

李丽, 孙琪, 孟江, 等. 硫氮双掺杂氧化石墨烯材料对水体中汞离子的吸附性能[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 78-84, 172.

LI L, SUN Q, MENG J, et al. Performance of sulfur-nitrogen co-doped graphene oxide materials for mercury ions adsorption in water body [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 78-84, 172.

硫氮双掺杂氧化石墨烯材料对水体中汞离子的吸附性能

李 丽^{1,2,3}, 孙 琪^{4,5,*}, 孟 江^{1,2,3}, 李淑萍^{1,2,3}, 朱文丽¹

(1. 西藏民族大学信息工程学院, 陕西咸阳 712082; 2. 西藏自治区水质安全与水环境健康重点实验室, 陕西咸阳 712082; 3. 西藏民族大学西藏水污染控制与生态修复国家重点实验室, 陕西咸阳 712082; 4. 东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210096; 5. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008)

摘 要 【目的】随着城市化与工业化进程的加速推进, 大量含重金属的工业废水及城市污水被排放至水体, 导致其中重金属污染日益加剧。汞离子因其具有高度的生物不可降解性、显著的生物累积效应以及强烈的神经毒性等特征, 被视为最具危害性的重金属污染物之一, 高效去除水体中的汞离子对于保障生态环境安全和人体健康至关重要。【方法】文章以氧化石墨烯(GO)和硫脲为原料, 通过简便的水热法成功制备了一种硫氮双掺杂氧化石墨烯(GO-SN)吸附材料。材料表征结果证实硫、氮元素成功掺杂至GO骨架中。【结果】将其应用于水溶液中汞离子的去除, 试验结果显示在30 h内, 97.2%的汞离子被有效去除, 其去除效率显著优于未掺杂的GO材料, GO-SN的去除效率约为GO的1.87倍。平衡吸附容量显示, GO-SN对汞离子的平衡吸附容量为5.00 mg/g, 约为GO的1.85倍。吸附动力学研究表明, GO-SN对汞离子的吸附行为可用拟二级动力学方程进行较好地描述($R^2=0.99879$), 表明该吸附过程主要由化学吸附机制主导。【结论】总之, 硫氮双掺杂有效提升了GO对水溶液中汞离子的吸附能力, GO-SN作为一种高效、有潜力的重金属吸附剂, 在含汞废水处理及水体修复领域展现出良好的应用前景。

关键词 硫氮掺杂 氧化石墨烯(GO) 改性 汞离子 吸附

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)08-0078-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.010

Performance of Sulfur-Nitrogen Co-Doped Graphene Oxide Materials for Mercury Ions Adsorption in Water Body

LI Li^{1,2,3}, SUN Qi^{4,5,*}, MENG Jiang^{1,2,3}, LI Shuping^{1,2,3}, ZHU Wenli¹

(1. College of Information Engineering, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, China;

2. Key Laboratory of Water Safety and Aquatic Ecosystem Health of Xizang, Xianyang 712082, China;

3. Key Laboratory of Water Pollution Control and Ecological Restoration of Xizang, National Ethnic Affairs Commission, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, China;

4. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

5. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract [Objective] With the accelerated advancement of urbanization and industrialization, substantial volumes of industrial wastewater and municipal sewage containing heavy metals are discharged into water bodies, leading to increasingly severe heavy metal pollution. Mercury ions are regarded as one of the most hazardous heavy metal contaminants due to their high non-biodegradability,

[收稿日期] 2024-01-14

[基金项目] 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202101ZR0077G)

[作者简介] 李丽(1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制与固体废物资源化, E-mail: lily-0918@163.com。

[通信作者] 孙琪(1989—), 女, 博士研究生, 研究方向为水污染控制, E-mail: fxs0903@163.com。

significant bioaccumulation effects, and potent neurotoxicity. Efficient removal of mercury ions from aquatic systems is crucial for safeguarding ecological security and human health. [Methods] In this paper, a sulfur-nitrogen dual-doped graphene oxide (GO-SN) adsorbent was successfully synthesized via a facile hydrothermal method using graphene oxide (GO) and thiourea as raw materials. Material characterization confirmed the effective incorporation of sulfur and nitrogen elements into the graphene oxide framework. [Results] The synthesized GO-SN was applied for mercury ions removal from aqueous solutions. Experimental result demonstrated that 97.2% of mercury ions were effectively removed within 30 h, with GO-SN exhibiting a removal efficiency approximately 1.87 times higher than that of pristine GO. The equilibrium adsorption capacity of GO-SN for mercury ions reached 5.00 mg/g, about 1.85 times that of GO. Adsorption kinetics revealed that the adsorption behavior followed the pseudo-second-order kinetic model ($R^2=0.99879$), indicating a chemisorption-dominated mechanism. [Conclusion] In summary, sulfur-nitrogen dual doping significantly enhances the mercury ions adsorption capacity of graphene oxide. As a highly efficient and promising adsorbent for heavy metals, GO-SN shows great application potential in mercury-containing wastewater treatment and aquatic ecosystem remediation.

