

改性木质素基生物炭的制备及其对全氟类化合物吸附性能研究

吕静, 程金彪, 高文玲, 任首宇, 李梦佳, 刘子凡, 靳紫涵, 白红娟*

河南工业大学化学化工学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月18日

摘要

本研究以酶解木质素为原料, 经水热预处理(尿素为氮源)与KOH活化的复合工艺, 成功制备出分级多孔碳吸附剂(K-NHPC), 用于探究对全氟类化合物(以OBS为代表)的吸附性能。结果表明: 所制备的K-NHPC具有高比表面积、丰富孔隙结构及均匀分散的氮元素, 吸附实验结果表明, K-NHPC对OBS的吸附性能优异, 且该吸附过程符合伪二级动力学模型和Langmuir吸附等温线模型, 说明吸附以化学吸附为主导、伴随物理吸附的单分子层吸附。热力学分析显示该过程为自发、吸热的熵增过程, ΔG 均为负值。本研究为高效去除水中全氟化合物提供了一种新型吸附材料, 具有一定的应用潜力。

关键词

木质素, 吸附, 全氟类化合物

Preparation of Modified Lignin-Based Biochar and Its Adsorption Performance for Perfluoroalkyl Substances

Jing Lyu, Jinbiao Cheng, Wenling Gao, Shouyu Ren, Mengjia Li, Zifan Liu, Zihan Jin, Hongjuan Bai*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan

Received: February 2, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 18, 2026

*通讯作者。

文章引用: 吕静, 程金彪, 高文玲, 任首宇, 李梦佳, 刘子凡, 靳紫涵, 白红娟. 改性木质素基生物炭的制备及其对全氟类化合物吸附性能研究[J]. 物理化学进展, 2026, 15(2): 71-81. DOI: 10.12677/japc.2026.152008

Abstract

This study utilized enzymatic hydrolysis lignin as the raw material and successfully fabricated a hierarchical porous carbon adsorbent (K-NHPC) through a combined process involving hydrothermal pretreatment (with urea as the nitrogen source) and KOH activation, aiming to explore its adsorption performance toward perfluoroalkyl substances (represented by OBS). The results indicated that the prepared K-NHPC possessed a high specific surface area, abundant pore structure, and uniformly dispersed nitrogen elements. Adsorption experiments demonstrated that K-NHPC exhibited excellent adsorption performance for OBS, and the adsorption process conformed to the pseudo-second-order kinetic model and the Langmuir adsorption isotherm model, indicating monolayer adsorption dominated by chemical adsorption accompanied by physical adsorption. Thermodynamic analysis revealed that the process was spontaneous, endothermic, and entropy-increasing, with all ΔG values being negative. This study provides a novel adsorbent material for the efficient removal of perfluoroalkyl substances from water, demonstrating promising application potential.

Keywords

Lignin, Adsorption, Perfluoroalkyl Substances (PFAS)

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全氟类化合物是一类经过人工合成的脂肪族化合物，它们拥有许多优异的特性，如出色的化学稳定性、耐高温性、高效的表面活性以及强大的疏水疏油能力。正因如此，全氟类化合物在众多领域得到了广泛应用，包括但不限于消防泡沫的制造、电镀工艺的改进、半导体光刻技术的应用，以及纸张和织物的防护处理等[1]。同时，全氟类化合物具有生物累积性，会随着食物链的传递而积累于生物体内，作为食物链顶层的人类面临更严峻的潜在危害，全氟类化合物受到了前所未有的关注[2]。当前，针对受全氟类化合物污染的水体，已经开发并应用了多种处理技术，包括光降解和电化学等方法。相对而言，物理方法如吸附技术被认为更适合用于去除水中的全氟类化合物。鉴于此，开发高效、可行的技术手段以去除水体中的全氟类化合物显得尤为重要。

生物质作为能源的一种，主要用于热能和电能的生产[3]，其重要性仅次于石油、煤炭和天然气，位居世界第四大能源[4]。在众多生物质材料中，木质素以其巨大的储量而备受瞩目。木质素分子中含有丰富的官能团，如羟基、苯基、甲基、醚键和羧基等，这些官能团赋予了木质素两亲性的特性，为木质素的改性提供了广阔的可能性[5]-[7]。然而，目前大多数基于木质素的吸附剂在处理含氟废水时，其吸附能力相对较低，且难以实现重复使用。这可能是由于木质素自身吸附位点的活性不足所导致的。因此，当前的研究重点在于如何有效提高木质素基材料中吸附位点的活性，以制备出高性能、可重复使用的吸附剂。通过化学改性，可以充分拓宽木质素的应用范围，实现其高附加值的利用。

