/生物质比率(D)对生物原油产率(Y)的影响实验。使用实验设计(DOE)软件 Design Expert 8.0.6.1 对因子进行优化。在本研究中,使用 300~350 °C 的温度、20~60 min 的时间、0.08~0.25 g/mL 的生物质/水比率和 0.2~0.8 的城市污泥/生物质比率研究共液化效应。表 2 为具体的实验设计方案。

表 2 BBD 实验方案以及生物原油产率的实际值、RSM 和 ANN 的预测值
Table 2 Experimental scheme by BBD and the experimental/predicted biocrude yields using RSM and ANN

序号	独立变量				生物原油产率/%		
	反应温度/°C	停留时间/min	生物质/水比率/(g·mL ⁻¹)	城市污泥/生物质比率	实验值	RSM	ANN
1	300	20	0.17	0.5	21.22	21.81	22.00
2	300	40	0.25	0.5	21.94	21.39	21.94
3	300	40	0.17	0.8	16.45	15.76	16.45
4	300	40	0.08	0.5	21.86	22.28	21.86
5	300	40	0.17	0.2	30.85	30.01	30.85
6	300	60	0.17	0.5	22.22	23.30	21.55
7	325	20	0.17	0.8	16.28	16.66	16.29
8	325	20	0.17	0.2	30.17	30.81	30.17
9	325	20	0.25	0.5	23.24	23.49	23.24
10	325	20	0.08	0.5	22.41	21.88	22.41
11	325	40	0.17	0.5	23.74	24.08	24.57
12	325	40	0.17	0.5	24.20	24.08	24.57
13	325	40	0.17	0.5	23.34	24.08	24.57
14	325	40	0.17	0.5	24.56	24.08	24.57
15	325	40	0.25	0.8	17.52	17.55	17.52

续表

序号	独立变量				生物原油产率/%		
	反应温度/℃	停留时间/min	生物质/水比率/(g·mL ⁻¹)	城市污泥/生物质比率	实验值	RSM	ANN
16	325	40	0.25	0.2	30.33	31.01	30.33
17	325	40	0.08	0.8	15.41	15.25	15.41
18	325	40	0.08	0.2	30.42	30.14	30.42
19	325	40	0.17	0.5	24.58	24.08	24.57
20	325	60	0.17	0.8	17.98	17.59	17.98
21	325	60	0.25	0.5	23.13	23.65	22.40
22	325	60	0.17	0.2	31.13	31.01	31.12
23	325	60	0.08	0.5	23.11	22.85	23.11
24	350	20	0.17	0.5	25.53	24.20	25.53
25	350	40	0.08	0.5	20.85	21.66	20.85
26	350	40	0.25	0.5	25.11	24.95	25.11
27	350	40	0.17	0.2	30.33	30.24	30.05
28	350	40	0.17	0.8	16.87	17.70	16.87
29	350	60	0.17	0.5	24.68	23.85	24.68

1.3.2 人工神经网络(ANN)

开发一个三层前馈神经网络,并通过反向传播梯度下降算法进行训练。将获得的实验数据随机分为3组,分别包含21、4和4个数据,用于训练、测试和验证。在训练过程中监督验证数据的误差,以避免过度拟合。如图1所示,使用Levenberg-Marquardt算法分析神经网络。1个双曲正切S形函数和2个线性函数分别用作隐层神经元和输入输出层神经元的传递函数,输入、隐藏和输出层分别有4、10和1个神经元。为了评估网络的性能,根据式(1)计算确定系数(R^2):

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{(y_{i,cal} - y_{i,exp})^2}{(y_{ave,exp} - y_{i,exp})^2} \right) \quad (1)$$

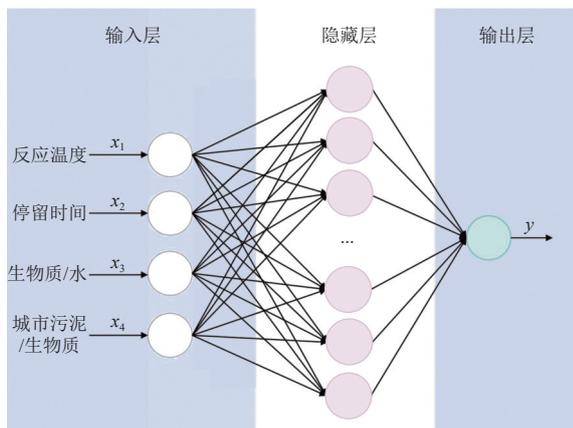


图1 人工神经网络示意图

Fig. 1 Schematic of the artificial neural network

式中: $y_{i,cal}$ (%)是根据反应条件预测得到生物原油产率的估计值, $y_{ave,exp}$ (%)是实验生物原油产率平均值, $y_{i,exp}$ (%)是不同反应条件的实验生物原油产率。