Keywords sulfur-nitrogen co-doped graphene oxide(GO) modification mercury ion adsorption

在电池制造、煤炭和废物的燃烧、烧碱和制药的生产过程中会产生大量的含汞废水,进而通过各种途径进入水环境中,使得水环境中汞的含量处于较高水平^[1-2]。作为毒性极强且污染较为严重的重金属污染物之一,汞离子具有生物不可降解性和生物累积性,即使极少量的汞也可能通过食物链和饮用水在人体内长期累积,危害极大^[3-4]。因此,寻求一种有效的方法去除水环境中的汞离子是十分必要的。

目前常用的去除汞离子的方法有离子交换法^[5]、化学沉淀法^[6]、膜过滤法^[7]和吸附法等。在这些方法中,吸附法因其操作简便、设备简单、能耗低等优点,被视为是去除汞离子最经济有效的方法^[1,8-10]。相关学者已经对不同类型的吸附材料进行了研究,其中氧化石墨烯(GO)作为石墨烯的衍生物,具有蜂窝状主体的二维片层结构,表面和边缘含有大量含氧官能团,具有比表面积大、机械性能好等特性。但GO的亲水性较好,使得其在水溶液中容易团聚,且官能团种类单一,缺乏与金属离子相互作用的结合位点,进而限制了其在重金属离子吸附方面的应用。因此,为了实现汞离子的有效去除,需对GO进行进一步的改性处理。

根据软硬酸碱理论,汞离子属于软酸,易于与属于软碱的含硫官能团结合。含氮功能基中的氮原子含有孤对电子,能与汞离子形成稳定的配合物,从而可以很好地与汞离子结合。基于此,本文通过水热法制备硫氮双掺杂氧化石墨烯(GO-SN)材料,并将其用于水体中汞离子的去除,以期含汞废水的处理提供新材料和新思路。

1 试验材料和方法

1.1 GO-SN 材料的制备

通过改进的 Hummers 法经氧化插层、超声剥离等过程制备 GO^[11]。采用水热法^[12]制备 GO-SN 材料,具体过程如下:将 0.1 g 制得的 GO 加入到 30 mL 的去离子水中,超声分散得到 GO 悬浮液,然后加入一定量硫脲,使 GO 与硫脲的质量比为 1:20,搅拌均匀,将此混合物转移到 100 mL 带有聚四氟乙烯衬里的高压反应釜中,于 180 ℃ 保持 24 h,冷却至室温,得到的产物用蒸馏水洗涤数次,然后于 70 ℃ 下干燥 24 h 即得产物。

1.2 材料表征与样品分析

通过扫描电镜(SEM)、红外光谱(FT-IR)、X 射线光电子能谱(XPS)等技术分别对材料的表面形貌、官能团和化学组成等进行表征。溶液中汞离子的浓度采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Thermo Fisher iCAP PRO)进行测试。

1.3 批量吸附试验

称取 35 mg 吸附剂于 250 mL 具塞三角瓶中,加入 175 mL 初始质量浓度为 1 mg/L 的汞离子溶液,在恒定温度为 (25 ± 2) ℃ 下以 170 r/min 的速度振荡达到平衡状态。在设置好的吸附时间内收集样品,收集的样品通过 0.22 μm 的滤膜过滤,测定溶液中汞离子的浓度。另外,为了说明掺杂后材料的吸附性能,在相同条件下,设置了掺杂前 GO 的吸附试验作为对照组。

汞离子的吸附效率和吸附容量分别通过式(1)和式(2)进行计算^[10]。

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

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

其中: C_0 ——溶液中汞离子的初始质量浓度, mg/L;

C_t ——在 t 时刻溶液中汞离子的残留质量浓度, mg/L;

V ——使用的汞离子溶液的体积, L;

m ——所用吸附剂的质量, g;