本文通过水热-活化法合成了一种木质素基生物炭吸附剂。在水热处理阶段，引入了掺杂了氮元素，随后利用氢氧化钾(KOH)作为造孔剂，成功制备了具有分级多孔结构的碳材料 K-NHPC，研究其对全氟

壬烯氧基苯磺酸钠(OBS)的吸附性能与机理。通过材料表征、吸附动力学、等温线及热力学分析,阐明其吸附行为与作用机制,以期OBS污染水体的修复提供新型高效吸附材料及理论指导。

2. 实验部分

2.1. 试剂与仪器

酶解木质素,全氟壬烯氧基苯磺酸钠,其中尿素、氢氧化钾、无水乙醇、甲醇、氢氧化钠、氯化钠等均为分析纯。

电子分析天平 ME204E/02、超声波清洗器 KQ-5200、紫外-可见分光光度计 TU-1810、恒温振荡箱 THZ-82、数显恒温水浴锅 HH-2、鼓风干燥箱 DHG-9020A、循环水式多用真空 SHB-IIIS。

2.2. 多孔碳材料的制备

将 10 g 酶解木质素(EHL)分散在 50 mL 尿素溶液中,并进行 10 min 的搅拌。接着,将搅拌好的混合溶液转移到容积为 250 mL 的水热反应釜中,在 200℃的条件下进行为期 200 min 的水热反应。反应结束后,待反应釜内的溶液自然冷却至室温,通过抽滤机收集生成的材料。为了去除杂质,用无水乙醇和去离子水分别对材料进行三次冲洗。最后,在 60℃的条件下对材料进行烘干,得到改性后的木质素碳球(NCS),并妥善保存以备后续使用。

为了制备木质素分级多孔碳(K-NHPC),首先在一个 500 mL 的烧杯中,将之前制备的 10 g 木质素基碳球(NCS)、30 g 氢氧化钾(KOH)和 500 mL 去离子水按照 1:3:50 的质量比混合。随后,在磁力搅拌器上以 20 r/min 的速度持续搅拌 48 h。接着,将混合溶液在 100℃~110℃的温度下进行干燥,以去除多余的水分。干燥后的混合物被转移到管式炉中,在 800℃的高温下进行 2 h 的加热活化,整个过程以 N₂ 作为保护气体,加热速率为 10℃/min。

活化反应完成后,使用去离子水对产物进行反复冲洗,以去除过量的氢氧化钾,直到洗出的液体呈中性为止。最后,在 60℃的条件下对产物进行烘干,最终得到木质素分级多孔碳(K-NHPC),并妥善保存以备后续使用。

2.3. 实验方法

2.3.1. 标准曲线的绘制

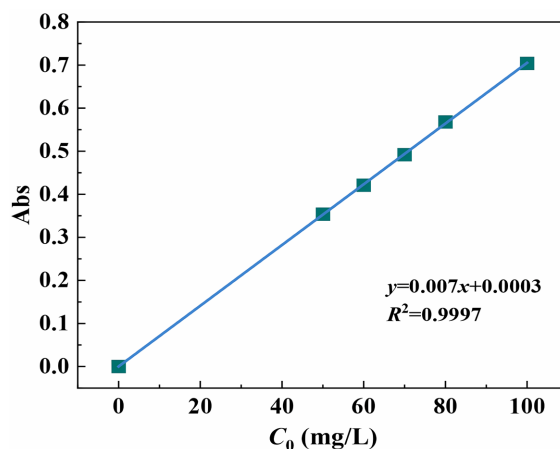


Figure 1. OBS standard curve

图 1. OBS 溶液标准曲线

为了绘制 OBS 的标准曲线, 首先制备了浓度为 100 mg/L 的 OBS 母液。随后, 我们将母液分别稀释至 50、60、70、80、90 和 100 mg/L, 从而得到一系列不同浓度的标准溶液。接着, 在 252 nm 的波长下, 我们对这些标准溶液的吸光度进行了测量。最后, 以 OBS 的浓度作为横坐标, 吸光度作为纵坐标, 绘制了浓度 - 吸光度关系图, 并通过线性拟合方法得到了 OBS 的标准曲线, 见图 1。

