

试验研究

煤渣—沸石复合球的制备及其对氨氮和 COD_{Cr} 的吸附研究

周宇航¹, 田伟君^{1,2}, 俞慧博¹, 顾红鹰³, 刘庆¹, 金鑫¹

(1.中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2.海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3.山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013)

摘要: 研制了煤渣-沸石复合多孔介质材料用于去除苇田养殖水体中的氨氮和 COD_{Cr}。通过材料中煤渣、沸石不同配比对吸附效果的影响实验, 确定了其配比为 2:1。进而以吸附实验探讨了该材料对水中氨氮和 COD_{Cr} 的吸附性能。结果表明, 该材料对氨氮和 COD_{Cr} 的吸附过程可用伪二级动力学方程和 Langmuir 等温方程描述; 在 25 °C 条件下, 通过 Langmuir 吸附等温方程拟合出的最大吸附量分别为 0.271 mg/g、0.680 mg/g, 而吸附速率主要受到边界层扩散和内扩散的控制。该材料对实际水体的吸附效果显示, 在不同 COD_{Cr} 浓度条件下其对氨氮的去除有着较好的稳定性, 对 COD_{Cr} 的去除效率随着 COD_{Cr} 初始浓度的增大稍有增加。

关键词: 煤渣; 沸石; 吸附; 氨氮; COD_{Cr}

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2016)01-0030-07

SYNTHESIS OF A COAL CINDER-ZEOLITE

HONEYCOMBED SORBENT AND ITS ADSORPTION

PERFORMANCE FOR AMMONIA NITROGEN AND COD_{CR}

ZHOU Yu-hang¹, TIAN Wei-jun^{1,2}, YU Hui-bo¹, GU Hong-ying³, LIU Qing¹, JIN Xin¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 3. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China)

Abstract: A coal cinder-zeolite honeycombed sorbent was developed to remove ammonia nitrogen and COD_{Cr} in the aquaculture water. The more suitable adding ratio of cinder and zeolite in honeycombed sorbent was determined as 2:1 after the influence of different adding ratios of cinder and zeolite on the adsorption of ammonia nitrogen and COD_{Cr} was analyzed. The adsorption performance of the sorbent for ammonia nitrogen and COD_{Cr} in the simulative water was investigated. The results showed that the adsorption process of the sorbent could be expressed with pseudo-second-order kinetic model and Langmuir equation. The adsorption capacities of ammonia nitrogen and COD_{Cr} calculated from Langmuir equation were 0.271 mg/

收稿日期: 2015-11-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项
(2013ZX07202-007)

第一作者简介: 周宇航(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与水污染控制。

g and 0.680 mg/g respectively. And the adsorption rate was controlled by the liquid film diffusion and intraparticle diffusion. In addition, the purification effect with different initial concentrations of COD_{Cr} showed that the removal of ammonia nitrogen kept stable, while the removal of COD_{Cr} increased slightly with the rising initial concentration.

Key words: coal cinder; zeolite; adsorption; ammonia nitrogen; COD_{Cr}

辽河河口地区具有丰富的湿地资源,为达到苇田湿地的多级利用,苇田养殖业近年来得到了快速发展^[1]。苇田养殖是在芦苇湿地中构建田间工程,同时进行鱼、蟹养殖和芦苇种植的一水多收的生态养殖经济模式^[2]。然而随着苇田养殖业整体上向着集约化、高密度、高产出的模式发展,常年过度放养使得苇田水体中氨氮、COD_{Cr}含量超标^[3],污染物质不断积累对苇田湿地生态系统及滨海环境带来一定影响。

现有的养殖水体净化技术(如过滤法^[4]、强氧化法^[5-6]、生物流化床^[7]、生物滤池^[8]等)都是针对传统养殖的特点而研发的,且大多能耗大、维护管理复杂。而苇田养殖与传统养殖明显不同,总体上表现为需水量很大,但又随着季节变化对水量的要求有所不同,且间歇性排水,在鱼、蟹捕捞和芦苇收割后,苇田多呈现无水状态,传统处理技术对苇田养殖水体并不具有适用性。

因此,本文根据辽河口苇田养殖水体的污染特征,从经济有效、可操作性出发,利用成本较低的煤渣、沸石、PVA有机粘合剂开发研制耐冲击负荷、多孔隙的材料,并研究其对水体中氨氮和COD_{Cr}的吸附性能,以期获得一种可以作为原位净化水体的填充介质。从而利用煤渣和沸石的大比表面积和高吸附性,强化介质微孔隙捕捉有机物的“吸附效应”净化养殖水体中的营养有机污染物。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 主要原材料