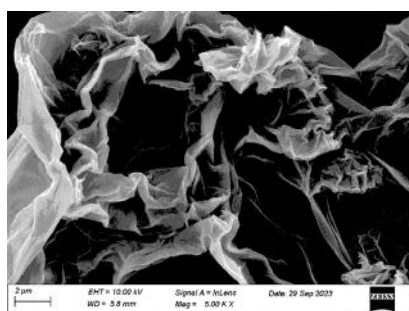
R ——吸附效率;

q_t ——吸附容量, mg/g。

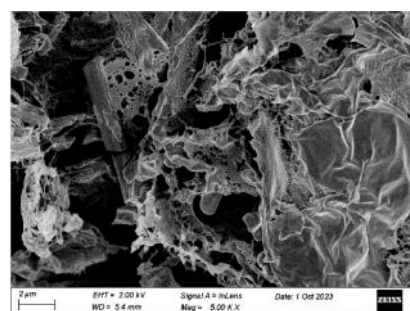
1.4 吸附动力学

在恒定温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下进行动力学试验, 研究接触时间对汞离子吸附的影响。每隔一段时间采集样品, 直到溶液中汞离子的浓度不变。此外, 采用拟一级动力学方程[式(3)]和拟二级动力学方程[式(4)]来描述汞离子的吸附动力学。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$



(a) GO



(b) GO-SN

图 1 GO 和 GO-SN 的 SEM 图

Fig. 1 SEM Pattern of GO and GO-SN

图 2 显示了 GO 和 GO-SN 的 N_2 吸附-脱附曲线图。其中, GO 属于 IV 型吸附脱附等温线并伴有 H3/H4 型滞回环, 这说明 GO 是介孔结构。GO-SN 属于 II 型吸附脱附等温线和 H4 型滞后环, 表明 GO-SN 的孔隙主要为狭窄的狭缝孔隙。氮气吸附-脱附测试结果与 SEM 分析结果一致。

用比表面积(BET)法测得 GO 和 GO-SN 比表面积分别为 $52.7782 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $0.5770 \text{ m}^2/\text{g}$, 介孔孔径分布分析(BJH)法得到的累积孔容分别为 $0.03916 \text{ cm}^3/\text{g}$ 和 $0.00164 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均孔径分别为 6.41875 nm 和 23.52085 nm 。由测试结果可知, GO-SN 较 GO 具有较小的比表面积和孔容, 较大的平均孔径。一些纯碳材料, 由于其丰富的孔隙度和较大的物理

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

其中: q_e ——平衡吸附容量, mg/g;

k_1 ——拟一级动力学吸附速率常数, h^{-1} ;

k_2 ——拟二级动力学模型的吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{h})$ 。

2 结果与讨论

2.1 吸附材料的表征

为了了解所制得的吸附材料的形貌, 将 GO 和 GO-SN 2 种吸附材料分别进行了 SEM 表征, 其结果如图 1 所示。其中, 图 1(a) 为 GO 的 SEM, GO 的表面呈褶皱和波浪形, 这可能是由于亲水性含氧官能团之间的相互作用^[13]。图 1(b) 为 GO-SN 的 SEM, 相比之下, GO-SN 的表面呈现出相互交联的孔状结构, 这种结构更有利于汞离子的吸附与扩散, 可以提高材料的吸附性能^[14]。

吸附表面积, 仅表现出较低的重金属离子吸附能力^[15]。因此, 为了提高吸附剂的吸附能力, 需要对吸附剂进行改性。

图 3 显示了 GO 和 GO-SN 的红外光谱图。通过对图 3 中 GO 的红外光谱分析可知, 3375 cm^{-1} 处的吸收峰为 O—H 的伸缩振动吸收峰, 1729 cm^{-1} 处的吸收峰为 C=O 伸缩振动吸收峰, 1619 cm^{-1} 处是水分子羟基弯曲振动模式以及未氧化石墨烯芳环 C=C 骨架振动的混合吸收, 1364 cm^{-1} 处的吸收峰与 C=O 对称伸缩振动模式和—OH 变形振动模式相关, 1055 cm^{-1} 处的吸收峰来源于 C—O 伸缩振动模式。而改性得到的 GO-SN 图谱特征变化明显, 其中羟基、C=O 及大部分 C—O 基团的特征峰消失,

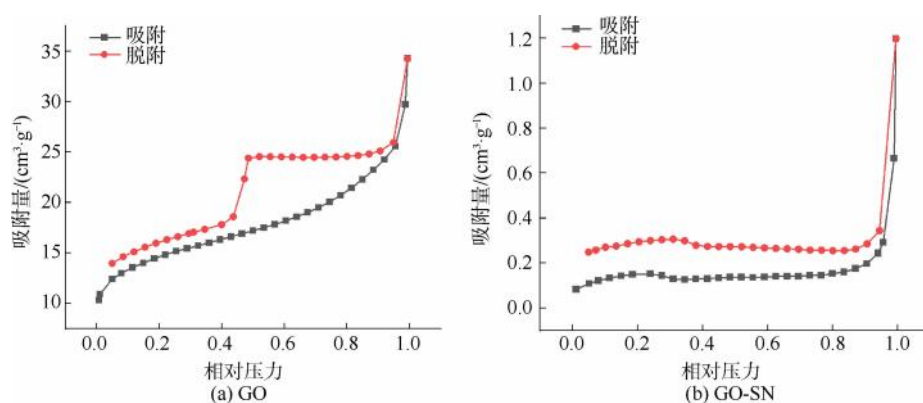
图 2 GO 和 GO-SN 的 N_2 吸附-脱附曲线图

Fig. 2 Nitrogen Adsorption-Desorption Isotherms of GO and GO-SN

在 1520 cm^{-1} 和 1020 cm^{-1} 附近出现了一系列微弱的吸收峰, 2 个吸收峰分别属于硫脲基 $N-H$ 及 $C=S$ 伸缩振动模式, 表明硫脲通过羧基和含氧基团反应接枝到氧化石墨烯上^[16]。

