

# Rectorite Adsorption Treatment Results of Lead-Containing Wastewater

Xuwei Yu, Yu Wan, Yingru Wang\*

School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei  
Email: 1054360507@qq.com, \*wangyr96@163.com

Received: Feb. 11<sup>th</sup>, 2020; accepted: Mar. 18<sup>th</sup>, 2020; published: Apr. 27<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

The rectorite was applied to remove lead-containing ion of wastewater in laboratory experiment. The influencing factors such as the initial lead ion concentration, rectorite dosage, reaction time and the temperature were investigated. The experiment results and optimal conditions for rectorite adsorption treatment of Pb(II) are that the initial concentration, rectorite dosage, adsorption temperature and time are  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  and 40 min, respectively. The removal rate of lead ion can reach 62.12%. The adsorption isotherm was well described by Langmuir model and the process of adsorption kinetic data fitted a pseudo-second-order model. The removal process of rectorite for Pb(II) was dominated by chemical adsorption and related to the ion exchange and surface precipitation between the active sites on rectorite surface and adsorbate.

## Keywords

Rectorite, Lead-Containing Wastewater, Adsorption Treatment, Experiment Results

# 累托石吸附处理含铅废水试验结果

俞旭唯, 万 瑀, 王莹茹\*

武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉  
Email: 1054360507@qq.com, \*wangyr96@163.com

收稿日期: 2020年2月11日; 录用日期: 2020年3月18日; 发布日期: 2020年4月27日

## 摘 要

选取累托石作为吸附剂用于废水中铅离子的去除, 探究铅离子初始浓度、吸附剂投加量、反应时间、温度等因

作者简介: 俞旭唯(1997-), 女, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 主要从事水处理方向研究。

\*通讯作者。

素对铅离子去除的影响。实验结果表明：REC吸附处理Pb(II)的最佳条件为：初始浓度 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、累托石用量 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、吸附温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、吸附时间 $40\text{ min}$ ，Pb(II)去除率可达 $62.12\%$ 。累托石吸附Pb(II)能较好地拟合Langmuir模型，该材料吸附处理铅离子过程更加符合准二级动力学模型。累托石对Pb(II)的去除过程以化学吸附为主导，反应过程与累托石表面的活性位点和吸附质之间的离子交换速率、表面沉淀有关。

## 关键词

累托石, 含铅废水, 吸附处理, 试验结果

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着现代工业的迅猛发展，重金属离子对水体的污染越来越严重。被重金属污染的水体存在持久危害性，且随着污染物的迁移转化，重金属容易在人体中积累，并导致蛋白质代谢中断，对人类以及水中生物的生存构成严重的威胁[1][2]。因此，寻找经济有效去除废水中重金属离子的方法十分重要。目前，对于水中重金属离子的去除有以下方法：化学沉淀法[2][3]，离子交换法[4]，吸附法[5][6]，膜过滤法[7]，电化学处理技术[8]，混凝和絮凝法[9][10]等。其中吸附法操作简单且经济高效，是一种应用普遍的处理技术。

累托石因其特殊的层状硅酸盐结构[11]，具有较大的表面积和高的阳离子交换容量，在去除重金属离子方面具有潜在的应用前景[12][13]。国内外专家对累托石的吸附已做了大量研究工作。李东等[14]研究了累托石对于 $\text{Ni}^{2+}$ 的吸附，通过实验探讨了不同因素吸附效果的影响，且环境中pH有较大影响，并表明累托石可以作为良好的吸附材料。Wang等[15]在累托石表面制备碳层，再与三磷酸三钠反应后，再研究改性后的累托石对Pb(II)、Cu(II)等金属离子的吸附，发现在低痕量Pb(II)浓度下去除率能达到90%，且对Pb(II)的吸附效果优于其他重金属离子。

本文采用累托石做吸附剂，以Pb(II)为处理对象，通过单因素条件试验探究累托石对水中Pb(II)的吸附效果，以期累托石去除水中重金属离子提供依据。

## 2. 材料及方法

### 2.1. 试剂及仪器

本试验所采用的累托石购于湖北名流累托科技股份有限公司，化学组成及性质参见文献[13]其化学组成如表1所示：

**Table 1.** The chemical compositions of rectorite

**表 1.** 累托石的化学组成

化学组成	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	L.O.I.
质量分数(%)	44.31	2.46	35.60	1.50	4.05	0.35	1.12	1.24	8.23