煤渣(原煤产地为辽宁省清河门),经测定后其主要成分含量如表1所示;沸石(购自青岛华之杰设备仪器有限公司),其理化性质如表2所示。

1.1.2 主要试剂

聚乙烯醇(1799型);丁二酸(AR级);盐酸(AR级);氯化铵(AR级);邻苯二甲酸氢钾(AR级)。

1.1.3 主要仪器

电磁矿石制样粉碎机(DF-4,浙江中科建材仪器有限公司);成球机(BY-300,泰州市黎明制药机械有限公司);水平振荡器(LRH-250-G250L型,韶关泰宏医疗器械有限公司);紫外可见分光光度计(18系列,北京普析通用仪器有限责任公司);消解装置(XJ-,韶关泰宏医疗器械有限公司);JSM-840扫描电镜(JEOL公司)。

表1 煤渣主要成分含量

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	TiO ₂	CaO	MgO	CaF	MnO ₂
含量%	62.25	20.72	5.75	0.59	1.33	2.05	0.35	0.85

表2 天然沸石的理化性能指标

比重 g/cm ³	容重 g/cm ³	磨损率%	含泥量%	水分%	钠离子交换能力 g/cm ³
2.0~2.6	1.6	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≥800

1.1.4 水样

辽河口苇田养殖水体,氨氮和COD_{Cr}的浓度分别在1.5和50 mg/L左右,pH约为8。为此实验过程中所用的模拟水样为COD_{Cr}浓度相近的中国海洋大学景观河水、氯化铵、邻苯二甲酸氢钾、去离子水配制而成的相应水样。

1.2 实验方法

1.2.1 PVA有机黏合剂的制备

PVA有机黏合剂的主要成分为聚乙烯醇、丁二酸、去离子水,其配比为5.6:1:80(g:g:mL),即85℃水浴条件下将5.6 g粉末聚乙烯醇溶于80 mL去离子水中,溶解后加入1 g丁二酸,搅拌溶解后冷却至室温即得高效PVA有机粘合剂^[9]。丁二酸作为交联剂^[10],对PVA粘合剂进行了改性,增强其耐水性和成膜机械性能。

1.2.2 多孔介质材料的制备

将煤渣、沸石研磨,过20目筛子。研磨后的煤渣用6 mol/L盐酸浸泡,用水清洗至清洗液pH为6~7,烘干后与沸石按一定质量比混合均匀置于成球机中,添加PVA有机粘合剂制成直径约3 cm的球体,每枚复合球的重量为19.7 g±0.3 g。烘干后,用水浸泡两周,取出再次烘干。

1.2.3 煤渣、沸石不同对比对氨氮和 COD_{Cr} 吸附性能的影响

分别以单一煤渣、单一沸石以及煤渣和沸石 2:1、1:1、1:2 的质量比为原料制作直径约 3 cm 的多孔介质材料。分别取 4 枚放入 700 mL 模拟水样中,在 25 °C 条件下恒温振荡,通过吸附实验,研究其对氨氮、COD_{Cr} 的去除效果,进而确定材料中煤渣和沸石配比。

1.2.4 吸附动力学试验

用氯化铵和去离子水配制成 10 mg/L 氨氮模拟用水 600 mL,取制备好的煤渣-沸石复合多孔介质材料 3 枚放入其中,在 25 °C 条件下恒温振荡,隔一定时间取样测定氨氮浓度;用邻苯二甲酸氢钾和去离子水配制 50 mg/L COD_{Cr} 模拟用水 400 mL,取备用的煤渣-沸石复合多孔介质材料 2 枚放入其中,在 25 °C 条件下恒温振荡,隔一定时间取样测定 COD_{Cr} 浓度。

根据模拟用水中氨氮、COD_{Cr} 浓度计算吸附量,即

$$q_e(q_t) = \frac{(c_0 - c_t)v}{m} \quad (1)$$

其中, q_e 为平衡吸附量, mg/g; q_t 为吸附 t 时间时的吸附量, mg/g; c_0 为吸附前模拟用水中污染物初始浓度, mg/L; c_t 为吸附 t 时间时模拟用水中污染物的浓度, mg/L; v 为溶液的体积, mL; m 为多孔介质材料的质量, g。