2.3.2. 吸附性能测试

称量一定量的吸附剂置于 50 mL 的锥形瓶中, 加入 10 mL 一定浓度的吸附溶液, 以特定温度、特定转速在振荡箱中吸附。一段时间后测量光度, 分别计算吸附量和去除率。

吸附量的计算:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

去除率的计算:

$$R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

2.3.3. 吸附模型

(1) 吸附动力学

在 25°C 的温度下, 锥形瓶中投加一定量吸附质, 设置 OBS 浓度为 50 mg/L、100 mg/L、150 mg/L 进行吸附, 在 10、30、60、90、120、180、240、360、480、600 min 时测量吸光度。使用准一级、准二级和 Elovich 动力学模型探究分析材料的动力学特征, 并对吸附过程采用内扩散模型进行线性拟合。

(a) 准一级动力学模型(PFO)

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

(b) 准二级动力学模型(PSO)

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (4)$$

(c) Elovich 方程

$$q_t = \frac{1}{b} \ln(ab) + \frac{1}{b} \ln(t) \quad (5)$$

(d) 粒子扩散模型

$$q_t = K_1 t^{0.5} + C_1 \quad (6)$$

这里, k_1 (1/min) 为 PFO 动力学模型的速率常数, 而 k_2 (g/mg·min) 为 PSO 模型的速率常数。 q_e (mg/g) 和 q_t (mg/g) 分别代表吸附剂的吸附量和吸附时间。 a 是初始吸附速率常数, b 是与表面覆盖度和吸附能有关的常数。 k_1 (mg/g·min^{0.5}) 为不同阶段粒子间扩散的速率常数, C (mg/g) 为与边界层相关的常数。

(2) 吸附等温线

温度设置为 301 K、311 K、321 K, 分级多孔碳的投加量为 0.4 g/L, OBS 初始浓度设置为: 50 mg/L、80 mg/L、100 mg/L、120 mg/L、150 mg/L、200 mg/L, 保证吸附平衡吸附时间为 4 h, 数据使用 Langmuir、Freunlich 和 Temkin 等温线探究 OBS 的吸附机制。

(a) Langmuir 吸附等温模型

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (7)$$

(b) Freundlich 吸附等温模型

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (8)$$

(c) Temkin 吸附等温模型

$$q_e = RT \ln(K_T \cdot C_e) / b \quad (9)$$

其中 K_L (L/mg) 为 Langmuir 模型的吸附平衡常数, C_e (mg/g) 为 Langmuir 模型的最大平衡容量, K_F ((mg/g)(L/mg) n) 为 Freundlich 的吸附平衡常数, n 为 Freundlich 模型的异质性因子的倒数, R (8.314 J/mol·K) 为气体常数, T (K) 为绝对温度式中, b 和 K_T 是 Temkin 模型的模型常数。

(3) 吸附热力学

吸附的热力学参数, 包括吉布斯自由能、焓和熵, 吉布斯自由能(ΔG)用于描述过程的自发性与系统的稳定性, 焓(ΔH)和熵(ΔS)决定了吸附过程的吸热性和有序性。通过对这些参数的研究, 可以进一步深入探究不同温度对木质素分级多孔碳吸附 OBS 和 TET 的机理。

$$K_d = \frac{q_e}{C_e} \quad (10)$$

$$\Delta G = -RT \ln K_d \quad (11)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (12)$$

上式中, ΔG (kJ/mol) 是吉布斯自由能变; ΔS (J/mol) 是熵变; ΔH (kJ/mol) 是焓变; T (K) 是绝对温度。

3. 结果与分析

3.1. 材料表征

(1) 扫描电子显微镜(SEM)

材料的表面形貌对吸附具有显著影响, 因此采用 SEM 表征技术对材料形貌进行了表征。由图像可以看出, 与酶解木质素(图 2(a)和图 2(b))相比, K-NHPC (图 2(c)和图 2(d)), 材料的表面形态发生了显著变化, 呈现出明显的多孔网络结构。EDS 图显示 K-NHPC 含有 C, N, O 和 K 元素(图 2(e)和图 2(f))。

