

稻壳吸附孔雀石绿染料废水的研究

张 歌, 江 妍, 王莹茹

武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年4月14日; 发布日期: 2025年4月22日

摘 要

论文选用稻壳作吸附材料处理孔雀石绿模拟废水。借助SEM、BET和FTIR等手段对稻壳结构、形貌和特性进行表征, 采用静态吸附实验探究了吸附时间、吸附剂投加量、孔雀石绿初始浓度和温度等因素对吸附效果的影响, 并用动力学模型和吸附等温模型进行拟合分析。SEM可以明显观察稻壳呈现纤维状或蜂窝状多孔结构, BET结果表明稻壳的比表面积为 $0.8064 \text{ m}^2/\text{g}$ 。孔雀石绿在稻壳上的吸附符合Langmuir模型, 说明孔雀石绿在稻壳的吸附为单分子层吸附。动力学拟合结果证明稻壳对孔雀石绿的吸附符合准二级动力学模型, 以化学吸附为主导。

关键词

稻壳, 孔雀石绿, 吸附

Study on the Adsorption of Malachite Green Dye Wastewater by Rice Husk

Ge Zhang, Yan Jiang, Yingru Wang

School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: Apr. 14th, 2025; published: Apr. 22nd, 2025

Abstract

The paper uses rice husk as an adsorbent material to treat simulated wastewater containing malachite green. The structure, morphology, and characteristics of rice husks were characterized using SEM, BET, and FTIR techniques. Static adsorption experiments were conducted to investigate the effects of adsorption time, adsorbent dosage, initial concentration of malachite green, and temperature on the adsorption efficiency. Dynamic and adsorption isotherm models were fitted and analyzed. SEM can clearly observe the fibrous or honeycomb like porous structure of rice husks, and BET results show that the specific surface area of rice husks is $0.8064 \text{ m}^2/\text{g}$. The adsorption of malachite green on

rice husks conforms to the Langmuir model, indicating that the adsorption of malachite green on rice husks is a monolayer adsorption. The dynamic fitting results demonstrate that the adsorption of peacock green by rice husks follows a quasi second order kinetic model, with chemical adsorption as the dominant mechanism.

Keywords

Rice Husk, Malachite Green, Adsorption

Copyright © 2025 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

我国作为一个农业大国,主要农作物为水稻和小麦,据国家统计局公告,2023年我国的稻谷产量为28,337亿斤,每年生产大量稻米的同时也产生了大量的稻壳。稻壳中主要包括木质素、半纤维、纤维素、少量的天然蛋白质等有机质,以及二氧化硅和微量金属氧化物等[1]。据研究稻壳具有一定的比表面积,存在活性官能团,使其具有作为吸附材料的潜质[2]。

目前常见的农业废弃物有玉米秸秆[3]、油菜秸秆[4]、棕榈油熟料[5]、花生壳[6]、稻壳等,农业废弃物的资源化利用主要集中在制作堆肥、加工饲料、制备生物炭、废水处理等方面。另外,农业废弃物多具有疏松、多孔的结构,并含有羧基、羟基等基团,通常被作为吸附材料应用于污染治理领域,不仅可以减轻环境负担,还可以“以废治废”。Hu等[7]以稻壳为原料,制备了具有丰富孔结构和较大比表面积的脱硅稻壳炭(DRHC),并将其作为可规模化的载体,利用含金属离子的废水在载体表面原位生长蒲公英状纳米粒子团簇,同时,以过氧化单硫酸钾(PMS)为活化剂,研究了它们对亚甲基蓝(MB)的催化去除能力。结果表明,该材料对亚甲基蓝具有良好的降解效果,pH范围宽,重复使用性能稳定,适合于多种染料的降解。Li[8]等以稻壳生物质为原料,采用 MgCl_2 和 Na_2CO_3 对生物质进行改性,制备了一种新型 MgO 改性生物炭(MgO-Z@RHB), $\text{MgO-5@RHB-450/MgO-5@RHB-600}$ 对 Cd(II) 、 Cu(II) 、 Zn(II) 和 Cr(VI) 进行吸附处理,吸附容量分别为91.13/104.68、166.68/173.22、80.12/104.38和38.88/47.02mg/g。Das等[9]以紫柳树叶粉为吸附剂,对亚甲基蓝染料进行吸附实验,在最优条件下,吸附剂的最大吸附效率为98.70%。

孔雀石绿(Malachite Green, MG)是一种三苯甲烷类的人工合成的阳离子染料,1877年由德国化学家Hermann Fischer合成,外观为亮绿色,带金属光泽的晶体[10]。MG分子式 $\text{C}_{23}\text{H}_{25}\text{Cl}$,分子量364.911,熔点 $158^\circ\text{C}\sim 160^\circ\text{C}$,色指数42,000。MG易溶于水,溶于乙醇、甲醇和戊醇,水溶液呈蓝绿色。当孔雀石绿溶于水时,其最大吸收波长618 nm [11]。化学结构是由三个苯环与位于中心的碳原子相连接的,其中两个位于不同苯环的氢取代为二氨基氨基,被归类为三苯甲烷类的延伸染料[12]。