利用伪一级动力学方程、伪二级动力学方程和颗粒内扩散模型对所得实验数据进行拟合分析。动力学方程如下^[11]:

伪一级动力学方程:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

伪二级动力学方程:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_2 q_e} t \quad (3)$$

颗粒内扩散方程:

$$q_t = k_3 t^{0.5} + c \quad (4)$$

其中, q_e 为平衡吸附量, mg/g; q_t 为吸附 t 时间时的吸附量, mg/g; t 为吸附时间; k_1, k_2, k_3 为吸附速率常数, 单位分别为 min^{-1} 、 $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ 、 $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min}^{0.5})$ 。

1.2.5 吸附平衡实验

用氯化铵和去离子水配制 2、4、6、8、10、15、

20、25 mg/L 的氨氮模拟用水 200 mL,各取 1 枚煤渣-沸石复合多孔介质材料分别放入其中,在 25 °C 条件下恒温振荡 24 h,取样分别测定氨氮浓度;用邻苯二甲酸氢钾和去离子水分别配制 40、50、60、80、100、120、180、250、350 mg/L 的 COD_{Cr} 模拟用水 200 mL,各放入 1 枚煤渣-沸石复合多孔介质材料,在 25 °C 条件下恒温振荡 24 h,取样分别测定 COD_{Cr} 浓度,计算吸附量。用 Freundlich 方程和 Langmuir 方程对实验数据进行拟合分析。

Freundlich 方程:

$$\log q_e = \log k_F + \frac{1}{n} \log c_e \quad (5)$$

Langmuir 方程:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} b} \cdot \frac{1}{c_e} + \frac{1}{q_{\max}} \quad (6)$$

其中, q_e 为平衡吸附量, mg/g; q_{\max} 为饱和吸附量, mg/g; c_e 为平衡浓度, mg/L; K_F, n 为 Freundlich 方程的常数,由吸附等温线的截距和斜率分别计算所得, K_F 表示吸附程度, mg/g, n 表示溶液浓度和吸附作用的非线性关系; b 为 Langmuir 方程的特征常数,表示吸附能力, $\text{L}/\text{mg}^{[12-13]}$ 。

1.2.6 多孔介质材料在苇田养殖水体净化中的应用研究

K_F 针对辽河口苇田水体 COD_{Cr} 浓度的波动情况,实验中设置了三个 COD_{Cr} 浓度梯度,分别为 37 mg/L、56 mg/L、75 mg/L。分别取 4 枚多孔介质材料放入 700 mL 水样中,研究不同 COD_{Cr} 初始浓度条件下,该材料对实际废水的静态处理效果。

1.2.7 水样测定方法

氨氮测定方法为纳氏试剂分光光度法; COD_{Cr} 测定方法为重铬酸钾快速消解滴定法。

2 结果与讨论

2.1 煤渣、沸石不同对比对氨氮和 COD_{Cr} 吸附性能的影响

煤渣、沸石不同质量对比对氨氮和 COD_{Cr} 的去除效果如图 1 所示。单一煤渣对氨氮的最大去除效率为 32%,而添加沸石后,在十个小时实验时间内的最大去除效率均能达到 60% 左右。其中,煤渣、沸石质量比 2:1 时的最大去除效率为 57.2%,比单一煤渣对氨氮的去除效率有了较大的提升,且吸附速率也进一步增大。说明沸石在该材料中对氨氮的去除起着较显著的促进作用。而

随着沸石质量的增加,材料对氨氮的去除效率增大缓慢,可能是受到水中较低的氨氮浓度的限制。同时从图1可知,单一煤渣对 COD_{Cr} 的去除效果最好,其最大去除效率可达到 59.8%。添加沸石后的材料对 COD_{Cr} 的去除效率可稳定在 40%~50%。其中,煤渣、沸石质量比 2:1 时的最大去除效率为 51.2%,比其它配比材料的最大去除效率稍高。可见,煤渣对水体中 COD_{Cr} 的去除能力较沸石好。

结合苇田养殖水体中氨氮和 COD_{Cr} 浓度的实际,并综合考虑五种不同质量配比为原料的多孔介质材料对氨氮和 COD_{Cr} 的去除效果,煤渣废物的再利用以及多孔介质材料价格对其大量应用的影响,本研究拟采用煤渣、沸石 2:1 的质量配比为原料,制备煤渣-沸石复合多孔介质材料。

