

腐植酸吸附铁离子的性能研究

钟世杰

中山华明泰科技股份有限公司民众分公司, 广东中山, 528400;

摘要: 腐植酸作为天然高分子螯合材料, 不仅具备纤维素状网络多孔结构, 还含有羧基、酚羟基等多种极性官能团, 对金属离子表现出酸性、离子交换性及络合螯合性。本文以腐植酸为吸附剂, 针对 Fe^{3+} 开展吸附实验, 验证其吸附可行性, 并分析吸附时间、温度及溶液 pH 值对吸附效果的影响。结果表明, 当吸附时间为 1h、温度为 298K、溶液 pH 值为 2.5 时, 腐植酸对 Fe^{3+} 的吸附量达到较高水平, 为后续腐植酸在含 Fe^{3+} 废水处理中的应用提供参考。

关键词: 腐植酸; Fe^{3+} ; 吸附性能; 影响因素

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 11. 054

引言

腐植酸是自然界中广泛存在的天然高分子物质, 其独特的结构赋予了优异的性能——既拥有类似纤维素的多孔网络结构, 又富含羧基、酚羟基、醇羟基、醌基等极性官能团^[1]。这些结构特点使得腐植酸对金属离子具有显著的吸附能力, 可通过酸性作用、离子交换或络合螯合反应与金属离子结合, 进而实现对金属离子的固定与去除。

凭借这一特性, 腐植酸在多个领域得到广泛应用: 农业领域中, 可用于土壤改良、制备腐植酸类肥料与农药^[2-3]; 工业领域里, 在建筑、陶瓷及煤炭加工中发挥作用^[4]; 医药领域, 可研发腐植酸类药物或用于泥疗^[5]; 环保领域, 更是在工业废水与废气处理中展现出巨大潜力^[6]。尤其在重金属废水处理方面, 腐植酸因来源广泛、制备成本低, 且脂肪族、芳香族结构及多种活性基团能增强离子吸附与杂质脱除能力^[7], 成为当前研究的热点方向。本文聚焦腐植酸对 Fe^{3+} 的吸附性能, 深入探究关键因素对吸附效果的影响, 旨在为其实际应用提供实验依据。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

实验所用主要试剂包括腐植酸、硫酸铁、硫酸; 仪器有上海 721B 可见分光光度计、HH-S24S 数显恒温水浴锅、JB-3 定时恒温磁力搅拌器、TB-214 电子分析天平、PHS-3C 精密 pH 计、数显鼓风干燥箱、DW-I 多功能电动搅拌器等。

1.2 Fe^{3+} 溶液的配制

为确保溶液中仅含 Fe^{3+} 一种金属离子, 实验选用硫酸铁固体配制溶液。具体步骤如下: 首先, 用电子分析天平称取一定质量的硫酸铁固体, 置于烧杯中; 随后, 向烧杯中加入去离子水, 同时滴加适量硫酸溶液, 边加边搅拌至固体完全溶解, 控制溶液 pH 值约为 1.0; 最后, 将溶液转移至容量瓶中定容, 配制成 Fe^{3+} 浓度为 28mg/L 的标准溶液, 用于后续吸附实验^[6]。

1.3 腐植酸对 Fe^{3+} 的吸附实验

本实验重点探究吸附时间、吸附温度及溶液 pH 值三个因素对腐植酸吸附 Fe^{3+} 效果的影响, 以吸附率和吸附量 Q ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 作为吸附效果的评价指标。

实验操作流程: 量取 30mL 上述 Fe^{3+} 标准溶液, 倒入 100mL 圆底烧瓶中; 向烧瓶内加入 0.5g 腐植酸, 将烧瓶固定在带搅拌器的恒温水浴锅上, 启动搅拌进行吸附反应; 反应达到设定时间后, 对固液混合物进行抽滤分离; 收集滤液与滤渣, 滤渣放入真空干燥箱, 在 60℃ 条件下干燥 3h, 滤液用于测定剩余 Fe^{3+} 浓度^[4]。吸附率与吸附量的计算公式如图 1 所见。

$$\text{吸附率} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

C_0 —吸附前溶液中离子初始质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

C_1 —吸附后溶液中离子质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

$$Q = \frac{V(C_0 - C_1)}{m} \quad (1-2)$$

图 1: 吸附率与吸附量的计算公式

2 结果与讨论

2.1 吸附时间对吸附效果的影响

实验条件：溶液 pH=1.2、腐植酸用量 0.5g、吸附温度 313K，考察吸附时间为 0.5h、1h、1.5h、2h、3h、4h、5h、6h、7h 时的吸附效果，结果如表 1、图 2 所示。

