

改性水葫芦生物炭对磷的吸附性能研究

徐俊焯¹, 俞志涛¹, 陈雪松^{2*}

¹浙江树人大学家扬书院, 浙江 杭州

²浙江树人大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州

Email: *183591749@qq.com

收稿日期: 2020年11月18日; 录用日期: 2020年12月8日; 发布日期: 2020年12月15日

摘要

不同的生物炭对水体中磷的吸附效果不同, 因此筛选制备低成本、高效、环境友好的吸附剂对废水处理有着现实意义。本文采用水葫芦来制备生物质炭, 通过锰、镁改性以期提高生物质炭对水体中磷的吸附性能。通过实验研究, 发现未改性、锰改性和镁改性生物炭对水体中磷的吸附性能各不相同。其中, 锰改性生物炭、镁改性生物炭和未改性生物炭对磷的最大吸附量分别为 $13.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $52.49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $98.04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中对锰改性生物炭对磷的吸附量是未改性生物炭的7.42倍。从实验结果看出水葫芦制备生物炭可以对水体中磷有一定的修复作用, 同时也可实现水生植物的资源化利用, 具有很好的应用前景。

关键词

生物炭, 水葫芦, 磷, 吸附

Study on Adsorption Properties of Modified Biomass Carbon of *Eihhornia crassipes* to Phosphorus

Junye Xu¹, Zhitao Yu¹, Xuesong Chen^{2*}

¹Jiayang College, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

²College of Biology and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

Email: *183591749@qq.com

Received: Nov. 18th, 2020; accepted: Dec. 8th, 2020; published: Dec. 15th, 2020

Abstract

Different biochar have different adsorption effects on phosphorus in water, so it is of practical sig-

*通讯作者。

nificance to screen and prepare low-cost, efficient and environmentally friendly adsorbents for wastewater treatment. In this paper, *Eichhornia crassipes* was used to prepare biomass carbon, which was modified by manganese and magnesium in order to improve the adsorption performance of biomass carbon to phosphorus in water. It was found that the adsorption properties of unmodified, manganese modified and magnesium modified biochar to phosphorus in water were different. Among them, the maximum phosphorus adsorption capacity of manganese modified biomass, magnesium modified biochar and unmodified biochar is $13.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $52.49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and $98.04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively, and the phosphorus adsorption capacity of manganese modified biochar is 7.42 times that of unmodified biochar. The experimental results show that the biomass charcoal prepared by *Eihhornia crassipes* has a certain remediation effect on phosphorus in water, and can also realize the resource utilization of aquatic plants, which has a good application prospect.

Keywords

Biochar, *Eichhornia crassipes*, Phosphorus, Adsorption

Copyright © 2020 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. 研究背景

水体富营养化给人们生活带来的十分巨大的影响,不但破坏了水生生态系统,同时严重影响了经济的发展[1]。磷(P, Phosphorus)是农作物成长必要的营养成分,同时也是水体富营养化现象最重要的制约因子[2]。有学者研究发现,由于长期过量地对土壤施用磷肥,使农田可耕种土壤长期处于含磷丰富的状态,进而通过地表径流等途径将磷转移到水体中,使得水体中含磷量屡屡超标[3]。吸附法除磷由于成本低,操作简便、安全等多种优点日益受到关注和重视。各种材料先后被研究者用作水中磷的吸附剂[4]。其中生物炭是目前非常热门的一种有效处理磷的吸附材料[5] [6]。但是不同的生物炭对磷的吸附效果不同,因此筛选制备低成本、高效、环境友好的吸附剂对废水处理有着现实意义。

生物炭是利用生物质在无氧或限氧条件下热解制备的富炭材料,有较为发达的孔隙结构,吸附能力强,在环境领域已受到广泛关注[6]。由于未经过化学改性的原生生物质普遍存在吸附容量低吸附选择性差等问题,生物炭作为吸附剂通常对金属阳离子和有机污染物具有较强的吸附能力,而对阴离子污染物(磷酸根)的吸附能力有限[7],不利于实际废水处理工程中的利用[8]。这是因为生物质中金属阳离子含量较低,因此需要引入金属元素来改性生物炭,从而提高材料对阴离子的吸附性能。近几年来利用生物炭去除水体磷酸盐的相关研究不断稳步增长,许多研究者采用不同金属元素(镁、钙、铁、镧等)来改性生物炭应用于磷酸盐吸附领域。Zhang 等分别以甘蔗渣、甜茶渣、杨木、松木和花生壳为原材料,采用 $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为前驱体,制备多孔 MgO -生物炭复合材料[9]。Kong 等利用 Ca 改性污泥吸附水体中的磷酸盐,吸附量高达 $116.82 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ [10]。Zhang 等以水葫芦为底物,采用 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 共沉淀法制备的磁性生物炭,对磷酸盐具有良好的吸附能力,并显著提高了生物炭的回收率[11] [12]。