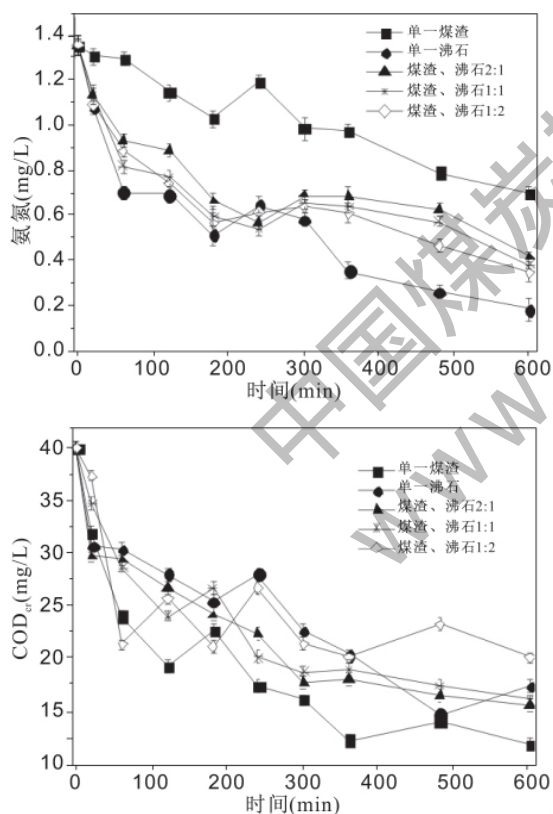


图1 煤渣、沸石五种配比对氨氮和 COD_{Cr} 吸附效果的影响

2.2 煤渣-沸石复合多孔介质材料的表征

煤渣用 6 mol/L 盐酸改性后,比表面积增大。由比表面积测定仪测出了煤渣改性前后的比表面积分别为 26.14 m²/g、37.74 m²/g,这是因为在使用盐酸改性过程中,盐酸与 SiO₂、Al₂O₃ 等发生反应,破坏了煤渣的表面结构,并且煤渣中的一些重金

属和易被盐酸溶解的物质溶出,从而使煤渣内部结构更加疏松,孔隙率增加^[14]。

以煤渣、沸石 2:1 的质量配比为原料制成的复合多孔介质材料的扫描电镜图片如图 2 所示。由 500 倍扫描电镜图片可知材料表面颗粒间相互堆叠,形成了大量的孔道结构;将材料表面结构放大 20 000 倍,微观结构中也显示出了较丰富的孔隙。较大的比表面积为氨氮等污染物质的吸附提供了更多的吸附位点,对大颗粒有机物也可起到良好的捕捉效果,因而对水中污染物质的去除能起到有效的作用^[15]。

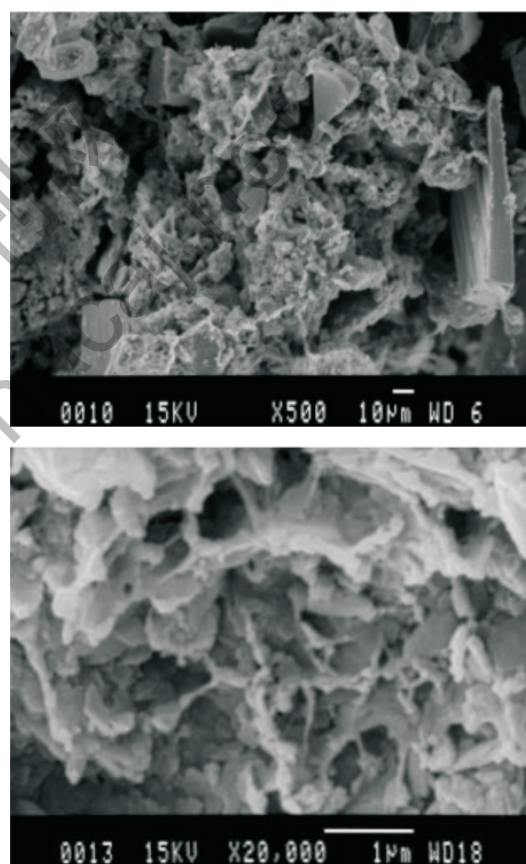


图2 煤渣-沸石复合多孔介质材料的 SEM 图

2.3 吸附动力学

为研究以煤渣、沸石 2:1 配比为原料的复合多孔介质材料对氨氮、COD_{Cr} 的吸附性能,对该过程的动力学进行了测定,结果见图 3。

在 25 °C 条件下,前 180 min,由于煤渣-沸石复合多孔介质材料具有较多的吸附位点,对氨氮和 COD_{Cr} 的吸附速率较快,300 min 后吸附速率逐渐减缓,之后吸附量增加很少。可能是由于溶液中吸附质浓度降低,溶液与材料表面的浓度差下降,

