

王亚茹,宋刚福,孙文俊. 颗粒活性炭对典型药物卡马西平的吸附特性及机制[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 50-63.

Wang Y R, Song G F, Sun W J. Adsorption characteristics and mechanism of granular activated carbon for typical drug carbamazepine[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 50-63.

颗粒活性炭对典型药物卡马西平的吸附特性及机制

王亚茹¹, 宋刚福¹, 孙文俊^{2,*}

(1. 华北水利水电大学环境与市政工程学院, 河南郑州 450045; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要 【目的】 本文旨在使用3种不同性状的颗粒活性炭(GAC)作为吸附剂,研究其对典型药物卡马西平(CBZ)的吸附效能与机制。【方法】 分别考察GAC投加量、初始浓度、温度、pH、水基质对吸附过程的影响,采用傅里叶红外光谱(FTIR)对吸附前后GAC的表面官能团变化情况进行表征分析,并探讨其吸附机理。【结果】 在初始CBZ质量浓度为2 mg/L,投加量为0.2 g/L时,吸附24 h的平衡吸附量煤质压块炭(9.87 mg/g) > 椰壳炭(9.44 mg/g) > 煤质柱状炭(8.62 mg/g)。CBZ在煤质压块炭和煤质柱状炭上的吸附过程更符合Freundlich等温吸附模型,即CBZ在煤质压块炭和柱状炭上的吸附以多分子层吸附为主。而在椰壳炭上的吸附过程更符合Langmuir等温吸附模型,即CBZ在椰壳炭表面以单分子层吸附为主,颗粒内扩散模型拟合表明3种GAC的吸附速率均由表面吸附和颗粒内扩散共同控制。pH对3种GAC吸附CBZ的影响均不明显,但天然有机物(NOM)对吸附影响显著,这是因为NOM与吸附剂表面之间的疏水相互作用干扰了GAC对CBZ的吸附。吸附前后GAC的FTIR对比结果显示,CBZ分子的芳香环和活性炭石墨烯层的芳香结构之间存在 π - π 相互作用,这是GAC吸附CBZ的主要机制之一。【结论】 相比煤质柱状炭和椰壳炭,煤质压块炭对CBZ的吸附效果最好,pH对3种GAC吸附CBZ的影响较小,但NOM对吸附起负影响。GAC吸附CBZ主要由疏水作用和 π - π 相互作用主导。

关键词 颗粒活性炭; 卡马西平; 吸附特性; 吸附机制; 水处理

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)09-0050-14

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.006

Adsorption Characteristics and Mechanism of Granular Activated Carbon for Typical Drug Carbamazepine

Wang Yaru¹, Song Gangfu¹, Sun Wenjun^{2,*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract [Objective] This paper aims to investigate the adsorption efficacy and mechanism of the typical drug carbamazepine (CBZ) using three different traits of granular activated carbon (GAC) as adsorbents. [Methods] The effects of GAC dosage, initial concentration, temperature, pH, and water matrix on the adsorption process were investigated separately, and the changes in the surface functional groups of GAC before and after adsorption were characterised and analysed by fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and the adsorption mechanism was explored. [Results] Equilibrium adsorption amount of coal briquetted charcoal (9.87 mg/g) > coconut shell charcoal (9.44 mg/g) > coal columnar charcoal (8.62 mg/g) was obtained for 24 h of adsorption when the initial CBZ mass concentration was 2 mg/L and the dosage was 0.2 g/L. The adsorption process of CBZ on coal briquetted charcoal and coal columnar charcoal was more in line with Freundlich's isothermal adsorption model, the adsorption of CBZ on coal briquette charcoal and columnar charcoal was dominated by the adsorption of multimolecular layers. The adsorption process on coconut shell charcoal was more in line with Langmuir isothermal adsorption model, i. e., CBZ adsorption on the surface of coconut shell charcoal was

[收稿日期] 2024-09-22

[基金项目] 国家重点研发计划(2021YFC3201304)

[作者简介] 王亚茹(2000—),女,硕士研究生,研究方向为城镇供水安全保障技术,E-mail: 1321984267@qq.com。

[通信作者] 孙文俊(1981—),男,研究员,研究方向为城镇供水安全保障技术,E-mail: wsun@tsinghua.edu.cn。

dominated by monomolecular layer adsorption, and the intra-particle diffusion model fitting indicated that the adsorption rate of all the three types of GAC was controlled by surface adsorption and intra-particle diffusion. The effect of pH on the adsorption of CBZ by the three types of GAC was not obvious, but natural organic matter (NOM) had significant effect on the adsorption due to the hydrophobicity between NOM and the adsorbent surfaces. The hydrophobic interaction between NOM and adsorbent surface interfered with the adsorption of CBZ by GAC. The FTIR comparison result of GAC before and after adsorption showed that there was a π - π interaction between the aromatic ring of the CBZ molecule and the aromatic structure of the graphene layer of the activated carbon, which was one of the main mechanisms of CBZ adsorption by GAC. [**Conclusion**] Compared with coal-based columnar carbon and coconut shell carbon, coal-based briquetted charcoal shows the best adsorption effect of CBZ. pH has less effect on the adsorption of CBZ by three GAC, but NOM negatively affects the adsorption. The adsorption of CBZ by three types of GAC is mainly dominated by hydrophobic interactions and π - π interactions.

Keywords granular activated carbon (GAC); carbamazepine (CBZ); adsorption property; adsorption mechanism; water treatment

近年来,药品及个人护理产品 (PPCPs) 成为水环境中最受关注的新污染物之一^[1]。PPCPs 有多种类型,包括抗生素、镇痛药、抗炎药等,其中一些具有很强的稳定性以及较差的生物降解性。其中,卡马西平 (CBZ) 是一种控制癫痫发作和缓解疼痛、相对稳定的药物^[2]。CBZ 具有短期和长期毒性、内分泌干扰作用和致畸性,严重威胁水生生物及人类的健康^[2]。其极性较强、挥发性较低,易于在水环境中停留,在地表水、地下水等水源中经常被检测到^[3]。据报道^[4-5],在天然水体中检测到质量浓度为 ng/L ~ μ g/L 的 CBZ。因此,如何降低水环境中 CBZ 的含量已成为亟待解决的问题。

活性炭因其多功能性、短时间内的高去除效率、有效性、无不良副产物形成以及可再生等优点,是去除水中有机微污染物的一种很有前景的方法^[6],已被普遍用作许多较小尺寸、疏水性有机污染物 (如酚类化合物) 的有效吸附剂^[7]。Al-Ghoul^[8] 等采用低成本的农业废弃物-石榴皮作为原材料,通过活化过程制备活性炭,并评估其在去除 CBZ 方面的应用潜力。高宁^[9] 对比了椰壳炭和木制炭对 CBZ 的吸附效果,发现在同一条件下椰壳炭吸附效果优于木制炭,从而选择椰壳炭进行后续研究。也有研究是通过活性炭改性从而提高其对 CBZ 的吸附能

力。周巡等^[10] 通过氨气化学气相沉积法对煤质活性炭进行改性,提高了活性炭对 CBZ 的吸附能力。然而,现有文献中对活性炭吸附 CBZ 的研究尚不全面,且相关研究多集中于单一类型的活性炭对 CBZ 的吸附性能,或是仅在同一条件下对比不同种类活性炭的吸附量从而优选炭,缺乏对不同类型活性炭,特别是煤质炭中不同形状活性炭 (如压块炭与柱状炭) 对 CBZ 吸附特性的系统性比较。

为了填补现有研究的空白,本文选取了 3 种不同类型的活性炭-煤质压块炭、煤质柱状炭和椰壳炭,并系统比较了其在不同影响因素下对 CBZ 吸附性能的差异。通过傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 表征分析,探讨了活性炭对 CBZ 的吸附机理,并结合动力学与等温线研究,进一步分析了吸附过程中的关键影响因素。希望本文能够为活性炭在水处理中的应用提供新的理论依据,并为 CBZ 等药物污染物的去除技术发展作出贡献。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 活性炭种类

选用煤质压块活性炭、椰壳炭、煤质柱状活性炭 3 种颗粒活性炭 (GAC) 为吸附剂,进行 CBZ 的吸附试验。GAC 具体信息如表 1 所示。

表 1 GAC 的种类和基本性质
Tab. 1 Types and Basic Properties of GAC

GAC 种类	规格	碘值/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	来源	强度	堆重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$)	四氯化碳吸附率	水分
煤质压块活性炭	10×20 目	1 045	新疆府谷	95.53%	0.582	68.96%	19.07%
椰壳炭	8×20 目	1 038	江苏富汇通科技有限公司	98.15%	0.566	67.00%	20.39%
煤质柱状活性炭	1.5 mm	958	宁夏	98.60%	0.551	59.63%	11.50%

