

# 零价铁掺杂氮化碳吸附水中卡马西平性能研究

许飞亚<sup>a</sup>, 姬亚军<sup>b\*</sup>, 方 堃<sup>c</sup>, 金紫荷<sup>a</sup>, 郑凌云<sup>a</sup>

(信阳师范大学 a. 分析测试中心; b. 地理科学学院; c. 信阳理工学院, 河南 信阳 464000)

**摘要:** 针对传统碳材料吸附有机污染物性能不足和固液分离性能较差的缺陷, 合成零价铁掺杂氮化碳(Fe@N/C)吸附剂。与氮化碳(N/C)相比, Fe@N/C具有更高的比表面积、孔容和孔径, 有利于含N和含O活性位点的暴露以及污染物的吸附。以卡马西平(CBZ)为目标污染物, 详细研究了溶液pH、吸附时间和污染物浓度对Fe@N/C吸附效果的影响。结果表明, Fe@N/C能在较宽pH范围内吸附水中CBZ; 吸附过程遵循准二级动力学模型和Langmuir等温模型; 拟合得到Fe@N/C的最大吸附量为56.88 mg/g; Fe@N/C具有良好的再生利用性能, 而且吸附完成后利用磁铁即可快速将吸附剂从水中分离开来; 吸附机理研究表明, Fe@N/C主要通过 $\pi$ - $\pi$ 电子供体-受体相互作用和氢键作用吸附去除水中的CBZ。

**关键词:** 零价铁; 氮化碳; 吸附; 卡马西平

中图分类号: TQ424; X506

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on the adsorption of carbamazepine by zero valent iron doped carbon nitride in water

XU Feiya<sup>a</sup>, JI Yajun<sup>b\*</sup>, FANG Kun<sup>c</sup>, JIN Zihe<sup>a</sup>, ZHENG Lingyun<sup>a</sup>

(a. Analysis & Testing Center; b. College of Geographic Sciences; c. Xinyang Institute of Technology, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** Zero valent iron doped carbon nitride (Fe@N/C) was synthesized to address the shortcomings of insufficient adsorption performance and poor solid-liquid separation performance of traditional carbon materials. Compared to carbon nitride (N/C), Fe@N/C had a higher BET surface area, pore volume and pore size, facilitating the exposure of N- and O-contained active sites, as well as the adsorption of pollutants. Carbamazepine (CBZ) was selected as the target pollutant, and the effect of solution pH, adsorption time and pollutant concentration on the adsorption performance of Fe@N/C was studied in detail. The results indicated that CBZ could be adsorbed onto Fe@N/C in a wide pH range. The adsorption process conformed to the pseudo-second order kinetic model and Langmuir isothermal model. The maximum adsorption capacity of Fe@N/C obtained by fitting with Langmuir isothermal model reached to 56.88 mg/g. Fe@N/C exhibited good reusability, and the adsorbent can be quickly separated from water using a magnet after adsorption. The adsorption mechanism indicated that CBZ was adsorbed onto Fe@N/C through  $\pi$ - $\pi$  electron donor acceptor interactions and hydrogen bonding.

**Key words:** zero valent iron; carbon nitride; adsorption; carbamazepine

收稿日期: 2024-10-06; 修回日期: 2024-11-05; \*通信联系人, E-mail: jiyajun928@163.com

基金项目: 河南省自然科学基金项目(252300421568); 河南省科技攻关计划项目(242102320078); 信阳师范大学青年科研基金项目(2024-QN-043); 信阳师范大学“南湖学者奖励计划”青年项目; 河南省水土环境污染协同防治重点实验室开放基金项目(KLSPWSEP-A05)

作者简介: 许飞亚(1990—), 女, 陕西咸阳人, 实验师, 硕士, 主要从事环境催化材料的设计及性能优化研究; 姬亚军(1990—), 男, 河南信阳人, 副教授, 博士, 主要从事环境污染修复研究。

引用格式: 许飞亚, 姬亚军, 方 堃, 等. 零价铁掺杂氮化碳吸附水中卡马西平性能研究[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版), 2026, 39(1): 66-73.

XU Feiya, JI Yajun, FANG Kun, et al. Study on the adsorption of carbamazepine by zero valent iron doped carbon nitride in water [J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(1): 66-73.