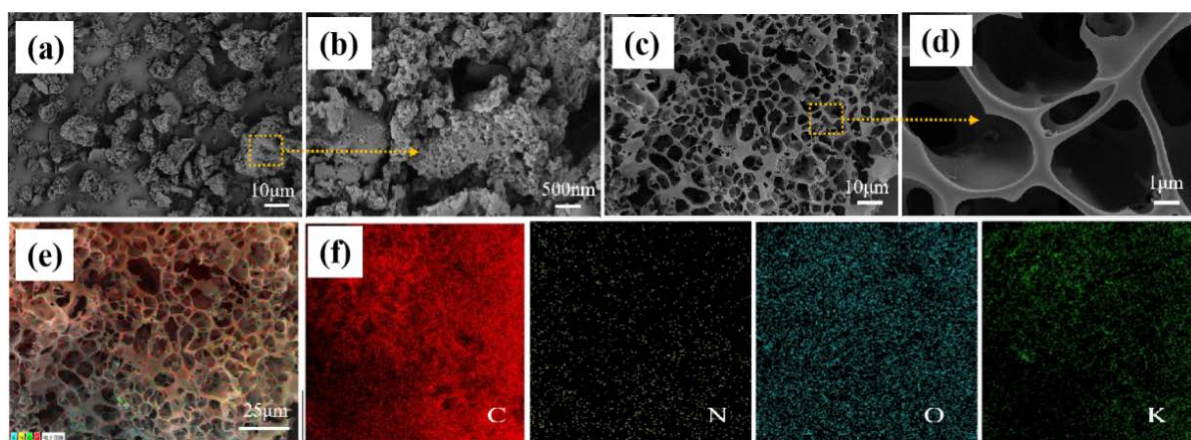


Figure 2. SEM images of EHL ((a) and (b)) and SEM-EDS images of K-NHPC ((c), (d), (e) and (f))

图 2. EHL 的 SEM 图((a)和(b))和 K-NHPC 的 SEM-EDS 电镜图((c), (d), (e)和(f))

(2) 透射电子显微镜(TEM)

由 SEM (图 2(a)和图 2(b))可看出 EHL 相互粘附的碳球形成了以碳球为基本单元的形状不规则的碳骨架, 这为后续的活化反应提供了基础。TEM 结果进一步表明 K-NHPC 的骨架结构比较稳定(图 3), 在经过活化处理后, K-NHPC 内外均存在大量孔隙, 且孔隙大小分级。

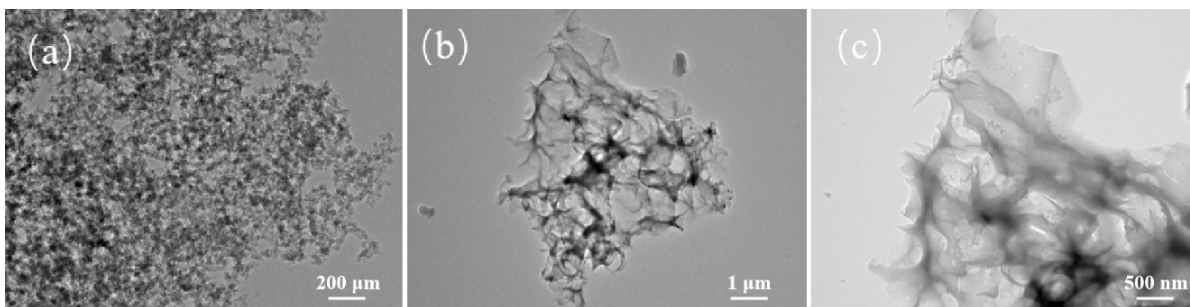


Figure 3. TEM images of K-NHPC
图 3. K-NHPC 的 TEM 图像

(3) 比表面积(BET)

比表面积是衡量材料吸附能力、催化活性、反应速率等性能的重要参数。从图 4(a)可以看出随着压力的增加两种材料的吸附量均增加, 其中吸附量 K-NHPC 远远大于 EHL。在初始阶段是, K-NHPC 有较低的吸附量, 随着相对压力的增加, 吸附量逐渐增加并在某一范围内迅速上升, 形成一个明显的滞后环, 所以 K-NHPC 吸附曲线属于 IV 型吸附等温线。这一结果表明孔隙结构在吸附中有一定影响。

从图 4(b)可以看出 EHL 几乎没有孔隙结构, 而 K-NHPC 大部分小于 2 nm, 为微孔, 部分大于 2 nm, 为介孔。改性后的 K-NHPC 比表面积可达 1713.4 m²/g 和孔容可达 0.716 cm³/g, 远远高于 EHL。通过对比两种材料, 可以看出造孔剂 KOH 在其中起到非常重要的作用。