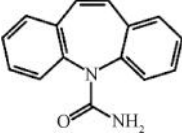
1.1.2 试剂

CBZ(纯度>99%,阿拉丁),甲醇和乙腈(色谱纯,MREDA),盐酸、氢氧化钠(分析

纯,国药集团),试验用水为 Milli-Q 超纯水仪所制的超纯水。CBZ 理化性质如表 2 所示。

表 2 CBZ 理化性质

Tab. 2 Physicochemical Properties of CBZ

化合物	化学结构	摩尔质量/(g·mol ⁻¹)	pK _{a1}	pK _{a2}	logK _{ow}	熔点/℃
CBZ (C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O)		236.28	2.3	13.9	2.45	189~192

注:pK_{a1}——一级解离常数;pK_{a2}——二级解离常数;logK_{ow}——正辛醇-水分配系数对数。

1.1.3 仪器

高效液相色谱仪(LC-20A GPC;岛津),恒温振荡培养箱(HZQ F160;苏州市培英实验设备有限公司),电子分析天平(ML104/02;Mettler Toledo),pH计(HQ30d;HACH),恒温烘箱(HDG-9070A;中仪国科科技有限公司)。

1.2 吸附剂预处理及表征

将不同种类的 GAC 用超纯水清洗数次,直至上清液无炭黑洗出。然后将清洗后的 GAC 置于 105℃恒温烘箱中干燥 12 h,收集后置于阴凉干燥处保存备用。

采用 iS50 FT-IR Thermo 型 FTIR 对 GAC 吸附 CBZ 前后官能团进行表征分析。纯 KBr 制成的颗粒用作背景测量的参考样品。光谱记录值为 400~4 000 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹。

1.3 静态吸附试验

1.3.1 动力学试验

准确称取不同质量(0.01、0.02、0.04、0.06、0.10 g)的 GAC 于 250 mL 锥形瓶中,加入 200 mL 质量浓度为 2 mg/L 的 CBZ 溶液,GAC 质量浓度分别为 0.05、0.10、0.20、0.30、0.50 g/L,置于 25℃的温度下,转速为 180 r/min 的恒温振荡培养箱中振荡,并于 0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、12.0、24.0、48.0 h 取样测定剩余 CBZ 浓度。

1.3.2 等温吸附试验

准确称取 0.04 g 的 GAC 于 250 mL 锥形瓶中,加入 200 mL 不同质量浓度(1、2、5、10、15 mg/L)的 CBZ 溶液,活性炭质量浓度为 0.2 g/L,置于温度为 25℃,转速为 180 r/min 的恒温振荡培养箱中振荡 24 h,取样测定剩余 CBZ 质量浓度。

1.3.3 影响因素试验

GAC 投加量的影响:在 CBZ 初始质量浓度为 2.0 mg/L 的条件下,投加不同质量浓度(0.05、0.10、0.20、0.30、0.50 g/L)活性炭,置于温度 25℃,转速 180 r/min 的恒温振荡培养箱中振荡,并于 0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、12.0、24.0、48.0 h 取样测定剩余 CBZ 的质量浓度。

pH 的影响:为研究 pH 对 GAC 吸附 CBZ 的影响,在初始质量浓度为 2 mg/L,投炭量为 0.2 g/L 的条件下,调节溶液 pH 值分别为 3、5、7、9,在 25℃条件下置于转速为 180 r/min 的恒温振荡培养箱中振荡,振荡 24 h 后取样测定剩余 CBZ 质量浓度。

温度的影响(热力学试验):准确称取 0.04 g 的 GAC 于锥形瓶中,加入 200 mL 质量浓度为 2 mg/L 的 CBZ 溶液,活性炭质量浓度为 0.2 g/L,分别置于温度为 15、25、35℃,转速 180 r/min 的恒温振荡培养箱中振荡 24 h 后取样,采用 0.22 μm 针式过滤器过滤后测定剩余 CBZ 质量浓度。

水质背景的影响:为研究不同水质背景对 3 种 GAC 吸附量的影响,采用超纯水和北京第九自来水厂沉淀后出水两种水体分别配置质量浓度为 2 mg/L 的 CBZ 溶液,GAC 投加量为 0.2 g/L,在 25℃条件下置于转速为 180 r/min 的恒温振荡培养箱中振荡,振荡 24 h 后取样测定剩余 CBZ 质量浓度。

待测样品经 0.22 μm 的滤膜过滤后用高效液相色谱仪测定含量。吸附容量根据式(1)计算^[11]。

$$Q_{E,exp} = \frac{(C_0 - C_E) \times V}{m} \quad (1)$$

其中:Q_{E,exp}——吸附剂对 CBZ 的吸附量,mg/g;
C_E——平衡吸附质量浓度,mg/L;

C_0 ——CBZ 的初始质量浓度, mg/L;
 V ——CBZ 溶液的体积, L;
 m ——GAC 的质量, g。

2 结果与讨论

2.1 吸附动力学

吸附过程包括 3 个步骤:外部传质、内部扩散和吸附。在外部传质过程中,吸附质从溶液移动到吸附剂的外表面;在内部扩散过程中,吸附质迁移到吸附位点;在吸附过程中,吸附质与吸附剂相连^[12]。动力学模型采用拟一级、拟二级和颗粒内扩散三种动力学模型进行模拟。

(1) 拟一级与拟二级动力学拟合

拟一级动力学模型是基于一种非可逆反应,即吸附速率与吸附剂未占据位点的数量成正比,拟一级动力学模型如式(2)^[13]。

$$\ln(Q_{E,cal1} - Q_t) = \ln Q_{E,cal1} - k_1 t \quad (2)$$

两边取对数得式(3)。

$$Q_t = Q_{E,cal1} (1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

拟二级动力学模型是基于这样一个假设,即限

制相是化学吸附。在整个吸附过程中,吸附速率与未占据位点数量的平方成正比。在这种情况下,吸附率并不取决于平衡浓度,而是取决于吸附容量。拟二级动力学模型方程可用下面的非线性方程^[13]表示[式(4)]。

$$Q_t = \frac{Q_{E,cal2}^2 k_2 t}{1 + Q_{E,cal2} k_2 t} \quad (4)$$

其中: $Q_{E,cal2}$ ——吸附平衡时的吸附量, mg/g;

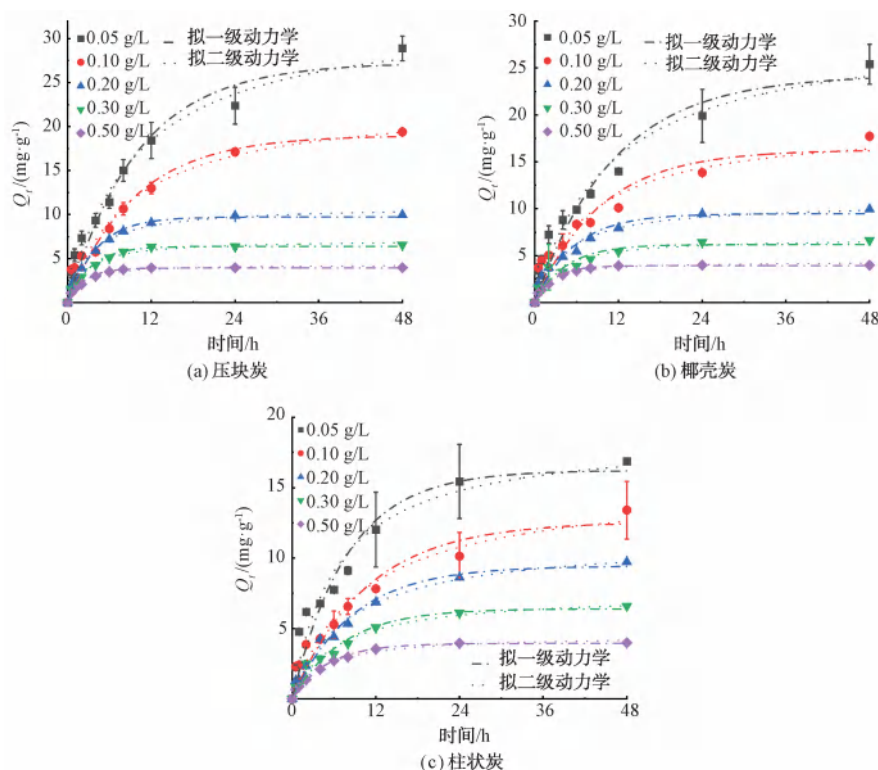
Q_t ——时间为 t 时的吸附量, mg/g;

k_1 ——拟一级动力学的反应速率常数, h^{-1} ;

k_2 ——拟二级动力学的反应速率常数, $g/(mg \cdot h)$ 。

在 5 种不同投炭量下 3 种 GAC 吸附 CBZ 的动力学拟合结果如图 1 和表 3~表 5 所示。

由图 1 可知,CBZ 在 3 种 GAC 上的吸附量都在接触初期迅速增加,随后逐渐减缓,直到 24 h 基本达到吸附平衡,这表明 CBZ 的吸附包括 CBZ 在 GAC 表面的初期快速吸附和吸附剂内部的缓慢扩散。最初的快速吸附主要归因于吸附剂表面丰富的



