

生物质炭的制备及对氨氮吸附性能研究

雷好婕, 钟宇鑫, 杨露, 王鑫, 艾克丹·艾赛提, 买里克扎提·买合木提*

新疆大学化工学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年5月7日; 录用日期: 2024年7月8日; 发布日期: 2024年7月15日

摘要

本文以核桃壳作为原料制备生物质炭, 进行正交实验优化, 考察了吸附温度、吸附时间、投加量、pH值以及吸附浓度对吸附性能的影响。结果表明: 生物质炭对水中氨氮的最佳吸附条件为: 吸附温度35℃, 吸附时间45 min, 生物质投加量0.1 g, 吸附浓度100 mg/L, 吸附pH值为7.0。该生物质的对氨氮吸附量为8.963 mg/g。

关键词

生物炭, 改性生物炭, 吸附, 正交实验, 氨氮

Preparation of Biomass Charcoal and Its Adsorption Performance for Ammonia Nitrogen

Yujie Lei, Yuxin Zhong, Lu Yang, Xin Wang, Aikedan-Aisaiti, Mailikezhati-Maihemuti*

School of Chemical Engineering and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Received: May 7th, 2024; accepted: Jul. 8th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

This article used walnut shell as raw material to prepare biochar, and the orthogonal experiment was optimized to investigate the effects of temperature, dosage, pH value and concentration on adsorption performance. The results showed that the optimum adsorption conditions of biomass carbon for ammonia nitrogen in water were as follows: adsorption temperature 35℃, adsorption

*通讯作者。

文章引用: 雷好婕, 钟宇鑫, 杨露, 王鑫, 艾克丹·艾赛提, 买里克扎提·买合木提. 生物质炭的制备及对氨氮吸附性能研究[J]. 化学工程与技术, 2024, 14(4): 258-268. DOI: 10.12677/hjct.2024.144027

time 40 min, biomass dosage 0.1 g, adsorption concentration 100 mg/L and adsorption pH 7.0. The ammonia nitrogen adsorption value of the biomass is 8.963 mg/g.

Keywords

Biochar, Modified Biochar, Adsorption, Orthogonal Test, Ammonia Nitrogen

Copyright © 2024 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. 前言

中国是一个以农林业为主的国家，地域辽阔，农业发达，由于广泛的农作物种植，每年会产生大量的废弃生物质，其处理方法不一，废弃生物质转变为生物炭已经变成废弃物可持续利用的一种有效途径[1]。

随着工业技术与经济高速发展，环境与资源问题随之而来且愈演愈烈。在化工工业生产过程中，产生大量污水，污水成分复杂，包含大量有害重金属元素、有机污染物、染料和致癌化合物，因此污水的处理效果不仅直接影响着生态环境保护 and 城市化建设，而且影响着人类生态健康。污水中较高含量的难降解有机物会对生态环境产生影响，如氨氮和磷酸盐，污水中氨氮和磷酸盐是导致水体富营养化的主要原因，因此寻找一种高效的氮、磷去除技术并实现氮、磷资源回收再利用已获得更多研究者的共识[2]，成为现代废水脱氮除磷技术的发展新趋势。

利用生物炭吸附废水中的氨氮，不仅能避免资源的浪费，亦可减少水体的富营养化现象，从而起到保护环境的作用[3]。目前利用生物质制备炭材料颇受人们的关注，利用各种生物质制备炭材料，生物炭的种类也越来越繁多，例如用棉秆以及核桃、巴旦木等果壳来制备生物炭等等[4]。张慧等[5]比较了炭化秸秆、炉渣和粉煤灰三种吸附材料对氨氮的吸附性能，结果表明三种材料吸附容量顺序为：粉煤灰 > 炭化秸秆 > 炉渣，且 pH 对炭化秸秆吸附氨氮的效果影响较小。张爱莉等[6]研究了竹炭对氨氮的吸附性能及影响因素，实验结果表明，吸附动力学符合准二级动力学模型，吸附等温线可以用 Langmuir 和 Freundlich 模型描述；升高温度有利于吸附；在 pH 为 4.93 至 9.03 的范围内，吸附量随着 pH 的升高而增加。