孔雀石绿可用作生物染色剂,植物病毒感染的宿主细胞染色[13]。并且孔雀石绿是一种廉价而有效的抗菌、局部杀菌剂和寄生虫剂,但在水产养殖业中应用是非法的[14]。因孔雀石绿对哺乳动物细胞具有高度的细胞毒性,并促进肝脏和肾脏疾病。此外,MG残留在水生环境中,被鱼类吸收后快速代谢成脂溶性的隐色孔雀石绿,这种代谢物在鱼类组织中积累,选择性破坏正常的肝肾细胞、抑制生物细胞酶的合成与活性、进入细胞膜使得DNA变异等等,从而造成致癌、致畸和致突变效应,威胁着生命安全[15]。因此,孔雀石绿不仅破坏环境,而且通过食物链对公众健康构成严重威胁。我国在农业行业标准《NY5071-

2002 无公害食品鱼药使用准则》中也将孔雀石绿列为禁用药物。由于没有廉价高效的替代品,孔雀石绿在水产养殖中的使用禁而不止。2019 年 6 月 12 日前后,杭州市消保委在对七家买菜类 APP 进行评测时,发现“叮咚买菜”、“美团-优品生鲜”2 家买菜 APP 的鳊鱼存在孔雀石绿药残的情况。而在 2017 年国家食药总局的通告上,涉及北京、石家庄、沈阳、上海、南京、杭州、福州、济南、武汉、广州、西安 11 个市共 31 个批发市场的鳊鱼检出孔雀石绿。水环境中孔雀石绿的去除刻不容缓。

本研究中选择稻壳吸附处理孔雀石绿,采用 SEM、BET 以及 FTIR 等表征手段分析稻壳的结构特征,此外通过拟合吸附等温线和吸附动力学,探讨稻壳对 MG 的吸附机理。

2. 实验材料和方法

2.1. 实验试剂及仪器

2.1.1. 实验试剂

实验所用稻壳取自湖北赤壁,孔雀石绿购于国药集团化学试剂有限公司。

2.1.2. 实验仪器

实验所用仪器:紫外-可见分光光度计(UV-2900 上海舜宇恒平科学仪器有限公司)、恒温水浴振荡器(SHZ-C 上海跃进医疗器械厂)、傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet 6700)、医用离心机(MH3180 长沙综仪生物科技有限公司)、比表面积及孔径分析测定仪(American Micromeritics Instrument Corporation, ASAP2460)、扫描电子显微镜(JSW-5510LV 日本电子株式会社)。

2.2. 材料表征方法

通过扫描电子显微镜(SEM)分析材料的形貌,样品采用 Japan Hitachi, Regulus 8100 冷场场发射扫描电镜测定。通过傅里叶红外光谱仪(FTIR)分析材料的分子结构和化学键等信息,实验中样品的表征采用赛默飞世尔科技公司 Nicolet 6700 进行表征。通过比表面积测试(BET)在-195.6℃下,以 N₂ 为吸附介质测定材料的比表面积和孔结构,采用比表面积孔隙度分析仪(American Micromeritics Instrument Corporation, ASAP2460)进行表征。

2.3. 模拟废水的制备

孔雀石绿是三苯甲烷类染料,配置不同浓度的 MG 模拟废水进行实验。用分析天平称取 0.1000 g MG 于 1 L 容量瓶中定容,配置成 100 mg/L 溶液。通过紫外-可见分光光度计在 618 nm 处测吸光度绘制 MG 标准曲线。

2.4. 吸附实验

取 200 mL MG 模拟废水于圆底烧瓶中,放入恒温水浴振荡器震荡,振荡速度为 150 rpm,温度为 25℃ 进行吸附实验,定时取上清液测吸光度计算溶液浓度。根据公式(1)和公式(2)分别计算吸附量和去除率。

吸附量的计算:

$$q = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (1)$$

去除率的计算:

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

其中 C_0 为模拟废水初始浓度, mg/L; C_t 为 t 时刻的模拟废水浓度, mg/L; m 为吸附剂投加量, g; V 为模拟废水体积, L; C_e 为吸附平衡时的模拟废水浓度, mg/L; η 为去除率, %; q 为 1 g 吸附剂吸附 MG 模拟废水的量; mg/g。

2.5. 吸附等温线

吸附等温线是通过分别拟合 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 等温线模型研究特定温度下吸附量和溶液浓度的关系, 了解到吸附层的结构, 以及两者之间的作用力[16]。

Langmuir 等温线方程:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \quad (3)$$

Freundlich 等温线方程:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n \log C_e} \quad (4)$$

Temkin 等温线方程:

$$q_e = b \log K_T C_e \quad (5)$$

式中, q_e 为吸附平衡时的吸附容量, mg/g; C_e 为吸附平衡时 MG 模拟废水的浓度, mg/L; K_L 为朗缪尔常数, L/mg; q_m 为最大吸附容量, mg/g; K_F 为 Freundlich 常数; $\frac{1}{n}$ 为吸附指数; K_T (L/g) 和 b 为 Temkin 常数。