$S2p$ 信号峰, 这表明 N 和 S 元素成功掺入到所制备的材料中。

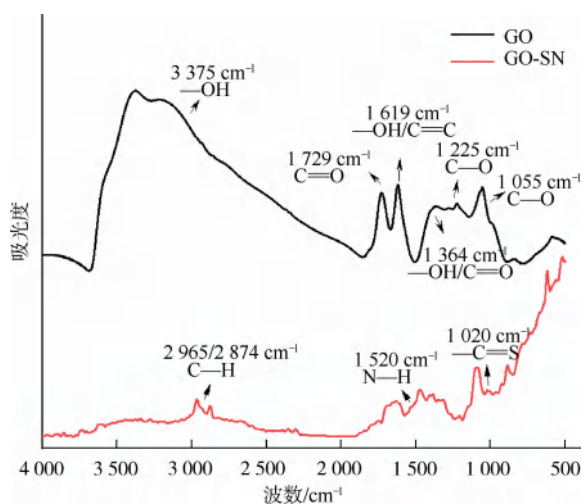


图 3 GO 及 GO-SN 的 FT-IR 光谱

Fig. 3 FT-IR of GO and GO-SN

为了进一步确认所制备材料的特征和组成, 对其进行了 XPS 分析。图 4 为 GO 和 GO-SN 的 XPS 全谱扫描图。由图 4 可知, 在结合能为 285.08 eV 和 532.08 eV 处出现的特征峰分别归属于 $C1s$ 和 $O1s$ 的信号峰。对比 GO 和 GO-SN 中 $C1s$ 峰和 $O1s$ 峰的强度可知, GO-SN 中的碳元素略有增加, 而氧元素明显减少。GO-SN 的 $O1s$ 峰较弱, 说明部分 GO 被还原, 改性后的 GO-SN 材料表面的含氧量降低。从 GO-SN 的全谱扫描图中可知, 除过 $C1s$ 和 $O1s$ 的特征峰外, GO-SN 在结合能为 400.08 eV 和 166.08 eV 处出现了新的特征峰, 分别对应 $N1s$ 和

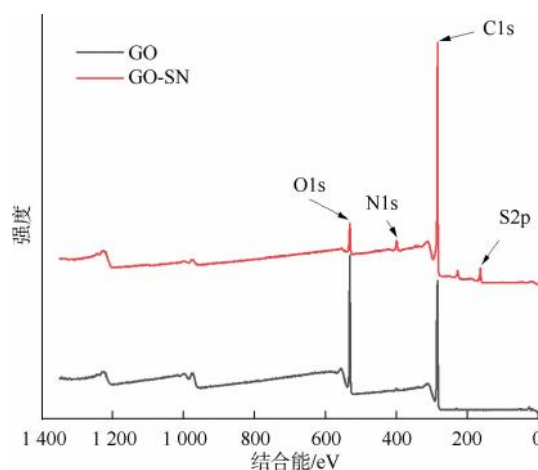


图 4 GO 和 GO-SN 的 XPS 全谱图

Fig. 4 XPS Survey Spectra of GO and GO-SN

为了分析 N 和 S 元素的掺杂状态, 分别对 $N1s$ 和 $S2p$ 峰进行分峰拟合处理。 $N1s$ 峰可分成 3 个峰 [图 5(a)], 结合能为 397.78 eV 的拟合峰对应吡啶氮 (pyridinic-N), 结合能为 399.44 eV 的拟合峰对应吡咯氮 (pyrrolic-N), 结合能为 401.42 eV 的拟合峰对应石墨化氮 (graphitic-N)^[17]。在所归属的 3 种含氮类型中, pyrrolic-N 的峰面积较大, 说明掺杂样品主要是以 pyrrolic-N 类型为主。 $S2p$ 峰可拟合为 8 个峰 [图 5(b)], 结合能分别为 161.88 、 162.93 、 163.60 、 164.77 、 165.23 、 166.39 、 168.05 eV 和 169.4 eV , 其中 163.60 eV 和 164.77 eV 处的拟合峰对应 $C-S_n-C$ 键 ($n=1$ 或 2) 和 $C=S$ 键的特征峰, 其余各结合能的拟合峰对应氧化态硫 ($-SO_n-$) 的特征峰^[14]。以上结果表明, GO 的硫