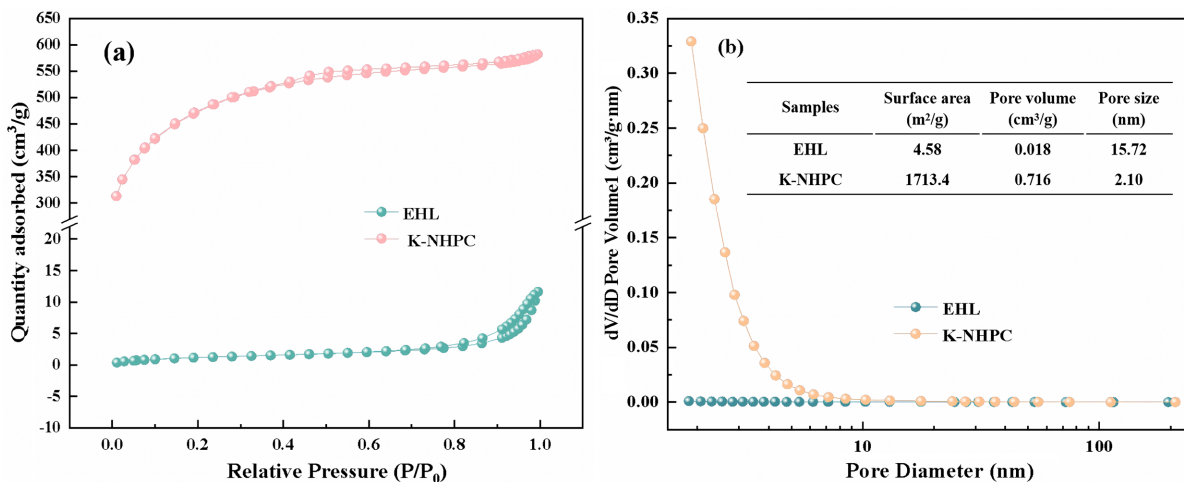


Figure 4. (a) N₂ adsorption-desorption isotherms and (b) pore size distribution curves of EHL and K-NHPC
图 4. EHL 和 K-NHPC 的氮气吸-脱附等温线(a)和孔径分布曲线(b)

(4) 拉曼光谱(Raman)

为了进一步了解材料的缺陷水平、无序化和石墨化程度, 使用拉曼光谱对 K-NHPC 进行特征和分析。K-NHPC 的拉曼光谱(图 5)在 1353 cm⁻¹ 和 1578 cm⁻¹ 附近显示出清晰的 D 峰和 G 峰, 其中 D 峰与无序碳

和缺陷结构有关，G 峰与石墨烯结构中的 sp^2 杂合碳有关。D 峰与 G 峰的面积比(I_D/I_G)可用于评价碳材料的表面缺陷水平和石墨化程度。D-band 和 G-band 都清晰可见，K-NHPC 的 I_D/I_G 值约为 1，D 峰与 G 峰的峰值强度几乎相等。这可能意味着该样品主要由有序的碳结构组成，但也含有一些缺陷或无序区域，且具有一定的石墨化程度，有利于吸附污染物。

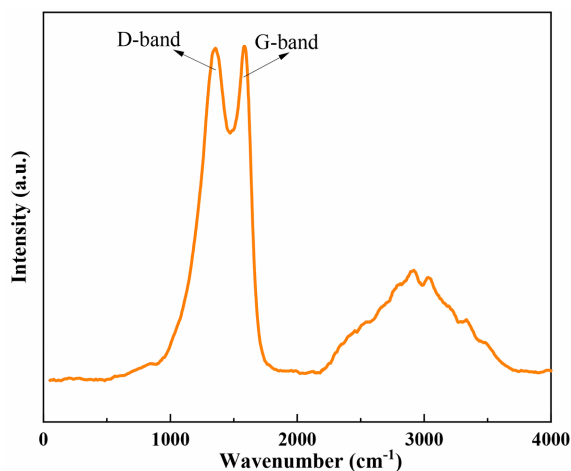


Figure 5. Raman spectrum of K-NHPC

图 5. K-NHPC 的拉曼光谱

3.2. 吸附动力学

随着实验时间增加，可以从图 6(a)看出吸附量呈现出先上升后趋于平稳的趋势。在最初的 4 小时内，吸附过程较为活跃，吸附量持续增加；然而，4 小时之后，吸附量的增长逐渐放缓并最终达到饱和状态。产生这一现象是因为，吸附剂表面的吸附位点逐渐减少。当浓度增加时，吸附量也随着升高，这是因为浓度的提高意味着在 K-NHPC 吸附剂周围，吸附质分子的数量显著增多，从而增加了它们与吸附剂表面碰撞的几率。这种碰撞几率增加促进了吸附质分子向 K-NHPC 表面的转移，因为两者之间存在较大势能差。K-NHPC 吸附 OBS 的动力学模型拟合如图 6(a)所示，动力学模型拟合数据如表 1 所示。

