

# 不同改性方法对污泥生物质炭 磷吸附能力的影响研究

李亚美<sup>1</sup>, 孟 猛<sup>1</sup>, 田大永<sup>1</sup>, 马超振<sup>1</sup>, 马 培<sup>2</sup>

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450000; 2. 河南工程学院 环境与生物工程学院, 河南 新郑 451191)

**摘 要:** 为了给市政污泥寻找一种合适的处理方法, 以市政污泥为原材料, 用热解和氯化镧改性两种方法制备生物质炭材料, 用于处理含磷废水。探讨了 pH 值、磷初始浓度以及干扰离子对污泥生物质炭除磷效果的影响, 并讨论了污泥生物质炭吸附的热力学过程。结果表明: 氯化镧改性污泥生物质炭对磷的最大平衡吸附量为  $58.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 是热解污泥生物质炭磷最大吸附量 ( $5.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 的近 11 倍; 热解污泥生物质炭磷吸附的最适 pH 值为  $6.0 \sim 10.0$ , 而氯化镧改性污泥生物质炭磷吸附的最适 pH 值为  $4.0 \sim 6.0$ 。Langmuir 等温吸附模型能够很好地拟合热解污泥生物质炭吸附磷的热力学过程 ( $R^2 = 0.9436$ ), Freundlich 等温吸附模型能很好地拟合氯化镧改性污泥生物质炭吸附磷的热力学过程 ( $R^2 = 0.9652$ )。氯化镧改性污泥生物质炭对磷吸附有较高的选择性, 当干扰阴离子  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  在很高浓度 ( $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 下对氯化镧改性污泥生物质炭磷吸附的影响较弱。高浓度的  $\text{HCO}_3^-$  ( $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 会显著增加水体的 pH 值, 降低了氯化镧改性污泥生物质炭磷的吸附能力, 但该生物质炭对磷仍保持着较强的吸附能力。氯化镧改性污泥生物质炭可以有效地去除污水中的磷, 缓解水体富营养化, 实现污泥的资源化利用。

**关键词:** 市政污泥; 生物质炭; 磷; 干扰离子; 热力学

中图分类号: TQ016; X56 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)06-0034-05

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023060034

**Two Modified Sludge Based Biochar Adsorbents in Phosphorus Removal from Wastewater / LI Yamei<sup>1</sup>, MENG Meng<sup>1</sup>, TIAN Dayong<sup>1</sup>, MA Chaozhen<sup>1</sup>, MA Pei<sup>2</sup> / (1. The Second Institute of Geological Environment Investigation of Henan Geological and Mineral Resources Exploration and Development Bureau, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Environment and Ecological Engineering Hennan University of Engineering, Xinzheng 451191, China)**

**Abstract:** To find a suitable adsorption for phosphorus removal, municipal sludge was modified by pyrolysis and lanthanum to remove phosphorus from wastewater. This study discuss the effect of pH, the initial concentration of phosphorus and the co-existing ions on phosphorus adsorption, and the adsorption thermal dynamics were also investigated. Results show that the maximum adsorption quantity by lanthanum modified biochar was  $58.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , almost 11 times of that by pyrolysis modified biochar. The suitable pH for phosphorus removal by pyrolysis modified biochar was  $6.0 \sim 10.0$ , while that by lanthanum modified biochar was  $4.0 \sim 6.0$ . Langmuir model can fit the thermal dynamics of phosphorus adsorption process on pyrolysis modified biochar, with  $R^2$  of 0.9436; while Freundlich model fits that on lanthanum modified biochar well, with  $R^2$  of 0.9652. Lanthanum modified biochar was insensitive to the coexisting anions. Even when the coexisting ions, such as  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ , were in a high concentration ( $5.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), they still have little effect on phosphorus adsorption by lanthanum modified biochar.  $\text{HCO}_3^-$  slightly affected phosphorus adsorption, but a good adsorption capacity was still maintained. Lanthanum modified biochar can effectively adsorb and remove phosphorus in water and provide a new way for the resource utilization of water treatment sludge.

