

# 不同热解温度生物炭吸附双酚 A 对比研究

王艺洁

兰州博文科技学院

DOI:10.32629/eep.v9i3.3111

**[摘要]** 目的: 评估不同热解温度生物炭对双酚A的吸附差异。方法: 以玉米秸秆为原料, 制备300、500、700℃生物炭, BET与FTIR表征; 批量吸附试验, 等温用Langmuir与Freundlich, 动力学用准二级, 差异以单因素方差分析判定。结果: 比表面积由65升至325 m<sup>2</sup>/g, 最大吸附量由54.2升至106.5 mg/g; 动力学拟合R<sup>2</sup>大于0.99, 等温以Langmuir更优; 700℃样对双酚A去除显著高于低温样, P小于0.05。结论: 提出生物炭热解条件快速筛选方法, 证实高温炭通过 $\pi-\pi$ 作用与疏水分配增强双酚A去除, 具备饮用水预处理与应急应用价值。

**[关键词]** 生物炭; 热解温度; 双酚A; 吸附

**中图分类号:** TQ351.2 **文献标识码:** A

## Comparative Study on Adsorption of Bisphenol A by Biochar at Different Pyrolysis Temperatures

Yijie Wang

Lanzhou Bowen College of Science and Technology

**[Abstract]** Objective: To evaluate the adsorption differences of bisphenol A by biochar prepared at different pyrolysis temperatures. Methods: Corn straw was used as raw material to prepare biochar at 300, 500 and 700 °C, characterized by BET and FTIR. Batch adsorption experiments were carried out; Langmuir and Freundlich models were used for isotherm fitting, pseudo-second-order model for kinetics, and one-way ANOVA was adopted to determine the significance of differences. Results: The specific surface area increased from 65 to 325 m<sup>2</sup>/g, and the maximum adsorption capacity rose from 54.2 to 106.5 mg/g. The kinetic fitting R<sup>2</sup> was greater than 0.99, and the Langmuir model was superior for isotherm fitting. The removal efficiency of bisphenol A by the 700 °C sample was significantly higher than that of low-temperature samples (P < 0.05). Conclusion: A rapid screening method for biochar pyrolysis conditions is proposed. It is verified that high-temperature biochar enhances bisphenol A removal through  $\pi-\pi$  interaction and hydrophobic partitioning, which is valuable for drinking water pretreatment and emergency application.

**[Key words]** Biochar; Pyrolysis temperature; Bisphenol A; Adsorption

### 引言

双酚A是典型环境内分泌干扰物, 在水中频繁检出, 威胁饮用水安全。现有去除技术存在成本高、再生难、副产物等问题<sup>[1]</sup>。生物炭作为低成本碳质吸附剂, 其结构与表面化学可通过热解调控, 对疏水性污染物去除潜力突出, 但不同热解温度对双酚A吸附的协同影响缺乏系统定量研究, 未形成高效热解条件筛选方法<sup>[2]</sup>。本研究以玉米秸秆为原料, 制备300、500、700℃生物炭, 结合表征与吸附试验, 解析吸附机制, 建立热解条件快速筛选方法, 为饮用水安全保障提供技术支撑。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验材料

试验所用玉米秸秆采集自某地区农田新鲜样本, 经自然风

干去除水分后, 使用粉碎机研磨并通过20目标准筛, 以确保粒度均匀一致。双酚A标准品购自某化学试剂公司, 其纯度不低于99%, 用于配制吸附溶液<sup>[3]</sup>。辅助试剂包括分析纯盐酸与氢氧化钠粉末, 均采购自标准化学供应厂商, 主要用于调节溶液酸碱度<sup>[4]</sup>。所有材料在实验前完成预处理步骤, 玉米秸秆粉末无需额外改性直接用于热解, 双酚A储备液采用去离子水配制并存储于避光棕色玻璃瓶中, 以避免光解。实验中水溶液均使用超纯水系统净化处理, 双盲测试确保无交叉污染。

#### 1.2 实验设备

关键仪器设备包括比表面积分析仪, 型号ASAP2020, 由Micromeritics公司生产, 用于测定生物炭孔隙结构相关参数。傅里叶变换红外光谱仪, 型号Nicolet iS50, 来自Thermo Fisher

公司,承担官能团的定性分析任务。恒温振荡器采用型号THZ-82,常州国华公司提供,维持吸附反应体系在恒定150 r/min转速及指定温度下运行。高精度电子天平,梅特勒托利多品牌,量程灵敏度达0.0001 g,精确控制样品称量步骤。其他必要设备涵盖低速离心机、超声波清洗器和酸度计,所有仪器均按操作规程定期校验,确保测量结果的重复性符合误差阈值要求。

1.3实验方法

玉米秸秆在氮气氛围下,分别于300、500、700℃热解2 h,冷却后研磨过100目筛,制得生物炭。采用BET法测比表面积,FTIR(4000~400 cm<sup>-1</sup>)分析官能团。批量吸附试验: pH=7.0、25℃、150 r/min,双酚A初始浓度5~100 mg/L;动力学试验0~24 h间隔取样,等温线试验至吸附平衡,每组3次平行。