1.3.3 遗传算法(GA)

GA是一类具有一定学习能力的并行迭代和全局搜索算法,使用交叉和变异算子解决优化问题。如图2所示,为了获得全局最优解,尝试在最大生物原油产率条件下使用遗传算法,在确定适应度函数值时,采用开发的ANN模型的输出。初始建立一定数量的群体,在优化过程中,选择优良

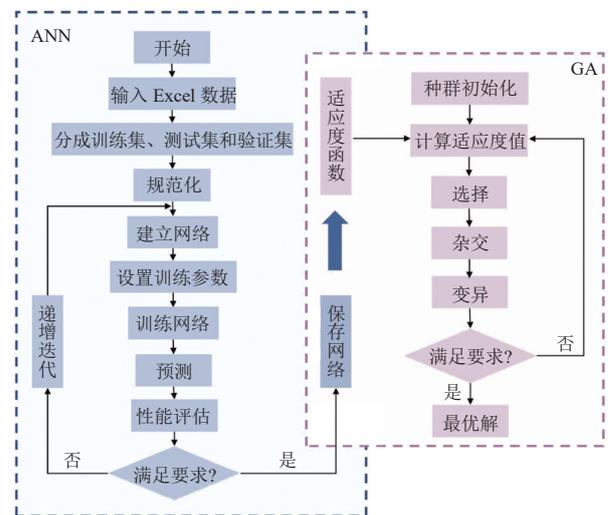


图2 ANN-GA模型流程图^[13]

Fig. 2 Flowchart of the ANN-GA model^[13]

个体进行交叉、变异过程并组成新的种群,再从中选择优良个体进行交叉、变异。遗传算法的最佳适应度将连续世代的最佳适应值逐渐收敛到最终最佳值,实现适应度函数的全局寻优。在GA中,设定最大进化代数100,种群大小100,变异概率0.01,交叉概率0.8。

1.4 分析方法

采用精度为0.1 mg的分析天平(Mettler-toledo XA105)测定生物质及产物质量。共水热液化生物原油产率(Y)由式(2)确定:

$$Y = \frac{m}{m_B} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $m(\text{g})$ 为生物原油的质量, $m_B(\text{g})$ 为加入到反应器中干基污泥和微藻混合的质量。

2 结果与讨论

2.1 基于RSM的城市污泥和微藻共水热液化生产优化与建模

基于BBD设计的实验方案进行了29组实验,以研究城市污泥和微藻共水热液化对生物原油产率和品质的影响。表2总结了实验设计和对应的生物原油产率。这些数据被用于建立RSM

模型以及优化操作参数。实验所得生物原油产率与二阶多项式方程的预测值较为吻合。生物原油产率的二次回归模型由编码因子表示,如式(3)所示:

$$Y = 24.08 + 0.74A + 0.28B + 0.60C - 6.89D - 0.46AB + 1.04AC + 0.24AD - 0.2BC + 0.19BD + 0.55CD - 0.60A^2 - 0.20B^2 - 0.92C^2 + 0.13D^2 \quad (3)$$

其中, Y 表示生物原油的产率, A 、 B 、 C 和 D 分别是反应过程变量反应温度、停留时间、生物质/水比率和污泥/生物质比率的编码值。基于当前RSM模型的氢气产量预测值见表2。二阶多项式方程的正负号分别表示过程变量对生物原油产率的协同效应和拮抗效应^[14]。表3展示了生物原油产率的方差分析(ANOVA)。当 F 值越大, p 值越小时,从ANOVA获得的值越显著。 p 值小于0.05,表明响应模型具有95%的置信水平,具有显著性。从方差分析可以看出,各因子具有不同的显著性,表明反应温度、停留时间、生物质/水比率以及污泥/生物质比率之间的相互作用对生物原油产率有显著影响。通过引入模型的决定系数(R^2)进一步评价模型质量。较高的 R^2 值(0.9833)表明98.33%的变量可以遵循总响应。由图3可知,