**Key words:** municipal sludge; biochar; phosphorus; coexisting ions; thermal dynamics

收稿日期: 2022-12-26

项目来源: 河南省地质矿产勘查开发局 2021 年度局管地质环境项目(豫地环[2021]3 号); 2021 年度河南省重点研发和推广专项(212102310082)。

作者简介: 李亚美(1987-), 女, 汉族, 河南商丘人, 中级工程师, 研究方向为水文地质, E-mail: 1404853567@qq.com

磷是生态系统中的一种重要元素,但过多的磷将会导致水体富营养化和生态系统恶化<sup>[1-2]</sup>。研究表明,有效降低水体中磷的排放量是改善水体富营养化的关键,故如何去除废水中的磷成为遏制水体富营养化的重要手段<sup>[3]</sup>。当前磷去除的方法主要有生物法、生物膜法、化学法和吸附法等。吸附法由于其效率高、污染小以及便于操作而被广泛应用于磷的去除中,然而现存的磷吸附剂成本高,不适合推广应用<sup>[4-6]</sup>。近些年来,许多固体废弃物被应用到磷吸附的研究中,例如废铁、赤泥、市政污泥等等<sup>[7-8]</sup>。固体废弃物的利用能够大幅度地降低除磷成本且能够达到以废治废的目的。市政污泥是市政废水处理过程中的副产物,我国市政污水剩余污泥的年产量高达  $6.0 \times 10^7 \sim 9.0 \times 10^7$  t<sup>[9-10]</sup>。市政污泥中含有大量的污染物,如果处理不当将会对环境产生二次污染,因此资源化利用市政污泥成为污泥处理处置问题的重点研究方向<sup>[11-12]</sup>。故本文拟用两种方法对市政污泥进行改性处理用于吸附污水中的磷,以期对污泥的资源化利用以及磷废水的处理寻找一种廉价高效的吸附剂。

## 1 材料与方法

### 1.1 吸附材料的制备

污泥取自新郑市某污水处理厂,将其风干后过筛(100目),备用。

热解:取适量污泥粉放入瓷舟中,置于管式炉并通入氮气。将管式炉以  $10\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度进行升温至  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ,保温 1.5 h 进行热解后冷却取出备用。

氯化镧改性:取 3 g 污泥粉放入 27 mL 浓度为  $0.2\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的氯化镧溶液中,之后滴加 3 mL 浓度为  $12\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaOH 溶液,室温下震荡 30 min。之后将混合液置于水热反应釜中  $170\text{ }^\circ\text{C}$  下反应 3 h。产物进行过滤,滤出物用去离子水清洗 3 遍之后干燥箱内干燥( $105\text{ }^\circ\text{C}$ ),过筛(100目),备用。

### 1.2 吸附实验

磷储备液:配制浓度为  $1000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (以 P 计)的  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  储备液溶液。

pH 值影响实验:取适量磷储备液,用 NaOH( $0.1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )和 HCl( $0.1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )调节磷储备 pH 值分别为 2、4、6、7、8、10 和 12,并加水稀释使溶液含磷浓度为  $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,体积为 100 mL,加入污泥生物质炭使其浓度为  $1.0\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。恒温振荡器内恒温  $30\text{ }^\circ\text{C}$  中速震荡 2 h 后过滤,用钼酸铵分光光度法测定滤

液中磷的含量。

磷浓度影响实验/吸附热力学实验:取适量磷储备液配制浓度分别为 20、30、40、50、60、80、100、125、150、175、200、225、250、275  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的磷溶液。取上述溶液 100 mL,加入污泥生物质炭使其浓度为  $1.0\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,恒温  $30\text{ }^\circ\text{C}$  中速震荡 2 h 后过滤,用钼酸铵分光光度法测定滤液中磷的含量。

干扰离子影响实验:配制磷浓度为  $100\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、干扰离子( $\text{NaCl}$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaHCO}_3$ )浓度分别为  $0.1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的溶液。取上述溶液 100 mL,加入适量污泥生物质炭使其含量为  $1.0\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,恒温  $30\text{ }^\circ\text{C}$  中速震荡 2 h 后过滤,用钼酸铵分光光度法测定滤液中磷的含量。