含铅模拟废水由硝酸铅配制而成。

仪器：紫外可见分光光度计(UV290型，上海舜宇恒平科学仪器有限公司)；恒温振荡器(SHZ-C，上海跃进

医疗器械厂); 高速离心机(TDL-5-A, 上海安亭科学仪器厂); 超声波清洗机(SB-3200DT, 宁波新芝生物科技股份有限公司); 电子天平(FA2004N, 上海菁海仪器有限公司)。

## 2.2. 吸附实验

将 0.5 g 的累托石放入装有 100 mL 模拟废水( $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的平底烧瓶(250 mL)中。在  $25^\circ\text{C}$  条件下恒温振荡, 振荡速度为  $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 定时取样, 用  $0.45 \mu\text{m}$  的滤膜过滤后, 测定铅离子浓度。

## 2.3. 标准曲线的绘制

二甲酚橙分光光度法测铅

1) 二甲酚橙溶液( $0.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ): 称取 0.1 g 二甲酚橙四钠盐加入 100 mL 容量瓶中( $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 取 10 mL 稀释至 50 mL。

2) 铅标准储备液( $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ): 称取 1.599 g 硝酸铅溶液溶于(1 + 9)硝酸溶液中, 再稀释至 1000 mL。

3) HAc-NaAc 溶液( $\text{pH} = 6$ ): 54.6 g 醋酸钠加  $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  醋酸溶液 20 mL 溶解, 加水至 500 mL。

测定: 分别加入 0、0.5、1、1.5、2、3 mL 硝酸铅溶液于 10 mL 比色管中, 再加入 1 mL HAc-NaAc 缓冲溶液, 0.5 mL 二甲酚橙溶液, 稀释至刻度, 在 575 nm 波长处测定。所得标准曲线如图 1。

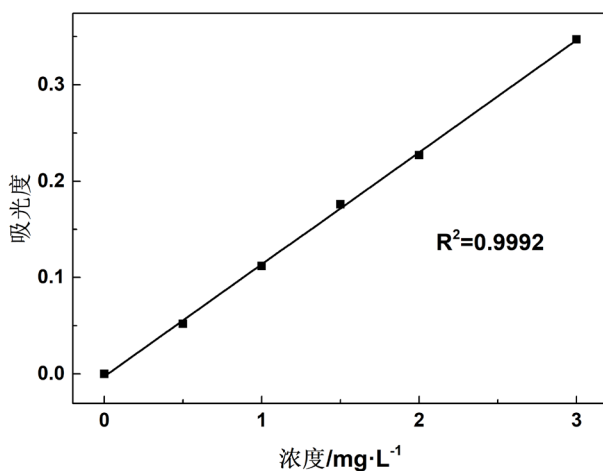


Figure 1. The standard curve line of Pb(II)

图 1. 铅离子标准曲线

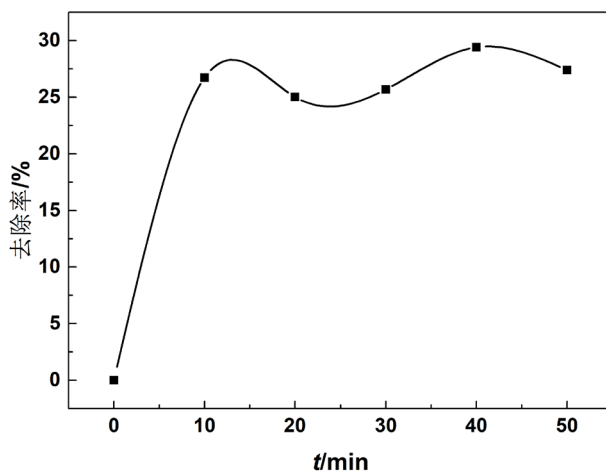


Figure 2. Effect of adsorption time on rectorite adsorption Pb(II)

图 2. 吸附时间对累托石吸附 Pb(II)的影响

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 吸附时间对 Pb(II)去除率的影响

以累托石为吸附剂,对硝酸铅溶液进行静态吸附实验。室温条件下,当初始浓度  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,选取累托石用量  $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,考察溶液的吸附过程。累托石吸附 Pb(II)的时间的关系如图 2 所示。