2.6. 吸附动力学

为了进一步研究吸附机理, 故采用准一级动力学、准二级动力学以及粒子内扩散模型在三种不同 MG 模拟废水初始浓度条件下进行拟合[17]。

准一级动力学模型:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (6)$$

准二级动力学模型:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (7)$$

粒子内扩散模型:

$$q_t = K_p t^{0.5} + C \quad (8)$$

式中, q_e 为吸附平衡时的吸附量, mg/g; q_t 为吸附剂在 t 时刻的吸附容量, mg/g; K_1 为准一级动力学常数, 1/min; K_2 为准二级动力学常数, g/mg.min; K_p 为粒子内扩散模型常数, g/mg.min; C 是与边界层厚度有关的常数。

3. 结果与分析

3.1. FTIR 分析

图 1 为稻壳的傅里叶红外变换光谱, 图 1 中显示在 3420.5 cm^{-1} 、 2942.4 cm^{-1} 、 2352.1 cm^{-1} 、 1633.1 cm^{-1} 、 1099.7 cm^{-1} 等处有明显的伸缩振动吸收峰, 查阅文献可知 3420.5 cm^{-1} 是 -OH 的伸缩振动, 2942.4 cm^{-1} 是 C-H 的伸缩振动, 1633.1 cm^{-1} 是 C=O 的伸缩振动, 这可能与稻壳中的半纤维素与木质素有关, 1099.7 cm^{-1} 是

Si-O-Si 基团的伸缩振动[18]。

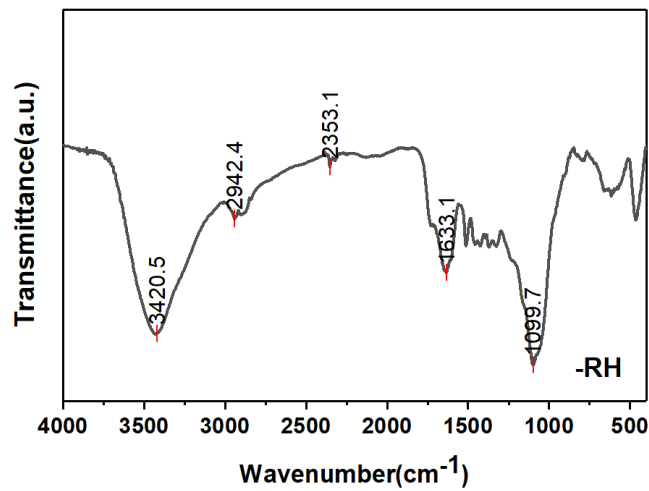


Figure 1. FTIR Spectra of RH
图 1. 稻壳的 FTIR 光谱

3.2. SEM 分析

如图 2 所示，图 a 和 b 为原稻壳的不同放大倍数的 SEM 图，稻壳外层通常呈现致密且凹凸不平的形貌，主要由二氧化硅(SiO₂)沉积形成的硅质细胞层构成。SEM 图像中可能观察到颗粒状或鳞片状结构，这些颗粒多为无定形二氧化硅，粒径在微米级，紧密堆积形成保护层。内层以纤维素和半纤维素为主，呈现纤维状或蜂窝状多孔结构，反映了生物质天然的多孔特性。

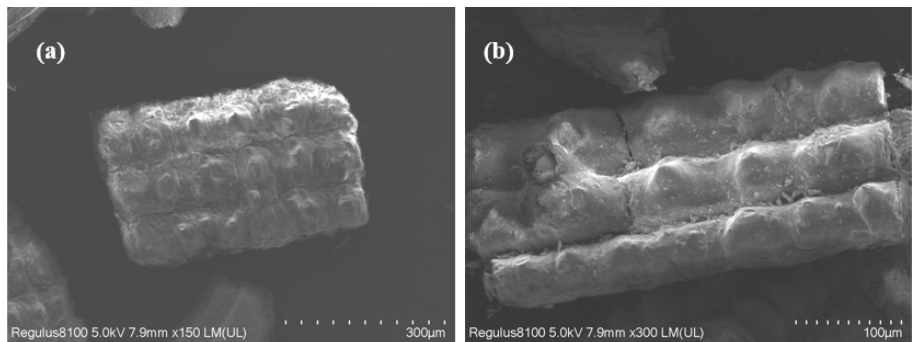


Figure 2. SEM of RH
图 2. 稻壳的扫描电镜图

3.3. BET 分析

为了探究吸附剂的比表面积，在 77 K 氮气吸附的条件下，图 3(a)为稻壳的吸附/解吸等温线。根据吸附/解吸等温线的五种类型可以判断属于多级孔材料，其中微孔可以提供更大的比表面积和孔容，增加活性位点的数量；介孔和大孔可以促进污染物分子的快速扩散以及快速转移。根据表 1 可得出，其中稻壳的比表面积为 0.8064 m²/g。回滞环形状为具有 H3 型滞后环的 IV 型等温线，证明稻壳是具有粒间空隙或狭缝孔隙的介孔材料，其中 H3 型回滞环吸附等温线没有明显的饱和吸附平台，表明孔结构不规整，H3 型见于层状结构的聚集体，产生狭缝的介孔或大孔材料[19]。H3 型的回滞环有两个不同的特征：(i) 吸附