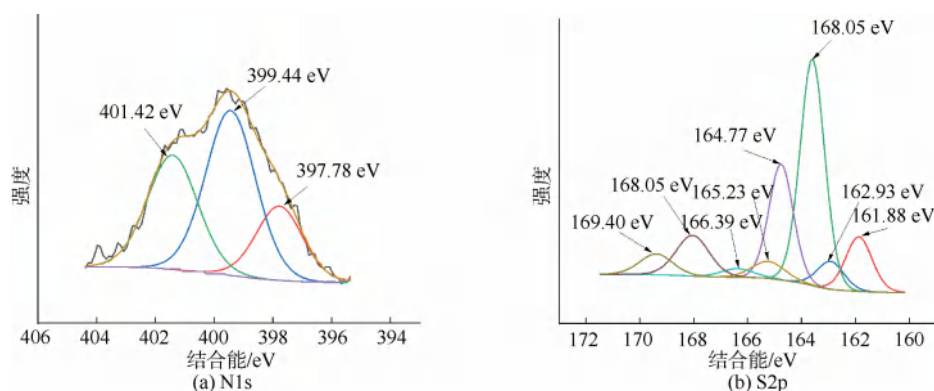


图 5 GO-SN 的分峰拟合

Fig. 5 Spectra Fitting of GO-SN

氮改性是成功的。

2.2 吸附性能研究

在初始汞离子质量浓度为 1 mg/L 时,测试了 GO 和 GO-SN 的吸附性能,如图 6 所示。由图 6(a) 可知,30 h 内 GO-SN 对汞离子的去除率为 97.2%,远远高于 GO (51.9%) 的去除率,表明使用 GO-SN 是提升汞离子去除效率的有效方法。

由图 6(b) 可知,2 条吸附曲线的趋势类似,整

个吸附过程包含 2 个阶段,即初始的快速吸附过程和后期的慢速平衡过程。在初始阶段,汞离子在前 7 h 内在 GO 和 GO-SN 上的吸附量迅速增加,在这个快速吸附阶段之后,GO 吸附速率变慢且 16 h 后没有进一步的吸附量增加,GO-SN 吸附速率逐渐变慢且在 30 h 后没有进一步的吸附量增加。汞离子在 GO 和 GO-SN 上的平衡吸附量分别为 2.70 mg/g 和 5.00 mg/g,由此可见,GO-SN 的吸附性能优于 GO。

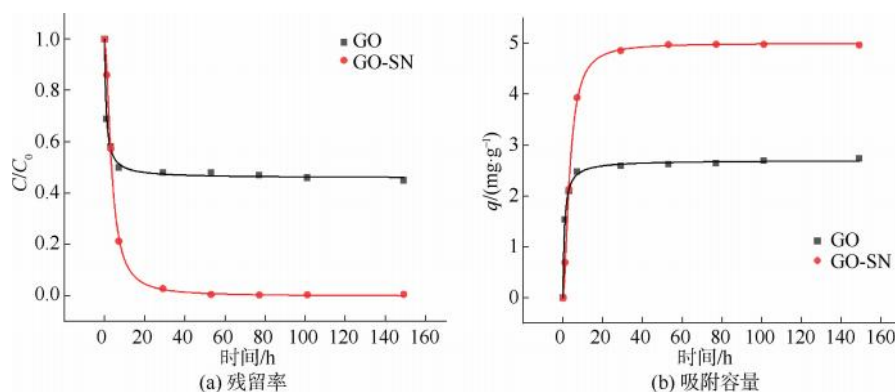


图 6 GO 和 GO-SN 对汞离子的吸附

Fig. 6 Adsorption of Mercury Ion by GO and GO-SN

2.3 吸附后材料表征

为了更好地了解 GO-SN 的吸附机理,对 GO-SN 吸附剂进行 XPS 研究。在吸附汞离子后,从 GO-SN 的测量扫描中可以清楚地看到 Hg 4f 的峰(图 7)。Hg 4f 信号的出现清楚地表明汞离子已被成功吸附。对 Hg 4f 的峰进行分峰拟合处理,Hg 4f 峰可分成 2 个峰(图 8)结合能分别为 100.36 eV 和 104.33 eV,分别鉴定为 Hg 4f_{7/2} 和 Hg 4f_{5/2}。这表明汞加载到 GO-SN 表面。