在对生物炭材料的进一步研究中，研究者对生物炭进行改性，研究改性材料对氨氮的吸附性能。周珊等[7]研究了通过硝酸改性后的竹炭对氨氮的吸附性能，实验结果表明，硝酸改性后，竹炭表面的酸性含氧官能团数量、孔比容积和比表面积均明显增大，对氨氮的去除率由 20.1% 提高到了 82.2%，吸附平衡时间由改性前的 6 h 缩短至 4 h，改性竹炭对氨氮的吸附等温线符合 Freundlich 方程；温度升高不利于改性竹炭对氨氮的吸附，而 pH 值升高有利于改性竹炭对氨氮的吸附。在不同活化条件下制备出生物炭来研究其吸附性能，加以利用生物质，进一步增加生物质的价值。

综上所述，针对工业废水和生活污水量增多、有机物含量高且降解困难等问题，寻找一种高效的氨氮去除技术并实现氨氮资源回收再利用具有一定的研究价值。本研究采用生物质(核桃壳)作为原料，经过交联反应预先处理，通过脱灰、煅烧、活化等方法制备生物炭及其改性材料。研究最佳改性生物炭对含氨氮模拟废水的吸附性能，考察温度、投加量和溶液初始 pH 等因素对吸附效果的影响，为生物炭吸附污水处理厂灌溉用水中氨氮，解决氮超标问题提供一定的理论依据。

2. 实验部分

2.1. 生物质炭的制备

1) 首先对收集来的核桃壳去除内膜后清洗并将置于 80°C 真空干燥箱中恒温干燥 8 h。干燥后的核桃壳被粉碎、过筛、取 60 目到 80 目部分, 得到粒径均匀的核桃壳粉末。之后核桃壳粉与柠檬酸和磷酸二钾钠按照一定比例混合并在常温下超声 1 h 至乳浊液状态后放到磁力搅拌器上进行加热搅拌 3 h, 待样品呈糊状后停止加热并冷却到室温进行冷冻干燥 24 h。干燥后的样品研末至粉末状态放入管式炉中, 分别在 400°C 和 600°C (升温速率 5°C/min, N₂ 维持一定流速) 下煅烧 3 h, 得到半焦化的生物质炭[8]。

2) 半焦化的生物质炭上分别加入一定比例的活化物质(KOH, MgCl₂)进行活化改性处理, 分别在 400、600°C (升温速率 5°C/min, N₂ 维持一定流速) 下煅烧 3 h 后得到生物质炭。所得生物质炭(分别用 C400-KOH、C400-MgCl₂、C600-KOH、C600-MgCl₂ 来表示)研磨后存放至干燥箱中备用。

2.2. 试剂与仪器

实验试剂见表 1。

Table 1. Experimental reagents

表 1. 实验试剂

名称	纯度	厂家
氯化镁(MgCl ₂)	分析纯	天津市鑫铂特化工有限公司
氢氧化钾(KOH)	分析纯	天津市鑫铂特化工有限公司
柠檬酸(C ₆ H ₈ O ₇)	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
碳酸二氢钾(KH ₂ PO ₄)	分析纯	天津市鑫铂特化工有限公司
氯化铵(NH ₄ Cl)	分析纯	天津市鑫铂特化工有限公司
抗坏血酸(C ₆ H ₈ O ₆)	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司

实验仪器见表 2。

Table 2. Experimental Instruments

表 2. 实验仪器

实验仪器	型号	生产厂家
集热式磁力加热搅拌器	DF-II	江苏金洽仪器科技有限公司
电热鼓风干燥箱	DHG-9070A	北京市永光明医疗仪器厂
紫外可见分光光度计	T6	北京普析通用仪器有限责任公司
数显水浴恒温振荡器	SHY	常州普天仪器制造有限公司
pH 计	FE28	梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司
管式炉	OTF-1200X	合肥科晶材料技术有限公司

2.3. 实验部分

2.3.1. 氨氮溶液标准曲线的绘制

氨氮标准溶液曲线的绘制采用《水质氨氮的测定方法—纳氏试剂分光光度法》(HJ535-2009 [9])。取

8 个 50 mL 的容量瓶, 加入氨氮标准溶液, 稀释, 定容至刻度线, 混匀, 再加入配制好的酒石酸钾钠溶液以及纳氏试剂(碘化汞 - 碘化钾 - 氢氧化钠), 混匀。先将分光光度计预热 20 min, 将配制好的容量瓶室温静置显色 10 min, 在波长 420 nm 处, 选用 20 mm 比色皿, 以超纯水做参比, 测定吸光度。以空白校正后的吸光度为纵坐标, 其对应的氨氮含量(mg/L)为横坐标, 绘制标准曲线[10]。