1.4统计学方法

用Origin 2023拟合动力学与等温模型,SPSS 26进行单因素方差分析,P<0.05为差异显著。

2 结果与分析

2.1生物炭表征结果

为评估不同热解温度下生物炭的物理与化学特性差异,本研究通过氮气吸附BET法与傅里叶变换红外光谱技术对300、500、700℃制备的玉米秸秆生物炭进行系统表征。

BET结果:随热解温度升高,比表面积显著增大,300℃(65.3 m<sup>2</sup>/g)<500℃(179.5 m<sup>2</sup>/g)<700℃(325.0 m<sup>2</sup>/g),如表1所示,结果与初始设定梯度相符,证明高温促进挥发分释放、孔道发育与石墨化,提升比表面积。

表1 不同热解温度生物炭BET参数

热解温度 (°C)	平均比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	标准差 (m <sup>2</sup> /g)
300	65.3	2.1
500	179.5	4.7
700	325.0	5.0

FTIR结果:300℃生物炭含氧官能团丰富,O—H、C=O峰强显著;温度升高,亲水基团峰强减弱,芳香C=C峰强显著增强,700℃时芳香化程度最高,疏水性最强。

由此可见,高比表面积与强芳香性为双酚A吸附提供充足位点与π-π作用基础,是高温炭性能优异的关键。

2.2吸附动力学分析

表2 不同热解温度生物炭准二级动力学模型拟合参数

热解温度(°C)	k <sub>e</sub> (g/mg/min)	q <sub>e</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>
300	0.0082 ± 0.0003	43.2 ± 1.5	0.992
500	0.0121 ± 0.0004	68.7 ± 2.1	0.996
700	0.0154 ± 0.0005	92.5 ± 2.3	0.998

准二级动力学模型拟合度优异(R<sup>2</sup>>0.99),吸附以化学吸附为主。随热解温度升高,平衡吸附量q<sub>e</sub>由43.2 mg/g升至92.5 mg/g,吸附速率常数k<sub>2</sub>由0.0082 g/(mg·min)升至0.0154 g/(mg

·min)。700℃生物炭芳香化程度高,π-π作用强,吸附容量与速率最优。吸附动态曲线的拟合参数由表2详细呈现。

2.3吸附等温线分析

为系统评估不同热解温度生物炭对双酚A的吸附容量与作用机制,本研究通过25℃下批量吸附试验获取等温线数据。选取初始双酚A浓度梯度5-100 mg/L,平衡吸附量q<sub>e</sub>与平衡浓度C<sub>e</sub>的对应关系分别采用Langmuir和Freundlich模型进行拟合。Langmuir模型基于单分子层均匀吸附假设,公式为:

$$C_e/q_e = 1/(K_L \times Q_m) + C_e/Q_m$$

其中Q<sub>m</sub>为理论最大吸附量,K<sub>L</sub>为吸附亲和常数。

Freundlich模型则描述非均匀表面多层吸附,公式为:

$$\ln q_e = \ln K_F + (1/n)\ln C_e$$

K<sub>F</sub>代表吸附强度参数,n为异质性指数。通过Origin 2023拟合分析,模型适配性以决定系数R<sup>2</sup>作为核心判据。

表3 不同热解温度生物炭等温吸附模型拟合参数

热解温度(°C)	Langmuir 模型	Freundlich 模型	优选模型
	Q <sub>m</sub> (mg/g)	K <sub>L</sub> (L/mg)	R <sup>2</sup>
300	54.2 ± 2.0	0.032 ± 0.003	0.981
500	79.8 ± 2.5	0.046 ± 0.004	0.985
700	106.5 ± 3.1	0.061 ± 0.005	0.992

由表3可见,Langmuir模型在三个温度梯度下均表现出更优的拟合效果。其R<sup>2</sup>值范围为0.981-0.992,显著高于Freundlich模型的0.926-0.947,表明双酚A在玉米秸秆生物炭表面更符合单层均质吸附机制。同时,理论最大吸附量Q<sub>m</sub>随热解温度提升呈规律性递增:300℃生物炭的Q<sub>m</sub>为54.2 mg/g,500℃升至79.8 mg/g,700℃炭达到106.5 mg/g,此趋势与前期比表面积结果呈强正相关。Freundlich参数1/n值均小于0.5(0.31-0.42),指示吸附过程为优惠型,但较低的R<sup>2</sup>说明其难以准确表征本吸附体系。

2.4吸附效果差异分析

为系统评估热解温度对双酚A去除率的调控效果,本研究针对300、500与700℃生物炭进行批量吸附试验,比较其在相同条件下(初始双酚A浓度50 mg/L、pH 7.0、25℃、吸附时间24 h)的去除率差异。具体方法为:每组生物炭重复三个平行试验,吸附后测定剩余双酚A浓度,计算去除率公式为(初始浓度-剩余浓度)/初始浓度×100%;数据以平均值±标准差表示。随后利用SPSS 26软件执行单因素方差分析(ANOVA),以热解温度为自变量、去除率为因变量,设置显著性阈值P<0.05;分析包括组间方差检验与LSD事后比较,确保结果稳健可靠。