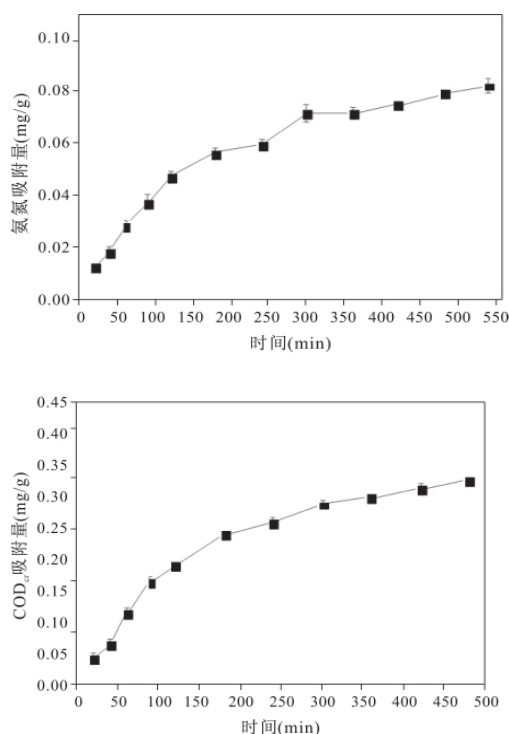


图3 吸附时间对氨氮和 COD_{Cr} 吸附量的影响

吸附逐渐趋于平衡^[15-16]。吸附材料的物理或化学特性对吸附机理有着较显著影响。为了进一步探究煤渣-沸石复合多孔介质材料对氨氮和 COD_{Cr} 的吸附机理和速率控制步骤, 利用伪一级动力学方程、伪二级动力学方程颗粒内扩散方程对实验数据进行拟合分析。

由伪一级动力学方程和伪二级动力学方程的相关性系数可知, 伪二级动力学模型 ($R^2 > 0.99$) 比伪一级动力学模型 ($R^2 > 0.9$) 有更好的符合程度, 在一些对氨氮吸附效果的研究中, 得到了相似的结论^[17-18]。由于伪二级动力学模型是基于吸附速率受到化学吸附作用的控制, 因此该吸附过程以化学吸附为主^[19], 主要有离子交换、化学键的作用^[20], 以及材料表面的铝盐、铁盐、硅酸盐等成分对悬浮颗粒的吸附作用^[14]。

表3 吸附动力学拟合参数

	伪一级动力学方程			伪二级动力学方程		
	q_e (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	q_e (mg/g)	k_2 g/(mg·min)	R^2
氨氮	0.08125	0.00663	0.988	0.1067	0.0558	0.993
COD _{Cr}	0.3468	0.00553	0.978	0.4421	0.0134	0.993