2.3.2. 正交实验

生物质对水中氨氮的吸附性能采用《水质氨氮的测定方法—纳氏试剂分光光度法》(HJ535-2009)。选取五个对氨氮吸附可能有影响的因素: 吸附温度、吸附 pH 值、氨氮初始浓度、生物质炭投加量、吸附时间。研究五个因素对生物质炭吸附氨氮吸附效果的影响。因素水平表见表 3。pH 通过加入盐酸或氢氧化钠进行调节, 利用 pH 计进行测定。吸附温度以及吸附时间通过数显水浴恒温振荡器来控制[11]。

Table 3. Orthogonal experimental design table

表 3. 正交实验设计表

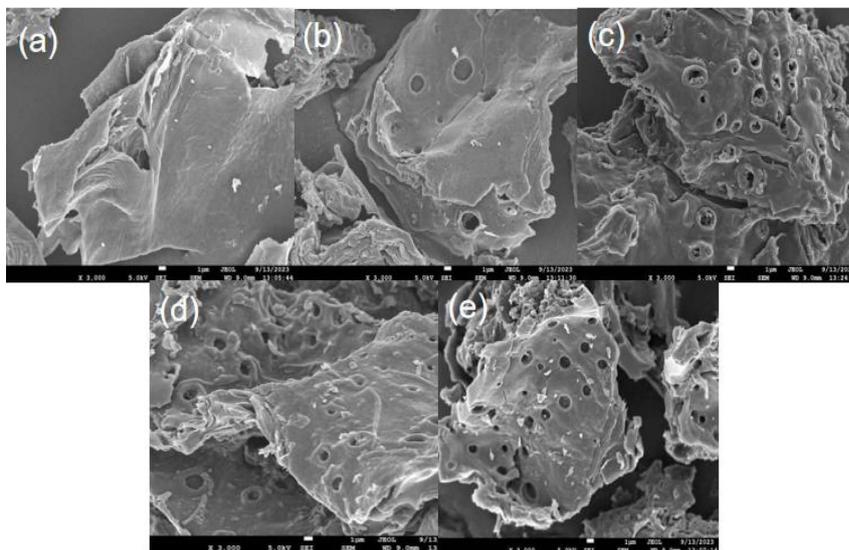
编号	吸附温度(°C)	吸附浓度(mg/L)	投加量(g)	吸附时间(min)	pH 值
1	20	25	0.1	15	6
2	20	50	0.2	30	7
3	20	75	0.3	45	8
4	20	100	0.4	60	9
5	25	25	0.2	45	9
6	25	50	0.1	60	8
7	25	75	0.4	15	7
8	25	100	0.3	30	6
9	30	25	0.3	60	7
10	30	50	0.4	45	6
11	30	75	0.1	30	9
12	30	100	0.2	15	8
13	35	25	0.4	30	8
14	35	50	0.3	15	9
15	35	75	0.2	60	6
16	35	100	0.1	45	7

3. 结果与分析

3.1. 核桃壳生物质炭的表征分析

3.1.1. SEM 分析

分别对原材料核桃壳、碳化和制备好的生物炭用扫描电子显微镜(SEM)表征, 分析样品的结构, 性能。测试结果见图 1。



(a)原材料 SEM 图; (b)炭化后 SEM 图; (c) C400-KOH SEM 图; (d) C400-MgCl₂ SEM 图; (e) C600-KOH 活化后 SEM 图

Figure 1. Scanning electron microscope image
图 1. 扫描电子显微镜图(SEM)

观察 SEM 测试图可知, 原材料(a)还没碳化处理的核桃壳样品呈现卷曲, 表面光滑, 不均匀, 无定型, 颗粒状形态, 几乎没有孔型结构。炭化(b)、用 KOH 和 MgCl₂ 改性后的生物质炭图(c-e)观察到有明显的多孔结构, 孔结构清晰, 密集, 孔径也较大。