水葫芦中含有大量的优质多孔纤维,将其制成生物炭用于处理含磷废水,既可以解决水葫芦的生态危害,也可以治理水体富营养化的问题。这种方法提供了一种农业面源污染及水体富营养化防治的新策略。水葫芦被认为是具有快速增长率的侵入性水草,水葫芦等水生植物在富磷水体中爆发性的生长,会对水生生态系统产生严重的影响,因此将水葫芦等水生植物作为原料制备生物炭,具有一定的生态意义。

目前有研究者利用落叶、小麦秸秆[13]等材料制备成生物炭并研究了其对磷的吸附能力,但是利用水

葫芦制备成生物质炭并且进行金属改性来吸附水中磷的相关研究并不多。本研究以水生植物水葫芦烧制成的生物炭用作水中磷的吸附剂,通过锰、铁来进行改性来研究水葫芦生物炭对废水中磷吸附性能的影响因素,在单一因素试验基础上进行优化试验,找出最佳吸附工艺条件,以期为水体中磷的处理和水葫芦的无害化治理提供科学依据。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

仪器: TS-100B 台式恒温振荡器(常州光启实验仪器有限公司)、JJ-1 增力电动搅拌器(常州金坛宏华仪器厂)、马弗炉(余姚市长江温度仪表厂)、DHG-9070A 电热鼓风干燥箱、TGL-16 高速离心机、UV-2600 紫外可见光光度计(日本津岛)、雷磁 pH-3E 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司)、梅特勒电子天平 AL204。

试剂: 磷酸二氢钾(化学纯)、抗坏血酸(分析纯)、乙二胺四乙酸二钠(分析纯)、甲酸(分析纯)、钼酸铵(分析纯)、酒石酸锑钾(分析纯)、浓硫酸(分析纯)、盐酸(分析纯)、氢氧化钠(分析纯)。

模拟废水: 实验用含磷废水由 KH_2PO_4 溶液配置模拟, 备用。

2.2. 试验材料与制备方法

2.2.1. 生物炭制备

试验所需植物为水葫芦采自水葫芦取自浙江树人大学周边溪河, 选取植物长势良好, 植株体积大小相似。用自来水清洗掉水葫芦携带的泥沙和表面其他附着物, 保留茎叶主体部分。在 80°C 下烘箱中烘干至恒重, 再粉碎过 20 目筛, 然后将粉碎的水葫芦装入陶瓷坩埚中, 压实盖盖子, 放入马弗炉里恒温(400°C)热解 1 h, 冷却至室温, 装袋密封干燥保存备用, 即制得水葫芦生物炭[14]。

2.2.2. 水葫芦炭的改性

1) 铁离子改性

将 10.0 g 制备后的水葫芦生物炭加入到 1 L 浓度为 40 g/L 的无水 FeCl_3 溶液中室温下搅拌 24 h 后将茶叶渣滤出, 放置在 60°C 左右的真空干燥箱中 2 h, 随后将其加入到 1 L 质量分数均为 5% 的 NaCl-NaOH 混合溶液中在 30°C 温度下搅拌 24 h。最后将获得的材料先后用 0.01 M 的 HCl 溶液和去离子水冲洗至 pH 为中性。将材料滤出后放置在 60°C 的真空干燥箱中烘干至平衡, 并储存于具塞玻璃瓶中备用[15]。