## 0 引言

新污染物主要包括持久性有机污染物、内分泌干扰物、微塑料、药物和个人护理产品等,它们具有毒性强、生物累积性强等特点。即使低浓度的新污染物长期暴露在环境中,也可能对人类和生态系统造成严重危害<sup>[1-3]</sup>。在各国地表水中,均或多或少检测出各种新污染物。LI等<sup>[4]</sup>对中国7条主要河流和4个海域水质检测中共发现94种抗生素,其中有12种抗生素出现频率最高,包括3种磺胺类、2种四环素类、4种氟喹诺酮类和3种大环内酯类。因此,国家多次在工作报告中提出,要制定并实施新污染物治理行动方案,要落实新污染物治理工作。

水中新污染物治理方法主要有生物降解法、膜过滤法、高级氧化法、光催化法和吸附法等<sup>[5-8]</sup>。其中,生物降解法因新污染物毒性强导致效率较低;膜过滤法存在运行成本高、前处理要求较高的缺陷;高级氧化法和光催化法可能产生毒性更强的中间产物;而吸附法具有操作简单、成本低、不产生二次污染等特点<sup>[9-10]</sup>。研究表明,多孔碳材料能够有效吸附水中有机污染物<sup>[11]</sup>。利用碳酸氢钠改性的丝瓜络生物炭对卡马西平(CBZ)的吸附量达到125.52 mg/g<sup>[12]</sup>。氨气改性煤质炭能够显著增加炭材料表面的含氮量,从而提高其对CBZ的吸附性能<sup>[13]</sup>。但是,粉末状多孔碳材料在水中固液分离性能较差,限制了其实际应用。开发具有磁性的多孔碳吸附剂能够同时解决污染物去除和吸附剂固液分离的问题。CBZ是一种广泛使用的抗癫痫药物,其具有较高的稳定性,在地表水、地下水 and 城市污水中均被广泛检测出<sup>[14]</sup>。因此,本文将通过制备具有磁性的零价铁掺杂氮化碳,高效吸附去除水中CBZ。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂

主要试剂有三聚氰胺、甘氨酸、六水合三氯化铁、卡马西平、氯化钠、无水硫酸钠、硝酸钠、无水磷酸二氢钠和碳酸氢钠。以上试剂均为分析纯,采购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

### 1.2 吸附剂制备

首先,称取5.00 g三聚氰胺、0.50 g甘氨酸和1.33 g六水合三氯化铁,并将它们加入50 mL去离

子水中制成混合溶液。然后,将该混合溶液在80 °C下搅拌蒸发水分,将获得的粉末在60 °C下继续干燥12 h。最后,将干燥后的粉末置于管式炉中,在N<sub>2</sub>氛围下,700 °C热解2 h,获得最终的吸附剂,记作Fe@N/C。除了未添加六水合三氯化铁外,氮化碳(N/C)的制备过程与Fe@N/C相同。

### 1.3 吸附剂表征

采用X射线衍射仪(XRD, Smartlab 9, 日本Rigaku)测试吸附剂的晶体结构,扫描范围为10°—90°,扫描速度为10 (°)/min。采用物理吸附仪(BET, ASAP 2460, 美国Micromeritics)测试吸附剂的比表面积和孔道结构。采用扫描电子显微镜(SEM, S4800, 日本Hitachi)测试吸附剂的形貌。采用X射线光电子能谱仪(XPS, K-ALPHA, 美国ThermoFisher)测试吸附剂表面元素和化学态,测试结果根据C 1s标准峰位284.8 eV进行校正。

### 1.4 吸附实验

pH影响实验:利用0.1 mol/L的HCl或NaOH调节CBZ溶液的pH值(4~12),分别称取0.004 0 g吸附剂于离心管中,并加入20 mL不同pH的CBZ溶液(10 mg/L)。将离心管置于恒温摇床中,在25 °C和200 r/m下振荡吸附24 h。吸附完成后,溶液经0.45 μm的滤膜过滤后,利用紫外可见分光光度计(UV-Vis, TU-1901, 北京普析)测试溶液中剩余CBZ的浓度(最大吸收波长为285 nm)。吸附剂对CBZ的去除率(*R*)和吸附量(*Q*)的计算方法分别如式(1)和式(2)所示。

$$R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$Q = \frac{C_0 - C_t}{m} \times V, \quad (2)$$

式中:*R*为去除率,单位%;*Q*为吸附量,单位mg/g;*C*<sub>0</sub>为CBZ初始浓度,单位mg/L;*C*<sub>*t*</sub>为*t*时刻CBZ浓度,单位mg/L;*m*为吸附剂质量,单位g;*V*为溶液体积,单位L。

吸附动力学实验:分别量取100 mL不同浓度的CBZ溶液(5、10、20 mg/L)于烧杯中,并加入0.020 0 g吸附剂,在25 °C下反应60 min,测试吸附剂吸附量随时间变化情况。利用准一级(式(3))和准二级(式(4))动力学模型对结果进行拟合,以对吸附机理进行分析<sup>[15]</sup>。

$$Q_t = Q_c(1 - e^{-K_1 t}), \quad (3)$$

$$Q_t = \frac{Q_c^2 K_2 t}{1 + K_2 Q_c t}, \quad (4)$$

式中:  $Q_t$  为  $t$  时刻的吸附量, 单位  $\text{mg/g}$ ;  $Q_e$  为平衡吸附量, 单位  $\text{mg/g}$ ;  $K_1$  为准一级动力学吸附速率常数, 单位  $\text{min}^{-1}$ ;  $t$  为吸附时间, 单位  $\text{min}$ ;  $K_2$  为准二级动力学吸附速率常数, 单位  $\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{min})$ 。