3.1.2. BET 低温吸附法测比表面积

测定固体比表面积的方法很多, 常用的方法有溶液吸附法, BET 低温吸附法和气象色谱法等。本研究以 BET 低温吸附法测定生物质炭的比表面积。利用式 2-1 进行比表面积的计算得出的数据见表 4: 随着温度的降低, 得到的生物质的 BET 比表面积, 平均孔径, 孔容等均有一定程度上的减小; 同时不同活化剂下所得的表征亦有不同。

$$S_0 = (C_0 - C) \times \left(\frac{V}{m} \right) \times 2.45 \times 10^6 \quad (2-1)$$

用 BET 低温吸附法测生物质炭比表面积, 结果如表 4 所示。

Table 4. Pore Structure Related Parameters of Biomass Charcoal with Different Temperatures and Activators

表 4. 不同温度及活化剂生物质炭的孔隙结构相关参数

样品	BET 比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	平均孔径/nm	孔容/(cm ³ ·g ⁻¹)
C600KOH	398.7622 m ² /g	2.9396 nm	0.202653 cm ³ /g
C400KOH	340.7543 m ² /g	2.7633 nm	0.167100 cm ³ /g
C600MgCl ₂	385.8942 m ² /g	3.6326 nm	0.167100 cm ³ /g
C400MgCl ₂	307.9215 m ² /g	3.3298 nm	0.152504 cm ³ /g

通过表 4 所显示的生物质炭比表面积和孔容测试结果可知, 生物质炭比表面积从大到小分别为 C600KOH, C600MgCl₂, C400KOH, C400MgCl₂。

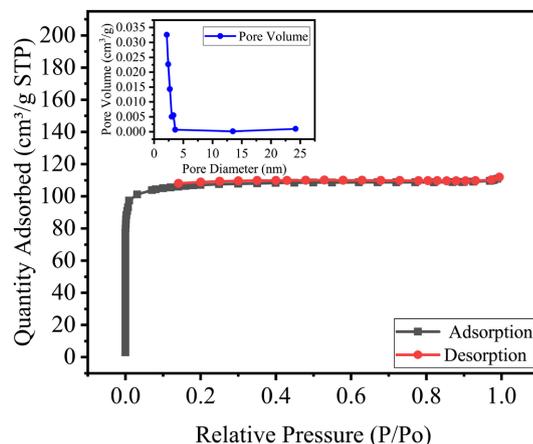


Figure 2. N₂ adsorption-desorption isotherm of activated carbon
图 2. 活性炭的 N₂ 吸附-脱附等温线

生物质炭吸附脱附等温线结果见图 2。通过图可知，等温吸附曲线闭合，可推断所测材料比表面积以及碳材料吸脱附情况较为理想。采用 BET 方法计算出生物质活性炭的比表面积为 1002.20 m²/g，由 BJH 方法计算得出孔容积为 0.93 cm³/g，平均孔径 3.71 nm。为了使液相吸附质在活性炭内孔更好的扩散，一般选用中孔较发达的活性炭作为液相吸附剂材料，故认为此条件制得的生物质活性炭是合适的液相吸附剂材料。

3.2. 氨氮溶液标准曲线

氨氮溶液标准工作曲线见图 3。对曲线进行回归分析，得到的曲线方程为 $y = 0.43112x - 0.0035$ ，其中 x 为氨氮溶液的质量浓度， y 为吸光度。线性决定系数 R^2 为 0.9998，吸光度值与氨氮溶液浓度呈良好的线性关系。

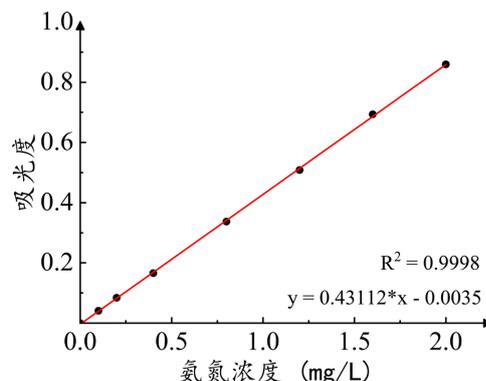


Figure 3. Standard curve of ammonia nitrogen solution
图 3. 氨氮溶液标准曲线

3.3. 正交实验

按照四个水平和五个影响因素做出 16 组条件，准确称量生物质炭于锥形瓶，再精确量取模拟含氮废水加入锥形瓶，放入恒温振荡器中进行振荡吸附，吸附完成后进行抽滤取样，通过紫外分光光度计测量样品液吸光度以计算吸附量和去除率。根据正交测试结果分析方法，处理数据进行分析。分析以及分析结果见表 5~12。