2) 锰离子改性

将 10.0 g 预处理后的水葫芦生物炭加入到 1 L 浓度为 1 mol/L 的 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 溶液中室温下搅拌 24 h。滤出后, 放置在 60°C 的真空干燥箱中 2 h, 随后将其加入到 1 L 含有 10% 碱度和 13% 有效氯的 NaClO-NaOH 混合溶液中在 30°C 温度下搅拌 24 h, 此步骤实现将 Mn^{2+} 转化成 Mn^{4+} 沉积在水葫芦生物炭上[16]。最后将获得的复合材料先后用 0.01 M 的 HCl 溶液和去离子水冲洗至 pH 为中性。将材料滤出后放置在 60°C 的真空干燥箱中烘干至平衡, 并储存于具塞玻璃瓶中备用。

2.3. 分析方法

溶液中磷酸盐浓度采用钼酸铵分光光度法(GB11893-89), 设置波长为 710 nm, 以水做参比, 测定吸光度, 每个样品吸光度重复测试 3 次, 最终取平均值, 使用紫外可见光光度计测定模拟废水中磷的浓度。

2.4. 吸附实验

吸附实验采用静态实验, 以单因素作为变量, 对不同 pH 值、生物炭投加量和反应时间对水葫芦生物炭吸。

在 100 mL 锥形瓶中加入 50 mL 模拟 20 mg/L 含磷废水, 然后分别加入一定量的改性水葫芦炭, 将锥形瓶置于水浴恒温振荡器中进行吸附除磷实验, 25℃ 下恒温以 200 r·min 的转速连续振荡 120 min 后, 经 0.45 μm 滤膜过滤后测定滤液中离心取上清液测定磷的浓度, 设 3 次重复, 结果取平均值。并用式(1)计算吸附剂的吸附容量。

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

式中: q 为吸附容量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; C_0 为吸附前 P 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_t 为时间 t 时溶液中 P 的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为溶液体积, L; m 为吸附剂的质量, g。

2.4.1. 磷初始浓度对水葫芦生物炭吸附磷的实验

称取 0.2 g 改性水葫芦生物炭于 100 mL 具塞锥形瓶中, 加入 50 mL 初始浓度分别为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 mg/L 的磷溶液, 溶液的 $\text{pH} = 5.5 \pm 0.2$ 。将锥形瓶置于恒温振荡器中, 25℃ 下恒温以 200 r·min 的转速连续振荡 120 min 后, 经 0.45 μm 滤膜过滤后测定滤液中离心取上清液测定磷的浓度, 设 3 次重复, 结果取平均值。测定吸附平衡后溶液中磷的浓度并计算吸附容量。

2.4.2. pH 对水葫芦生物炭吸附磷的实验

分别称取 0.2 g 改性水葫芦生物炭放置于 100 ml 具塞锥形瓶中, 加入 50 ml 磷含量 20 mg/L 的溶液于锥形瓶中, 通过 0.1 mol/L HCl 或 NaOH 来调节溶液的 pH, 使溶液的 pH 均匀分布 2~12 范围内。将锥形瓶置于恒温振荡器中, 25℃ 下恒温以 200 r/min 的转速连续振荡 120 min 后, 经 0.45 μm 滤膜过滤后测定滤液中离心取上清液测定磷的浓度, 设 3 次重复, 结果取平均值。测定吸附平衡后溶液中磷的浓度并计算吸附容量。

2.4.3. 投加量对水葫芦生物炭吸附磷的实验

分别称取 0.1 g、0.15 g、0.2 g、0.25 g、0.3 g 改性水葫芦生物炭于 100 mL 具塞锥形瓶中, 加入 50 ml 含磷量 20 mg/L 的溶液于锥形瓶中, 溶液的 pH 为 6 左右。将锥形瓶置于恒温摇床中, 在 25℃ 的条件下以 200 r/min 的转速连续振荡 120 min 后, 经 0.45 μm 滤膜过滤后, 取滤液中离心后的上清液, 测定磷的浓度, 重复 3 次, 结果取平均值。测定吸附平衡后溶液中磷的浓度并计算吸附容量。

2.4.4. 反应时间对水葫芦生物炭吸附磷的实验

分别称取 0.2 g 改性水葫芦生物炭放置于 100 ml 具塞锥形瓶中, 加入 50 ml 磷含量 20 mg/L 的溶液于锥形瓶中, 溶液的 pH 为 6 左右。将锥形瓶置于恒温振荡器中, 25℃ 下恒温以 200 r·min 的转速连续振荡, 分别设置反应时间为: 30、60、90、120、150、180 和 210 min 后, 经 0.45 μm 滤膜过滤后测定滤液中离心取上清液测定磷的浓度, 设 3 次重复, 结果取平均值。