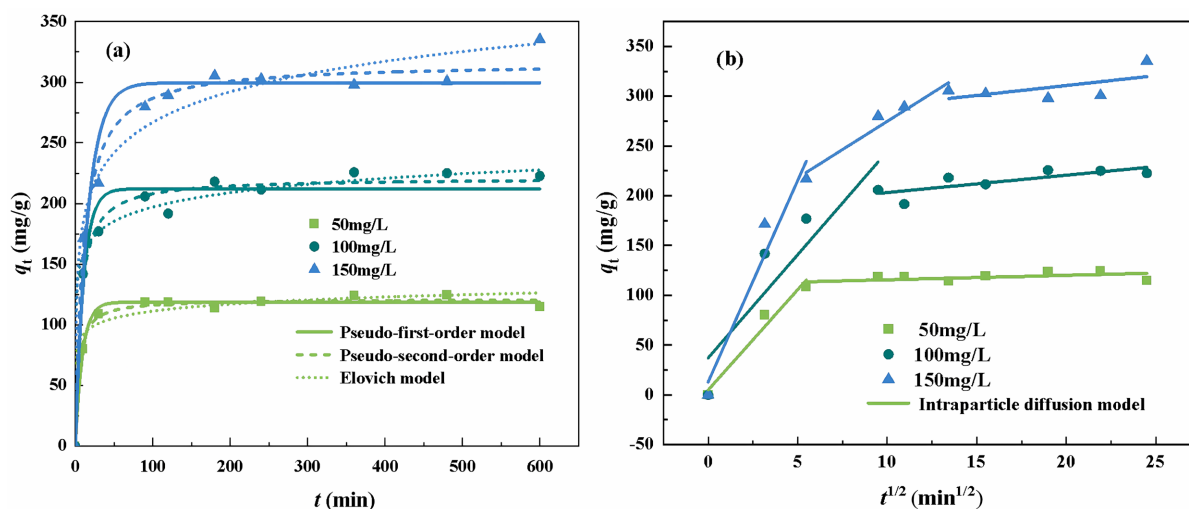


Figure 6. Kinetic curve of adsorption of OBS by K-NHPC

图 6. K-NHPC 吸附 OBS 的吸附动力学曲线

Table 1. Correlation parameters of kinetic models for OBS onto K-NHPC
表 1. K-NHPC 吸附 OBS 的动力学模型相关参数

C_0 (mg/L)	50	100	150
伪一阶模型			
k_1 /(1/min)	0.108	0.0970	0.0623
q_e (cal)/(mg/g)	118.65	212.12	299.63
R^2	0.990	0.962	0.954
伪二阶模型			
k_2 /(g/mg·min)	0.00199	7.20×10^{-4}	3.09×10^{-4}
q_e (cal)/(mg/g)	121.08	221.12	316.15
R^2	0.924	0.987	0.984
Elovich 方程			
a	47379.74	17565.26	571.03
b	0.119	0.0585	0.0276
R^2	0.967	0.778	0.978
粒子扩散模型			
K_1 /(mg/g·min ^{0.5})	20.17	20.75	40.48
C_1 (mg/g)	4.93	37.15	12.93
R	0.968	0.824	0.946
K_2 /(mg/g·min ^{0.5})	0.45	1.74	11.35
C_2 (mg/g)	111.16	185.87	161.34
R	0.302	0.621	0.947
K_3 /(mg/g·min ^{0.5})	/	/	1.99
C_3 (mg/g)	/	/	270.96
R	/	/	0.346