3.3.1. 正交实验数据表

Table 5. C400 KOH adsorption of ammonia nitrogen in water

表 5. C400-KOH 吸附水中氨氮

实验序号	A 吸附温度(°C)	B 吸附浓度(mg/L)	C 投加量(g)	D 吸附时间(min)	E pH 值	吸附量(mg/g)
1	20	25	0.1	15	6	2.201
2	20	50	0.2	30	7	1.645
3	20	75	0.3	45	8	1.798
4	20	100	0.4	60	9	1.642
5	25	25	0.2	45	9	0.565
6	25	50	0.1	60	8	3.718
7	25	75	0.4	15	7	1.233
8	25	100	0.3	30	6	2.404
9	30	25	0.3	60	7	0.521
10	30	50	0.4	45	6	0.729
11	30	75	0.1	30	9	5.243
12	30	100	0.2	15	8	4.033
13	35	25	0.4	30	8	0.413
14	35	50	0.3	15	9	0.546
15	35	75	0.2	60	6	2.569
16	35	100	0.1	45	7	8.963

Table 6. C400 MgCl₂ adsorbed ammonia nitrogen in water表 6. C400-MgCl₂ 吸附水中氨氮

实验序号	A 吸附温度(°C)	B 吸附浓度(mg/L)	C 投加量(g)	D 吸附时间(min)	E pH 值	吸附量(mg/g)
1	20	25	0.1	15	6	0.378
2	20	50	0.2	30	7	1.053
3	20	75	0.3	45	8	1.364
4	20	100	0.4	60	9	1.795
5	25	25	0.2	45	9	0.276
6	25	50	0.1	60	8	2.013
7	25	75	0.4	15	7	0.711
8	25	100	0.3	30	6	0.654
9	30	25	0.3	60	7	0.155
10	30	50	0.4	45	6	0.410
11	30	75	0.1	30	9	2.699
12	30	100	0.2	15	8	1.704
13	35	25	0.4	30	8	0.406
14	35	50	0.3	15	9	1.233
15	35	75	0.2	60	6	2.129
16	35	100	0.1	45	7	2.802

Table 7. C600-KOH adsorption of ammonia nitrogen in water
表 7. C600-KOH 吸附水中氨氮

实验序号	A 吸附温度(°C)	B 吸附浓度(mg/L)	C 投加量(g)	D 吸附时间(min)	E pH 值	吸附量(mg/g)
1	20	25	0.1	15	6	0.291
2	20	50	0.2	30	7	0.603
3	20	75	0.3	45	8	0.774
4	20	100	0.4	60	9	0.867
5	25	25	0.2	45	9	0.247
6	25	50	0.1	60	8	1.814
7	25	75	0.4	15	7	1.116
8	25	100	0.3	30	6	0.780
9	30	25	0.3	60	7	0.367
10	30	50	0.4	45	6	0.483
11	30	75	0.1	30	9	4.953
12	30	100	0.2	15	8	1.515
13	35	25	0.4	30	8	0.283
14	35	50	0.3	15	9	0.460
15	35	75	0.2	60	6	0.915
16	35	100	0.1	45	7	2.445

Table 8. C600 MgCl₂ adsorption of ammonia nitrogen in water
表 8. C600-MgCl₂ 吸附水中氨氮

实验序号	A 吸附温度(°C)	B 吸附浓度(mg/L)	C 投加量(g)	D 吸附时间(min)	E pH 值	吸附量(mg/g)
1	20	25	0.1	15	6	0.464
2	20	50	0.2	30	7	0.371
3	20	75	0.3	45	8	1.228
4	20	100	0.4	60	9	0.737
5	25	25	0.2	45	9	0.001
6	25	50	0.1	60	8	1.319
7	25	75	0.4	15	7	0.755
8	25	100	0.3	30	6	0.451
9	30	25	0.3	60	7	0.117
10	30	50	0.4	45	6	0.214
11	30	75	0.1	30	9	4.852
12	30	100	0.2	15	8	0.561
13	35	25	0.4	30	8	0.399
14	35	50	0.3	15	9	0.807
15	35	75	0.2	60	6	0.567
16	35	100	0.1	45	7	1.900