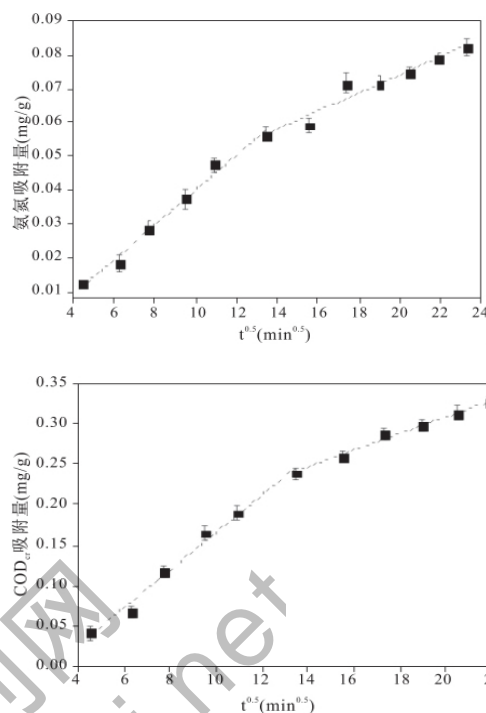


图4 氨氮和 COD_{Cr} 的吸附内扩散模型曲线

以 t 的平方根为横坐标、吸附量为纵坐标作颗粒内扩散模型曲线, 检验内扩散控制过程。根据颗粒扩散理论, 若内扩散过程是控制吸附速率的唯一步骤, 则内扩散曲线过原点。若颗粒扩散曲线有两个阶段, 则表面吸附作用的边界层扩散是第一阶段, 颗粒从溶液转移到吸附材料表面, 速率较快, 第二阶段是内扩散过程, 吸附在表面的颗粒被转移到内部, 由于阻力较大, 速率较缓慢^[21]。由图4可知, 氨氮和 COD_{Cr} 的内扩散模型曲线均分为两段, 过程较复杂, 其中第二阶段为内扩散过程, 与第一阶段的边界扩散速率相比, 内扩散速率减缓明显, 因此是吸附速率的主要控制步骤, 但不是唯一的速率控制步骤^[22-23], 还受到边界层扩散的影响。

2.4 吸附等温线

在温度为 25 °C, 不同氨氮和 COD_{Cr} 初始浓度条件下, 煤渣-沸石复合多孔介质材料对氨氮和 COD_{Cr} 的吸附等温线如图5所示。用 Freundlich 方程和 Langmuir 方程对实验数据进行拟合, 得到参数见表4。

由表4可知, 在实验质量浓度范围内, 煤渣-沸石复合多孔介质材料对氨氮和 COD_{Cr} 的等温吸附过程中, Langmuir 等温方程的相关性系数 ($R^2 > 0.99$) 均比 Freundlich 等温方程的相关性系数 ($R^2 >$

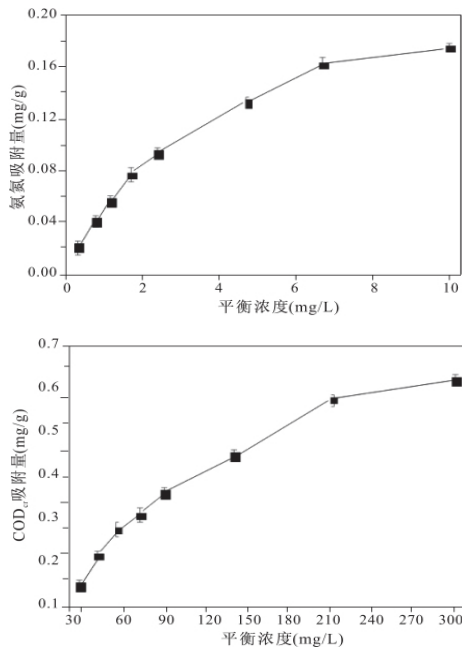


图5 煤渣-沸石复合多孔介质材料对氨氮和 COD_{Cr} 的吸附等温线

表4 吸附平衡拟合参数

	Freundlich			Langmuir		
	$K_F(mg/g)$	n	R^2	$q_{max}(mg/g)$	$b(L/mg)$	R^2
氨氮	0.0493	1.642	0.981	0.271	0.444	0.991
COD _{Cr}	0.0196	1.560	0.974	0.680	0.00658	0.991

0.9) 稍大, Langmuir 等温模型对两种污染物质的吸附具有更好的符合效果。Alshameri 等^[24]在天然沸石对氨氮的吸附研究中也报道了相同的结果。Dizge 等^[25]在粉煤灰对水中活性染料的吸附研究中也发现, Langmuir 等温模型的相关性系数比 Freundlich 等温模型的相关性系数稍大。因此根据相关研究报道^[21-25], 可推测氨氮和 COD_{Cr} 在该材料表面主要发生的是单分子层吸附, 其机理有待进一步研究。

2.5 多孔介质材料在苇田养殖水体净化中的应用研究

在不同 COD_{Cr} 初始浓度条件下, 该材料对实际水体的静态处理效果如图 6 所示。其对氨氮的去除效果相似, 最大去除效率均能达 50% 左右, 由此可知水中 COD_{Cr} 浓度小幅度波动对氨氮的去除效果影响较小。而随着水中 COD_{Cr} 初始浓度的增大, COD_{Cr} 的最大去除效率分别为 41.9%、47.5%、51.3%, 可见该材料对 COD_{Cr} 的去除效率稍有