注:CBZ 质量浓度为 2 mg/L、超纯水温度为 $(25.0 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 、恒温振荡箱转速为 180 r/min。

图 1 不同种类 GAC 吸附 CBZ 的动力学拟合线

Fig. 1 Kinetic Fitting Curves of CBZ Adsorption by Different Kinds of GAC

表 3 不同投炭量条件下的压块炭吸附 CBZ 的拟一级以及拟二级动力学参数
Tab. 3 Quasi-First-Order and Quasi-Second-Order Kinetic Parameters of CBZ Adsorption on Briquetted Charcoal
under Different Charcoal Dosage

活性炭投量/ (g·L ⁻¹)	拟一级动力学			拟二级动力学		
	$k_1/(h^{-1})$	$Q_{E,cal1}/(mg \cdot g^{-1})$	R^2	$k_2/[g \cdot (mg \cdot h)^{-1}]$	$Q_{E,cal2}/(mg \cdot g^{-1})$	R^2
0.05	0.099 14	27.26	0.961 09	0.003 11	33.26	0.977 82
0.10	0.104 22	19.01	0.952 51	0.004 84	22.97	0.962 35
0.20	0.242 46	9.73	0.988 95	0.028 69	11.00	0.993 83
0.30	0.303 38	6.40	0.985 03	0.057 74	7.15	0.988 10
0.50	0.406 65	3.92	0.987 33	0.130 99	4.34	0.988 94

表 4 不同投炭量条件下的椰壳炭吸附 CBZ 的拟一级以及拟二级动力学参数
Tab. 4 Quasi-First-Order and Quasi-Second-Order Kinetic Parameters of CBZ Adsorption on Coconut Shell Carbon
under Different Charcoal Dosage

活性炭投量/ (g·L ⁻¹)	拟一级动力学			拟二级动力学		
	$k_1/(h^{-1})$	$Q_{E,cal1}/(mg \cdot g^{-1})$	R^2	$k_2/[g \cdot (mg \cdot h)^{-1}]$	$Q_{E,cal2}/(mg \cdot g^{-1})$	R^2
0.05	0.088 10	24.25	0.936 89	0.003 18	29.50	0.958 99
0.10	0.106 61	16.29	0.884 41	0.006 59	19.09	0.921 34
0.20	0.180 48	9.45	0.948 29	0.022 40	10.68	0.975 53
0.30	0.223 10	6.19	0.894 76	0.046 76	6.87	0.939 21
0.50	0.369 47	3.93	0.991 87	0.115 17	4.37	0.989 63

表 5 不同投炭量条件下的柱状炭吸附 CBZ 的拟一级以及拟二级动力学参数
Tab. 5 Quasi-First-Order and Quasi-Second-Order Kinetic Parameters of CBZ Adsorption on Columnar Charcoal
under Different Charcoal Dosage

活性炭投量/ (g·L ⁻¹)	拟一级动力学			拟二级动力学		
	$k_1/(h^{-1})$	$Q_{E,cal1}/(mg \cdot g^{-1})$	R^2	$k_2/[g \cdot (mg \cdot h)^{-1}]$	$Q_{E,cal2}/(mg \cdot g^{-1})$	R^2
0.05	0.126 67	16.23	0.926 76	0.008 30	18.74	0.951 11
0.10	0.093 81	12.57	0.929 72	0.006 61	15.22	0.953 88
0.20	0.115 57	9.43	0.982 16	0.010 99	11.33	0.990 88
0.30	0.135 95	6.39	0.968 50	0.021 12	7.48	0.979 76
0.50	0.196 01	3.93	0.992 12	0.053 79	4.50	0.992 57

活性位点。而且 CBZ 表面含有极性基团(如酰胺基),这些特性决定了其在吸附初期会较快地与活性炭表面发生相互作用。当这些活性位点被占据后,吸附过程减慢,吸附速率由吸附剂分子从液体向吸附剂内部孔隙的扩散所主导^[14]。这一过程中,分子不仅要与表面发生相互作用,还需要通过孔隙内的扩散进入内部。由于活性炭的孔隙大小分布不同,CBZ 可能更倾向于进入某些特定大小的孔隙。这种扩散过程在吸附初期较快,随着活性位点的占据,扩散速度减缓,从而导致吸附过程的逐渐减速。

动力学模型拟合结果相应的动力学参数和 R^2 值表明,CBZ 在 GAC 上的吸附动力学数据更符合拟

二级动力学模型,说明 CBZ 在 GAC 上的吸附受化学吸附限制,吸附主要取决于 GAC 与 CBZ 分子间的相互作用,CBZ 与 GAC 之间的化学吸附是吸附过程的限速步骤。

(2)颗粒内扩散模型

为研究不同种类 GAC 在吸附 CBZ 过程中的扩散机制,用颗粒内扩散模型进一步探讨其吸附动力学机制。

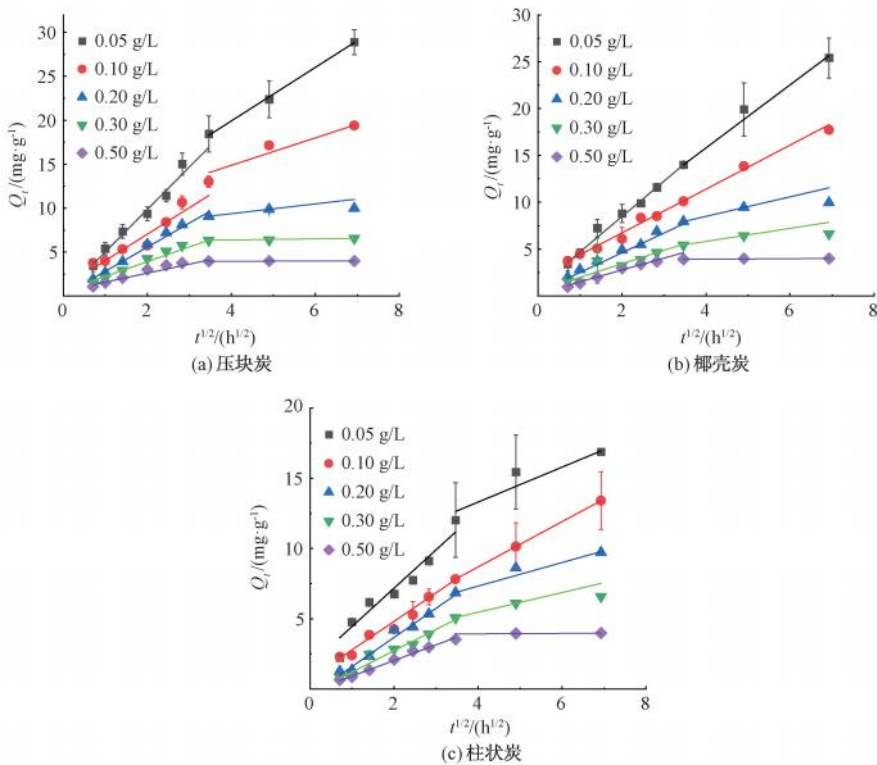
颗粒内扩散模型公式^[13]如式(5)。

$$Q_t = K_d t^{\frac{1}{2}} + C_i \quad (5)$$

其中: K_d ——颗粒内扩散的速率常数,

$\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h}^{1/2})$;
 C_i ——与边界层厚度成正比的常数, C_i 值越大表示边界层厚度越大, mg/g 。
在颗粒内扩散模型拟合过程中, $t^{1/2}$ 与 Q_t 的关