等温吸附实验: 分别称取 0.004 0 g 吸附剂加入 20 mL 不同浓度的 CBZ 溶液中 (5、10、20、30、40、50  $\text{mg/L}$ ), 在 25  $^{\circ}\text{C}$  下振荡吸附 24 h, 测试吸附平衡后溶液中 CBZ 的浓度。利用 Langmuir (式 (5))、Freundlich (式 (6)) 和 Temkin (式 (7)) 模型对等温吸附结果进行拟合。

$$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}, \quad (5)$$

$$Q_e = K_F C_e^{1/n}, \quad (6)$$

$$Q_e = \frac{8.31T}{b} \ln A + \frac{8.31T}{b} \ln C_e, \quad (7)$$

式中:  $Q_e$  为平衡吸附量, 单位  $\text{mg/g}$ ;  $Q_m$  为饱和吸附量, 单位  $\text{mg/g}$ ;  $C_e$  为 CBZ 平衡浓度, 单位  $\text{mg/L}$ ;  $K_L$  为结合常数, 单位  $\text{L/mg}$ ;  $K_F$  为吸附平衡常数, 单位  $\text{L/g}$ ;  $1/n$  为与吸附亲和力相关的常数;  $A$  为 Temkin 等温常数, 单位  $\text{L/g}$ ;  $b$  为 Temkin 等温吸附热, 单位  $\text{kJ/mol}$ ;  $T$  为温度, 单位  $\text{K}$ 。

共存离子实验: 分别向 20 mL 含有不同共存离子 ( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , 50  $\text{mg/L}$ ) 的 CBZ 溶液 (10  $\text{mg/L}$ ) 中加入 0.004 0 g 吸附剂。在 25  $^{\circ}\text{C}$  下振荡吸附 24 h, 测试吸附平衡后吸附剂的吸附量, 研究共存离子对吸附效果的影响。

重复利用实验: 吸附完成后, 磁性分离吸附剂, 利用乙醇脱附吸附剂上的 CBZ, 并用去离子水

清洗吸附剂, 完成吸附剂的再生。吸附剂重复利用 3 次, 研究吸附剂的重复利用性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附剂的理化性质

N/C 和 Fe@N/C 的 XRD 谱图如图 1 所示。N/C 只在 26.7 $^{\circ}$  处呈现出较宽的峰, 其对应于氮化碳的 (002) 晶面<sup>[16]</sup>。而 Fe@N/C 在此处的衍射峰明显降低, 并在 44.7 $^{\circ}$ 、65.0 $^{\circ}$  和 82.3 $^{\circ}$  处呈现出一组较强的衍射峰, 分别对应于  $\text{Fe}^0$  的 (110)、(200) 和 (211) 晶面 (JCPDS No.06-0696)<sup>[17]</sup>。表明 Fe@N/C 为  $\text{Fe}^0$  掺杂的氮化碳晶体。

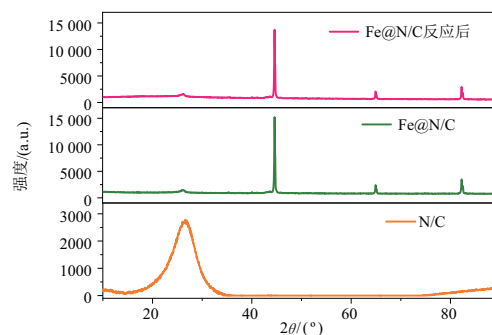


图 1 N/C 和 Fe@N/C 的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of N/C and Fe@N/C

图 2 为 N/C 和 Fe@N/C 的 BET 测试结果。根据国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 划分, N/C 和 Fe@N/C 的  $\text{N}_2$  吸脱附曲线均属于 IV 型 (图 2(a))。Fe@N/C 的吸脱附曲线形成明显的回滞环, 表明其具有中孔结构。

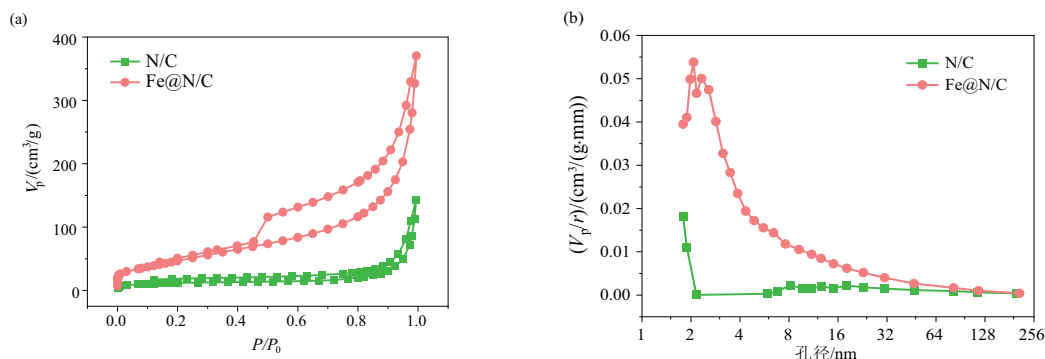


图 2 N/C 和 Fe@N/C 的  $\text{N}_2$  吸脱附等温线 (a) 和孔径分布 (b)