分支类似于 II 型等温吸附线；(ii) 脱附分支的下限通常位于气穴引起的 P/P_0 压力点。另外，这些孔网都是由大孔组成，并且它们没有被孔凝聚物完全填充。

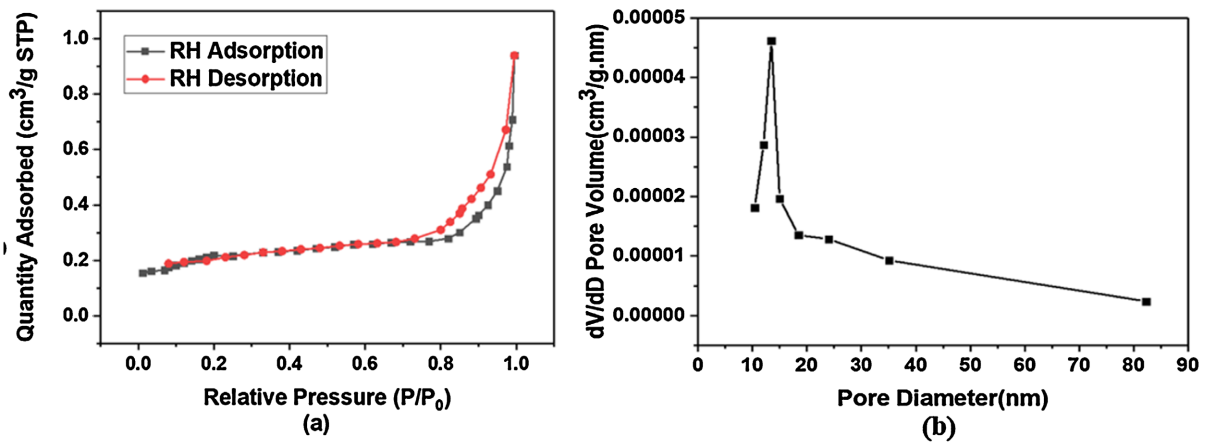


Figure 3. Adsorption desorption curve (a) and pore size distribution curve (b) of RH
图 3. 稻壳的吸附 - 解吸曲线(a)和孔径分布曲线(b)

Table 1. The specific surface area, total pore volume, and average pore size of RH
表 1. 稻壳的比表面积、总孔容和平均孔径

Parameters	RH
Specific surface area (m^2/g)	0.8064
Pore volume/ (cm^3/g)	0.0014
Average pore size/nm	7.2053

3.4. 吸附条件实验

3.4.1. 吸附时间对吸附效果的影响

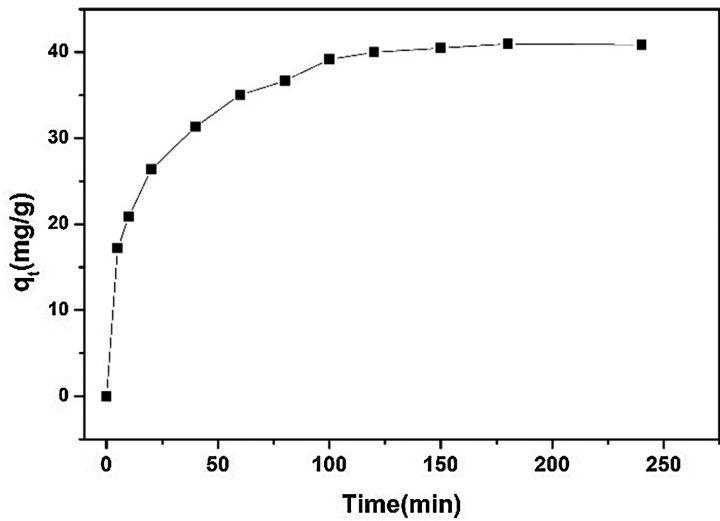


Figure 4. Effect of contact time on removal of malachite green
图 4. 吸附时间对 MG 吸附效果的影响

如图 4 所示,可以得出在 50 min 内吸附量快速增加,随后趋于平衡,在 120 min 后吸附量增幅较小。吸附开始阶段,稻壳由于存在大量的吸附结合位点,吸附速度很快,之后,分子进入孔隙(内部表面),这是一个相对缓慢的过程,而吸附平衡阶段,由于结合位点的饱和以及 MG 浓度的降低导致吸附量增幅不大,吸附达到平衡。因此,选择 120 min 作为稻壳吸附 MG 的最佳吸附时间。