2.4 吸附动力学

吸附动力学为研究 GO-SN 对汞离子的吸附机

理提供了重要信息,为确定 GO-SN 的吸附行为提供了必要条件。因此,为了更好地描述 GO 和 GO-SN 对汞离子的吸附过程,分别使用拟一级动力学和拟二级动力学模型对吸附过程进行拟合。拟合曲线如图 9 和图 10 所示,其参数值如表 1 所示。

由拟合结果可知,对于 GO,拟二级动力学模型拟合效果较好($R^2 > 0.99$),速率常数 k_2 为 0.261 89 g/(mg·h)。这表明 GO 对汞离子的去除主要是化学过程。GO-SN 的拟二级动力学模型相关系数($R^2 = 0.998\ 79$)远大于拟一级动力学模型相关系数($R^2 = 0.596\ 80$),速率常数 k_2 为 0.059 51 g/(mg·h),

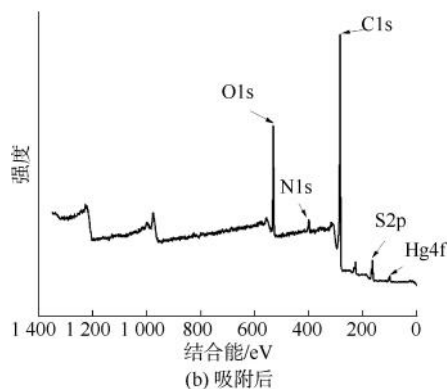
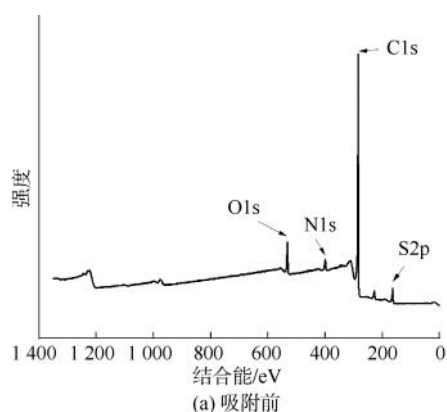


图7 GO-SN 吸附前与吸附后的 XPS 全谱图对比
Fig. 7 Comparison of XPS Survey Spectra of GO-SN before and after Adsorption

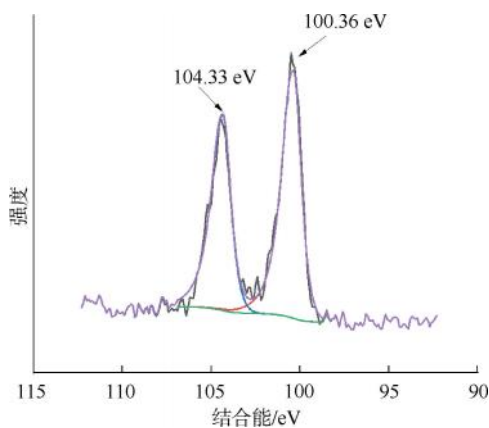


图8 GO-SN 的 Hg4f 分峰拟合
Fig. 8 Hg4f Spectra Fitting of GO-SN

计算得到的对汞离子的平衡吸附量 (5.13 mg/g) 与吸附试验测得的平衡吸附量 (5.00 mg/g) 基本相符。因此,GO-SN 对汞离子的吸附过程可用拟二级动力学方程更好地拟合。这既表明 GO-SN 去除汞离子的限速过程是化学过程,又证明汞离子在 GO-SN 表面的吸附速率受 GO-SN 表面的活性位点与汞之间的化学吸附速率影响,而不是受汞离子

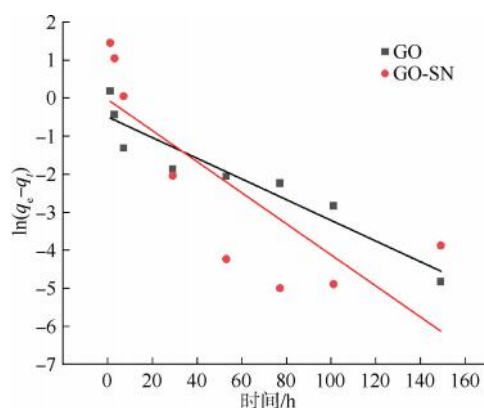


图9 GO 和 GO-SN 对汞离子拟一级动力学方程
Fig. 9 Pseudo-First-Order Kinetic Model Fitting of Mercury Ion Adsorbed by GO and GO-SN