Fig. 2  $\text{N}_2$  adsorption/desorption isotherms (a) and pore size distribution (b) of N/C and Fe@N/C

从孔径分布曲线 (图 2(b)) 可知, Fe@N/C 的孔径主要为中孔。Fe@N/C 的比表面积是 N/C 的 3.08 倍。与 N/C 相比, Fe@N/C 具有更大的外表

面积、孔容和孔径 (表 1)。更大的比表面积能够使更多的活性位点暴露出来, 更大的孔容能够为 CBZ 吸附提供更多的空间, 更大的孔径能够提高

CBZ分子在Fe@N/C孔道内的扩散效率。

Fe@N/C的XPS谱图如图3所示。Fe@N/C表面检测到C、N、O和Fe(图3(a)),其中N 1s高分辨谱图可划分为5个峰,分别为399.24(吡啶N)、400.24(吡咯N)、401.67(Fe-N<sub>x</sub>)、403.74(石墨N)和406.05 eV(氧化态N)(图3(b))<sup>[18]</sup>。O 1s

高分辨谱图可划分为3个峰,分别为530.62(Fe—O)、532.14(C—O)和533.57 eV(O—C=O)(图3(c))<sup>[17]</sup>。丰富的含N和含O基团为CBZ的吸附提供充足的活性位点。Fe 2p高分辨谱图包括2个宽峰,分别为Fe 2p<sub>1/2</sub>和Fe 2p<sub>3/2</sub>峰,其均可划分为Fe<sup>0</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>和卫星峰(图3(d))。

表1 N/C和Fe@N/C的物理性质

Tab. 1 Physicochemical properties of N/C and Fe@N/C

| 样品     | 比表面积/(m <sup>2</sup> /g) | 外表面积/(m <sup>2</sup> /g) | 总孔容/(cm <sup>3</sup> /g) | 微孔孔容/(cm <sup>3</sup> /g) | 介孔孔容/(cm <sup>3</sup> /g) | 平均孔径/nm |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| N/C    | 37.56                    | 28.72                    | 0.077                    | 0.005 7                   | 0.071                     | 7.23    |
| Fe@N/C | 115.63                   | 214.53                   | 0.320                    | 0.000 0                   | 0.320                     | 10.95   |

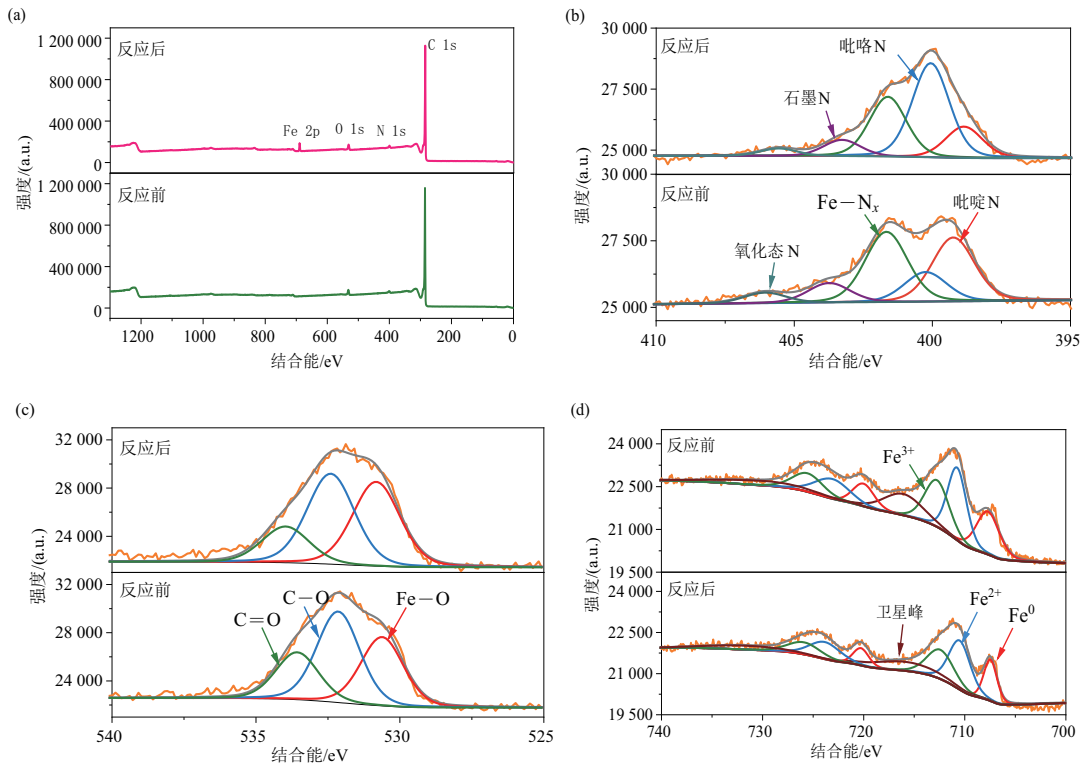


图3 反应前后Fe@N/C的XPS全谱(a)、N 1s(b)、O 1s(c)和Fe 2p(d)高分辨谱图

Fig. 3 XPS survey spectra (a), N 1s (b), O 1s (c) and Fe 2p (d) high resolution spectra of Fe@N/C before and after reaction