3.4.2. 吸附剂投加量对吸附效果的影响

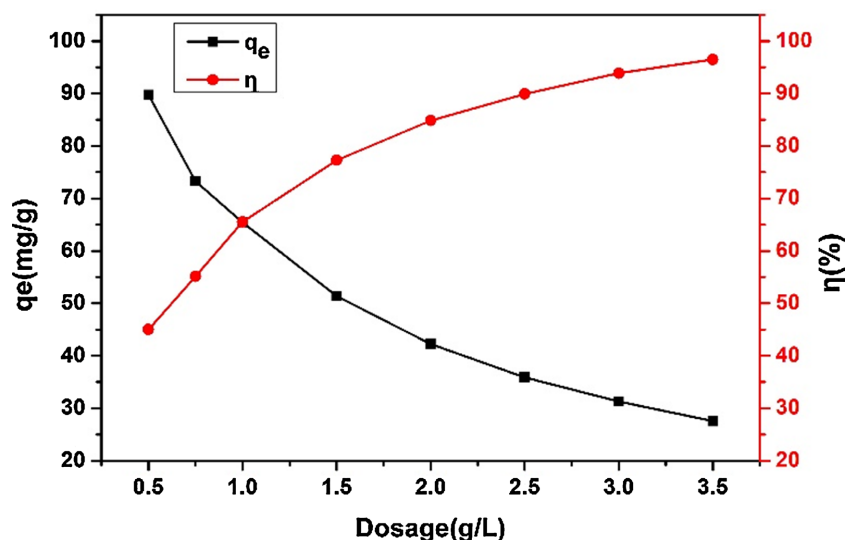


Figure 5. Effect of adsorbent dose on removal of malachite green

图 5. 吸附剂投加量对 MG 吸附效果的影响

吸附剂投加量是吸附过程中的一个重要影响因素,在 MG 初始浓度 100 mg/L,温度在 25℃,搅拌速度为 150 rpm,接触时间为 120 min 的条件下,投加量分别为 0.5、0.75、1、1.5、2、2.5、3、3.5 g/L,由图 5 可知,随着投加量的增加,RH 吸附量逐渐下降,MG 去除率逐渐增大。这是因为随着稻壳投加量增加,从而增加活性吸附位点,提高 MG 去除率。综合考虑去除率和吸附量确定稻壳最佳投加量为 1.0 g/L。

3.4.3. MG 初始浓度对吸附效果的影响

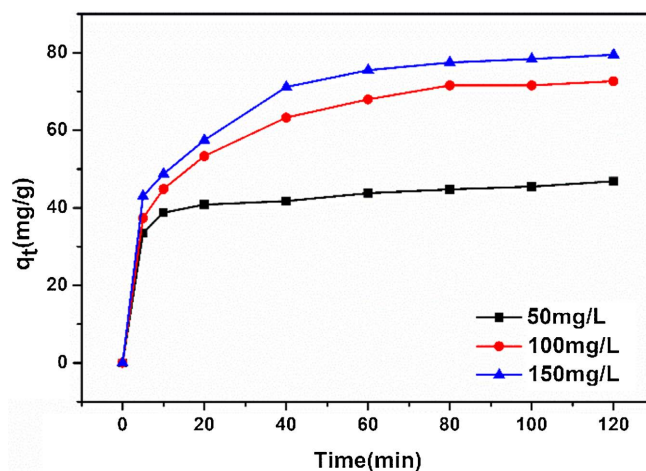


Figure 6. The effect of initial solution concentration on MG adsorption efficiency

图 6. 溶液初始浓度对 MG 吸附效果的影响

在温度在 25℃, 搅拌速度为 150 rpm, 稻壳投加量为 1 g/L, 接触时间为 120 min 的条件下, MG 初始浓度在 50~150 mg/L 考察吸附效果。由图 6 可以看出, MG 初始浓度从 50 mg/L 增加到 150 mg/L, 吸附量逐渐增加。这是由于在固定的吸附剂投加量, 当溶液的初始质量浓度较低时, 吸附剂能够提供充足的吸附位点和活性基团, 而随着溶液初始质量浓度的不断增加, 吸附位点逐渐饱和, 活性基团相对减少, 则吸附剂达到吸附饱和[20]。