### 1.3 吸附量及吸附率的计算方法

吸附量的计算方程式:

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

式中:  $q_t$  为 t 时刻磷的吸附量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $C_0$  和  $C_t$  分别为初始时刻和 t 时刻溶液中磷的浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $m$  为投加吸附剂的量, g;  $V$  为吸附液的体积, L。

### 1.4 吸附热力学模型

本研究采用 Langmuir 和 FreundlichSips 模型拟合污泥生物质炭吸附磷的热力学过程。

Langmuir 模型表达式如下<sup>[13-15]</sup>:

$$q_e = q_m \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

式中:  $q_m$  为最大吸附量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $K_L$  为 Langmuir 常数,  $\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

Freundlich 模型表达式如下<sup>[13-15]</sup>:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

式中:  $K_F$  为 Freundlich 模型吸附能力参数,  $\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $n$  为经验指数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH 值对生物质炭材料磷吸附的影响

图 1 显示当溶液 pH 值较低时,两种改性污泥生物质炭对磷的吸附量均较低。随着 pH 值的增加,两种生物质炭对磷的吸附量均逐渐增加。当 pH 值由 2.0 增加至 4.0 时,热解和氯化镧改性污泥生物质炭对磷的吸附量分别从  $1.32\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $15.3\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  增加至  $1.82\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $23.8\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。继续增加 pH 值,热解污泥生物质炭对磷的吸附量继续

增加,当 pH 值处于 6~10 的范围内,其对磷的吸附量达到最大,为  $1.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;继续增加 pH 值,热解污泥生物质炭对磷的吸附量显著降低。而当 pH 值为 4.0~6.0 的范围内时,氯化镧改性污泥生物质炭对磷的吸附量基本维持不变 ( $22.5 \sim 23.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );当 pH 值超过 6.0 后,氯化镧改性污泥生物质炭对磷的吸附量则逐渐降低。如,当  $\text{pH} = 7.0$  时,磷的吸附量为  $17.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;当  $\text{pH} = 12.0$  时,磷的吸附量降低至  $7.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。可见氯化镧改性污泥生物质炭对磷吸附的最佳 pH 值范围是 4.0~6.0;而热解污泥生物质炭对磷吸附的最佳 pH 值范围是 6.0~10.0。

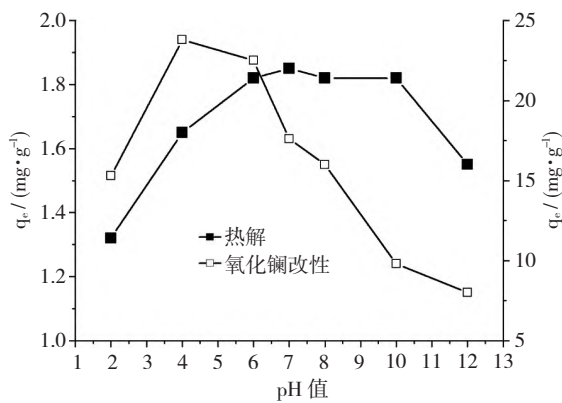


图1 pH 值对热解和氯化镧改性污泥生物质炭磷吸附的影响

## 2.2 磷初始浓度对生物炭材料磷吸附的影响

如图2所示,当磷浓度从  $20.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增加至  $100.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,热解和氯化镧改性污泥生物质炭对磷的吸附量分别从  $1.96 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $9.95 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  增加至  $5.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $37.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,吸附量均几乎呈线性增加的趋势。继续增加磷的初始浓度,热解污泥生物质炭对磷的吸附量几乎不再增加,而氯化镧改性生物炭对磷的吸附量则继续增加。当磷初始浓度为  $225 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,氯化镧改性生物炭对磷的吸附量达到  $58.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,继续增加磷初始浓度,氯化镧改性生物炭吸附磷的量不再增加。两种生物炭对磷的吸附量存在显著差异,氯化镧改性污泥生物质炭对磷的最大吸附量 ( $58.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 几乎是热解污泥生物质炭最大吸附量 ( $5.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 的 11 倍。