从图 2 可以看出,室温下累托石对 Pb(II)有较好的吸附能力。在反应的前 10 min Pb(II)被累托石迅速吸附,继续延长吸附时间,去除率增幅不大。吸附时间为 40 min,去除率为 29.4%。

#### 3.2. 铅离子浓度对 Pb(II)去除率的影响

铅离子初始浓度对吸附有较大影响。铅离子初始浓度分别为 25、50、100、150、200  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,累托石用量  $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,吸附时间 40 min,室温条件下,考察铅离子浓度对累托石吸附效果的影响。结果如图 3 所示。

由图 3 曲线可以看出,累托石对 Pb(II)的吸附量随 Pb(II)初始浓度的增大而增加,但去除率随着浓度增加先上升,较高浓度之后趋于稳定。这主要是因为初始浓度增加时,铅离子物质的量增大,吸附量也在增大。但是累托石吸附位点是一定的,只能吸附定量的铅离子,因此当浓度较高时,Pb(II)去除率无法有效提高。因此选取了  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  作为最佳浓度,此时去除率达到 42.6%。

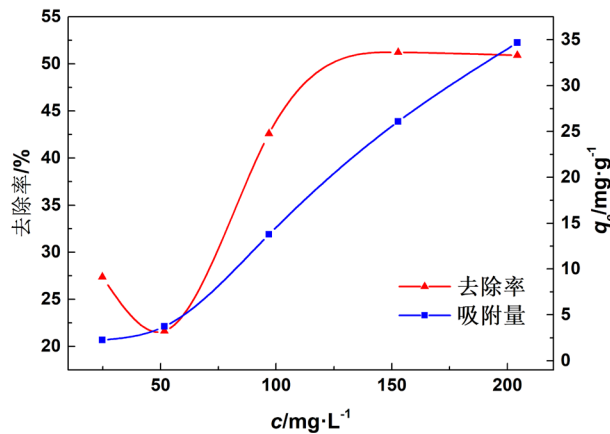


Figure 3. Effect of lead ion concentration on rectorite adsorption Pb(II)

图 3. 铅离子浓度对累托石吸附 Pb(II)的影响

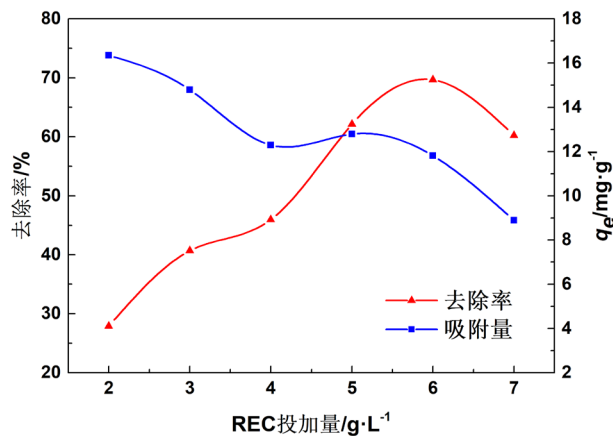


Figure 4. Effect of the rectorite amount on the adsorption of Pb(II)

图 4. 累托石用量对吸附 Pb(II)的影响

### 3.3. 累托石投加量对 Pb(II)去除率的影响

吸附剂的投加量是影响污染物去除率的重要因素。铅离子初始浓度为  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 分别选取吸附剂用量  $2\sim 7 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 吸附时间为  $40 \text{ min}$ , 室温下, 考察吸附剂用量对铅离子去除率的影响。结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 随着累托石投加量的增加, 提供的有效吸附活性位点的总量也在增大, 因而会有更多的可交换的表面吸附位与 Pb(II)形成络合物[16], 相应地提高了溶液中 Pb(II)的去除率。在较低的投加量条件下, 各种表面官能团完全暴露, 表面官能团达到饱和和速度快, 吸附容量高。从图 4 也可以看出, 随着投加量的增加, 累托石对 Pb(II)的吸附容量逐渐降低。这是由于吸附剂投加量过大, 会造成颗粒之间相互碰撞的机率增大, 从而使颗粒更容易聚集。综合考虑去除率及吸附量, 选取累托石用量为  $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 此时去除率达  $62.12\%$ 。