表3 生物原油产率方差分析
Table 3 ANOVA for biocrude yields

方差来源	自由度	平方和	均方差	F 值	p 值	显著性
模型	14	596.608	42.615	58.930	<0.05	显著
A-温度	1	6.497	6.497	8.990	<0.05	显著
B-时间	1	0.963	0.963	1.330	0.27	—
C-生物质/水比率	1	4.332	4.332	5.990	<0.05	显著
D-污泥/生物质比率	1	570.217	570.217	788.588	<0.05	显著
AB	1	0.856	0.856	1.180	0.30	—
AC	1	4.368	4.368	6.040	<0.05	显著
AD	1	0.221	0.221	0.310	0.59	—
BC	1	0.164	0.164	0.230	0.64	—
BD	1	0.137	0.137	0.190	0.67	—
CD	1	1.210	1.210	1.670	0.22	—
A^2	1	2.309	2.309	3.190	0.10	—
B^2	1	0.254	0.254	0.350	0.56	—
C^2	1	5.479	5.479	7.580	<0.05	显著
D^2	1	0.113	0.113	0.160	0.70	—
残差	14	10.123	0.723	—	—	—
纯误差	4	1.158	0.289	—	—	—
总回归	28	606.731	—	—	—	—

RSM 模型具有较好的拟合能力,这与 R^2 的数值相吻合。

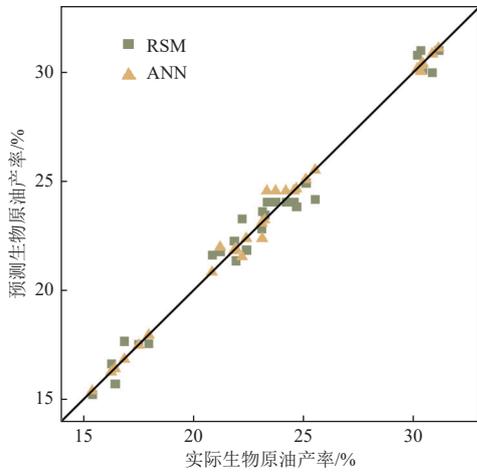


图 3 实际生物原油产率与 ANN 和 RSM 模型预测值的对比

Fig. 3 Comparison of actual biocrude yields with predicted values by the ANN and RSM models

2.2 基于 ANN 的城市污泥和微藻共水热液化生产优化与建模

ANN 是研究非线性过程变量优化的常用随机工具^[15]。本研究中,评估隐藏层中不同数量神经元的网络,发现包括 10 个神经元隐藏层(结构为 4-10-1)的神经网络是模拟城市污泥和微藻共水热液化过程最合适的网络结构。具体结构为具有 4 个神经元(反应温度,停留时间,生物质/水比率,污泥/生物质比率)的输入层,10 个神经元的隐藏层和单个神经元(生物原油产率)的输出层。图 4 展示了训练、验证和测试的输出回归系数值,相应的 R 值分别为 1、0.973 38 和 0.985 83,该值表明实验值和估计值之间具有良好的一致性。

与 RSM 模型相比,ANN 模型的 R^2 值(0.998 9)更接近于 1。表 2 也列出了 ANN 模型对城市污泥和微藻共水热液化生物原油产率的预测。结合图 1 可以发现 ANN 模型具备更加良好预测能力,其预测结果的准确度高于 RSM 模型。由此可见,