系图为 1 条直线, 表明颗粒内扩散在吸附过程中占主导地位; 反之, 则表明吸附动力学受多个过程控制^[15]。3 种 GAC 吸附 CBZ 的颗粒内扩散拟合结果如图 2 和表 6~表 8 所示。



注: CBZ 质量浓度为 2 mg/L, 超纯水温度为 $(25.0\pm0.2)^\circ\text{C}$ 、恒温振荡箱转速为 180 r/min。

图 2 不同种类 GAC 吸附 CBZ 的颗粒内扩散模型拟合线

Fig. 2 Fitting Curves of Intraparticle Diffusion Model for Adsorption of CBZ by Different Kinds of GAC

表 6 不同投炭量条件下压块炭吸附 CBZ 颗粒内扩散模型拟合信息

Tab. 6 Fitting Information of Intraparticle Diffusion Model for CBZ Particle Adsorption by Briquetted Carbon under Different Charcoal Dosage Conditions

活性炭投量/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	内扩散模型第一段			内扩散模型第二段		
	$K_{d1}/[\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{1/2})^{-1}]$	$C_1/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	R^2	$K_{d2}/[\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{1/2})^{-1}]$	$C_2/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	R^2
0.05	4.831 02	0.177 90	0.978 22	3.049 06	7.724 76	0.998 78
0.10	3.010 52	1.003 83	0.976 90	1.562 54	8.617 94	0.942 34
0.20	2.742 57	0.066 16	0.987 31	0.555 96	7.143 60	0.983 26
0.30	1.672 96	0.556 81	0.990 97	0.060 19	6.138 14	0.988 74
0.50	1.022 99	0.545 81	0.956 61	0.013 94	3.891 72	0.853 50

由图 2 可知, GAC 对 CBZ 的吸附主要表现为表面吸附和孔隙内扩散两方面。第一条直线表示的是 CBZ 从 GAC 边界向表面的扩散, K_{d1} 越高, 则说明 CBZ 从吸附剂边界向表面扩散的速率越快。这主要是由于在吸附初期, 溶液中的 CBZ 和吸附到 GAC 表面的 CBZ 之间存在高浓度差, 这会促进 CBZ 分子

向 GAC 外表面扩散, 加速外部传质过程。第二条直线对应的是孔隙内扩散吸附, CBZ 分子进入 GAC 的孔隙, 继续在孔隙内扩散并被吸附在内表面。由于 GAC 的孔隙结构复杂且孔径分布广泛, CBZ 分子可能在孔隙中经历缓慢的扩散过程, 直到它们被吸附在孔隙的内表面。较低的 K_{d2} 值表示扩散过程较

表 7 不同投炭量条件下椰壳炭吸附 CBZ 颗粒内扩散模型拟合信息

Tab. 7 Fitting Information of Intraparticle Diffusion Model for CBZ Adsorption by Coconut Shell Carbon under Different Charcoal Dosage Conditions

活性炭投量/ (g·L ⁻¹)	内扩散模型第一段			内扩散模型第二段		
	$K_{d1}/[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h}^{1/2})^{-1}]$	$C_1/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2	$K_{d2}/[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h}^{1/2})^{-1}]$	$C_2/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2
0.05	3.774 78	0.927 75	0.997 87	3.362 64	2.353 04	0.995 21
0.10	2.334 10	2.065 04	0.990 16	2.349 50	1.999 68	0.991 52
0.20	2.105 93	0.397 14	0.983 17	1.041 41	4.328 70	0.991 58
0.30	1.437 32	0.554 36	0.994 86	0.694 50	3.044 27	0.995 56
0.50	1.267 77	0.235 79	0.960 08	0.020 91	3.847 58	0.853 50

表 8 不同投炭量条件下柱状炭吸附 CBZ 颗粒内扩散模型拟合信息

Tab. 8 Fitting Information of Intraparticle Diffusion Model for CBZ Particle Adsorption by Columnar Carbon under Different Charcoal Dosage

活性炭投量/ (g·L ⁻¹)	内扩散模型第一段			内扩散模型第二段		
	$K_{d1}/[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h}^{1/2})^{-1}]$	$C_1/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2	$K_{d2}/[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h}^{1/2})^{-1}]$	$C_2/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2
0.05	2.727 91	1.720 20	0.832 94	1.243 92	8.323 13	0.931 06
0.10	2.028 08	0.757 69	0.980 70	1.612 02	2.235 85	1
0.20	2.072 79	-0.476 32	0.975 13	0.839 42	3.963 19	0.987 81
0.30	1.518 02	-0.313 50	0.988 13	0.701 26	2.655 73	0.984 31
0.50	1.113 07	-0.196 54	0.997 37	0.017 40	3.856 92	0.362 96

慢,表明颗粒内的扩散过程限制了整体吸附速率。由于孔隙内的扩散路径较长且复杂,CBZ 分子需要较长的时间才能达到稳定的吸附状态。由表 6~表 8 可知,常数 C 均不为 0,两个阶段的拟合方程均未经过原点,说明颗粒内扩散不是唯一的速率控制步骤,还有其他过程控制反应速率,这些过程共同构成限速^[16]。因此,GAC 吸附 CBZ 的过程中,吸附速率可能由表面吸附和颗粒内扩散这两个过程共同控制。这一结论与 Yu 等^[14]的研究结果一致,他们在研究 CBZ 在纳米多孔碳上的吸附过程中也得出了类似的结论。

2.2 吸附等温线研究

Langmuir 模型方程假设:吸附位点是均匀的,每个位点容纳一个吸附质分子或离子;假设单层吸附,被吸附的分子或离子之间不存在相互作用^[13,17]。Langmuir 等温线方程如式(6)^[13]。

$$Q_{E,\text{exp}} = \frac{Q_m K_L C_E}{1 + K_L C_E} \tag{6}$$

其中: Q_m ——最大吸附量,mg/g;
 K_L ——吸附等温线常数,L/mg。

Freundlich 吸附等温线模型描述的是可逆的非理想吸附过程。与 Langmuir 等温线模型不同,

Freundlich 模型并不局限于单层吸附,它也可用于多层吸附^[17]。Freundlich 等温线方程如式(7)^[13]。

$$Q_{E,\text{exp}} = K_F C_E^{\frac{1}{n}} \tag{7}$$

其中: K_F ——Freundlich 经验常数, $(\text{mg/g}) \cdot (\text{L/mg})^n$;
 n ——吸附剂吸附强度相关常数。

Langmuir 和 Freundlich 等温模型的拟合结果如图 3 所示,相应参数如表 9 所示。得到的 R^2 表明,

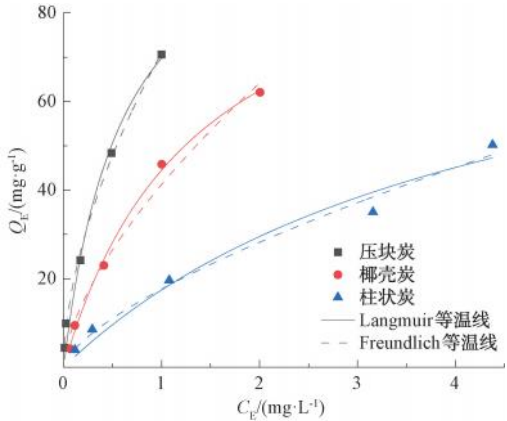


图 3 不同种类 GAC 的 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线
Fig. 3 Langmuir and Freundlich Adsorption Isotherms of Different Kinds of GAC

对于煤质的压块炭和柱状炭, Freundlich 模型更适合 CBZ 的吸附; 而对于椰壳炭, Langmuir 模型比 Freundlich 模型更适合 CBZ 的吸附。这表明 CBZ 在椰壳炭表面形成了单分子层, 吸附位点在椰壳炭表面均匀分布; 而 CBZ 在压块炭和柱状炭表面形成了多分子层, 是由不同吸附位点或机制共同作用引起的非均相吸附。在 Langmuir 模型中, K_L 表示吸附质与吸附剂表面之间的相互作用程度^[14]。压块炭对