3. 结果与讨论

3.1. 不同的初始磷溶液浓度对磷吸附性能影响研究

以水葫芦生物炭在不同浓度梯度吸附过程中磷的平衡浓度为横坐标, 磷的吸附容量为纵坐标, 得到生物炭对磷的吸附等温曲线见图 1。

从图中可以看出: 水葫芦生物炭对磷的吸附量随着含磷溶液浓度增加呈现增强的趋势。三种生物炭对磷的吸附能力高低依次为: 锰改性生物炭 > 铁改性生物炭 > 未改性生物炭。当含磷废水的浓度在 10 mg/L, 水葫芦生物炭对磷的吸附量增加缓慢, 这一现象的主要原因可能是低浓度的含磷溶液与生物炭混合后, 混合液中存在的杂质对生物炭的吸附有一定的影响。当含磷废水的浓度大于 20 mg/L 以后, 生物炭对磷的吸附容量增大加速, 并在浓度为 80 mg/L 时磷吸附容量趋于平稳。说明水葫芦生物炭对高浓度含磷废水的处理具有一定的优势, 这个结论和一些研究者的结论相似[16]。含磷废水浓度的增加对吸附剂

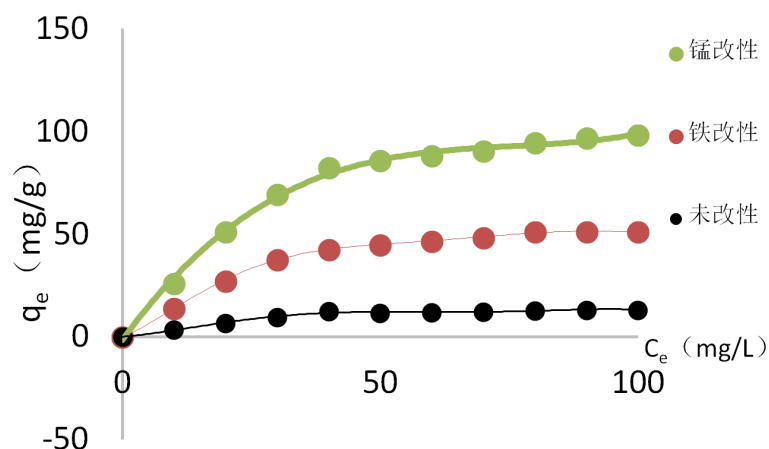


Figure 1. Effect of different initial phosphorus concentration on adsorption of phosphorus
图 1. 不同的初始磷溶液浓度对磷吸附性能影响研究

表面的吸附位点有促进作用,使其价值最大发挥,不过随着吸附的推进,吸附达到极限,所有的结合位点全部被消耗,其吸附容量达到最大,磷浓度不再起正向影响作用。

3.2. 不同的 pH 对磷吸附性能影响研究

有研究者认为不同的初始 pH 对生物炭吸附能力的影响,是由于溶液不同 pH 值会影响磷的存在形式,同时也会影响生物炭表面的电荷分布[17]。图 2 是不同初始 pH 值对水葫芦生物炭吸附含磷模拟废水效果的影响,从图 2 可以看出随溶液初始 pH 值的升高,未改性的水葫芦生物炭对磷的吸附量较低,并且没有明显变化。锰和铁改性的 2 种生物炭对磷的吸附容量是先增加,然后减少。随 pH 值升高,锰、铁性的生物炭对磷的吸附量增加迅速,在 pH 值为 6 时达到对磷的吸附峰值,吸附量达到 98.04 mg/g,其中锰改性的生物炭对磷的吸附值更高一些。随后当 pH 不断增加到 8 时,吸附容量开始呈现出明显下降的趋势。这一结果表明 pH 过低过高的酸碱条件对生物炭的吸附是不利的, HAN 等在水稻秸秆生物炭对镉吸附研究中的结论相一致[18]。较低的 pH 值可能会破坏生物炭与吸附质之间的键能[18],有学者认为当 pH 值过低时磷以分子形式存在,不易被吸附, pH 较低的条件,生物炭表面官能团的质子化作用明显。pH 较高时,生物炭表面负电荷增多,静电排斥作用加强,导致吸附量降低[18]。