增加。由此可知在相同的吸附时间内, COD_{Cr} 初始浓度的增大使得材料对 COD_{Cr} 的吸附量有所增大。

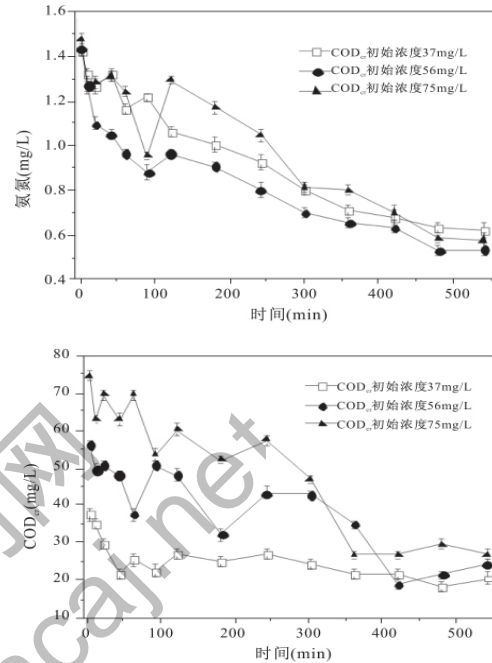


图6 不同 COD_{Cr} 浓度条件下氨氮和 COD_{Cr} 去除效果

3 结论

根据辽河口苇田养殖自身特点及养殖水体的污染特征, 从经济有效、简单易行的角度出发, 开发研制了煤渣-沸石复合多孔介质材料作为原位净化苇田水体的填充介质。通过煤渣、沸石不同配比对氨氮和 COD_{Cr} 的去除效果的影响研究, 确定了其配比为 2:1; 进而研究了煤渣-沸石复合多孔介质材料对水体中氨氮和 COD_{Cr} 的吸附性能。结果显示, 在 25 °C 条件下, 其对氨氮和 COD_{Cr} 的吸附过程可用伪二级动力学方程和 Langmuir 等温方程描述, 通过 Langmuir 等温方程拟合出的氨氮和 COD_{Cr} 的最大吸附量分别为 0.271 mg/g、0.680 mg/g。颗粒内扩散方程进一步揭示了其吸附过程是复杂的, 吸附速率主要受到边界层扩散和内扩散的影响。通过在不同 COD_{Cr} 浓度条件下对实际水体的净化效果研究, 发现其对氨氮去除有着较好的稳定性, 随着水中 COD_{Cr} 初始浓度的增大, 对 COD_{Cr} 的去除效率稍有增加。

参考文献

- [1] 王德林. 苇田综合高效养殖与循环经济模式研究[J]. 现代农业科技, 2009 (24): 238-238.