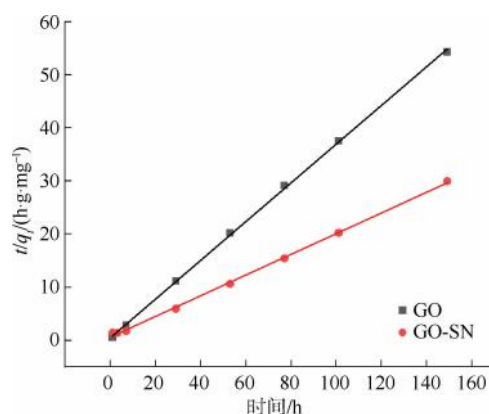


图10 GO 和 GO-SN 对汞离子拟二级动力学方程
Fig. 10 Pseudo-Second-Order Kinetic Model Fitting of Mercury Ion Adsorbed by GO and GO-SN

扩散速率的影响。主要原因是 GO-SN 具有相互交联的孔状结构,该结构极大地增加了吸附材料与汞离子接触的概率,提高了汞离子在溶液中扩散达到 GO-SN 表面的速率,并使其大于 GO-SN 表面的活性位点与汞离子之间的化学吸附速率,从而使 GO-SN 与汞离子之间的吸附行为更符合拟二级动力学模型^[18]。

3 结论

本文以硫脲作为氮源和硫源,通过水热法成功地制备了 GO-SN 并将其作为吸附材料用于水溶液中汞离子的去除。与 GO 相比,GO-SN 具有无序的孔隙结构,对水溶液中的汞离子的吸效效率 (97.2%) 远高于 GO (51.9%)。GO-SN 对汞离子的吸附行为符合拟二级动力学模型。本文为水体中重金属离子的有效去除提供了理论和技术支撑。然

表 1 拟一级二级动力学方程参数
Tab. 1 Parameters of Pseudo-First-Order and Pseudo-Second-Order Kinetic Model Fitting

吸附材料	拟一级动力学参数			拟二级动力学参数		
	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_1/(\text{h}^{-1})$	R^2	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_2/[\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{h})^{-1}]$	R^2
GO	0.61	0.027 2	0.883 08	2.74	0.261 89	0.998 62
GO-SN	0.96	0.040 85	0.596 80	5.13	0.059 51	0.998 79

而,为了实际应用,还需对工艺参数等进行进一步的探究,使其有望应用于实际废水中汞离子的去除。

参考文献

- [1] MA Y X, KOU Y L, JIN P S, et al. Adsorption of Hg(II) in aqueous solution by magnetic graphene oxide grafted polymaleicamide dendrimer nanohybrids[J]. Separation Science and Technology, 2019, 54(15): 2409–2417.
- [2] MOBINA A, MEHDI G. Adsorptive removal of Hg^{2+} from aqueous solutions using amino phenyl-pyrazole-functionalized graphene oxide[J]. Carbon Letters, 2020, 30: 493–508. DOI: 10.1007/s42823-019-00119-8.
- [3] 林建清, 陈尹淇, 张亚爽, 等. 离子交换法处理实验室含汞废水的研究[J]. 泉州师范学院学报, 2018, 36(2): 45–49.
LIN J Q, CHEN Y Q, ZHANG Y S, et al. Research on ion exchange treatment of mercury-containing wastewater in laboratory [J]. Journal of Quanzhou Normal University, 2018, 36(2): 45–49.
- [4] 吴春来, 樊静. 石墨烯材料在重金属废水吸附净化中的应用[J]. 化工进展, 2013, 32(11): 2668–2694.
WU C L, FAN J. Adsorption of heavy metals by grapheme based materials for wastewater purification[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(11): 2668–2694.
- [5] ZENG Q, HU L, ZHONG H, et al. Efficient removal of Hg^{2+} from aqueous solution by a novel composite of nano humboldtine decorated almandine (NHDA): Ion exchange, reducing-oxidation and adsorption[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 404:124035. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124035.
- [6] KHAN S, SINGH J, VERMA A, et al. Precipitation of a chromium-rich α -phase in Alloy 693 and its effect on tensile properties[J]. Materials Science and Engineering, 2017, 686: 176–183. DOI: 10.1016/J.MSEA.2017.01.013.
- [7] KANAGARAJ P, NAGENDRAN A, RANA D, et al. Influence of *N*-phthaloyl chitosan on poly (ether imide) ultrafiltration membranes and its application in biomolecules and toxic heavy metal ion separation and their antifouling properties[J]. Applied Surface Science, 2015, 329: 165 – 173. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.12.082.
- [8] GUPTA V K, JAIN C K, ALI I, et al. Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash: A sugar industry waste[J]. Water Research, 2003, 37(16): 4038–4044.
- [9] FU J, ZHAO C P, LUO Y P, et al. Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: Their relations to environmental factors[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 270: 102–109. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.01.044.
- [10] HE J S, CHEN J P. A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools [J]. Bioresource Technology, 2014, 160: 67 – 78. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.01.068.
- [11] POH H L, SANEK F, AMBROSI A, et al. Graphenes prepared by staudenmaier, hofmann and hummers methods with consequent thermal exfoliation exhibit very different electrochemical properties [J]. Nanoscale, 2012, 4 (11): 3515–3522.
- [12] SU Y Z, ZHANG Y, ZHUANG X D, et al. Low-temperature synthesis of nitrogen/sulfur co-doped three-dimensional graphene frameworks as efficient metal-free electrocatalyst for oxygen reduction reaction[J]. Carbon, 2013, 62: 296 – 301. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.05.067.
- [13] CHEN H, LIU F, CAI C, et al. Removal of Hg^{2+} from desulfurization wastewater by tannin-immobilized graphene oxide [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022 (12): 17964–17976.
- [14] 王涛. 氨基酸为杂原子源 N(S) 掺杂石墨烯材料的制备及其电化学性能研究[D]. 新疆: 新疆大学, 2016.
WANG T. Preparation of the N (S) doped graphene using amino acids as heteroatoms sources and their electrochemical performances[D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2016.
- [15] LU X C, JIANG J C, SUN K, et al. Influence of the pore structure and surface chemical properties of activated carbon on the adsorption of mercury from aqueous solutions [J]. Marine Pollution Bulletin 2014, 78: 69 – 76. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.11.007.
- [16] 查少秋. 氨基改性磁性氧化石墨烯的制备及其对重金属离子的吸附研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
ZHA S Q. Study on preparation of amino modified magnetic graphene oxide and application of adsorption for heavy metal ions [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