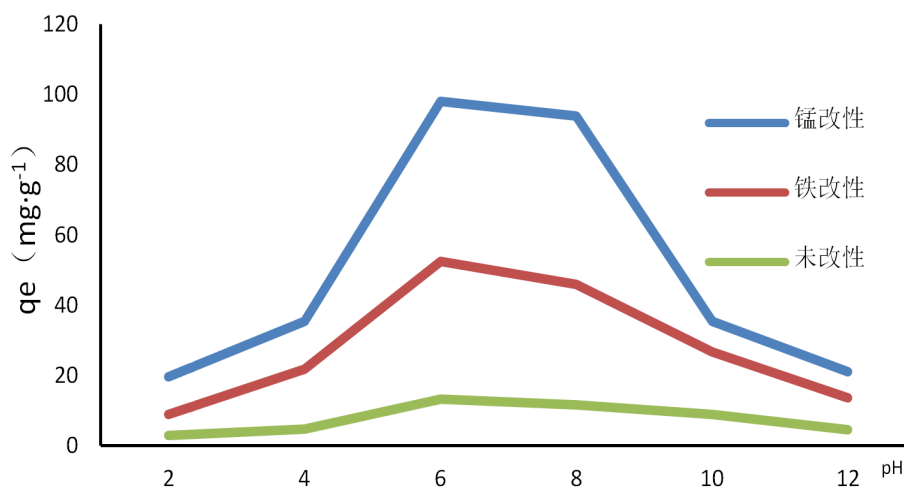


Figure 2. Effect of initial pH on adsorption of phosphorus
图 2. 不同 pH 对磷的吸附影响

3.3. 不同的生物炭投加量对磷吸附效果的影响研究

通常水处理过程中, 吸附剂用量对处理成本和污染物的去除率关系非常大。通过确定最佳的生物炭投加量, 以期得到好的去除效率和降低处理成本。生物炭投加量对磷吸附性能的影响见图 3。

从图 3 可以看出, 三种生物炭对磷的吸附量均随着投加量的增加而下降, 同时吸附效率则相应上升。

随着三种水葫芦生物炭用量的增加, 从 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 其吸附量均在投加量为 0.2 g 处达到最大, 锰改性生物炭和铁改性生物炭吸附量分别为 $98.04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $52.49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 显著大于未改性生物炭 ($13.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 吸附容量。其中锰改性水葫芦生物炭的投加量为 0.2 g 时, 其吸附容量达到 $98.04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 吸附效率也从 20.15% 快速上升到 97.34% , 逐渐趋于稳定。吸附率随着投加量增加的主要原因是由于溶液中磷含量一定, 随着投加量的增加, 吸附剂表面的活性位点逐渐趋于饱和, 因此, 单位吸附量减少; 但总吸附量有所增加, 所以吸附率逐渐上升。随着吸附剂用量的增加, 吸附剂活性位点也随之增加, 提高了对磷离子的吸附能力, 并逐渐达到最大去除效率水葫芦生物炭对磷的单位吸附量则随生物炭用量增加而下降。在 $0.1\sim 0.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 单位吸附量缓慢下降, 在 $0.2\sim 0.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 快速下降。因此, 考虑到处理成本及去除效率, 在水溶液磷浓度为 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液中, 生物炭适宜用量为 $0.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