3.5. 吸附等温线

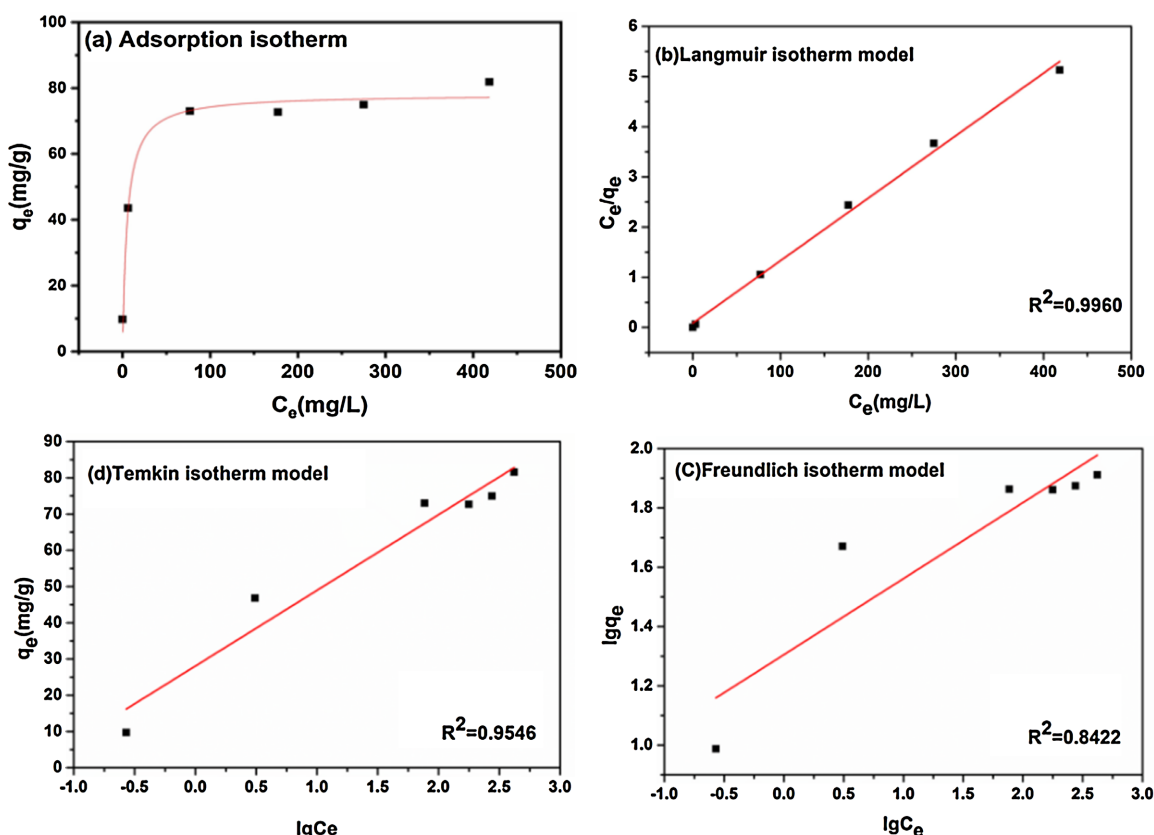


Figure 7. The adsorption isotherm of RH to MG

图 7. 稻壳对 MG 的吸附等温线

为了研究 MG 染料吸附量 q_e 溶液中 MG 浓度 C_e 之间的平衡关系, 在不同浓度 MG (10~500 mg/L) 和稻壳投加量 (1 g/L), 接触时间为 120 min 的条件下进行等温吸附研究。分别拟合 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 等温线模型。结果如图 7 所示, 图(a)为吸附等温线, 稻壳的最大吸附量为 76.51 mg/g, 其次根据相关系数 R^2 可以得出 MG 在 RH 上的吸附过程符合 Langmuir 模型 ($R^2=0.9960$), 说明 MG 在 RH 上的吸附过程为单分子层吸附。一般认为 $1/n$ 越小, 吸附剂对吸附质的吸附性能越好, 当 $1/n > 2$ 时, 则难以吸附, RH 的 $1/n$ 值为 0.2564, 表示 RH 可以对 MG 有一个很好的吸附[21]。由吸附等温线可知, 随着初始浓度的增加, RH 对 MG 的吸附量逐渐增加, 这与吸附质在水中的浓度梯度的驱动力相关。

3.6. 吸附动力学

分别在 MG 初始浓度为 50 mg/L、100 mg/L 和 150 mg/L 条件下, 进行吸附实验。根据拟合相关系数 R^2 可以判断符合可以得出 MG 在 RH 上的吸附最符合准二级动力学模型, 结果如图 8 和表 2 所示, 根据

拟合计算出的单位吸附量 q_e ，准二级动力学模型下原稻壳对 MG 的吸附量分别为 46.73、75.24、82.17 mg/g；对比来看，试验 $q_{e,exp}$ 的值(46.82, 72.63, 79.45 mg/g)与来自准二级动力学模型的计算的 $q_{e,cal}$ 值一致，准二级吸附动力学模型能够更好地描述 RH 对 MG 的吸附过程和行为，这与 R^2 得出的结论一致。因此得出结论：RH 对 MG 的吸附过程由化学吸附主导。