多价态铁物种赋予吸附剂良好的固液分离特性。利用磁铁可将Fe@N/C迅速从水中分离开来(图4)。

N/C和Fe@N/C的SEM图如图5所示。对于N/C,其表面平滑,无特殊形貌,而Fe@N/C呈现棒状结构。主要是由于在高温下,掺杂的Fe能够充当催化剂,促进棒状结构生长。结合BET和XPS测试结果可知,棒状结构使吸附剂的比表面

积、孔容和孔径更大,进而使Fe@N/C中丰富的含氮、含氧等活性位点暴露出来,可能使其具有优异的吸附特性。

## 2.2 吸附剂的吸附性能

### 2.2.1 pH影响

溶液pH对N/C和Fe@N/C吸附CBZ的影响如图6所示。当溶液pH为4~12时,N/C对CBZ的吸附量和去除率分别低于0.58 mg/g和1.17%。

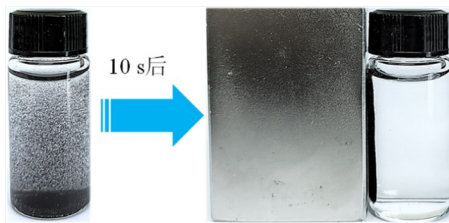


图 4 水中 Fe@N/C 磁性分离图

Fig. 4 Diagram of Fe@N/C separation from water by a magnet

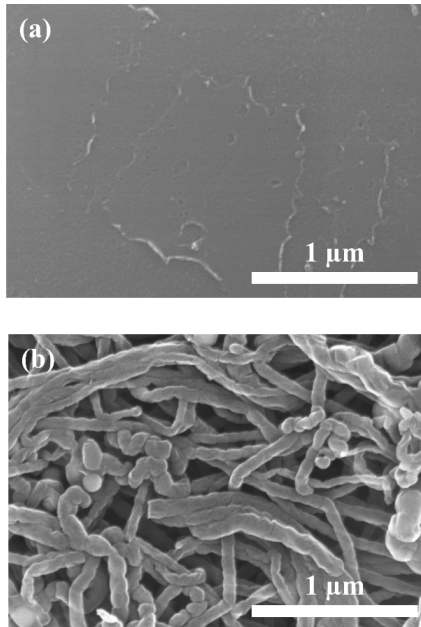


图 5 N/C(a)和 Fe@N/C(b)的电镜图

Fig. 5 SEM images of N/C (a) and Fe@N/C (b)

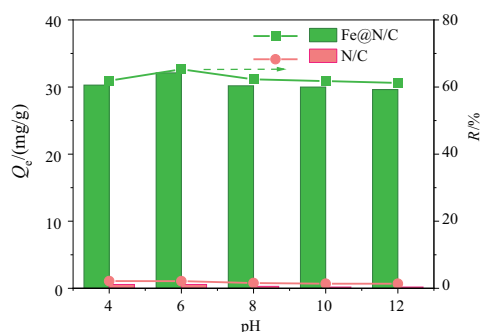


图 6 溶液 pH 对 N/C 和 Fe@N/C 吸附 CBZ 的影响

Fig. 6 Effect of pH values on the adsorption of CBZ by N/C and Fe@N/C

而 Fe@N/C 对 CBZ 的吸附量达到 32.12 mg/g, 是 N/C 对 CBZ 吸附量的 55.38 倍。主要归因于 Fe@N/C 具有更大的比表面积、孔容和孔径, 能够使更多的含 N 和含 O 活性位点暴露出来以吸附更多的 CBZ。在溶液 pH 为 4~12 时, Fe@N/C 对

CBZ 的去除率约为 60%, 表明 pH 对 Fe@N/C 吸附 CBZ 的影响较小, 主要是由于 CBZ 的酸度系数 ( $pK_a$ ) 为 13.94<sup>[12]</sup>。在溶液 pH 为 4~12 时, CBZ 呈分子形态。吸附剂带正电或者负电对 CBZ 的吸附影响较小。因此, Fe@N/C 能在较宽的 pH 范围内吸附去除 CBZ。