### 3.4. 温度对吸附效果的影响

当硝酸铅溶液初始浓度为  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 吸附剂用量  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 吸附时间为  $40 \text{ min}$  时分别考察了  $15^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ 、 $45^\circ\text{C}$ 、 $55^\circ\text{C}$ 、 $65^\circ\text{C}$  温度下, 累托石对铅离子的吸附效果, 结果如图 5 所示。

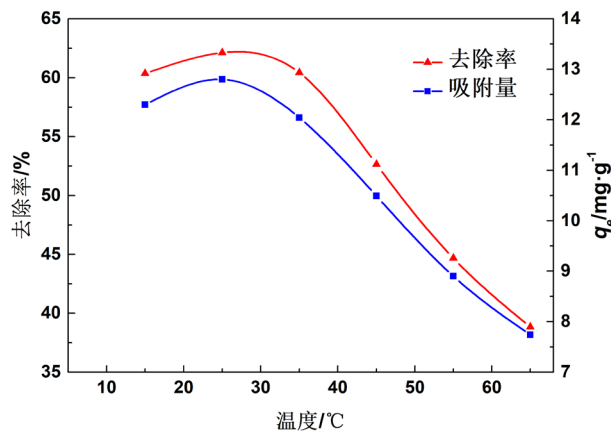


Figure 5. Effect of temperature on rectorite adsorption of Pb(II)  
图 5. 温度对累托石吸附 Pb(II)的影响

图 5 表明随着反应体系温度的增加, 吸附剂的吸附量呈现减小的趋势。这说明累托石对于 Pb(II)的吸附是一个放热过程, 较低温度有利于累托石对于 Pb(II)的吸附。温度过高会使吸附剂的吸附能力降低。累托石吸附金属离子之后螯合形成的配位化合物不稳定, 温度升高会使配合物再次脱离, 导致吸附量降低[17]。由图可看出在  $15^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$  范围内累托石对 Pb(II)的去除率变化不大, 因此反应温度定设为常温。

### 3.5. 吸附等温线

配制  $100 \text{ mL}$  初始浓度分别为  $100, 150, 200, 300, 400$  和  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的硝酸铅溶液, 分别加入  $0.5 \text{ g}$  累托石, 在不改变溶液初始 pH 条件下测定  $298 \text{ K}$  时累托石对 Pb(II)的等温吸附曲线, 所得实验数据用 Langmuir, Freundlich 和 Temkin 模型进行拟合, 得到 Langmuir, Freundlich 和 Temkin 等温吸附方程的相关参数如表 2 所示, 拟合结果如图 6 所示。

Table 2. Adsorption isotherm parameters of Langmuir, Freundlich and Temkin models  
表 2. Langmuir, Freundlich 和 Temkin 模型的吸附等温线参数

温度(K)	Langmuir			Freundlich			Temkin		
	$q_m$	$K_L$	$R^2$	$K_F$	$1/n$	$R^2$	$b$	$K_T$	$R^2$
298	62.03	0.0247	0.9963	6.53	0.391	0.8728	31.12	0.2298	0.9288