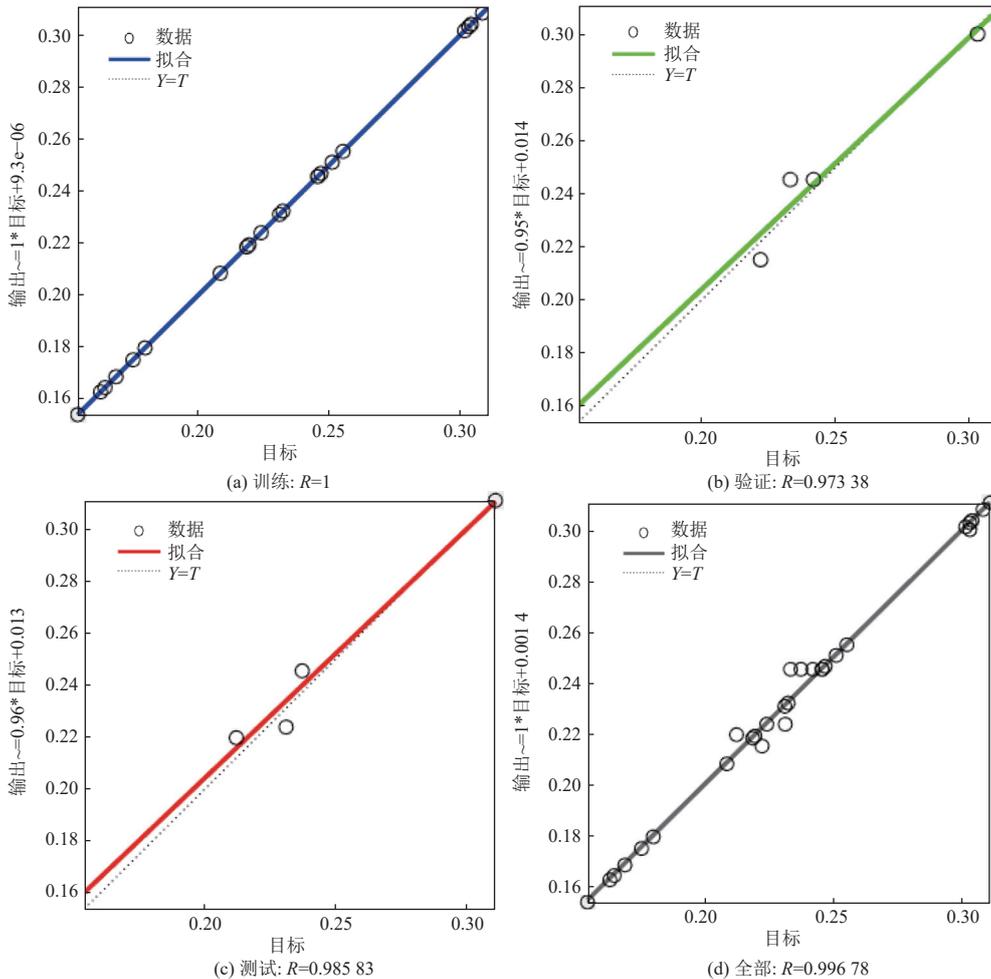


图 4 具有训练、验证、测试和所有预测数据的最佳拟合的人工神经网络预测模型

Fig. 4 ANN predicted model with training, validation, test and best fit for all predicted data

ANN 是一种更可靠的建模技术以表示该城市污泥和微藻共水热液化系统的非线性过程。

2.3 操作参数的影响

基于响应面模型, 图 5 展示了 6 对独立变量与生物原油产率的相互作用。运行过程中, 非变量的 2 个参数均处于中间值, 分别为反应温度 325 °C, 停留时间 40 min, 生物质/水比率 0.17 g/mL, 污泥/生物质比率 0.5。

2.3.1 反应温度

图 5(a)~(c)说明了反应温度对城市污泥和微藻共水热液化生物原油产率有显著影响, 这与方差分析的结果一致。温度的提高对生物物质的转化有明显的促进作用。当达到一定温度后, 继续提高温度则抑制生物物质向生物原油的转化。类似的

发现已经被文献广泛报道, 主要被解释为液化过程在低温下是一个吸热过程, 在高温下却是一个放热过程^[16]。生物质转化为生物原油的过程中, 升高温度将促进蛋白质中的肽键、糖类和脂质中的 C—C 键和 C—O—C 键断裂, 大分子物质降解、异构、重排, 从而增加液相中自由基的浓度, 再聚合生成生物原油^[17]。然而进一步提高温度促进了生物原油组分的进一步环化、缩合或者二次降解, 生成了固体和气体^[18]。ZHU 等^[19]发现在高温下, 不稳定的化合物如苯酚及其衍生物会发生缩合聚合过程形成固体, 使水热液化中固体残留物的产率增加。一系列的平行竞争或次序反应, 最终导致了生物原油产率呈现先升高再降低的趋势。