### 2.2.2 吸附动力学

Fe@N/C 对 CBZ 的吸附量随时间变化如图 7 所示。Fe@N/C 的吸附量在前 10 min 迅速增加, 经过约 15 min 即可达到吸附平衡。在 CBZ 初始浓度分别为 5、10、20 mg/L 时, Fe@N/C 对 CBZ 的平衡吸附量分别为 20.00、32.98、45.29 mg/g。利用准一级(式(3))和准二级(式(4))动力学模型对 CBZ 吸附动力学拟合, 结果如表 2 所示。对比相关系数  $R^2$  值可知, Fe@N/C 对 CBZ 的吸附符合准二级动力学模型, 即 Fe@N/C 对 CBZ 的吸附主要是化学吸附<sup>[19-20]</sup>。

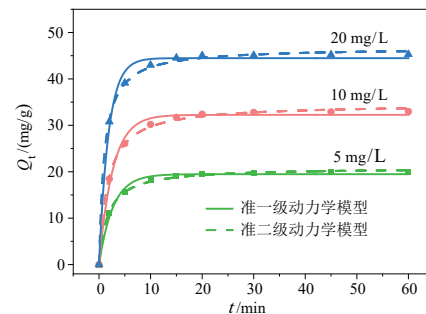


图 7 Fe@N/C 吸附 CBZ 动力学曲线

Fig. 7 Kinetics plots of CBZ adsorption by Fe@N/C

### 2.2.3 等温吸附

Fe@N/C 对 CBZ 的等温吸附结果如图 8 所示。随着 CBZ 浓度的增加, Fe@N/C 对 CBZ 的吸附量也逐渐增加。利用 Langmuir(式(5))、Freundlich(式(6))和 Temkin(式(7))模型对等温吸附结果进行拟合, 结果如表 3 所示。其中, 利用 Langmuir 模型拟合得到的  $R^2$  值最高, 说明 CBZ 主要以单层的方式吸附在 Fe@N/C 上<sup>[8, 21]</sup>。Fe@N/C 对 CBZ 的最大吸附量为 56.88 mg/g。

### 2.2.4 共存离子

溶液中各种共存阴离子可能对污染物的吸附产生影响。各种阴离子对 Fe@N/C 吸附 CBZ 的影响如图 9 所示。由图 9 可以看出, 即使存在各种阴离子时, Fe@N/C 对 CBZ 的吸附率仍与无共存离子时相当, 表明 Fe@N/C 对 CBZ 的吸附过程具有良好的抗离子干扰性。

表2 Fe@N/C 吸附 CBZ 动力学参数

Tab. 2 Adsorption kinetic parameters for CBZ adsorption by Fe@N/C

| 初始浓度/<br>(mg/L) | 准一级动力学模型                        |                         |       | 准二级动力学模型                        |   |       |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------|-------|---------------------------------|---|-------|
|                 | $Q_e(\text{cal})/(\text{mg/g})$ | $K_1/(\text{min}^{-1})$ | $R^2$ | $Q_e(\text{cal})/(\text{mg/g})$ | $K_2/(\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{min}))$ | $R^2$ |
| 5               | 19.470                          | 0.370                   | 0.991 | 20.920                          | 0.028                                       | 0.999 |
| 10              | 32.250                          | 0.380                   | 0.992 | 34.590                          | 0.017                                       | 0.998 |
| 20              | 44.480                          | 0.540                   | 0.993 | 46.750                          | 0.021                                       | 0.999 |

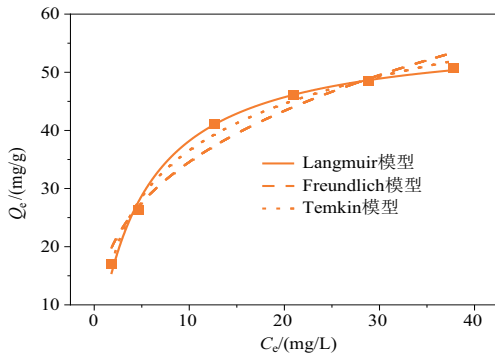


图8 Fe@N/C 吸附 CBZ 等温吸附曲线

Fig. 8 Adsorption isotherms for CBZ adsorption by Fe@N/C

含有苯环和酰胺基团,是 $\pi$ 电子受体。

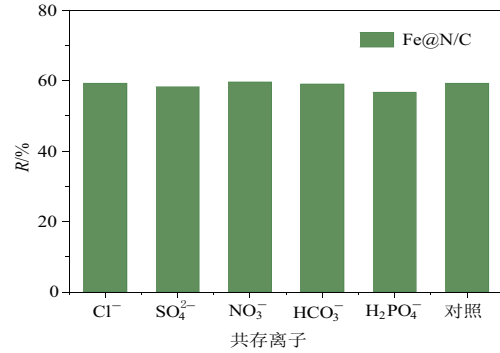


图9 共存离子对 Fe@N/C 吸附 CBZ 的影响

Fig. 9 Effect of coexisting anions on the adsorption of CBZ by Fe@N/C

### 2.2.5 重复利用

Fe@N/C 的重复利用结果如图 10 所示。重复使用 3 次后, Fe@N/C 对 CBZ 的去除率从 59.06% 降至 51.27%。Fe@N/C 对 CBZ 吸附性能下降主要是由于在吸附剂重复使用过程中部分 CBZ 未完全脱附以及部分吸附剂流失导致的。整体上看, 在重复使用 3 次过程中, Fe@N/C 对 CBZ 的去除率下降只有 7.79%, 表明 Fe@N/C 具有良好的重复利用的性能。