- [2] 田文达. 苇田河蟹养殖技术[J]. 现代农业科技, 2008 (8): 189-189.
- [3] 于长斌. 盘锦芦苇湿地河蟹养殖现状及发展对策[J]. 现代农业科技, 2009 (23): 294-295.
- [4] Nora'aini A, Wahab Mohammad A, et al. Treatment of aquaculture wastewater using ultra-low pressure asymmetric polyethersulfone (PES)membrane[J]. Desalination, 2005, 185(1): 317-326.
- [5] Tango M S, Gagnon G A. Impact of ozonation on water quality in marine recirculation systems[J]. Aquacultural engineering, 2003, 29(3): 125-137.
- [6] Virkutyte J, Jegatheesan V. Electro-Fenton, hydrogenotrophic and Fe²⁺ ions mediated TOC and nitrate removal from aquaculture system: Different experimental strategies[J]. Bioresource technology, 2009, 100(7): 2189-2197.
- [7] Sánchez O I A, Matsumoto T. Hydrodynamic characterization and performance evaluation of an aerobic three phase airlift fluidized bed reactor in a recirculation aquaculture system for Nile Tilapia production[J]. Aquacultural Engineering, 2012, 47: 16-26.
- [8] Eding E H, Kamstra A, Verreth J A J, et al. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: a review [J]. Aquacultural engineering, 2006, 34(3): 234-260.
- [9] 陈林, 吴雅红, 余坚, 等. 聚乙烯醇胶的改性及性能测试[J]. 化学与生物工程, 2012, 29(4): 15-17.
- [10] Gimenez V, Mantecon A, Ronda J C, et al. Poly (vinyl alcohol) modified with carboxylic acid anhydrides: crosslinking through carboxylic groups [J]. Journal of applied polymer science, 1997, 65(8): 1643-1651.
- [11] Wu Z L, Yang H, Jiao F P, et al. Carbon nanoparticles pillared multi-walled carbon nanotubes for adsorption of 1-naphthol: Thermodynamics, kinetics and isotherms [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 470: 149-160.
- [12] Wang S, Ma Q, Zhu Z H. Characteristics of coal fly ash and adsorption application[J]. Fuel, 2008, 87(15): 3469-3473.
- [13] Sun D, Zhang X, Wu Y, et al. Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 181(1): 335-342.
- [14] 滕宗焕, 陈建中. 改性粉煤灰的吸附机理及其在废水处理中的应用[J]. 西南给排水, 2007, 29(4): 23-27.
- [15] 姜霞, 周小宁, 丁明玉, 等. 天然沸石及改性沸石去除低浓度氨氮的研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 37-42.
- [16] 郑越, 刘方, 吴永贵. 粉煤灰对工业废水中氨氮的吸附性能研究[J]. 环境科学与技术, 2011 (1): 4-7.
- [17] Sharifnia S, Khadivi M A, Shojaeimehr T, et al. Characterization, isotherm and kinetic studies for ammonium ion adsorption by light expanded clay aggregate [J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2012.
- [18] U?urlu M, Karao?lu M H. Adsorption of ammonium from an aqueous solution by fly ash and sepiolite: isotherm, kinetic and thermodynamic analysis[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2011, 139(1): 173-178.
- [19] 左卫元, 仝海娟, 史兵方. 改性活性炭对废水中铬离子的吸附[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 45-50.
- [20] 郎印海, 王慧, 刘伟. 柚皮生物炭对土壤中磷吸附能力的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(4): 78-84.
- [21] Wu F C, Tseng R L, Juang R S. Initial behavior of intraparticle diffusion model used in the description of adsorption kinetics [J]. Chemical engineering journal, 2009, 153(1): 1-8.
- [22] 刘咏, 刘娅, 任越琳, 等. 金属离子改性腐植酸钠吸附剂的制备及其除氟性能[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 942-950.
- [23] Liu Q, Guo H, Shan Y. Adsorption of fluoride on synthetic siderite from aqueous solution [J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2010, 131(5): 635-641.
- [24] Alshameri A, Yan C, Al-Ani Y, et al. An investigation into the adsorption removal of ammonium by salt activated Chinese (Hulaodu) natural zeolite: Kinetics, isotherms, and thermodynamics [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2014.
- [25] Dizge N, Aydinler C, Demirbas E, et al. Adsorption of reactive dyes from aqueous solutions by fly ash: Kinetic and equilibrium studies[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150(3): 737-746.

(上接第 29 页)

脉冲放电等离子体协同光催化剂 TiO₂ 时具有协同效应, 放电产生的等离子体及紫外光激发光催化剂的活性, 从而增强脉冲放电去除甲醛的效率。

所制备的负载型 TiO₂/沸石光催化剂具有更强的催化活性, 与脉冲放电等离子体协同效应更强, 对甲醛的去除率明显高于脉冲放电协同 TiO₂ 的作用。

参考文献

- [1] Lakshmi S, Renganathan R, Fujita S. Study on TiO₂-mediated photocatalytic degradation of methylene blue [J]. Journal of Photo-Chemistry and Photobiology A: Chemistry, 1995, 88: 163
- [2] Amirov R H. Nanosecond corona discharge for decomposition of gas phase formaldehyde [C]. The second international conference on applied electrodynamics. Beijing, 1993: 139-143
- [3] Mizuno A, Kisanuki Y, Noguchi M, et al. Indoor air cleaning using a pulsed discharge plasma [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1999, 35 (6) : 1284-1288
- [4] Oda T, Takahashi T, Yamaji K. Nonthermal plasma processing for dilute VOCs decomposition [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2002, 38(3): 873-878
- [5] 杨庆, 郭奋, 等. TiO₂ 多孔性薄膜光催化降解低浓度甲醛. 环境科学, 2005, 26(4): 35-39
- [6] 何正浩, 丁留华, 邓东, 瞿晶晶, 李劲, 胡辉, 叶齐政. 应用介质阻挡放电处理甲醛气体. 高压技术, 2005, 31(12): 37-39
- [7] 杨学昌, 周飞, 高得力. 等离子体放电催化降解甲醛的试验研究. 高压技术, 2007, 33(6): 30-36
- [8] Sumaeth Chavadej, Witan Kiatubolpaiboon, et al. A combined multistage corona discharge and catalytic system for gaseous benzene removal. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2007, 263: 128-136
- [9] 黄碧纯, 杨岳, 张晓明, 叶代启. 介质阻挡放电-光催化降解甲苯的实验研究. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2008, 36(12): 56-60