3.3.2. 正交实验数据表分析

Table 9. Analysis of Range Results for C400-KOH

表 9. C400-KOH 极差结果分析

指标	因素	A	B	C	D	E
水中氨氮吸附量(mg/g)	K ₁	7.723	3.701	20.124	8.013	7.902
	K ₂	7.920	6.638	8.811	9.705	12.362
	K ₃	10.526	10.842	5.270	12.054	9.962
	K ₄	12.491	17.042	4.017	8.450	7.996
	R	4.769	13.341	16.108	4.041	4.459

Table 10. Analysis of Range Results for C400-MgCl₂

表 10. C400-MgCl₂ 极差结果分析

指标	因素	A	B	C	D	E
水中氨氮吸附量(mg/g)	K ₁	5.447	1.214	7.891	4.026	3.571
	K ₂	3.654	4.708	5.162	4.812	4.721
	K ₃	4.969	6.903	3.405	4.852	5.486
	K ₄	6.570	6.956	3.323	6.092	6.003
	R	2.916	5.741	4.568	2.067	2.432

Table 11. Analysis of Range Results for C600-KOH

表 11. C600-KOH 极差结果分析

指标	因素	A	B	C	D	E
水中氨氮吸附量(mg/g)	K ₁	3.702	1.188	7.059	3.383	2.468
	K ₂	3.957	3.359	3.280	6.619	4.531
	K ₃	7.318	7.758	2.381	3.949	4.386
	K ₄	4.102	5.607	2.749	3.963	6.527
	R	3.616	6.570	4.678	3.236	4.059

Table 12. Analysis of Range Results for C600-MgCl₂

表 12. C600-MgCl₂ 极差结果分析

指标	因素	A	B	C	D	E
水中氨氮吸附量(mg/g)	K ₁	3.284	0.980	6.635	2.587	1.696
	K ₂	2.525	2.712	1.500	6.073	3.143
	K ₃	5.744	7.402	2.602	3.344	3.506
	K ₄	3.673	3.649	2.105	2.739	6.397
	R	3.219	6.422	5.135	3.486	4.701

3.3.3. 正交实验结果分析

根据以上正交实验结果表可知, C400-KOH 生物质炭的五个因素极差大小顺序为: $R_3 > R_2 > R_1 > R_5 >$

R_4 , C400-MgCl₂ 生物质炭的五个因素极差大小顺序为: $R_2 > R_3 > R_1 > R_5 > R_4$, C600-KOH 生物质炭的五个因素极差大小顺序为: $R_2 > R_3 > R_5 > R_1 > R_4$, C600-MgCl₂ 生物质炭的五个因素极差大小顺序为: $R_2 > R_3 > R_5 > R_4 > R_1$ 。综合考虑, 选取的生物质炭为 C400-KOH, 最佳吸附条件为 A₄B₄C₁D₃E₂, 即温度为 35℃, 初始氨氮浓度为 100 mg/L, 投加量为 0.1 g、吸附时间为 45 min, pH 值为 7.0, 此条件下的氨氮的吸附量为 8.963 mg/g。

3.4. 吸附动力学的研究

采用准一级动力学方程(2)和准二级动力学方程(3)对选取的改性生物炭吸附氨氮实验数据进行拟合并计算相关参数:

准一级动力学模型公式为:

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (2)$$

准二级动力学模型公式为:

$$q_t = k_2 q_e^2 t / (1 + k_2 q_e t) \quad (3)$$

式中: q_t : t 时刻对污染物的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;

q_e : 吸附平衡时对污染物的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;

k_1 : 准一级吸附速率常数;

k_2 : 准二级吸附速率常数;

t : 吸附时间, min。

利用动力学吸附模型对生物炭吸附氨氮的数据进行拟合如结果见表 13。

Table 13. Adsorption kinetics model parameters

表 13. 吸附动力学模型参数

动力学模型	参数	生物炭
一级动力学模型	Q_e (mg/g)	10.675
	K_1 (1/min)	0.119
	R^2	0.968
二级动力学模型	Q_e (mg/g)	12.350
	K_2 (g/mg·min)	0.0122
	R^2	0.983