应的 K_L 值较高, 柱状炭较低, 表明 CBZ 与 GAC 之间的相互作用为压块炭>椰壳炭>柱状炭。

此外, Freundlich 拟合结果也显示了相同的趋势。 K_F 反映了吸附剂的吸附容量, 其值越大, 吸附剂与吸附质之间的结合力越强; n 是一个非线性因子, 其值通常大于 1, 如果 $1/n$ 为 0~1, 则吸附过程容易, 而 $1/n$ 大于 1, 则吸附过程困难。 n 值表明, CBZ 在 3 种 GAC 上的吸附都很容易。

表 9 不同种类 GAC 吸附 CBZ 等温线模型参数

Tab. 9 Parameters of Isotherm Model for Adsorption of CBZ by Different Kinds of GAC

活性炭种类	Freundlich			Langmuir		
	$1/n$	$K_F / [(\text{mg} \cdot \text{g}) \cdot (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})^n]$	R^2	$Q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_L / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	R^2
压块炭	0.569 75	71.002 33	0.997 56	112.117	1.650 24	0.986 01
椰壳炭	0.644 52	41.217 19	0.981 62	106.385	0.717 87	0.996 23
柱状炭	0.678 18	17.633 61	0.987 73	95.705	0.222 94	0.973 60

2.3 吸附热力学研究

热力学分析可以揭示与吸附相关的内能变化的更多细节。本文通过热力学公式对不同种类 GAC 吸附 CBZ 的热力学参数进行线性拟合, 热力学计算如式(8)~式(10)^[18]。

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_D \quad (8)$$

$$K_D = \frac{C_0 - C_E}{C_E} \quad (9)$$

$$\ln K_D = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (10)$$

其中: K_D ——分配系数;

C_0 ——为溶液中溶质的初始质量浓度, mg/L;

C_E ——平衡质量浓度, mg/L;

T ——温度, K;

ΔG^0 ——吉布斯自由能, kJ/mol;

ΔH^0 ——焓值, kJ/mol;

ΔS^0 ——熵值, kJ/(mol·K);

R ——通用气体常数, 取值为 8.314 J/(mol·K)。

图 4 显示了不同反应温度下 3 种不同种类 GAC 对 CBZ 的吸附情况。通过对 $\ln K_D$ 与 $1/T$ 之间的线性关系图进行分析, 可以计算出 ΔH^0 和 ΔS^0 的值, 计算结果如图 5 所示, 并在表 10 中列出。

3 种 GAC 吸附 CBZ 的标准 ΔG^0 均为负值, 表明吸附过程是自发进行的。 ΔG^0 绝对值的增大表明吸

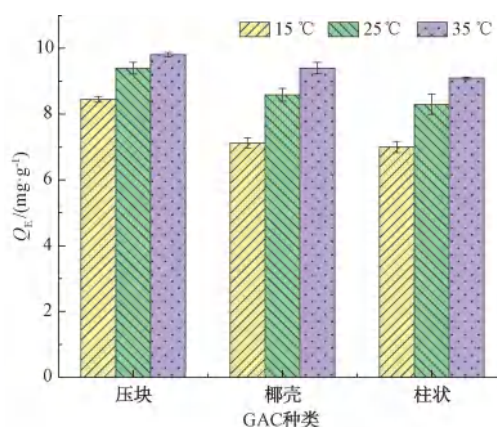


图 4 不同反应温度下不同种类 GAC 对 CBZ 的吸附

Fig. 4 Adsorption of Different Kinds of GAC on CBZ under Different Reaction Temperatures

附的驱动力随温度的升高而增大, 高温有利于吸附的进行。在同一温度下比较不同种类 GAC 的 ΔG^0 绝对值可得吸附驱动力: 压块炭>椰壳炭>柱状炭。 ΔH^0 的正值表明吸附过程为吸热反应, 这与图 4 的试验结果一致。此外, ΔS^0 的正值表明在活性炭吸附 CBZ 的过程中, 固液界面的混乱度增加。这一结果与 Suriyanon 等^[16] 研究 CBZ 在粉末活性炭 PAC 上的热力学结论一致。

CBZ 分子具有一定的极性(如氨基、酰胺基等官能团), 这些极性基团能够与活性炭表面的官能团(如羧基、酚羟基等)发生强烈的相互作用。高温时, CBZ 与 GAC 的相互作用增强, 使得吸附过程为吸热反应。在吸附过程中, 随着温度升高, CBZ 分子

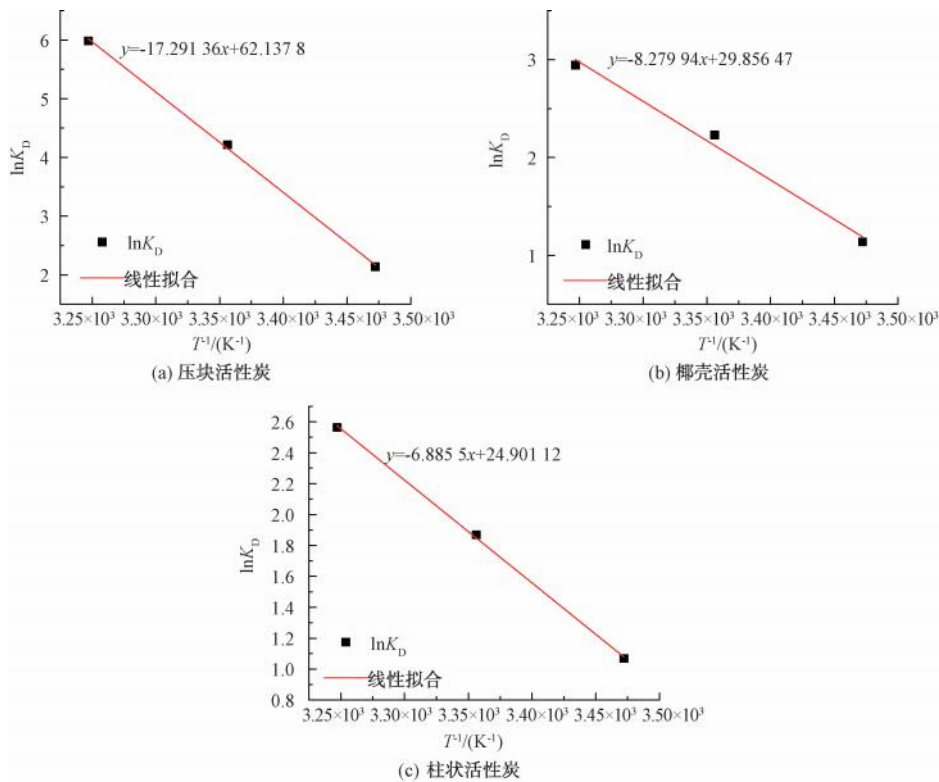


图 5 不同种类 GAC 热力学图解

Fig. 5 Thermodynamic Illustration of Different Types of GACs

与吸附位点的结合力增强,从而促进了吸附过程的自发性和吸附量的增加。

表 10 不同种类 GAC 吸附热力学参数
Tab. 10 Thermodynamic Parameters of Adsorption for Different Kinds of GAC

GAC 种类	T/K	$\ln K_D$	$\Delta G^0/$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\Delta H^0/$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\Delta S^0/$ [$\text{kJ}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$]
压块炭	288	2.143	-5.131	143.76	0.517
	298	4.219	-10.453		
	308	5.989	-15.336		
椰壳炭	288	1.139	-2.727	68.84	0.248
	298	2.231	-5.527		
	308	2.944	-7.539		
柱状炭	288	1.069	-2.561	57.25	0.207
	298	1.870	-4.634		
	308	2.564	-6.565		