表 1：吸附时间对 Fe^{3+} 吸附效果的影响

吸附时间/h	Fe^{3+} 的吸附率/%	$Q/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
0.5	25.63	0.43
1.0	26.71	0.45
1.5	24.74	0.42
2.0	24.96	0.42
3.0	26.06	0.44
4.0	23.38	0.39
5.0	23.61	0.40
6.0	23.84	0.40
7.0	23.84	0.40

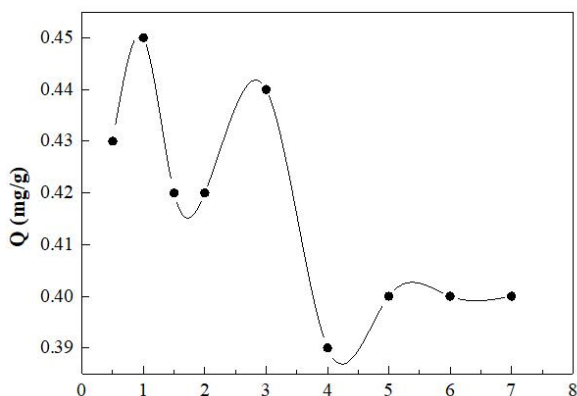


图 2：吸附时间对 Fe^{3+} 吸附量的影响

腐植酸中的羧基、酚羟基等基团含电子给予体，易与金属离子配位。从表 1、图 2 可见，随着吸附时间延长，吸附率与吸附量先上升后下降，最终趋于稳定。这是因为吸附初期， Fe^{3+} 先在腐植酸分子表面及大孔内快速吸附，随着反应进行，吸附逐渐向微孔推进，传质速率减慢；当吸附达到一定时间后，体系出现解吸现象，吸附与解吸过程逐渐平衡。其中，吸附时间为 1h 时，吸附率与吸附量达到较高值，吸附效果最佳。

2.2 吸附温度对吸附效果的影响

实验条件：腐植酸用量 0.5g、吸附时间 1h、溶液 pH=1.2，考察吸附温度为 298K、303K、308K、313K、318K、323K、328K、333K、338K、343K 时的吸附效果，结果如表 2 和图 3 所示。

表 2：吸附温度对铁离子的吸附影响

吸附温度/K	Fe^{3+} 的吸附率/%	$Q/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
298	27.78	0.47

303	26.50	0.46
308	25.85	0.44
313	26.06	0.43
318	26.06	0.44
323	26.50	0.45
328	25.85	0.43
333	25.63	0.43
338	22.92	0.39
343	21.99	0.37

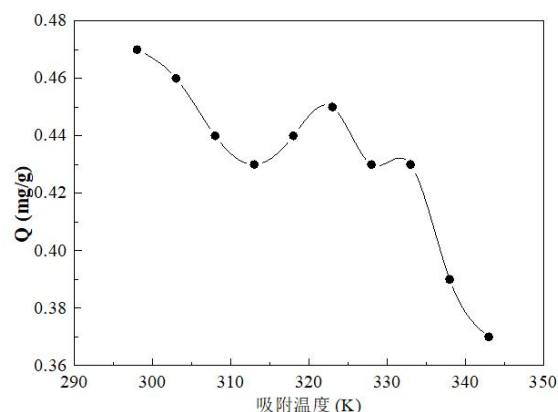


图 3：吸附温度对 Fe^{3+} 吸附量的影响

由表 2 和图 3 可知，随着吸附温度升高， Fe^{3+} 的吸附率与吸附量整体呈下降趋势，在 298K 时吸附效果最优。吸附过程分为物理吸附与化学吸附：化学吸附需吸收热量，升温可促进反应；物理吸附为放热过程，降温更利于吸附。结合实验数据推测，腐植酸对 Fe^{3+} 的吸附以物理吸附为主，且腐植酸热稳定性有限，温度过高易发生分解，进一步导致吸附能力下降。

2.3 溶液 pH 对吸附效果的影响

基于上述实验结果，确定吸附时间 1h、吸附温度 298K 为最优基础条件，在此前提下，保持腐植酸用量 0.5g，考察溶液 pH 值为 0.5、1、1.2、1.5、2、2.5、3 时的吸附效果，结果如表 3 和图 4 所示。