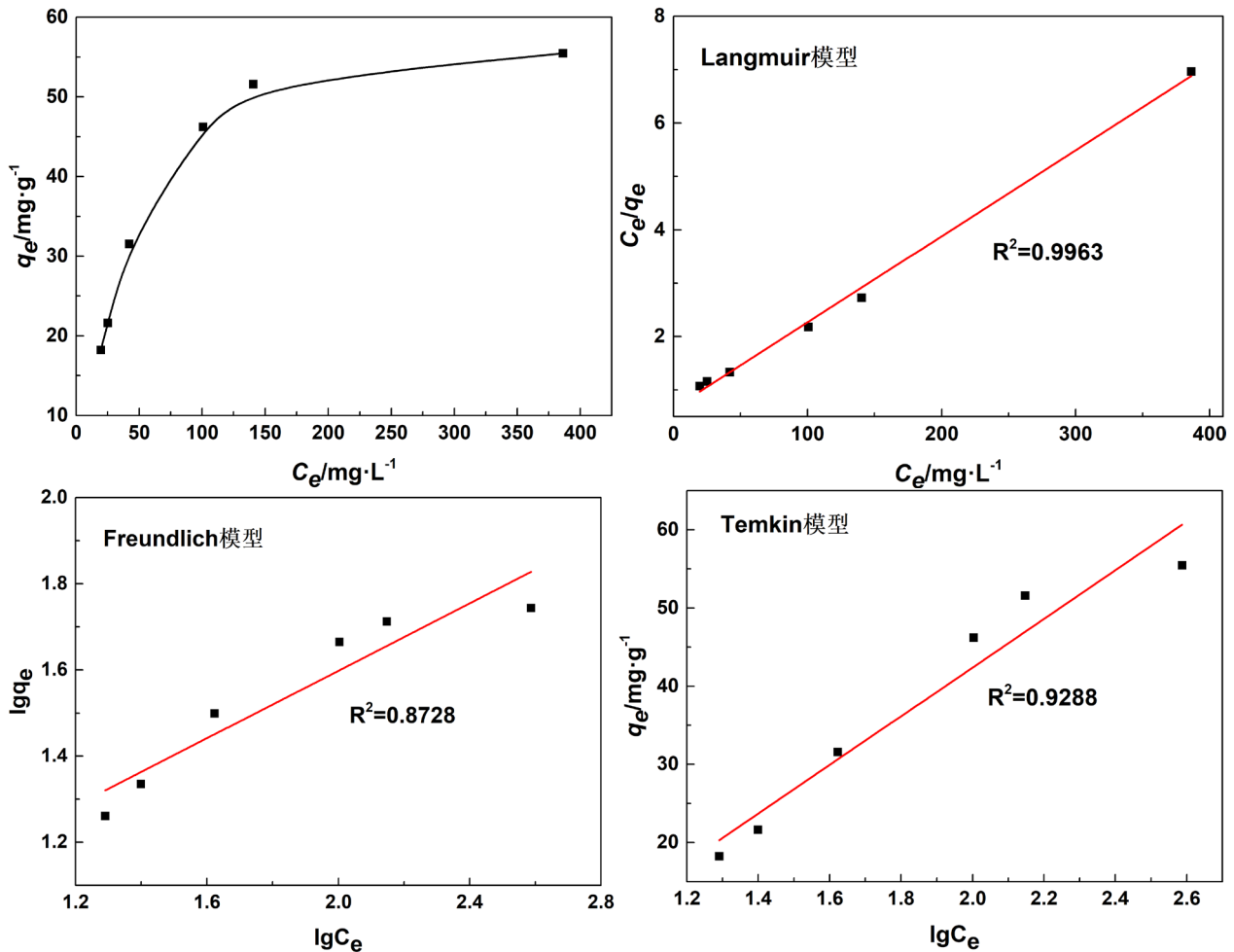


Figure 6. Adsorption isotherm model fitting of Pb(II) by rectorite  
图 6. 累托石对 Pb(II)的吸附等温线模型拟合

如表 2 和图 6 所示, 随着溶液 Pb(II)浓度的增加, 累托石对 Pb(II)的吸附容量增加。在初始阶段, 累托石对 Pb(II)的吸附量增加较快, 表明此时吸附剂表面吸附位点数量较多, 有利于 REC 吸附 Pb(II)。而随着浓度的增加受到吸附位点的限制, 吸附量缓慢增长。

累托石吸附 Pb(II)的 Langmuir 模型的  $R^2$  (0.9963)高于 Freundlich 模型  $R^2$  (0.8728), 以及 Temkin 模型  $R^2$  (0.9288), 表明 Langmuir 吸附等温线模型能更好的描述累托石对 Pb(II)的吸附机理, 说明累托石对 Pb(II)的吸附主要为单分子层吸附。

用 Langmuir 吸附等温线模型拟合累托石吸附 MB 在 298 K 温度条件下的最大吸附量  $q_m$  为  $62.03 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