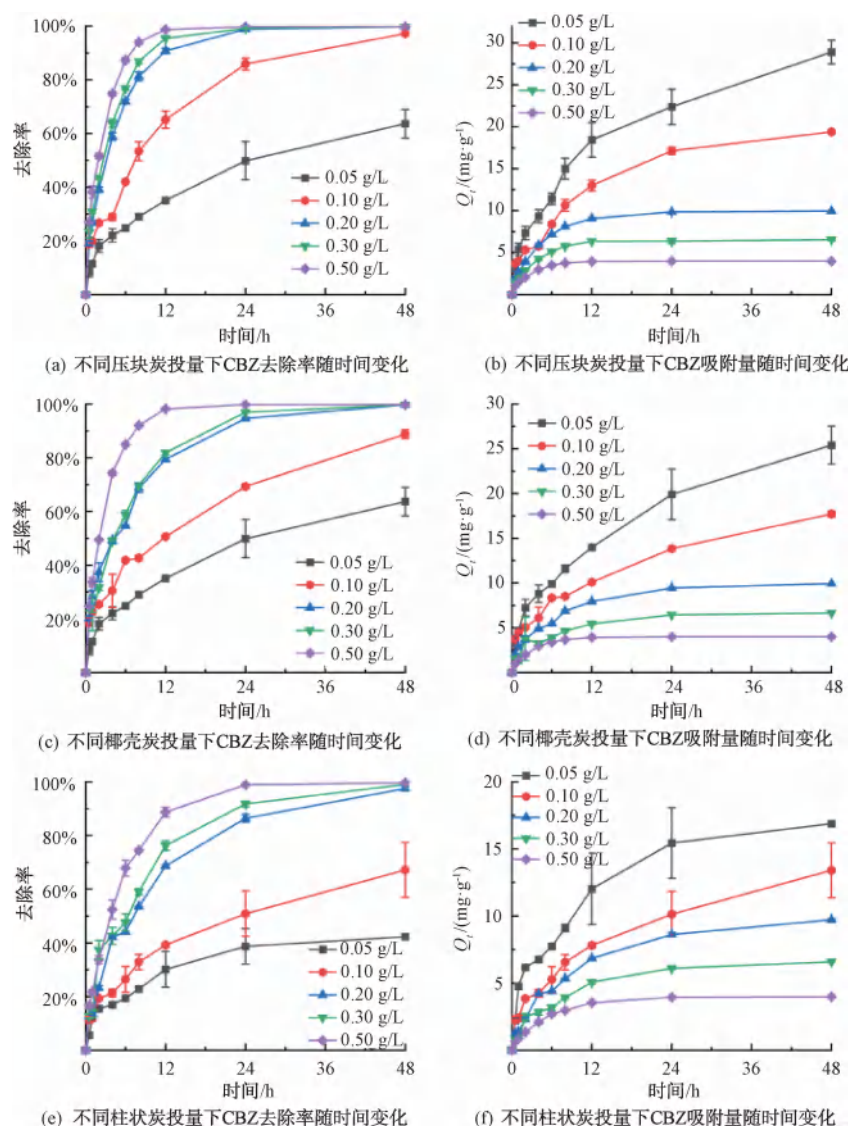
2.4 投加量的影响

在初始质量浓度为 2.0 mg/L 的条件下,投加不同质量(0.05、0.10、0.20、0.30、0.50 g/L)活性炭,置于温度 25 ℃,转速 180 r/min 的恒温振荡培养箱中振荡,于不同时刻取样测定。3 种 GAC 对 CBZ 的

吸附效果如图 6 所示。

由图 6 可知,随着活性炭投加量的增加,CBZ 的去除率增加,表明随着 GAC 的增多,吸附剂的比表面积增大,吸附位点增多,CBZ 与吸附剂的接触面积增大^[19]。这些位点可以与 CBZ 的极性基团(如氨基、酰胺基等)发生相互作用,从而提升吸附效率。

对于 CBZ 的吸附来说,3 种 GAC 在投加量为 0.2~0.5 g/L 时,于 24 h 内达到吸附平衡,在少于 0.2 g/L 的投加量下,吸附持续进行,吸附达到平衡需要更长的时间。在投加量为 0.2 g/L,吸附时间 24 h 条件下,压块炭对 CBZ 的去除率为 99.75%,平衡吸附量为 9.87 mg/g;椰壳炭对 CBZ 的去除率为 94.64%,平衡吸附量为 9.44 mg/g;柱状炭对 CBZ 的去除率为 86.42%,平衡吸附量为 8.62 mg/g。因此,对于 CBZ 的吸附效果,从平衡吸附量的对比来讲,压块炭最好,椰壳炭次之,柱状炭最差,且 3 种 GAC 的去除率均达到 85% 以上。研究还发现,在 0.2 g/L 的 GAC 投加量下吸附效果均较好,而继续加大投加量对去除率影响不大,说明 CBZ 分子在此浓度下已经能够充分与活性炭的吸附位点发生相互



注: CBZ 质量浓度为 2 mg/L、超纯水温度为 (25.0±0.2)℃、恒温振荡箱转速为 180 r/min。

图 6 不同种类 GAC 投量下 CBZ 去除率以及 CBZ 吸附量随时间的变化

Fig. 6 CBZ Removal Rate and CBZ Adsorption with Time at Different Kinds of GAC Dosage

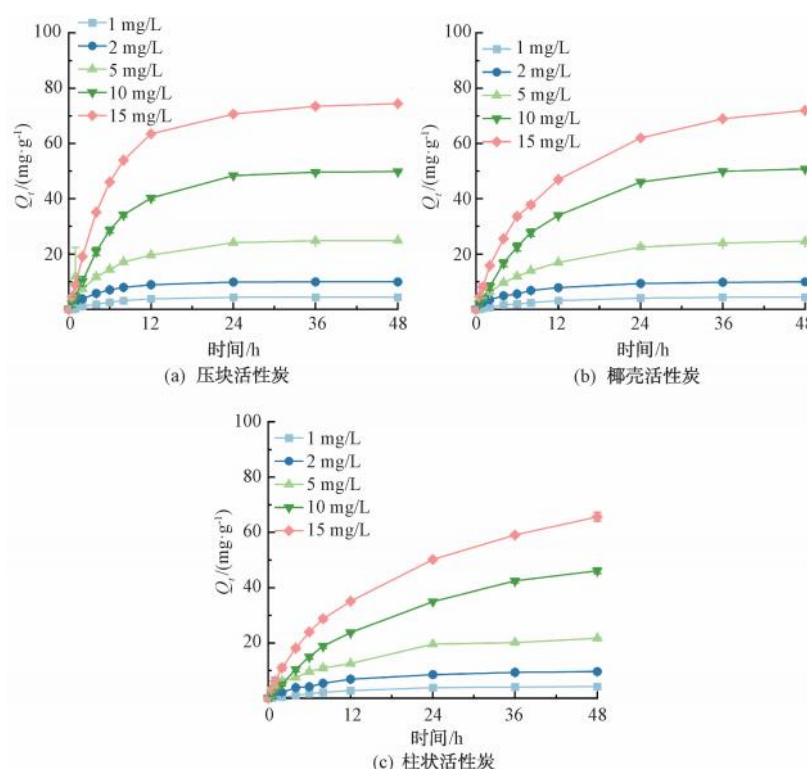
作用,从而达到吸附平衡。综合考虑去除效果和经济效益,选择 0.2 g/L 作为最佳投加量,吸附平衡时间为 24 h。

2.5 初始质量浓度的影响

设置不同的初始质量浓度 (1、2、5、10、15 mg/L),投加相同质量浓度 (0.2 g/L) 的活性炭,在 25℃ 条件下置于转速为 180 r/min 的恒温振荡培养箱中振荡,并于不同时间间隔取样。其吸附结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着初始浓度的提高,吸附量也在提高。这是由于溶液中 CBZ 分子的浓度梯度增大,增加了分子向活性炭表面扩散的驱动力。CBZ 分子

中的极性基团 (如酰胺基、氨基) 能够通过氢键作用与活性炭表面的官能团 (如羧基、酚羟基) 结合,而非极性结构的芳环则可以与活性炭表面的 π - π 相互作用位点结合。较高浓度的 CBZ 分子可以更充分地占据这些表面吸附位点,导致吸附量显著增加。认为 24 h 的吸附量为平衡吸附量,在初始质量浓度为 1 mg/L 时,压块活性炭的平衡吸附量为 4.395 mg/g,椰壳活性炭的平衡吸附量为 4.083 mg/g,柱状活性炭的平衡吸附量为 3.875 mg/g;在初始质量浓度为 15 mg/L 时,压块活性炭的平衡吸附量为 70.62 mg/g,椰壳活性炭的平衡吸附量为 62.065 mg/g,柱状活性炭的平衡吸附量为 50.191 mg/g。



注:投加量为 0.2 g/L、超纯水温度为 $(25.0 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 、恒温振荡箱转速为 180 r/min。

图 7 不同质量浓度下 GAC 对 CBZ 的吸附量

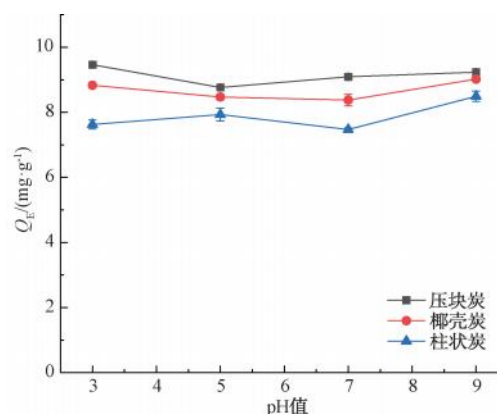
Fig. 7 Adsorption of CBZ by GAC at Different Mass Concentrations