## 2.3 干扰离子对污泥生物炭磷吸附的影响

在实际污水中往往存在多种离子,图3显示了常见的阴离子对磷吸附的影响。2.2 的研究中表明氯化镧改性污泥生物炭远高于热解污泥生物炭对磷

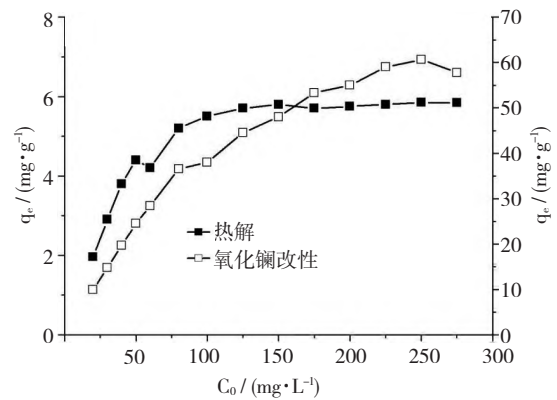


图2 磷初始浓度对热解和氯化镧改性污泥生物质炭磷吸附的影响

的吸附量。故本节继续探析干扰离子对氯化镧改性污泥生物质炭对磷吸附的干扰。

由图3可知,即便当干扰阴离子  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度达到很高时 ( $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ),它们对氯化镧改性污泥生物质炭磷吸附的影响也很弱,表明氯化镧改性污泥生物质炭对磷有较高的选择吸附特性。当干扰离子  $\text{Cl}^-$  浓度从  $0.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  增加至  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,磷吸附量从  $37.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  先略微增加至  $39.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,之后继续增加  $\text{Cl}^-$  浓度至  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,磷的吸附量降回至  $37.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  在  $0 \sim 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的浓度范围内,氯化镧改性污泥生物质炭对磷的吸附曲线近乎水平,即  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  对磷吸附的影响几乎可以忽略。由图3可知,  $\text{HCO}_3^-$  对氯化镧改性污泥生物质炭吸附磷也有一定的负影响。当  $\text{HCO}_3^-$  浓度增加至  $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (是磷浓度的 160 倍),磷的吸附量从  $37.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  降低至  $34.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,降低了 8.0%。但氯化镧改性污泥生物质炭对磷仍保持着较强的吸附能力。高浓度的  $\text{HCO}_3^-$  会显著增加水体的 pH 值,会影响氯化镧改性生物炭的表面电荷特征,从而影响其对磷的静电吸附能力。