### 2.3 吸附机理

Fe@N/C 吸附 CBZ 前后的 N 1s 谱图如图 3b 所示。CBZ 中含有 C—N 键, 吸附反应后, Fe@N/C 在 400.24 eV 的 C—N 峰比例从 15.56% 增加到 45.06%, 表明 CBZ 被吸附在 Fe@N/C 上。CBZ 中

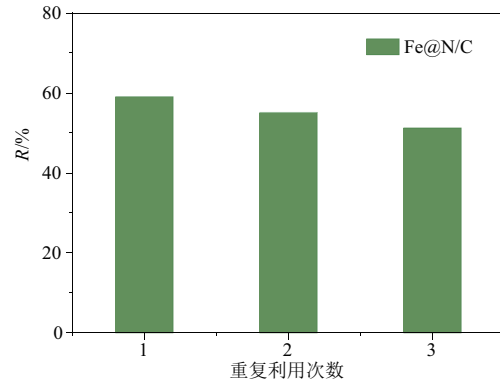


图10 Fe@N/C 吸附 CBZ 的重复利用性能

Fig. 10 Reusability of Fe@N/C for CBZ adsorption

表3 Fe@N/C 吸附 CBZ 等温吸附参数

Tab. 3 Adsorption isotherm parameters of CBZ adsorption by Fe@N/C

| 样品     | Langmuir 模型         |                            |             |       | Freundlich 模型  |       |       | Temkin 模型               |                           |       |
|--------|---------------------|----------------------------|-------------|-------|--|-------|-------|-------------------------|---------------------------|-------|
|        | $Q_m/(\text{mg/g})$ | $K_L/(\text{L}/\text{mg})$ | $R_L$       | $R^2$ | $K_F/((\text{mg}/\text{g})\cdot(\text{L}/\text{mg})^{-n})$ | $n$   | $R^2$ | $A/(\text{L}/\text{g})$ | $b/(\text{J}/\text{mol})$ | $R^2$ |
| Fe@N/C | 56.880              | 0.204                      | 0.093~0.500 | 0.994 | 16.280   | 3.060 | 0.954 | 2.330                   | 214.140                   | 0.989 |

Fe@N/C 中含有 C—N 和 C=O 等  $\pi$  电子给体基团, 吸附 CBZ 后, Fe@N/C 中各 N 峰以及各含 O 基团的结合能均出现偏移(图 3(b) 和 3(c)), 表明 Fe@N/C 和 CBZ 之间存在  $\pi$ - $\pi$  电子供体-受体相互作用<sup>[22]</sup>。此外, Fe@N/C 中的吡咯 N 和吡啶 N 易与 CBZ 之间形成氢键, 促进 CBZ 的吸附<sup>[13]</sup>。因此, Fe@N/C 主要通过  $\pi$ - $\pi$  电子供体-受体相互作用和氢键作用吸附 CBZ。

### 3 结论

针对传统碳材料吸附性能不足和固液分离性

能差的缺陷, 合成了零价铁掺杂氮化碳, 同时增强了对污染物的吸附性能和固液分离性能。研究表明, Fe 掺杂能有效增大氮化碳的比表面积、孔容和孔径, 有利于暴露出更多的活性位点, 从而显著提高对 CBZ 的吸附性能。

吸附实验结果表明: Fe@N/C 能在较宽的 pH 范围内吸附 CBZ; 吸附过程符合准二级动力学模型和 Langmuir 模型; Fe@N/C 对 CBZ 的最大吸附量为 56.88 mg/g。Fe@N/C 和 CBZ 之间的作用机制主要为  $\pi$ - $\pi$  电子供体-受体相互作用和氢键作用。