可以看出,随着初始浓度的升高,3 种 GAC 之间的平衡吸附量差距越来越大,压块活性炭表现出更为明显的优势,而在质量浓度只有 1 mg/L 时,3 种炭对 CBZ 的吸附量接近。这是因为在初始浓度较低时,溶液中 CBZ 分子的数量有限,3 种活性炭的吸附位点尚未饱和,因此能够充分利用其表面活性位点与 CBZ 分子结合。这时,孔隙结构的影响尚未显现,吸附效果主要取决于表面吸附过程,导致三种活性炭的吸附量较为接近。这表明高浓度的 CBZ 更能充分利用 GAC 的吸附能力。

2.6 pH 的影响

溶液 pH 会影响吸附剂的形态、有机分子上的官能团以及所选污染物分子的质子化或去质子化形式与吸附剂位点之间的不同亲和力和竞争^[20]。为研究 pH 对 3 种 GAC 吸附 CBZ 的影响,进行初始浓度为 2 mg/L,投炭量 0.2 g/L,吸附时间为 24 h,溶液 pH 值分别为 3、5、7、9 的吸附试验,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,pH 对 GAC 吸附 CBZ 的影响相对较小。CBZ 的两个 pK_a 值分别为 2.3 和 13.9,在试



注:CBZ 质量浓度为 2 mg/L、投加量为 0.2 g/L、超纯水温度为 $(25.0 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 、恒温振荡箱转速为 180 r/min。

图 8 不同 pH 条件下 3 种 GAC 对 CBZ 的吸附量

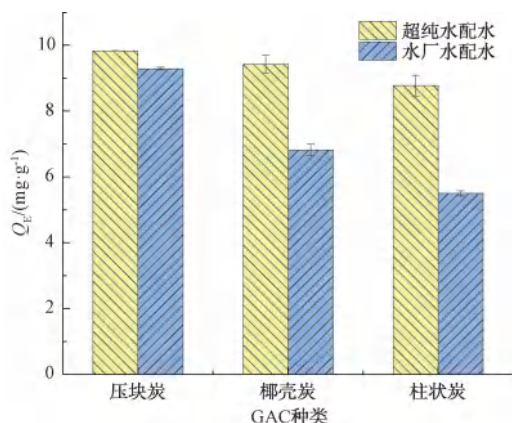
Fig. 8 Adsorption of CBZ by Three GACs under Different pH Conditions

验范围内(pH 值为 3~9),CBZ 以非离子形式存在,因此静电作用在 GAC 吸附 CBZ 的过程中未发挥主导作用。此外,CBZ 的分子特性表明,其分子中的酰胺基和芳环结构使其具有一定的极性和疏水性。有机化合物的疏水性[以 $\log K_{ow}$ 表示]对微污染物的

去除起着重要作用,因为具有较高 $\log K_{ow}$ 值 ($\log K_{ow} > 2$) 的化合物在活性炭上应显示出较强的吸附亲和力^[21]。CBZ 的 $\log K_{ow}$ 为 2.45,疏水键在 CBZ 吸附过程中发挥着重要作用^[22]。

2.7 水基质的影响

为研究不同水质背景对 3 种 GAC 吸附量的影响,采用超纯水和北京第九自来水厂沉淀后出水两种水体分别配置质量浓度为 2 mg/L 的 CBZ 溶液, GAC 投加量为 0.2 g/L,吸附时间为 24 h。试验结果如图 9 所示。水厂水的水质参数如表 11 所示。



注:CBZ 质量浓度为 2 mg/L、投加量为 0.2 g/L、温度为 (25.0±0.2)℃、恒温振荡箱转速为 180 r/min。

图 9 不同水质背景对 3 种 GAC 吸附 CBZ 的影响

Fig. 9 Effects of Different Water Quality Backgrounds on Adsorption of CBZ by Three GAC

表 11 水厂水水质参数

Tab. 11 Parameters of Water Quality in WTPs

pH 值	温度/℃	UV ₂₅₄ /(cm ⁻¹)	DOC/(mg·L ⁻¹)	COD/(mg·L ⁻¹)
7.8	22	0.022 3	3.73	1.48

注:UV₂₅₄—水样在 254 nm 波长紫外光下的吸光度;DOC—溶解有机碳;COD—化学需氧量。

由图 9 可知,在超纯水和自来水这两种不同的水质背景下,GAC 对 CBZ 的吸附量有显著差异,尤其是柱状炭。超纯水配水条件下,柱状炭的吸附量为 8.775 mg/g,而在自来水配水条件下,吸附量降至 5.5 mg/g。这一变化主要归因于自来水中 DOM 的干扰,尤其是 DOM 与 CBZ 分子在吸附剂表面的竞争作用。自来水中含有丰富的天然有机物(NOM),这些大分子有机物与 CBZ 分子竞争 GAC 表面活性位点,导致部分吸附位点被 NOM 占据,进而降低了 CBZ 的吸附量。NOM 的分子结构通常包

含较强的疏水性基团(如芳香环和酚类基团),这些基团与 CBZ 的芳香环及酰胺基之间的相互作用可能会干扰 CBZ 的吸附过程^[23],此外,NOM 的存在还可能导致 GAC 的孔隙堵塞,尤其是在 NOM 和 CBZ 分子的大小接近时,NOM 分子可能会填充 GAC 的微孔或中孔,从而阻碍 CBZ 分子进入孔隙内部进行吸附^[11]。对于这三种不同种类的 GAC,压块炭受水质影响最小,柱状炭受水质影响最大。与柱状炭相比,压块炭是利用原料煤的自黏结性压块成型,不需添加黏结剂,且反应活性高,易于发育出微孔和中孔,CBZ 分子量不大,更易被这些微孔和中孔吸附^[23]。

2.8 FTIR 表征

不同种类 GAC 吸附 CBZ 前后的傅里叶变换红外光谱如图 10 所示。吸附前,GAC 的红外光谱在 3 438 cm⁻¹ 处表现出显著的红外峰,可能来自羧基、醇类或酚类的羟基键(O—H)^[24];2 929 cm⁻¹ 和 2 854 cm⁻¹ 处的谱峰归属于饱和—CH—,—CH₂—和—CH₃ 烷基中 C—H 的对称和反对称伸缩振动^[25];1 645 cm⁻¹ 处的谱峰可归因于羧基的 C=O 不对称振动;1 569 cm⁻¹ 处的谱峰可能是芳香环的 C=C 振动^[24]。在吸附过程之后,可以观察到 3 438 cm⁻¹ 处几乎不发生变化,这一现象表明在 GAC 吸附 CBZ 的过程中,氢键相互作用并未显著参与。但在 1 569 cm⁻¹ 处谱峰发生变化,说明芳香环的 C=C 参与吸附过程,因此在吸附过程中可能存在 π - π 相互作用,这种相互作用发生在 CBZ 分子的芳香环和 GAC 石墨烯层的芳香结构之间^[26]。FTIR 图谱中的

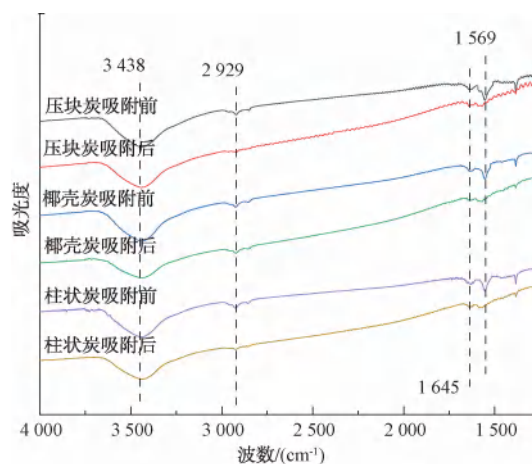


图 10 吸附前后 GAC 的 FTIR 图谱

Fig. 10 FTIR Spectra of GAC before and after Adsorption

1 645 cm^{-1} 处(羧基 $\text{C}=\text{O}$ 不对称振动)未显示出显著变化,可能表明 GAC 表面的羧基并未与 CBZ 分子中的酰胺基或其他极性基团形成强的化学键。然而,羧基和 $\text{C}=\text{O}$ 之间可能存在弱的范德华力或偶极-偶极相互作用。