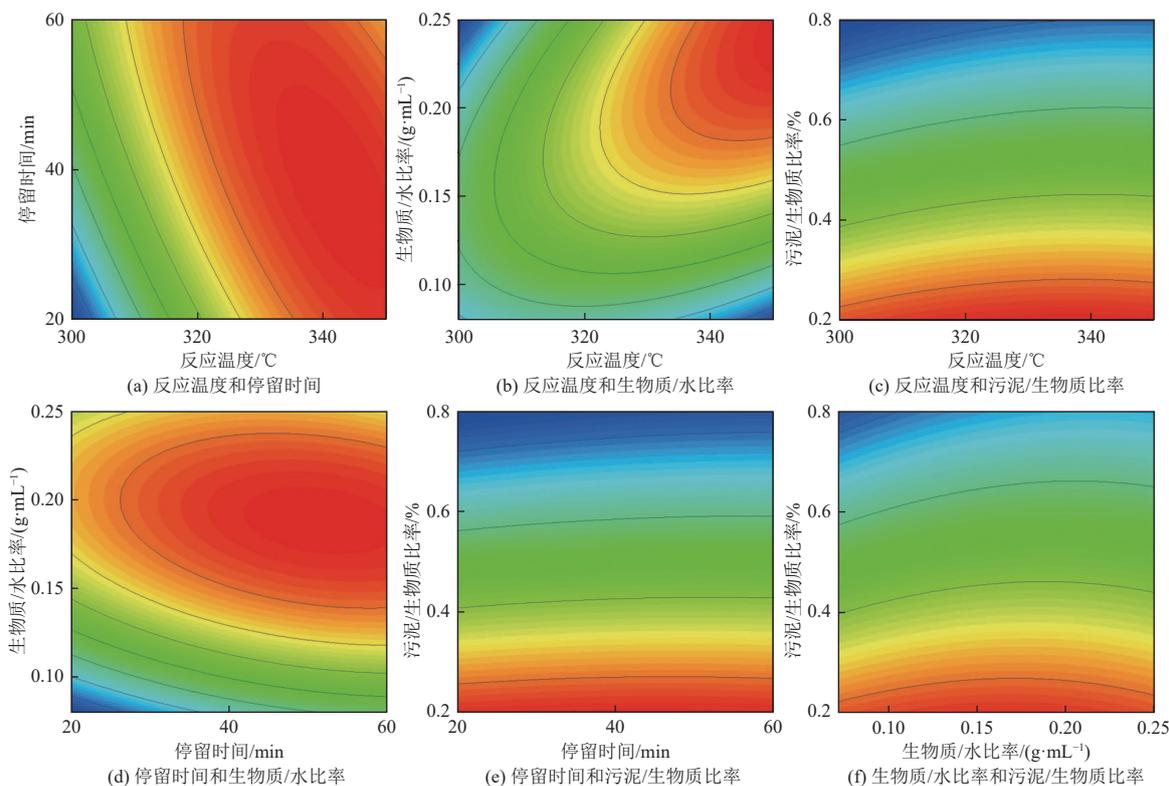


图 5 生物原油产率随因素变化的响应面图

Fig. 5 Response surface plots of biocrude yields as a function of factors

除了直接影响生物原油产率, 反应温度与其他参数之间也存在相互作用, 可能影响它们的最佳值。由二次回归模型方程可以得出, 反应温度和停留时间之间可能存在拮抗作用, 而反应温度和生物质/水比率、污泥/生物质比率之间存在协同作用。低温和较短的时间内发生了水解和解聚等反应, 但生成的一些小分子未进一步充分反应, 导致生物原油产率较低^[16]。从图 5(a)~(c)可以看

出, 将反应温度从 300 °C 提高至 350 °C, 使最佳停留时间从 60 min 减少至 31 min, 最佳生物质/水比率从 0.15 g/mL 增加到 0.24 g/mL, 但对最佳污泥/生物质比率影响不大(约为 0.2), 进一步验证该结论。

2.3.2 停留时间

由图 5(a)(d)和(e)可知, 延长停留时间, 生成的生物原油产率略有增加。较长的停留时间给予生物物质充分的水解和分解时间, 实现中间产物的充

分转化和反应,从而达到生物质转化的饱和点,实现较高的生物原油产率^[20]。当温度较高时,过长的停留时间会导致生物原油分子聚合生成固相或是降解生成气体小分子,从而降低生物原油产率^[19]。

停留时间与其他参数之间的相互作用也可以从图 5(a)(d)和(e)观察到。停留时间延长,最佳反应温度从 350 °C 下降到 331 °C,生物质/比率从 0.20 g/mL 降低到 0.18 g/mL,停留时间对污泥/生物质比率影响不大(约为 0.2)。