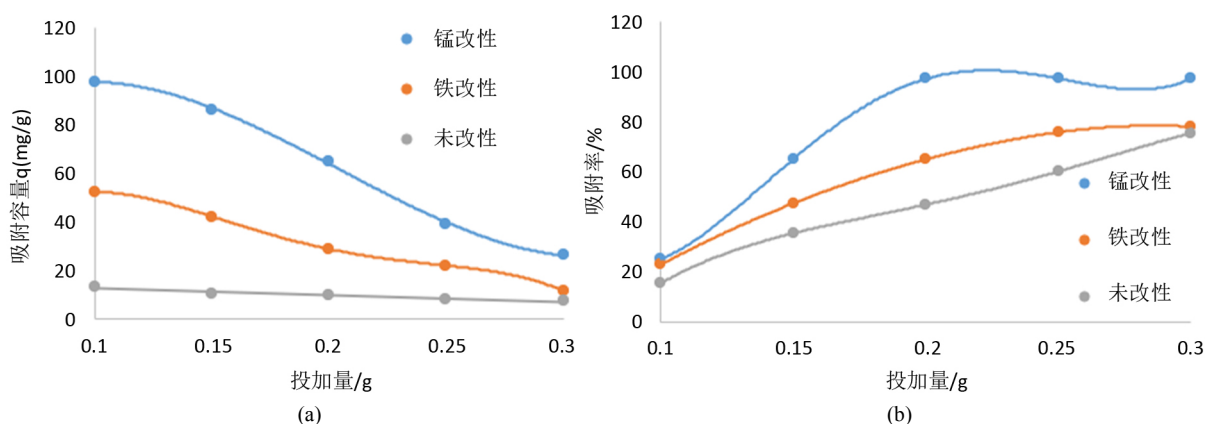


Figure 3. (a) Effect of biochar addition on adsorption; (b) Effect of biochar addition on adsorption rate

图 3. (a) 生物炭投加量对吸附量的影响; (b) 生物炭投加量对吸附率的影响

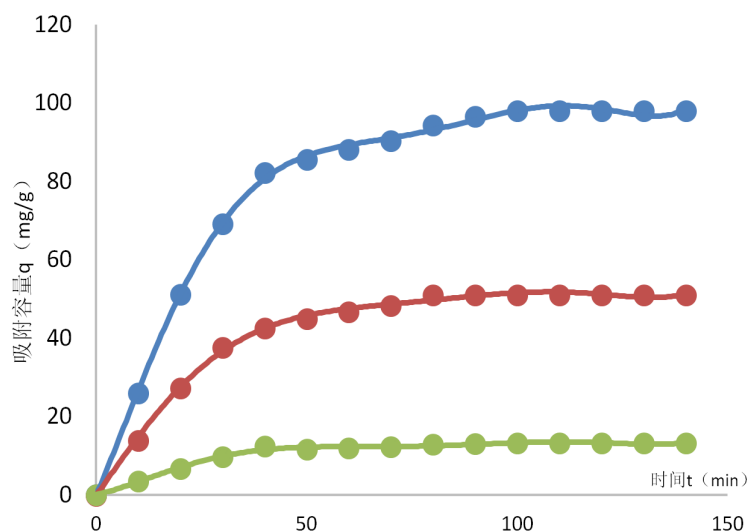


Figure 4. Effect of adsorption time on phosphorus adsorption

图 4. 吸附时间对磷吸附性能的影响

3.4. 不同的生物炭吸附时间对磷吸附性能的影响研究

吸附平衡时间对生物炭吸附性能的影响非常重要。在图 4 中可以看出, 3 种生物炭对磷的吸附过程中, 开始吸附时, 随着时间的增加吸附量上升迅速, 但随吸附时间的增加, 吸附速率逐渐减小。其随着时间的增加吸附量上升迅速, 65 min 后上升趋于平稳, 在 120 min 内基本达到吸附平衡。随吸附时间的延长, 锰改性生物炭、铁改性生物炭和未改性生物炭可达到的最高吸附量分别为 $98.04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $52.49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $13.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

其中, 锰改性生物炭显著高于镁改性生物炭和未改性生物炭。好的吸附效果, 必须要确定最适宜的吸附时间。这是由于刚开始吸附时, 生物炭的结合点位比较多, 还没有被杂质布满。同时含磷溶液离子浓度大, 吸附动力梯度加大, 因此吸附速率比较快。在 2 h 之后, 吸附容量上升趋于平缓, 接近水平。随着生物炭对磷的吸附不断增加, 水中磷含量大幅降少, 吸附能力也一起降低, 吸附速率出现迅速下降, 因而逐渐达到吸附平衡。