3 结论

(1)CBZ 在 GAC 上的吸附动力学均符合拟二级动力学模型,CBZ 与 GAC 之间的化学吸附是吸附过程的限速步骤。由颗粒内扩散结果可知,吸附速率由表面吸附和颗粒内扩散共同控制。CBZ 在压块炭和柱状炭上的吸附过程更符合 Freundlich 等温吸附模型,说明 CBZ 在压块炭和柱状炭上的吸附过程以多分子层吸附为主,吸附过程是由不同吸附位点或机制共同作用引起的非均相吸附。在椰壳炭上的吸附过程更符合 Langmuir 等温吸附模型,表明 CBZ 在椰壳炭上的吸附过程主要是单分子层吸附。热力学研究表明,这种吸附是一种吸热、有利和自发的吸附。

(2)在初始质量浓度为 2 mg/L 的 CBZ 溶液中,活性炭的最佳投加量为 0.2 g/L,吸附时间 24 h 时可达到吸附平衡。对于 CBZ 的吸附效果,煤质压块炭最好,椰壳炭次之,煤质柱状炭最差。

(3)吸附质的浓度对吸附量也有影响。当吸附质的浓度增加时,更多的吸附质分子或离子会与吸附剂发生作用,因此吸附量也会增加。吸附剂的吸附位点有限,当吸附质浓度达到一定水平后,吸附位点会达到饱和,吸附量将不再增加。高浓度的 CBZ 更能充分利用活性炭的吸附能力。

(4)在超纯水和水厂水配水不同水质背景下活性炭对 CBZ 的吸附有很大差别。原因可能是水厂水背景中存在 NOM 与 CBZ 竞争吸附剂的活性吸附位点,NOM 与吸附剂表面之间的疏水相互作用干扰了活性炭对 CBZ 的吸附。

(5)氢键相互作用在 GAC 吸附 CBZ 过程中并不明显,CBZ 分子的芳香环和活性炭石墨烯层的芳香结构之间存在 π - π 相互作用。静电作用在活性炭吸附 CBZ 过程中不发挥作用,吸附过程由疏水键和 π - π 键主导。

参考文献

[1] Yadav A, Rene E R, Mandal M K, et al. Threat and sustainable technological solution for antineoplastic drugs pollution: Review

on a persisting global issue [J]. Chemosphere, 2021, 263: 128285. DOI: j. chemosphere. 2020. 128285.

[2] Su H, Dou X D, Xu D D, et al. Fe^0 -loaded superfine powdered activated carbon prepared by ball milling for synergistic adsorption and persulfate activation to remove aqueous carbamazepine [J]. Chemosphere, 2022, 293: 133665. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2022. 133665.

[3] Luo Y L, Guo W S, Ngo H H, et al. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2014, 473: 619 - 641. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2013. 12. 065.

[4] Calisto V, Domingues M R M, Erny G L, et al. Direct photodegradation of carbamazepine followed by micellar electrokinetic chromatography and mass spectrometry [J]. Water Research, 2011, 45(3): 1095-1104.

[5] Cui Q T, Fan M K, Liu X Y, et al. Activation ability of Yellow River (Huanghe) suspended sediment to degrade carbamazepine pollutants in water environment using peroxymonosulfate: Performance, mechanism, and potential toxicity evaluation [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 337: 126422. DOI: 10. 1016/j. seppur. 2024. 126422.

[6] Pereira D, Rocha L S, Gil M V, et al. *In situ* functionalization of a cellulosic-based activated carbon with magnetic iron oxides for the removal of carbamazepine from wastewater [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(15): 18314-18327.

[7] Ji L L, Liu F L, Xu Z Y, et al. Adsorption of pharmaceutical antibiotics on template-synthesized ordered micro- and mesoporous carbons [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(8): 3116-3122.

[8] Al-Ghoul N E, Albarghouti G A, Qandeel R G. Activated carbon-based pomegranate peels as an efficient removal method for carbamazepine [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(7): 821. DOI: 10. 1007/s10661-023-11393-5.

[9] 高宁. 颗粒活性炭对水中痕量医药类物质的吸附特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.

Gao N. Adsorption characteristics of pharmaceuticals in aqueous on granular activated carbon [D]. Xi ' an: Xi ' an University of Architecture and Technology, 2015.

[10] 周巡, 刘雨瑶, 钟永科. 氨气改性煤质炭对卡马西平的吸附性能研究 [J]. 炭素技术, 2023, 42(2): 49-55.

Zhou X, Liu Y Y, Zhong Y K. Adsorption performance of carbamazepine on ammonia-modified coal-based activated carbon [J]. Carbon Techniques, 2023, 42(2): 49-55.

[11] 郭菲菲. 活性炭吸附去除水中阿特拉津及臭氧微气泡原位再生效能 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

Guo F F. Adsorption removal effect of atrazine in water by

- granular activated carbon and its in-situ regeneration with ozone microbubbles [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [12] Largitte L, Pasquier R. A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, 109: 495–504. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.02.006.
- [13] Švábová M, Šváb M, Vorokhta M. Comparison of microwave and thermal reactivation of spent activated carbons: A pilot scale demonstration[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 67: 106189. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.106189.
- [14] Yu Y W, Chen D Z, Xie S S, et al. Adsorption behavior of carbamazepine on Zn-MOFs derived nanoporous carbons: Defect enhancement, role of N doping and adsorption mechanism[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107660. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107660.
- [15] Ashraf M, Galal M M, Matta M E. Removal of danofloxacin and ofloxacin as different generations of fluoroquinolones from aqueous solutions through the adsorption process using granular activated carbon: A comparative study, mechanism elucidation, and applicability investigation[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, 71: 679–690. DOI: 10.1016/j.aej.2023.03.096.
- [16] Suriyanon N, Punyapalakul P, Ngamcharussrivichai C. Mechanistic study of diclofenac and carbamazepine adsorption on functionalized silica-based porous materials [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 214: 208–218. DOI: 10.1016/j.cej.2012.10.052.
- [17] Al-Ghouti M A, Da'ana D A. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122383. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122383.
- [18] 周家晖. 改性活性炭-非均相类 Fenton 耦合工艺对四环素的去除效能与机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Zhou J H. Removal efficiency and mechanism of tetracycline by coupling modified activated carbon and heterogeneous Fenton-like oxidation processes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [19] Li R S, Sun W, Xia L F, et al. Adsorption of toxic tetracycline, thiamphenicol and sulfamethoxazole by a granular activated carbon (GAC) under different conditions[J]. *Molecules*, 2022, 27(22): 7980. DOI: 10.3390/molecules27227980.
- [20] Khnifira M, Boumya W, Attarki J, et al. Adsorption characteristics of dopamine by activated carbon: Experimental and theoretical approach [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2023, 1278: 134964. DOI: 10.1016/j.molstruc.2023.134964.
- [21] Álvarez-Torrellas S, Peres J A, Gil-Álvarez V, et al. Effective adsorption of non-biodegradable pharmaceuticals from hospital wastewater with different carbon materials [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 320: 319–329. DOI: 10.1016/j.cej.2017.03.077.
- [22] Décima M A, Marzeddu S, Barchiesi M, et al. A review on the removal of carbamazepine from aqueous solution by using activated carbon and biochar [J]. *Sustainability*, 2021, 13(21): 11760. DOI: 10.3390/su132111760.
- [23] 李景乐, 解伟. 水深度净化用活性炭的指标及选择[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2021(8): 85–88.
- Li J L, Xie W. Discussion on indexes and selection of activated carbon for deep water purification [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2021(8): 85–88.
- [24] Pauletto P S, Lütke S F, Dotto G L, et al. Adsorption mechanisms of single and simultaneous removal of pharmaceutical compounds onto activated carbon: Isotherm and thermodynamic modeling [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 336: 116203. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116203.
- [25] 李娜, 朱健, 查庆芳. 活性炭表面基团的定性和定量分析[J]. *高等学校化学学报*, 2012, 33(3): 548–554.
- Li N, Zhu J, Zha Q F. Quantitative and qualitative analyses of oxygen-containing surface functional groups on activated carbon [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2012, 33(3): 548–554.
- [26] Moreno-Castilla C. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials[J]. *Carbon*, 2004, 42(1): 83–94.