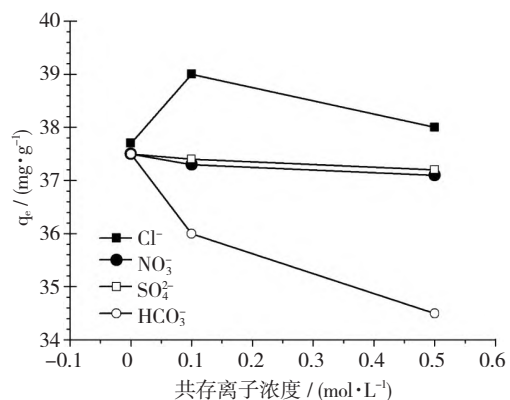


图3 干扰离子对氯化镧改性污泥生物质炭磷吸附的影响

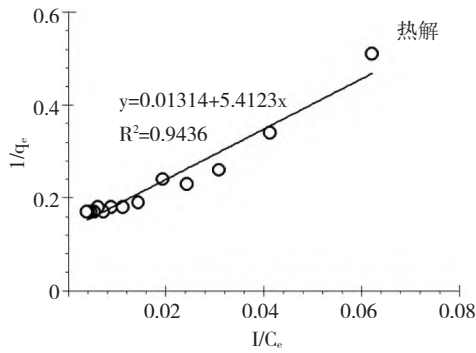


图4 热解污泥生物炭对磷的 Langmuir 等温吸附拟合曲线

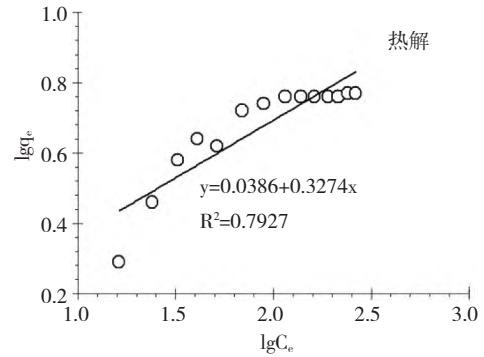


图6 热解污泥生物炭对磷的 Freundlich 等温吸附拟合曲线

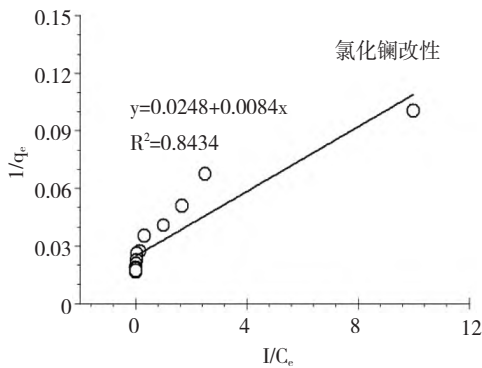


图5 氯化镧改性污泥生物炭对磷的 Langmuir 等温吸附拟合曲线

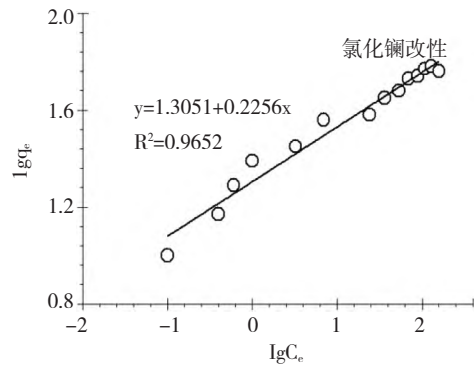


图7 氯化镧改性污泥生物炭对磷的 Freundlich 等温吸附拟合曲线

Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型对热解和氯化镧改性后的污泥生物炭吸附磷热力学过程的拟合结果见图 4 ~ 图 7 和表 1。从热力学模型拟合结果可知, Langmuir 模型能够很好地拟合热解污泥生物炭吸附磷的热力学过程,  $R^2$  为 0.9436。拟合结果中理论最大吸附量  $q_m$  为  $7.61 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 理论最大吸附量略高于实验结果 ( $5.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )。Freundlich 等温吸附模型对热解污泥生物炭吸附磷的热

力学过程拟合结果较差,  $R^2$  为 0.7927; 这表明热解污泥生物炭对磷的吸附以单层吸附为主<sup>[13-15]</sup>。

Langmuir 模型对氯化镧改性污泥生物炭吸附磷的热力学过程拟合结果较差,  $R^2$  为 0.8434; 而 Freundlich 等温吸附模型能很好地拟合氯化镧改性污泥生物炭吸附磷的热力学过程,  $R^2$  为 0.9652。这说明氯化镧改性污泥生物炭吸附磷的过程属于多层物理吸附<sup>[13-15]</sup>。氯化镧改性后的污泥生物炭对磷的吸附能力明显优于热解污泥生物炭。

表1 热解和氯化镧改性污泥生物炭磷吸附热力学参数

| 吸附剂        | Langmuir                               |                                         |        | Freundlich                             |        |        |
|------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|--------|----------------------------------------|--------|--------|
|            | $K_L / (\text{L} \cdot \text{g}^{-1})$ | $q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ | $R^2$  | $K_F / (\text{L} \cdot \text{g}^{-1})$ | $n$    | $R^2$  |
| 热解污泥生物炭    | 0.0243                                 | 7.61                                    | 0.9436 | 1.0929                                 | 3.0581 | 0.7927 |
| 氯化镧改性污泥生物炭 | 0.1179                                 | 25.91                                   | 0.8434 | 20.1883                                | 4.4330 | 0.9652 |

### 3 结论

本研究用热解和氯化镧改性两种方法对污泥进行处理得到两种生物炭, 氯化镧改性污泥生物炭明显优于热解污泥生物炭的磷吸附能力, 具体研究结论如下:

(1) 热解污泥生物炭对磷的吸附的最佳 pH 值范围为 6.0 ~ 10.0; 氯化镧改性污泥生物炭对磷吸附的最佳 pH 值范围是 4.0 ~ 6.0。

(2) 当磷浓度从  $20.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增加至  $100.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 两种污泥生物炭对磷的吸附曲线均几乎呈线性增加的趋势。当磷初始浓度从  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增

加至  $225 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 热解污泥生物质炭对磷的吸附量不再增加, 氯化镧改性生物质炭磷吸附量继续增加。氯化镧改性污泥生物质炭对磷的平衡吸附量 ( $58.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 几乎是热解污泥生物质炭磷平衡吸附量 ( $5.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 的 11 倍。

(3) Langmuir 模型能够很好地拟合热解污泥生物质炭吸附磷的热力学过程 ( $R^2 = 0.9436$ ), 而 Freundlich 等温吸附模型拟合结果较差 ( $R^2 = 0.7927$ )。Freundlich 等温吸附模型能很好地拟合氯化镧改性污泥生物质炭吸附磷的热力学过程 ( $R^2 = 0.9652$ ), 而 Langmuir 模型拟合结果较差 ( $R^2 = 0.8434$ ); 这说明热解污泥对磷的吸附过程以单层吸附为主, 而氯化镧改性污泥生物质炭对磷的吸附属于多层物理吸附。

(4) 氯化镧改性污泥生物质炭对磷有较高的吸附选择性, 当干扰阴离子  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度很高时 ( $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 对其磷吸附的影响也很弱。高浓度的  $\text{HCO}_3^-$  ( $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 会显著增加水体的 pH 值, 降低了氯化镧改性污泥生物质炭对磷的吸附能力, 但该生物质炭对磷仍保持着较强的吸附能力。

#### 参考文献:

- [1] LI J, LI B, HUANG H, et al. Removal of phosphate from aqueous solution by dolomite-modified biochar derived from urban dewatered sewage sludge [J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 461.
- [2] 刘永, 蒋青松, 梁中耀, 等. 湖泊富营养化响应与流域优化调控决策的模型研究进展 [J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 49–63.
- [3] SCHOLZ R W, WELLMER F W. Although there is no physical short-term scarcity of phosphorus, its resource efficiency should be improved [J]. J Ind Ecol, 2019, 23(52): 12750.
- [4] 林建伟, 王虹, 詹艳慧, 等. 氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 [J]. 环境科学, 2016, 37(1): 208–219.
- [5] ZOU H M, WANG Y. Phosphorus removal and recovery from domestic wastewater in a novel process of enhanced biological phosphorus removal coupled with crystallization [J]. Bioresource Technology, 2016, 211: 87–92.
- [6] HAUDUC H, TAKACS I, SMITH S, et al. A dynamic physicochemical model for chemical phosphorus removal [J]. Water Research, 2015, 73: 157–170.
- [7] 吴露, 刘锋, 龙睿, 等. 3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 [J]. 环境科学, 2019, 40(2): 677–684.
- [8] 桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 等. 铁硫改性生物炭去除水中的磷 [J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2313–2323.
- [9] 朱盛胜, 陈宁, 李剑华. 城市污泥处置技术及资源化技术的应用进展 [J]. 广东化工, 2018, 45(24): 28–32.
- [10] 朱明璇, 李梅, 刘承芳, 等. 污泥处理处置技术研究综述 [J]. 山东建筑大学学报, 2018, 33(6): 63–68.
- [11] 徐晗, 安平凡, 宋广明. 污泥综合处置及资源化利用技术研究 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(4): 76–78.
- [12] 吴江, 余凌洁, 张会, 等. 污泥与煤炭掺烧的特性及其研究进展 [J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(2): 107–110.
- [13] 张聪智, 苏亚拉图, 赖欣, 等. 花生壳生物炭对铵态氮的吸附性能研究 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(33): 214–220.
- [14] 周奕, 刘启斌, 孙建生, 等. 壳聚糖-高岭土复合材料吸附废水中磷的性能研究 [J]. 中国沼气, 2022, 40(6): 43–49.
- [15] 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 等. 改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 [J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2195–2201.