如表 1 所示, K-NHPC 吸附 OBS 的过程涉及物理和化学吸附, 但以化学吸附为主。伪二级动力学模型考虑了化学吸附的可能性, 这可能解释了为什么在某些条件下它比伪一级动力学模型拟合得更好。伪一级动力学模型假设吸附过程遵循一级反应动力学, 通常适用于描述单分子层吸附过程。然而, 它可能不适用于描述复杂的吸附过程, 尤其是当吸附剂表面不均匀或吸附过程涉及化学吸附时。Elovich 模型适用于描述非均质表面的吸附过程, 特别是当吸附速率随时间变化较大时。它假设吸附速率随吸附量的增加而减小, 这可能是由于吸附剂表面活性位点的能量分布不均匀或吸附质分子在吸附剂表面的迁移受限。

内扩散模型一般分为两种, 两段式(表面扩散、内扩散)和三段式(表面扩散、中空内扩散和微孔内扩散), 其中斜率 K 表示吸附速率。吸附 OBS 时 $K_1 > K_2 > K_3$, 表明随着吸附的进行, 吸附位点逐渐被占据,

吸附速率越来越慢,最后趋于平衡。由图 6(b)可以看出,颗粒内扩散并不是整个吸收过程中唯一的速率控制步骤。

3.3. 吸附等温线

K-NHPC 吸附 OBS 的等温线模型拟合如图 7 所示,动力学模型拟合数据如表 2 所示。观察一下数据可以看出无论温度为 301.15 K、311.15 K 还是 321.15 K 时,拟合吸附 OBS 的 Langmuir 的效果是最好的,但 Freundlich 模型和 Temkin 模型相关系数有时也大于 0.95,拟合效果较好,表明存在非均匀表面吸附。

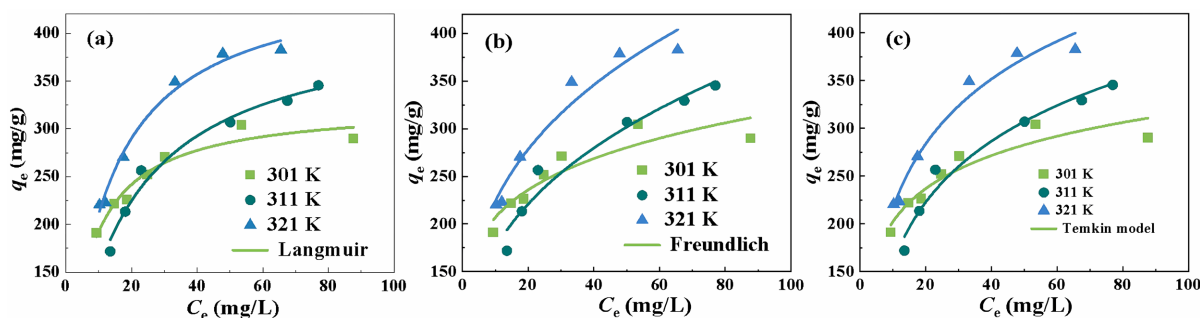


Figure 7. Isotherm fitting curves of OBS adsorption onto K-NHPC

图 7. K-NHPC 吸附 OBS 的等温线拟合曲线

Table 2. Isotherm-related parameters for OBS adsorption onto K-NHPC

表 2. K-NHPC 吸附 OBS 的吸附等温线拟合参数

T (K)	301.15 K	311.15 K	321.15 K
Langmuir			
q_m /(mg/g)	325.56	419.16	464.39
K_L /(L/mg)	6.95	17.31	12.04
R^2	0.941	0.979	0.987
Freundlich			
K_F	134.16	79.90	108.75
n	0.188	0.340	0.314
R^2	0.857	0.951	0.952
Temkin			
b	49.99	28.02	27.29
K_T	5.66	0.56	0.91
R^2	0.890	0.970	0.974

3.4. 吸附热力学

在不同温度下, K-NHPC 对 OBS 的 ΔG (kJ/mol) 为负值, 这表明吸附过程是自发进行的(见表 3)。随着温度的升高, ΔG 的绝对值增大, 说明吸附过程的自发性增强, 驱动力增强, 高温有利于吸附。同时,

OBS 的 ΔS (J/(mol·K))为正值(见表 3), 意味着吸附过程中系统的无序度增加。正值的 ΔH (kJ/mol)则说明吸附过程是吸热的, 因此提高环境温度有助于吸附效果的增强。

Table 3. Thermodynamic parameters of OBS adsorption by K-NHPC

表 3. K-NHPC 吸附 OBS 的热力学参数

T (K)	ΔG (kJ/mol)	ΔH (kJ/mol)	ΔS (J/mol·K)
301	-2.993		
311	-3.884	22.89	860
321	-4.711		