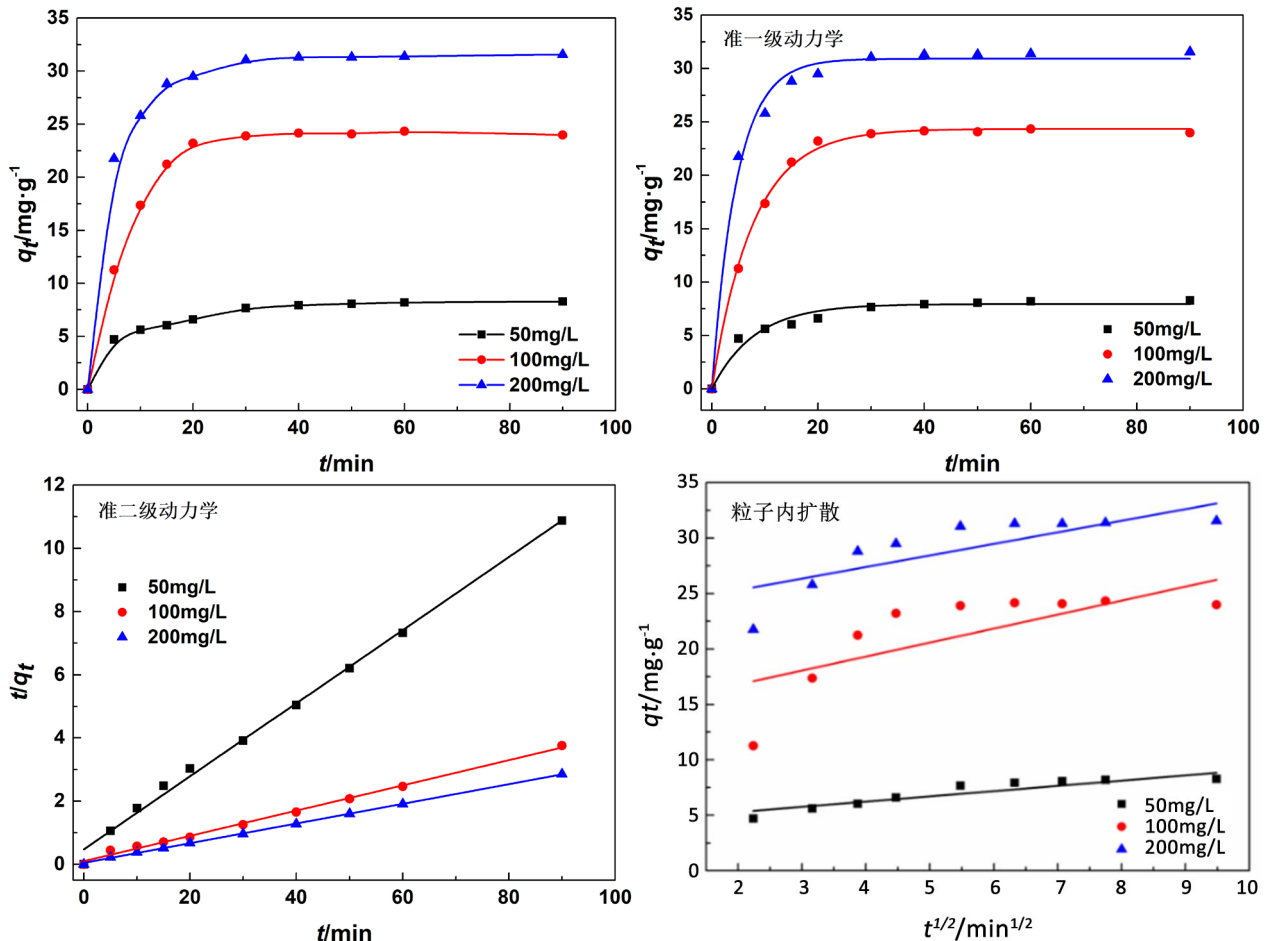
### 3.6. 吸附动力学

为了研究传质和化学反应等吸附过程的控制机理, 采用了 3 种动力学模型(即准一级动力学模型、准二级动力学模型、内扩散动力学模型)对三个不同浓度下的实验数据进行拟合。

配制初始浓度分别为  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的硝酸铅溶液, 向其中分别加入  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  累托石, 恒温振荡, 每隔一定时间取 5 mL 上清液过滤后测定吸光度。根据吸光度算出 t 时刻吸附量和平衡时刻吸附量, 进行动力学方程拟合。拟合得到准一级动力学、准二级动力学和粒子内扩散动力学方程的相关参数见表 3, 拟合曲线如图 7 所示。