2.3.3 生物质/水比率

当水被应用于水热液化中,其既是反应溶剂,为水解分子提供反应环境,也是水热转化的供氢体^[21]。事实证明,生物质/比率对生物原油产率有显著的影响,整体上呈现生物原油产率随生物质含量增多而增大的趋势,但过高的生物质含量会减少油相产物生成(图 5(b)(d)和(f))。生物质含量增加,转化过程中可以使更多的生物质溶解于水介质中参与水热反应。当生物质分子浓度达到饱和点后,生物质的溶解和析出达到动态平衡,持续增加的生物质分子加剧了中间物质的聚合环化过程,或降低了小分子产品和中间产物在水中的溶解度,抑制了油性产物的形成,促进生物原油转化为固体产物^[19]。

方差分析得知,生物质/水比率与反应温度之间的相互作用对生物原油产率存在显著作用,其之间存在明显的相互促进关系。随着温度的升

高,水的极性减弱,因而可以溶解更多非极性小分子或中间有机物以转化生成油性产物^[18]。当生物质/水比率从 0.08 g/mL 增加到 0.25 g/mL 时,最佳反应温度从 319 °C 增加到 350 °C,生物原油产率实现了明显增加。

2.3.4 污泥/生物质比率

污泥在生物质中的含量对生物原油产率有显著影响。城市污泥与其他物质共水热液化时,其中的碱和碱金属(Na、K、Ca 等)可以作为催化剂促进生物质转化为生物原油^[8]。此外,污泥中含氮化合物可能被还原成 NH_4 ,催化降解碳水化合物成为生物原油^[22]。与先前的研究结果不同^[11],在本次共水热液化过程中没有观察到微藻与污泥之间显著的相互促进作用,污泥的加入没有使生物原油产率的显著增加。通过比较原料,推测是此次采用的城市污泥中灰分含量过高,显著减少了参与水热转化的生物质含量,造成生物原油减少,其减少效果大于污泥中灰分促进生物质转化增加的效果,导致生物原油整体产率降低。

2.4 GA 总体优化

为了获取生物原油产率的最大值和对应的操作参数,使用 ANN 模型得到适应度函数进行 GA 优化。经过遗传、突变、杂交、自然等过程,筛选得到优良的个体进行下一步进化。通过 GA 可以实现对适应度函数的全局寻优,表 4 总结了基于 GA 的生物原油产率优化值及对应的操作参数。

表 4 基于 GA 的生物原油产量优化值和相应的运行参数

Table 4 Optimized values for biocrude production and corresponding operating parameters based on GA

参数	反应温度/°C	停留时间/min	生物质/水比率/(g·mL ⁻¹)	污泥/生物质比率	生物原油产率/%
最优值	319.51	45.18	0.17	0.24	32.22
实验值	320.00	45.00	0.17	0.24	32.19

3 结 论

本研究探讨了城市污泥和微藻共水热液化过程中关键操作参数的影响。反应温度、停留时间、生物质/水比率和污泥/生物质比率被选为自变量,水热液化生物原油产率为响应。研究结果表明,相较于利用响应曲面建立模型,通过人工神经网络建立的模型准确度更高。反应温度和生物质含量对生物原油产率的影响存在先增加后减小的趋势,是因为升高温度促进蛋白质中的肽键、糖类和脂质等大分子物质降解、异构、重排,从而促进生物原油的生成,但进一步提高温度会促进生物

原油组分进一步环化、缩合或者二次降解,生成固体和气体。较长的停留时间使有机物质充分分解转化,实现较高的产率,但较高温度下的过长反应时间使得生物原油中的分子物质聚合为固体,从而导致生物原油产率降低。此外,对操作参数影响的分析表明,除了影响生物原油产率,操作参数还可能影响其他参数的最佳值。利用遗传算法对建立的人工神经网络进行优化,发现在反应温度为 319.51 °C,停留时间为 45.18 min,生物质/水比率为 0.17 g/mL,城市污泥/生物质比率为 0.24 时,可以获得最大的生物原油产率。

参考文献 (References):