(下转第 172 页)

(2)智能监测技术:结合物联网技术实时监测渗透池水位与水质,优化调蓄效率,为渗透池的运行维护提供帮助。

(3)研究渗透池在冻融循环、极端气候下的稳定性,完善北方地区海绵设施设计标准。

参考文献

- [1] 韩晓东,孙明利. 北航北区食堂等项目雨水控制与利用工程分析[J]. 给水排水, 2019, 45(4): 88-93.
HAN X D, SUN M L. Analysis of rainwater control and utilization engineering of Beihang University northern district canteen & five items project [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(4): 88-93.
- [2] 北京市规划委员会,北京市质量技术监督局. 雨水控制与利用工程设计规范: DB11/685—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
Beijing Municipal Commission of Urban Planning, Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Code for design of stormwater management and harvest engineering: DB11/685—2013 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [3] 王熠宁,郑克白,李曼. 建筑与场地海绵专项设计思考[J]. 给水排水, 2019, 45(5): 70-75.
WANG Y N, ZHENG K B, LI M. Sponge specialized design of building and venue [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(5): 70-75.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [5] 王艳. 基于低影响开发的海绵城市方案研究及水量模拟[D]. 北京: 清华大学, 2017.
WANG Y. Research on the theory and application of LID in sponge city construction and simulation calculation of water quantity in infiltration ponds[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [6] 黄蓓蓓. 海绵城市建设的难点与技术要点探析[J]. 居业, 2022, 56(4): 50-52.
HUANG B B. Challenges and technical points in sponge city construction[J]. Create Living, 2022, 56(4): 50-52.
- [7] 熊子鹰,肖存艳,蔡甜,等. 基于SWMM的初期雨水调蓄池容积确定及截污效能模拟[J]. 水电能源科学, 2019, 37(1): 36-39.
XIONG Z Y, XIAO C Y, CAI T, et al. Study on volume determination and pollution effectiveness simulation of initial rainwater storage tank based on SWMM [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(1): 36-39.
- [8] 颜晓斐. 上海成都路合流污水调蓄池的污染减排效益及优化[J]. 中国给水排水, 2010, 26(8): 6-10, 14.
YAN X F. Pollution reduction benefit and optimization measures of Chengdulu combined sewage detention tank in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(8): 6-10, 14.
- [9] 李万军,杨振. 海绵城市建设理念及关键技术[J]. 山西建筑, 2023, 49(11): 169-174.
LI W J, YANG Z. The construction concept and key technology of sponge city [J]. Shanxi Architecture, 2023, 49(11): 169-174.

(上接第84页)

- [17] 王桂强,刘洁琼,董伟楠,等. 氮/硫共掺杂多孔碳纳米片的制备及其电化学性能[J]. 物理学报, 2018, 67(23): 276-284.
WANG G Q, LIU J Q, DONG W N, et al. Nitrogen/sulfur co-doped porous carbon nanosheets and its electrochemical performance[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(23): 276-284.
- [18] 蔡元兴,徐希杉,王振华. 直接巯基化石墨烯对汞吸附性能研究[J]. 山东建筑大学学报, 2020, 35(3): 13-20, 60.
CAI Y X, XU X S, WANG Z H. Study on adsorption properties of directly-thiolated graphene for mercury [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2020, 35(3): 13-20, 60.