**Table 3.** Adsorption kinetic model fitting parameters  
**表 3.** 吸附动力学模型拟合参数

浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	准一级动力学模型			准二级动力学模型			粒子内扩散模型		
	q <sub>e</sub>	K <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	q <sub>e</sub>	K <sub>2</sub> (10 <sup>-3</sup> )	R <sup>2</sup>	C	K <sub>p</sub>	R <sup>2</sup>
50	7.93	0.124	0.958	8.65	6.313	0.995	4.330	0.473	0.833
100	24.34	0.130	0.998	25.06	0.163	0.995	14.274	1.261	0.506
200	30.91	0.213	0.991	32.15	0.045	0.999	23.213	1.043	0.623



**Figure 7.** Adsorption kinetic model fitting  
**图 7.** 吸附动力学模型拟合

吸附时间对吸附过程有一定的影响。在开始 30 min 内，累托石对 Pb(II)的吸附容量增长迅速，吸附速度随着吸附时间的增加明显变缓，该反应在 30 min 之后渐渐趋于稳定。累托石的吸附过程可分为增加和平衡 2 个部分，刚开始发生吸附时，累托石的表面存在大量的吸附位点，溶液中重金属的浓度较高，吸附量相对比较大。随着吸附时间的延长，吸附位点逐渐减少导致吸附速率变慢，随后达到吸附平衡。到了平衡的阶段，吸附位点的减少导致吸附过程变得缓慢，吸附能力逐渐达到饱和。

根据拟合计算出的单位吸附量 q<sub>e</sub>，准一级动力学模型下对 Pb(II)分别为 7.93、24.34、30.91 mg·g<sup>-1</sup>；准二级动力学模型下对 Pb(II)分别为 8.65、25.06、32.15 mg·g<sup>-1</sup>；对比来看，试验 q<sub>e,exp</sub> 的值(8.57, 24.33, 31.56 mg·g<sup>-1</sup>)与来自准二级动力学模型的计算的 q<sub>e,cal</sub> 值一致，准二级吸附动力学模型能够更好的描述 REC 对 Pb(II)的吸附过

程和行为。此外,准二级动力学模型的  $R^2$  较准一级动力学模型的  $R^2$  更接近 1,在整个研究范围内,对于不同的初始浓度,准二级动力学模型与累托石吸附 Pb(II)的动力学行为非常吻合。因此,累托石对 Pb(II)的去除过程是化学吸附为主导,该吸附过程与累托石表面的活性位点和吸附质之间的离子交换、表面沉淀有关。

#### 4. 结论

1) 累托石可有效去除水中的 Pb(II),对于硝酸铅溶液,最佳的吸附条件为: Pb(II)浓度为  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,累托石投加量  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,反应温度  $25^\circ\text{C}$ ,吸附反应时间 40 min 达到平衡,去除率为 62.12%。