3.5. 吸附机理推测

通过比表面积分析发现, 该吸附剂材料内部存在微孔和介孔结构, 且大部分孔隙的直径小于 2 nm。这一发现表明, 吸附剂对污染物分子的吸附过程受到孔径大小的影响, 孔隙填充在吸附过程中可能发挥了部分作用。拉曼光谱和 EDS 能谱分析证实, K-NHPC 富含芳香碳结构且表面缺陷丰富, 但石墨化程度较低。这些芳香环结构中含有大量富余或缺失 π 电子的区域, 能够作为 π 电子供体或受体, 与污染物分子发生 π - π 相互作用。由于吸附材料 K-NHPC 进行了 N 掺杂改性, 推测 OBS 可能与 K-NHPC 中的含氮基团发生质子化、氢键等作用。基于以上对吸附剂的表征结果与吸附动力学、等温线及热力学数据, K-NHPC 对 OBS 的吸附机理主要包括: 孔隙填充、静电吸引、氢键和 π - π 相互作用。

4. 结论

本研究基于酶解木质素制备生物炭, 以水热-活化技术进行改性, 成功制备了木质素基生物炭吸附剂, 用于吸附水中的全氟类化合物。以尿素为氮源, 通过水热预处理, 并利用 KOH 作为活化剂进行活化, 成功制备了 K-NHPC 材料, 该材料对 OBS 展现出优异的吸附性能, 最大吸附量为 410 mg/g, 高于同类的吸附剂, 表明了水热-活化体系的优越性。通过多种表征技术、批量吸附试验、吸附模型拟合计算, 探究了水热-活化体系制备的分级多孔碳在水环境中对全氟类化合物污染的去除影响。OBS 在生物炭上的吸附行为符合单层吸附模型, 表明吸附主要发生在生物炭表面。同时, 吸附过程表现出非均一性, 暗示生物炭表面存在多种吸附位点。吸附机制以化学吸附为主导, 同时伴随有物理吸附作用。K-NHPC 对 OBS 的吸附机理主要包括: 孔隙填充、静电吸引、氢键和 π - π 相互作用。本研究为含 OBS 废水的修复提供了一种高效、环境友好的吸附材料, 具有较好的应用潜力。

基金项目

本研究获得河南工业大学本科生科研训练(科教融汇)项目(No. KYXL2025082)及河南工业大学化学化工学院本科生创新资助计划培育项目(No. HGCXPY2502)的资助。

参考文献

- [1] Jiang, L., Huang, Z., Xu, J., Zhang, L. and Du, Z. (2024) Selective Adsorption of OBS (Sodium P-Perfluorous Non-oxobenzenesulfonate) as an Emerging PFAS Contaminant from Aquatic Environments by Fluorinated MOFs: Novel Mechanisms of F-F Exclusive Attraction. *Chemical Engineering Journal*, **484**, Article ID: 149355. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149355>
- [2] 程浩铭, 张翠玲, 任昊晔, 陈慧. 化学沉淀法处理高氟废水的工艺条件优化[J]. 兰州交通大学学报, 2018, 37(5): 80-84.

-
- [3] 周宇. 酶解木质素基中空微纳米球的结构调控及药物负载性能研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
- [4] 陈江伟. 木质素基吸附材料的制备, 结构表征与应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [5] Zhang, B., Yang, D., Qiu, X., Qian, Y., Yan, M. and Li, Q. (2020) Influences of Aggregation Behavior of Lignin on the Microstructure and Adsorptive Properties of Lignin-Derived Porous Carbons by Potassium Compound Activation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **82**, 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.10.016>
- [6] Cavali, M., Soccol, C.R., Tavares, D., Zevallos Torres, L.A., Oliveira de Andrade Tanobe, V., Zandoná Filho, A., *et al.* (2020) Effect of Sequential Acid-Alkaline Treatment on Physical and Chemical Characteristics of Lignin and Cellulose from Pine (*Pinus* spp.) Residual Sawdust. *Bioresource Technology*, **316**, Article ID: 123884. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123884>
- [7] Liang, H., Zhang, H., Zhao, P., Zhao, X., Sun, H., Geng, Z., *et al.* (2021) Synthesis of a Novel Three-Dimensional Porous Carbon Material and Its Highly Selective Cr(VI) Removal in Wastewater. *Journal of Cleaner Production*, **306**, Article ID: 127204. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127204>