- [1] ABDULHUSSEIN ALSAEDI A, SOHRAB HOSSAIN M, BALAKRISHNAN V, et al. Extraction and separation of lipids from municipal sewage sludge for biodiesel production: Kinetics and thermodynamics modeling[J]. *Fuel*, 2022, 325: 124946.
- [2] RAGI K B, EKKA B, MEZULE L. Zero pollution protocol for the recovery of cellulose from municipal sewage sludge[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2022, 20: 101222.
- [3] DING An, ZHANG Rourou, NGO H H, et al. Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 769: 144451.
- [4] HAO Botian, XU Donghai, WANG Yu, et al. Catalytic hydrothermal liquefaction of municipal sludge for biocrude production over non-noble bimetallic catalyst in ethanol solvent[J]. *Fuel*, 2023, 331: 125812.
- [5] HAO Botian, YANG Wanpeng, WANG Yu, et al. Hydrothermal liquefaction of municipal sludge: Coupling effects of temperature and time on nitrogen migration[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 165: 105562.
- [6] JAHROMI H, RAHMAN T, ROY P, et al. Hydrotreatment of solvent-extracted biocrude from hydrothermal liquefaction of municipal sewage sludge[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 263: 115719.
- [7] SARAL J S, RANGANATHAN P. A hydrothermal co-liquefaction of spirulina platensis with rice husk, coconut shell and HDPE for biocrude production[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 363: 127911.
- [8] ZHANG Linghong, CHAMPAGNE P, XU Chunbao. Biocrude production from secondary pulp/paper-mill sludge and waste newspaper via co-liquefaction in hot-compressed water[J]. *Energy*, 2011, 36(4): 2142-2150.
- [9] HUANG Huajun, CHANG Yanchao, LAI Faying, et al. Co-liquefaction of sewage sludge and rice straw/wood sawdust: The effect of process parameters on the yields/properties of bio-oil and biochar products[J]. *Energy*, 2019, 173: 140-150.
- [10] VLASKIN M S, GRIGORENKO A V, KOTELEV M S, et al. Composition and properties of microalgae biomass hydrothermal liquefaction products[J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2019, 55(4): 373-377.
- [11] XU Donghai, WANG Yang, LIN Guike, et al. Co-hydrothermal liquefaction of microalgae and sewage sludge in subcritical water: Ash effects on bio-oil production[J]. *Renewable Energy*, 2019, 138: 1143-1151.
- [12] MISHRA S, MOHANTY K. Co-HTL of domestic sewage sludge and wastewater treatment derived microalgal biomass—An integrated biorefinery approach for sustainable biocrude production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 204: 112312.
- [13] 李灵鑫, 江海涛, 武晓燕, 等. 基于神经网络与遗传算法的 Al-Mg-Si 系合金强度预测模型[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(3): 929-936.
- LI Lingxin, JIANG Haitao, WU Xiaoyan, et al. Prediction model of strength of Al-Mg-Si alloy based on artificial neural network and genetic algorithm[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(3): 929-936.
- [14] RANJAN D, MISHRA D, HASAN S H. Bioadsorption of arsenic: An artificial neural networks and response surface methodological approach[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(17): 9852-9863.
- [15] SELVARAJ R, MOORTHY I G, KUMAR R V, et al. Microwave mediated production of FAME from waste cooking oil: Modelling and optimization of process parameters by RSM and ANN approach[J]. *Fuel*, 2019, 237: 40-49.
- [16] HADHOUM L, LOUBAR K, PARASCHIV M, et al. Optimization of oleaginous seeds liquefaction using response surface methodology[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, 11(6): 2655-2667.
- [17] VALDEZ P J, NELSON M C, WANG H Y, et al. Hydrothermal liquefaction of *nannochloropsis* sp.: Systematic study of process variables and analysis of the product fractions[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 46: 317-331.
- [18] HONG Chen, WANG Zhiqiang, SI Yanxiao, et al. Preparation of bio-oils by hydrothermal liquefaction (HTL) of penicillin fermentation residue (PR): Optimization of conditions and mechanistic studies[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143216.
- [19] ZHU Zhe, ROSENDAHL L, TOOR S S, et al. Optimizing the conditions for hydrothermal liquefaction of barley straw for bio-crude oil production using response surface methodology[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 560-569.
- [20] AKHTAR J, AMIN N A S. A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(3): 1615-1624.
- [21] ANASTASAKIS K, ROSS A B. Hydrothermal liquefaction of the brown macro-alga laminaria saccharina: Effect of reaction conditions on product distribution and composition[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(7): 4876-4883.
- [22] YANG Jie, SOPHIA HE Q, YANG Linxi. A review on hydrothermal co-liquefaction of biomass[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 926-945.