2) 吸附等温线模型拟合表明累托石吸附 Pb(II)符合 Langmuir 吸附等温线模型,累托石对 Pb(II)的吸附主要为单分子层吸附。

3) 吸附动力学模型拟合表明累托石吸附 Pb(II)更符合准二级动力学模型,表明累托石对 Pb(II)的去除过程是化学吸附为主导。

#### 参考文献

- [1] TIAN, Z., ZHANG, L., SHI, G., SANG, X., and NI, C. The synthesis of modified alginate flocculants and their properties for removing heavy metal ions of wastewater. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(31): 46577. <https://doi.org/10.1002/app.46577>
- [2] 邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫. 鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1310-1317.  
DENG Manjun, WANG Xuejiang, CHENG Xuejun, JING Huanping, and ZHAO Jianfu. Removal of lead ions from water by struvite natural zeolite composite. *Environmental Science*, 2019, 40(3): 1310-1317. (in Chinese)
- [3] LI, S., WANG, W., LIANG, F., and ZHANG, W. X. Heavy metal removal using nanoscale zero-valent iron (nZVI): Theory and application. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 322: 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.032>
- [4] 杨海, 黄新, 林子增, 何秋玫, 丁炜. 离子交换法处理重金属废水的研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(7): 1675-1680.  
YANG Hai, HUANG Xin, LIN Zizeng, HE Qiumei, and DING Wei. Research progress in the treatment of heavy metal wastewater by ion exchange. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(7): 1675-1680. (in Chinese)
- [5] 范先媛, 谢升昌, 刘红, 丁俊霞, 卢琦, 薛壮壮, 等. 4A 分子筛去除水中  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 性能和机理[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(5): 46-52.  
FAN Xianyuan, XIE Shengchang, LIU Hong, DING Junxia, LU Qi, XIE Zhuangzhuang, et al. Performances and mechanism for  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  removal from aqueous solution by 4A-molecular sieve. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(5): 46-52. (in Chinese)
- [6] MEI, H., YU, S., TAN, X., WANG, S., CHEN, C., and LI, J. Evaluation of the influence of environmental conditions on the removal of Pb(II) from wastewater by Ca-Rectorite. *Separation Science and Technology*, 2015, 50(15): 2257-2266. <https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1058821>
- [7] ABDI, G., ALIZADEH, A., ZINADINI, S., and MORADI, G. Removal of dye and heavy metal ion using a novel synthetic polyethersulfone nanofiltration membrane modified by magnetic graphene oxide/metformin-1 hybrid. *Journal of Membrane Science*, 2018, 552: 326-335. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.02.018>
- [8] 吴楠, 王三反, 宋小三, 李乐卓, 张雪. 电化学/水解/接触氧化/离子交换处理有机金属废水[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(16): 94-96+102.  
WU Nan, WANG Sanfan, SONG Xiaosan, LI Lezhao, and ZHANG Xue. Treatment of organometallic wastewater by electrochemistry, hydrolytic acidification, biological contact oxidation and ion exchange process. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(16): 94-96+102. (in Chinese)
- [9] HUANG, Y., WU, D., WANG, X., HUANG, W., LAWLESS, D., and FENG, X. Removal of heavy metals from water using polyvinylamine by polymer-enhanced ultrafiltration and flocculation. *Separation and Purification Technology*, 2016, 158: 124-136. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.12.008>
- [10] HOU, T., DU, H., YANG, Z., TIAN, Z., SHEN, S., SHI, Y., et al. Flocculation of different types of combined contaminants of antibiotics and heavy metals by thermo-responsive flocculants with various architectures. *Separation and Purification Technology*, 2019, 223: 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.068>
- [11] BAO, T., DAMTIE, M. M., WU, K., WEI, X. L., ZHANG, Y., CHEN, J., et al. Rectorite-supported nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  composite materials as catalyst for P-chlorophenol degradation: Preparation, characterization, and mechanism. *Applied Clay Science*, 2019, 176: 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.04.020>



- [12] ZENG, L., CHEN, Y., ZHANG, Q., GUO, X., PENG, Y., XIAO, H., et al. Adsorption of Cd(II), Cu(II) and Ni(II) ions by cross-linking chitosan/rectorite nano-hybrid composite microspheres. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 130: 333-343. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.05.015>
- [13] SHEN, Y., YU, X., and WANG, Y. Facile synthesis of modified rectorite (M-REC) for effective removal of anionic dye from water. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 278: 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.045>
- [14] 李东, 杜卫刚, 郭迎卫, 蒋金龙, 谭立强. 钠基累托石对模拟废水中 Ni<sup>2+</sup>的吸附研究[J]. *非金属矿*, 2018, 41(5): 79-82. LI Dong, DU Weigang, GUO Yingwei, JIANG Jinlong, and TAN Liqiang. Study on the sorption of Ni<sup>2+</sup> onto Na-rectorite from simulated wastewater. *Non-Metallic Mines*, 2018, 41(5): 79-82. (in Chinese)
- [15] WANG, N., FENG, Z., MA, X., and ZHENG, P. The modification of rectorite with carbon layers and trisodium trimetaphosphate for the removal of Pb<sup>2+</sup>. *Applied Clay Science*, 2017, 146: 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.044>
- [16] MA, J., LUO, J., LIU, Y., WEI, Y., CAI, T., YU, X., et al. Pb(II), Cu(II) and Cd(II) removal using a humic substance-based double network hydrogel in individual and multicomponent systems. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(41): 20110-20120. <https://doi.org/10.1039/C8TA07250G>
- [17] 卜帅宾, 孟昭福, Yek S, 张梦飞, 王腾, 任爽, 等. Cu<sup>2+</sup>和 Pb<sup>2+</sup>在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4611-4619. BU Shuaibin, MENG Zhaofu, YEK S, ZHANG Mengfei, WANG Teng, REN Shuang, et al. Adsorption and interaction of Cu<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> on BS-12 amphoteric modified bentonites. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4611-4619. (in Chinese)