表 3：反应溶液的 pH 值对 Fe^{3+} 吸附的影响

铁离子 溶液 pH 值	Fe^{3+} 吸附/%	$Q/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
0.5	25.18	0.42
1.0	26.06	0.44
1.2	26.71	0.45
1.5	29.85	0.50
2.0	40.29	0.68
2.5	47.13	0.79
3.0	42.40	0.71

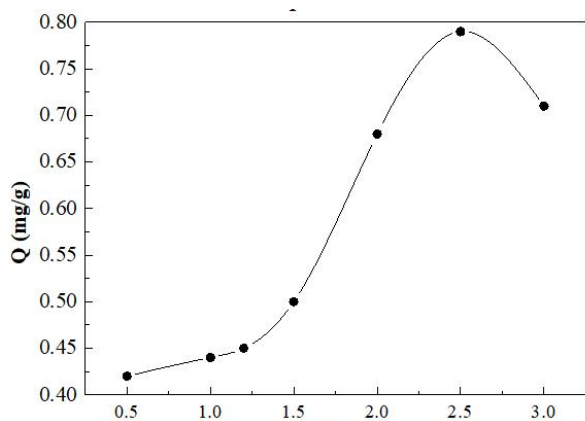


图 4: 反应溶液的 pH 值对 Fe^{3+} 吸附量的影响

从表 3 和图 4 可看出, 在实验考察的 pH 范围内, 随着溶液 pH 值增大, Fe^{3+} 的吸附率与吸附量先快速上升至峰值, 随后逐渐下降, 在 $\text{pH}=2.5$ 时达到最佳吸附效果。原因在于: 腐植酸属于弱解离有机酸, pH 值较低时, 羧基与酚羟基的氢解离受阻, 与 Fe^{3+} 的结合能力减弱, 吸附效果较差; 随着 pH 值升高, 溶液中氢离子浓度降低, 促进腐植酸酸性基团解离, 与 Fe^{3+} 的结合能力增强, 吸附率提升; 当 pH 值继续增大, 溶液中 OH^- 与 Fe^{3+} 的作用力增强, 导致 Fe^{3+} 与腐植酸的结合被抑制, 吸附率与吸附量随之下降。

3 结论

本实验通过单因素吸附实验验证了腐植酸对 Fe^{3+} 的吸附能力, 并确定其最佳吸附条件为: 吸附时间 1h、吸附温度 298K、溶液 $\text{pH}=2.5$, 此时 Fe^{3+} 的吸附率最高可达 47.13%, 吸附量最大为 0.79mg/g。

腐植酸对 Fe^{3+} 的吸附机制主要包括四种形式: 一是离子交换, 即腐植酸分子羧基中的氢被 Fe^{3+} 取代; 二是络合反应, 腐植酸与 Fe^{3+} 形成稳定的金属络合物; 三是静电吸附, 腐植酸解离后带负电的羧基与带正电的

Fe^{3+} 通过静电引力结合; 四是表面吸附, 腐植酸固体粉末具有较大比表面积与表面能, 可通过表面作用吸附 Fe^{3+} 。这些机制共同作用, 使得腐植酸对 Fe^{3+} 表现出良好的吸附性能, 为其在含 Fe^{3+} 废水处理中的实际应用提供了理论与实验支撑。

参考文献

- [1] 曾宪成. 腐植酸本源性肥料可持续发展[J]. 腐植酸, 2013(4): 1-6.
- [2] 罗煜, 张玉华, 赵立欣, 向欣, 程红胜, 赵小蓉, 林启美. 生物腐植酸在低碳农业中的地位与作用[J]. 腐植酸; 2013(1): 1-4.
- [3] E Bertoncini, V D'Orazio, N Senesi, et al. Effects of sewage sludge amendment on the properties of two Brazilian oxisols and their humic acids[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(11): 4972-4979.
- [4] Christian N. Albers, Gary T. Banta, Poul Erik Hansen, et al. The influence of organic matter on sorption and fate of glyphosate in soil -Comparing different soils and humic substances[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(10): 2865-2870.
- [5] 刘丹丹, 邓何, 郭庆时等. 腐植酸在油田钻井液中的应用[J]. 腐植酸, 2012(3): 11-17, 27.
- [6] 周霞萍. 腐植酸药物研究新进展[J]. 腐植酸, 2010(3): 1-6.
- [7] Mohamed Erhayem, Mary Sohn. Effect of humic acid source on humic acid adsorption onto titanium dioxide nanoparticles[J]. Science of the Total Environment, 2014, 470-471(2): 92-98.