通过表 13 可知: 对于准一级方程, 其相关系数 R^2 的值是 0.968, 但是通过准一级方程拟合得到的平衡吸附量 q_e 与实验值相差较大, 因此准一级方程也不能很好地描述生物炭对氨氮的吸附过程。准二级方程的相关系数 R^2 值 0.983, 而且拟合所得的平衡吸附量 q_e 与实验值相当接近, 因此准二级方程能更好地描述生物炭对氨氮的吸附过程, 说明化学吸附过程是生物炭吸附氨氮的主要控制步骤。

选取 C400-KOH 生物质炭, 吸附温度 35℃, 初始吸附浓度 100 mg/L, 投加量 0.1 g, pH 值 7.0 的条件下, 由振荡时间(振荡频率为 150 次/min)与吸附量之间作图, 得到吸附时间与吸附量之间的关系见图 4, 由图可知: 生物质炭对氨氮的去除率随着吸附时间变化而变化, 先逐渐增大后平稳, 当吸附时间达到 30 min 后吸附基本上达到平衡。吸附开始时, 生物质炭比表面积大, 吸附效果明显。但随着吸附时间的延长, 活性炭持续吸附氨氮离子, 吸附位点因此不断减少, 对溶液中氨氮的吸附慢慢地趋于吸附平衡。因此, 最佳吸附时间为 30 min。

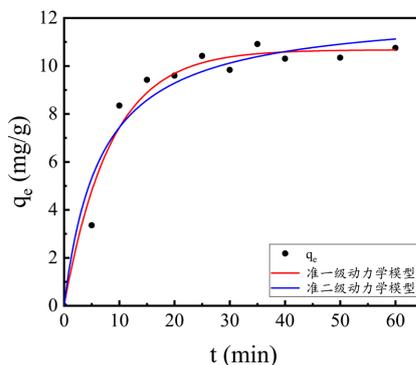


Figure 4. Effect of adsorption time on ammonia nitrogen adsorption efficiency

图 4. 吸附时间对氨氮吸附效果的影响

4. 结论

本研究以生物质(核桃壳)为原料,制备了生物质炭,并对材料进行 SEM、BET 表征分析。所制备的生物炭来吸附模拟废水中的氨氮,找出最佳吸附条件并研究吸附动力学。

研究结果显示,生物质炭吸附氨氮最优条件为: pH 值为 7.0、氨氮初始浓度为 100 mg/L、温度为 35℃、投加量为 0.1 g、吸附时间为 45 min 时的吸附量为 8.963 mg/g。

通过研究氨氮吸附动力学行为可知,氨氮吸附方程更符合准二级动力学方程。

基金项目

新疆大学 2022 年度国家级大学生创新训练计划项目,项目编号: 202210755036。

参考文献

- [1] 李俊生, 郭小瑞, 徐嘉伦, 等. 生物炭吸附法处理氨氮废水的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(4): 1264-1269, 1275.
- [2] 苏丽曼, 杨榕婷, 陈培珍, 等. 废菌渣活性炭的制备及对氨氮的吸附性能研究[J]. 山东化工, 2022, 51(12): 58-61.
- [3] 张华. 柚皮基活性炭制备及吸附应用机理研究[D]: [博士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [4] 任杰. 改性秸秆炭黑和膨化秸秆吸附去除废水中氨氮的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [5] 张慧, 代静玉, 李辉信. 炭化秸秆对水体中氨氮和磷的吸附性能及其与粉煤灰和炉渣的对比[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2389-2394.
- [6] 张爱莉, 朱义年, 纪锐琳, 等. 竹炭对氨氮的吸附性能及其影响因素的研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(6): 19-21, 50.
- [7] 周珊, 陈斌, 王佳莹, 等. 改性竹炭对氨氮的吸附性能研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, 33(5): 584-590.
- [8] 辛赫, 张娜, 柴洋洋, 等. 薄皮核桃壳基活性炭的制备及表征[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(2): 171-178.
- [9] 沈阳市环境监测中心站. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [10] 邢英, 李心清, 周志红, 等. 生物炭对水体中铵氮的吸附特征及其动力学研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 511-516.
- [11] 黎菲, 韩柱, 孟信刚. 基于正交实验方法的沼泽红假单胞菌对氨氮去除效果影响因素探究[J]. 当代化工研究, 2021(22): 43-45.