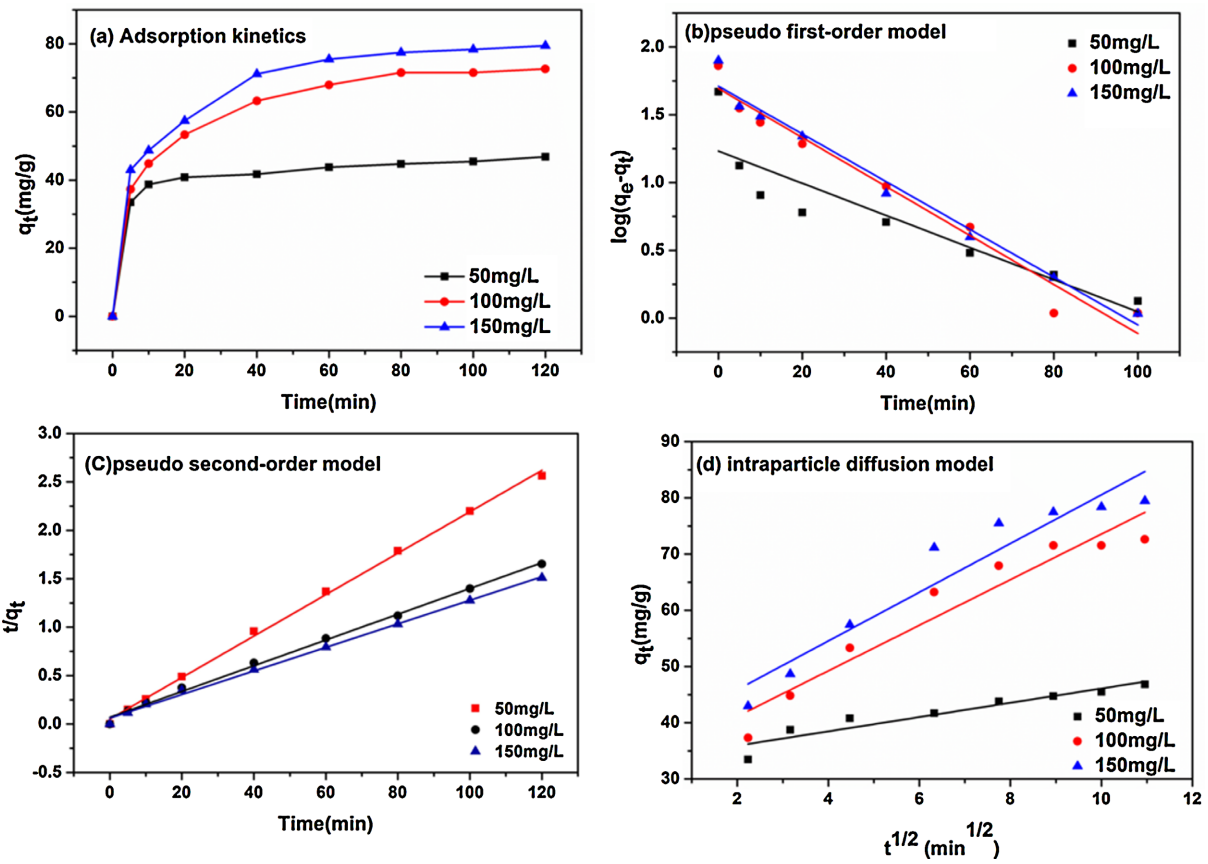


Figure 8. The adsorption kinetics curve of MG adsorption by RH
图 8. 稻壳吸附 MG 的吸附动力学拟合曲线

Table 2. Pseudo first-order, Pseudo second-order and intraparticle diffusion model fitting parameter
表 2. 准一级动力学、准二级动力学和粒子内扩散模型方程拟合参数表

Antibiotic	Initial concentration (mg/L)	Pseudo first order model			Pseudo-second order model			Intraparticle diffusion model		
		q_e	K_1	R^2	q_e	K_2	R^2	C	k_p	R^2
MG	50	3.43	0.019	0.9087	46.73	0.009	0.9992	33.39	1.271	0.9472
	100	5.44	0.018	0.9832	75.24	0.002	0.9965	33.02	4.054	0.9628
	150	5.53	0.018	0.9902	82.17	0.002	0.9968	37.23	4.332	0.9586

4. 结论

本论文采用稻壳作吸附剂吸附处理三苯甲烷类染料孔雀石绿，在 MG 初始浓度为 100 mg/L，稻壳投加量为 1.0 g/L 条件下，吸附处理 120 min MG 去除率达 72.64%。吸附等温方程和吸附动力学拟合表明，孔雀石绿在稻壳上的吸附符合 Langmuir 模型为单分子层吸附，最大吸附量为 76.51 mg/g，吸附动力学拟