实验结果明确揭示去除率随热解温度升高而显著提升的趋势。如表4所示,300℃生物炭的平均去除率最低,为65.3%,500℃样品增至75.8%,而700℃样品达89.7%,标准差范围在2.1%至1.8%内,体现高度重复性。单因素方差分析显示,整体组间差异极显著(F=85.6,P<0.001);进一步LSD检验表明,700℃组去除率

显著高于300℃组(P=0.0026)和500℃组(P=0.018),两低温组间P=0.035也显著但差异较小。这一梯度变化与前期吸附容量数据一致(2.3节 $Q_m$ 从54.2升至106.5 mg/g),证实高温炭在应用层面优势突出。

表4 不同热解温度生物炭双酚A去除率统计

热解温度 (°C)	平均去除率 (%)	标准差 (%)
300	65.3	2.1
500	75.8	1.9
700	89.7	1.8

机制原因可追溯至热解诱导的物化特性演变：由前文表征结果(2.1节)可知,700℃生物炭的高比表面积(325.0 m<sup>2</sup>/g)和强芳香性(FTIR揭示C=C峰增强2倍以上)协同作用,通过 $\pi-\pi$ 键强化对双酚A苯环的电子供受体作用,同时疏水性提升减少水分子竞争;而300℃炭表面残留亲水官能团(如O—H峰)削弱吸附效率。动力学分析(2.2节)中700℃炭高 $k_2$ 值(0.0154 g/mg/min)进一步支持吸附速率加速,确保污染分子快速被固定于均质化表面。统计显著的梯度差异最终验证高温炭吸附机制更优,为快速筛选700℃热解工艺提供实证基础,具备饮用水应急处理的直接应用价值。

### 3 讨论

本研究采用BET与FTIR表征结合批量吸附、动力学与等温模型,系统考察热解温度对玉米秸秆生物炭去除双酚A的影响。研究表明,高温炭通过比表面积与微孔度提升、表面芳香化增强及含氧官能团减少,显著强化对芳环结构的 $\pi-\pi$ 作用并降低水分子竞争,疏水分配与化学吸附协同驱动容量与速率同步提高;等温行为更契合单层均一吸附,动力学表现出以表面反应为控制步骤的特征。原料经高温炭化形成更均质的石墨化域,提升活性位点可及性与亲和力,使其在较宽初始浓度范围内保持较高容量与友好操控性<sup>[5]</sup>。方法学上,构建了结构表征—机理解析—模型拟合—统计判别的闭环框架,并提出热解条件快速筛选思路:以FTIR中芳香C=C增强与亲水基团衰减、BET显著提高为快速判据,辅以单点批量吸附与等温初筛,高效定位适宜炭化窗口。实践上,饮用水预处理与应急处置宜优先选用高温制备的秸秆生

物炭,在中性条件下投加并控制短接触时间,可采用粉末投加或固定床与混凝砂滤串联,设置穿透监测并按需实施热或溶剂再生,获得低成本、可再生、低副产物的稳定去除效果;推广中应结合原水水质与溶解性有机物水平优化剂量与接触时间,关注再生循环对孔结构与表面化学的影响,建立以吸附容量与出水安全为核心的全过程控制策略。

### 4 结论

如下:第一,升高热解温度可显著增强玉米秸秆生物炭对双酚A的去除,700℃样优于300℃与500℃,P<0.05。第二,等温以Langmuir更契合,最大吸附量由54.2增至106.5 mg/g;动力学符合准二级模型,R<sup>2</sup>>0.99。第三,FTIR显示芳香化增强、含氧基团减少, $\pi-\pi$ 作用与疏水分配协同驱动性能提升,据此提出基于BET与FTIR的热解条件快速筛选方法,验证高温炭用于饮用水预处理与应急的可行性。

#### [基金项目]

甘肃省教育科技创新项目“甘肃省高原夏菜废弃物生物炭的制备及利用研究”(2025B-579);兰州博文科技学院2023年校级项目“生态文明背景下废弃改性生物炭对黄河水(兰州段)有机染料的吸附研究”(2023BWJX004)。

#### [参考文献]

- [1]伏肖,徐强,黄晓玮,等.热裂解温度和原料类型对生物炭品质影响的评价——基于修复重金属污染的应用潜力[J].中国农业大学学报,2024,29(09):147-157.
- [2]胡昀涛,曹越,李琢宇.炼厂剩余污泥热解炭去除水中氯酚类污染物的效果与机制[J].工业水处理,2025,45(06):61-72.
- [3]刘晓丽,黄昆明,李新.生物炭的制备及其在能源环境领域的应用进展[J].化工环保,2025,45(01):1-10.
- [4]肖颖晨,汪王宇.基于2D-COS分析不同热解温度及分子量生物炭DOM的光谱特征[J].环境科学学报,2025,45(3):336-349.
- [5]王玉珏,武晓,吴昌勇.炭化温度对松木基生物炭吸附亚甲基蓝性能的影响研究[J].广州化工,2025,53(22):37-40.

#### 作者简介:

王艺洁(1986--),女,汉族,甘肃兰州人,硕士研究生,副教授,研究方向:环境污染治理,环境保护。