4. 结论

采用水葫芦制备的生物炭经过锰、铁改性后, 三种生物炭对磷的吸附性能不同, 锰改性生物炭对磷的吸附能力是镁的 1.86 倍, 是未改性水葫芦生物炭的 7.42 倍。三种水葫芦生物炭对磷具有较强的吸附能力, 其吸附量大小受到吸附剂用量和溶液初始 pH 和磷浓度的影响, 在 25°C 时, 磷的初始浓度为 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液中, 最佳生物炭投加量为 $0.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; 溶液 pH 在 2~10 的范围内时, 水葫芦生物炭对磷的吸附量随溶液 pH 的先升后略有下降, 最佳 pH 为 6; 水葫芦生物炭对磷吸附速度较快, 在 120 min 内达到平衡, 吸附过程符合准 Langmuir 等温吸附模型。本研究中锰改性的水葫芦生物炭对磷的最大吸附量是 $98.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 镁改性的水葫芦生物炭最大吸附量是 $52.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

因此本研究为这类廉价生物质吸附剂寻求了一种可以二次利用, 并且降低了其后续处理过程中环境风险的可持续发展新思路, 也为水生植物的应用提供较好的前景。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(201911842007)。

参考文献

- [1] Schindlerd, W. (2012) The Dilemma of Controlling Cultural Eutrophication of Lakes. *Proceedings of the Royal Society B*, **279**, 4322-4333. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1032>
- [2] 郭怀成, 孙延枫. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 500-506.
- [3] 段永蕙, 张乃明. 滇池流域农村面源污染状况分析[J]. 环境保护, 2003(7): 28-30.
- [4] Loganathan, P., Vigneswarans, Kandasamy, J., et al. (2014) Removal and Recovery of Phosphate from Water Using Sorption. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **44**, 847-907. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.741311>
- [5] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.
- [6] 李力, 刘娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1411-1421.
- [7] Li, R., Wang, J.J., Zhou, B., et al. (2016) Recovery of Phosphate from Aqueous Solution by Magnesium Oxide Decorated Magnetic Biochar and Its Potential as Phosphate-Based Fertilizer Substitute. *Bioresource Technology*, **215**, 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.125>
- [8] 孔丝纺, 姚兴成, 张江勇, 等. 生物炭的特性及其应用的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015(4): 716-723.
- [9] Zhang, M., Gao, B., Yao, Y., et al. (2012) Synthesis of Porous MgO-Biochar Nanocomposites for Removal of Phosphate and Nitrate from Aqueous Solutions. *Chemical Engineering Journal*, **210**, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.052>

-
- [10] Kong, L., Han, M., Shih, K., *et al.* (2018) Nano-Rod Ca-Decorated Sludge Derived Carbon for Removal of Phosphorus. *Environmental Pollution*, **233**, 698-705. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.099>
- [11] Zhang, F., Wang, X., Ji, X., *et al.* (2016) Efficient Arsenate Removal by Magnetite-Modified Water Hyacinth Biochar. *Environmental Pollution*, **216**, 575-583. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.013>
- [12] Zhang, H.Z., Chen, C.R., Gray, E.M., *et al.* (2016) Roles of Biochar in Improving Phosphorus Availability in Soils: A Phosphate Adsorbent and a Source of Available Phosphorus. *Geoderma*, **276**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.020>
- [13] 左昊, 徐康宁, 孟萍萍, 等. 硫酸改性小麦秸秆生物炭对氨氮吸附特性研究[J]. 应用化工, 2017, 46(7): 1237-1242.
- [14] 柳富杰, 周永升, 莫世涌, 韦巧艳. 甘蔗渣炭对磷的吸附研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(1): 59-61, 105.
- [15] 才吉卓玛, 翟丽梅, 刁斌, 等. 生物炭对不同类型土壤中 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 163-168.
- [16] Wan, S., Ma, Z., Xue, Y., *et al.* (2014) Sorption of Lead(II), Cadmium(II), and Copper(II) Ions from Aqueous Solutions Using Tea Waste. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **53**, 3629-3635. <https://doi.org/10.1021/ie402510s>
- [17] Su, Q., Pan, B., Pan, B., *et al.* (2009) Fabrication of Polymer-Supported Nanosized Hydrrous Manganese Dioxide (HMO) for Enhanced Lead Removal from Waters. *Science of the Total Environment*, **407**, 5471-5477. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.045>
- [18] Han, X., Liang, C.F., Li, T.Q., *et al.* (2013) Simultaneous Removal of Cadmium and Sulfamethoxazole from Aqueous Solution by Rice Straw Biochar. *Journal of Zhejiang University Science B*, **14**, 640-649. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1200353>