合与准二级动力学模型吻合, 表明稻壳对孔雀石绿的吸附以化学吸附为主导。

参考文献

- [1] Montalvo-Andía, J., Reátegui-Romero, W., Peña-Contreras, A.D., Zaldivar Alvarez, W.F., King-Santos, M.E., Fernández-Guzmán, V., *et al.* (2022) Adsorption of Cd (II) Using Chemically Modified Rice Husk: Characterization, Equilibrium, and Kinetic Studies. *Adsorption Science & Technology*, **2022**, Article ID: 3688155. <https://doi.org/10.1155/2022/3688155>
- [2] Chakraborty, S., Chowdhury, S. and Das Saha, P. (2011) Adsorption of Crystal Violet from Aqueous Solution onto NaOH-Modified Rice Husk. *Carbohydrate Polymers*, **86**, 1533-1541. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.058>
- [3] Peng, D., Ouyang, F., Liang, X., Guo, X., Dang, Z. and Zheng, L. (2018) Sorption of Crude Oil by Enzyme-Modified Corn Stalk vs. Chemically Treated Corn Stalk. *Journal of Molecular Liquids*, **255**, 324-332. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.178>
- [4] Gao, R., Xiang, L., Hu, H., Fu, Q., Zhu, J., Liu, Y., *et al.* (2020) High-efficiency Removal Capacities and Quantitative Sorption Mechanisms of Pb by Oxidized Rape Straw Biochars. *Science of the Total Environment*, **699**, Article ID: 134262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134262>
- [5] Rehman, M.A., Yusoff, I., Ahmmad, R. and Alias, Y. (2015) Arsenic Adsorption Using Palm Oil Waste Clinker Sand Biotechnology: An Experimental and Optimization Approach. *Water, Air, & Soil Pollution*, **226**, Article No. 149. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2411-9>
- [6] Kushwaha, R., Singh, R.S. and Mohan, D. (2023) Comparative Study for Sorption of Arsenic on Peanut Shell Biochar and Modified Peanut Shell Biochar. *Bioresource Technology*, **375**, Article ID: 128831. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128831>
- [7] Hu, Z., Su, G., Long, S., Zhang, X., Zhang, L., Chen, Y., *et al.* (2024) Synthesis of X@DRHC (X = Co, Ni, Mn) Catalyst from Comprehensive Utilization of Waste Rice Husk and Spent Lithium-Ion Batteries for Efficient Peroxymonosulfate (PMS) Activation. *Environmental Research*, **245**, Article ID: 118078. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118078>
- [8] Li, A., Xie, H., Qiu, Y., Liu, L., Lu, T., Wang, W., *et al.* (2022) Resource Utilization of Rice Husk Biomass: Preparation of MgO Flake-Modified Biochar for Simultaneous Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution and Polluted Soil. *Environmental Pollution*, **310**, Article ID: 119869. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119869>
- [9] Das, S.K., Manchanda, P. and Peinemann, K. (2019) Solvent-resistant Triazine-Piperazine Linked Porous Covalent Organic Polymer Thin-Film Nanofiltration Membrane. *Separation and Purification Technology*, **213**, 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.046>
- [10] Kumar, B. and Kumar, U. (2015) Adsorption of Malachite Green in Aqueous Solution onto Sodium Carbonate Treated Rice Husk. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **32**, 1655-1666. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0351-5>
- [11] Achary, P.G.R., Pattanaik, P. and Nanda, B. (2023) Facile Synthesis of Lanthanum Doped Strontium Manganite for Photocatalytic Decolourization of Malachite Green. *Inorganic Chemistry Communications*, **158**, Article ID: 111545. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111545>
- [12] Tewari, K., Singhal, G. and Arya, R.K. (2017) Adsorption Removal of Malachite Green Dye from Aqueous Solution. *Reviews in Chemical Engineering*, **34**, 427-453. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0041>
- [13] Le Curieux, F., Gohlke, J.M., Pronk, A., Andersen, W.C., Chen, G., Fang, J., *et al.* (2021) Carcinogenicity of Gentian Violet, Leucogentian Violet, Malachite Green, Leucomalachite Green, and CI Direct Blue 218. *The Lancet Oncology*, **22**, 585-586. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(21\)00178-9](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(21)00178-9)
- [14] Xia, Y., Yuan, H., Qiao, C., Li, W., Wang, R., Chen, P., *et al.* (2024) Multifunctional Eu³⁺-MOF for Simultaneous Quantification of Malachite Green and Leuco-Malachite Green and Efficient Adsorption of Malachite Green. *Journal of Hazardous Materials*, **465**, Article ID: 133386. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133386>
- [15] Sharma, J., Sharma, S. and Soni, V. (2023) Toxicity of Malachite Green on Plants and Its Phytoremediation: A Review. *Regional Studies in Marine Science*, **62**, Article ID: 102911. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102911>
- [16] Su, D., Huang, J., Li, Y., Chen, L. and Wang, Y. (2024) Removing Efficiency and Mechanism of Ciprofloxacin from Aqueous Solution Using Rectorite. *Water, Air, & Soil Pollution*, **235**, Article No. 271. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07070-z>
- [17] Vyavahare, G., Patil, R., Gurav, R., Shorobi, F.M., Kadam, S., Jadhav, J., *et al.* (2024) Investigating the Efficacy of Biochar Produced from Agro-Waste for Basic Fuchsin Dye Removal: Kinetics, Isotherm, and Thermodynamic Studies. *Journal of the Indian Chemical Society*, **101**, Article ID: 101278. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101278>
- [18] Shen, Y. and Fu, Y. (2018) Koh-Activated Rice Husk Char via CO₂ Pyrolysis for Phenol Adsorption. *Materials Today Energy*, **9**, 397-405. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.07.005>

- [19] 闫改萌. 稻壳基多孔材料的制备及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [20] Shen, Y., Yu, X. and Wang, Y. (2019) Facile Synthesis of Modified Rectorite (M-REC) for Effective Removal of Anionic Dye from Water. *Journal of Molecular Liquids*, **278**, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.045>
- [21] Li, M., Wang, Y., Liu, Y., Wang, H. and Song, H. (2022) Preparation of Active Carbon through One-Step NaOH Activation of Coconut Shell Biomass for Phenolic Wastewater Treatment. *Research on Chemical Intermediates*, **48**, 1665-1684. <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04650-0>