### 参考文献:

- [1] KUZMANOVIĆ M, GINEBREDA A, PETROVIĆ M, et al. Risk assessment based prioritization of 200 organic micropollutants in 4 Iberian rivers[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 503/504: 289-299.
- [2] LÓPEZ-PACHECO I Y, SILVA-NÚÑEZ A, SALINAS-SALAZAR C, et al. Anthropogenic contaminants of high concern: Existence in water resources and their adverse effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 1068-1088.
- [3] VINAYAGAM V, PALANI K N, GANESH S, et al. Recent developments on advanced oxidation processes for degradation of pollutants from wastewater with focus on antibiotics and organic dyes[J]. *Environmental Research*, 2024, 240: 117500.
- [4] LI Si, SHI Wanzi, LIU Wei, et al. A duodecennial national synthesis of antibiotics in China's major rivers and seas (2005—2016)[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 906-917.
- [5] 刘小刚, 张欣, 陈梦雨, 等. 表面氟化 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 光催化降解罗丹明 B 的性能研究[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2024, 37(1): 30-34.  
LIU Xiaogang, ZHANG Xin, CHEN Mengyu, et al. Reinforcing the photocatalytic degradation of rhodamine B through the surface fluorination of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>[J]. *Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition)*, 2024, 37(1): 30-34.
- [6] FENG Haoran, YUAN Kexin, LIU Yi, et al. Recent advances in covalent organic framework-based membranes for water purification: Insights into separation mechanisms and applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 474: 145580.
- [7] JI Yajun, XU Feiya, FANG Kun, et al. Facile synthesis of carbon nitride nanotube confined nano Fe<sup>0</sup> for boosting activation of peroxymonosulfate towards tetracycline removal[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2025, 38: 104079.
- [8] LEI Xiaobo, YAO Lunguang, LIAN Qiyu, et al. Enhanced adsorption of perfluorooctanoate (PFOA) onto low oxygen content ordered mesoporous carbon (OMC): Adsorption behaviors and mechanisms[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126810.
- [9] 姬亚军, 李甜甜, 高培林, 等. 等级孔 MFI 分子筛的合成及高效吸附结晶紫性能研究[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2021, 34(2): 277-282.  
JI Yajun, LI Tiantian, GAO Peilin, et al. Study on the synthesis of hierarchical MFI zeolite for efficient adsorption of crystal violet[J]. *Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition)*, 2021, 34(2): 277-282.
- [10] LIANG Yixuan, ZHANG Qiyu, LI Sumei, et al. Highly efficient removal of quinolones by using the easily reusable MOF derived-carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423(Part B): 127181.
- [11] 单丹娜. 碳基纳米材料吸附水中药物类污染物的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(14): 42-50.  
SHAN Danna. Advances in adsorption of typical pharmaceuticals on carbonaceous nano-materials in water[J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(14): 42-50.
- [12] 张继欢, 张晋玮, 武文龙, 等. 碳酸氢钠改性生物炭的制备及其吸附水中卡马西平的机理分析[J]. *过程工程学报*, 2024, 24(9): 1106-1119.  
ZHANG Jihuan, ZHANG Jinwei, WU Wenlong, et al. Preparation of sodium bicarbonate modified biochar and

- analysis of its adsorption mechanism for carbamazepine in water [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2024, 24(9): 1106-1119.
- [13] 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 Xun, LIU Yuyao, ZHONG Yongke. Adsorption performance of carbamazepine on ammonia-modified coal-based activated carbon [J]. *Carbon Techniques*, 2023, 42(2): 49-55.
- [14] LI Shuaishuai, ZHOU Minghua, WU Huizhong, et al. High-efficiency degradation of carbamazepine by the synergistic electro-activation and bimetal (FeCo@NC) catalytic-activation of peroxydisulfate [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2023, 338: 123064.
- [15] CHEN Bo, ZHAO Huinan, CHEN Sijiang, et al. A magnetically recyclable chitosan composite adsorbent functionalized with EDTA for simultaneous capture of anionic dye and heavy metals in complex wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 356: 69-80.
- [16] WANG Xunhe, NAN Zhaodong. Highly efficient fenton-like catalyst Fe-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> porous nanosheets formation and catalytic mechanism [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 233: 116023.
- [17] YAO Yuanyuan, LAI Leo, YU Zixun, et al. Carbon/iron by-product from catalytic methane decomposition as recyclable fenton catalyst for pollutant degradation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 437: 129328.
- [18] XIAO Tong, WANG Yan, WAN Jinquan, et al. Fe-N-C catalyst with Fe-N<sub>x</sub> sites anchored nano carboncubes derived from Fe-Zn-MOFs activate peroxydisulfate for high-effective degradation of ciprofloxacin: Thermal activation and catalytic mechanism [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424(Pt A): 127380.
- [19] JI Yajun, XU Feiya, ZHANG Panli, et al. Green synthesis of poly (pyrrole methane)-based adsorbent for efficient removal of chromium(VI) from aqueous solution [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 126197.
- [20] TIE Jingxi, LI Weipeng, LIU Haiyuan, et al. Efficient adsorption and reduction of Cr(VI) by a novel polyaniline modified magnetic iron-based waterworks sludge from aqueous solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451 (Part 3): 137673.
- [21] JI Yajun, ZHANG Wenlong, YANG Honghui, et al. Green synthesis of poly (pyrrole methane) for enhanced adsorption of anionic and cationic dyes from aqueous solution [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 590: 396-406.
- [22] XU Lu, WU Chenxi, CHAI Cheng, et al. Adsorption of micropollutants from wastewater using iron and nitrogen co-doped biochar: Performance, kinetics and mechanism studies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424(Part C): 127606.

责任编辑:张 钰 王 萍