

刘 项,南红岩,安 强.刺桐生物炭对水中氨氮和磷的吸附[J].农业资源与环境学报,2018,35(1):66-73.

LIU Xiang, NAN Hong-yan, AN Qiang. The *Erythrina Variegata* Biochar's Adsorption to NH_4^+-N and P from Aqueous Solution[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1): 66-73.

刺桐生物炭对水中氨氮和磷的吸附

刘 项¹,南红岩^{2*},安 强²

(1.重庆市环境工程评估中心,重庆 400021;2.重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

摘 要:本研究以园林绿化废弃物刺桐为原料,在不同的热解温度下(300、500、700 °C)制备生物炭,用动力学方程和等温吸附方程分别拟合生物炭对氨氮和磷的吸附性能。等温吸附方程拟合结果表明:生物炭对水中氨氮和磷的吸附量均随着氨氮和磷的初始浓度的增加而增大,且均能较好地拟合 Langmuir 吸附方程,且 BC500 吸附效果最好;动力学方程拟合结果表明:不同热解温度下得到的生物炭对氨氮和磷的吸附速率较快的过程分别发生在最初的 300 min 和 60 min 内,且均能较好地拟合准二级动力学方程;此外,生物炭对不同初始 pH 下对氨氮和磷溶液的吸附效果分别为 $\text{pH}7 > \text{pH}11 > \text{pH}3$ 和 $\text{pH}11 > \text{pH}7 > \text{pH}3$ 。

关键词:生物炭;热解温度;氨氮;磷;吸附

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)01-0066-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0111

The *Erythrina Variegata* Biochar's Adsorption to NH_4^+-N and P from Aqueous Solution

LIU Xiang¹, NAN Hong-yan^{2*}, AN Qiang²

(1.Appraisal Center for Environment & Engineering of Chongqing, Chongqing 400021, China; 2.Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The biochar derived from *Erythrina Variegata* which was pyrolyzed at the temperature of 300 °C, 500 °C and 700 °C was employed to investigate its adsorption property to NH_4^+-N and P by kinetics and isothermal adsorption equation. The results of isothermal adsorption model showed that the Langmuir equation fitted the data very well and the adsorption amount increased with the increase of initial concentration of NH_4^+-N and P. Besides, the BC500 had the best adsorption effect. The results of kinetics model showed that the adsorption process of biochar pyrolyzed at different temperatures to NH_4^+-N and P were concentrated in the initial 300 min and 60 min, respectively. They all fitted the pseudo-second order kinetic equation well. Besides, in different initial pH, the adsorption effects of biochar to NH_4^+-N and P in aqueous solutions were $\text{pH}7 > \text{pH}11 > \text{pH}3$ and $\text{pH}11 > \text{pH}7 > \text{pH}3$, respectively.

Keywords: biochar; pyrolysis temperature; ammonia nitrogen; phosphorus; adsorption

随着我国工农业生产活动与日俱增,河流、湖泊等地表水的污染问题随之而来,特别是水体的富营养化问题。水体富营养化是指在人类活动的影响下,生物所需要的氮、磷等营养盐元素大量进入河流、湖泊等地表水体,造成藻类及其他浮游生物快速繁殖,水体溶解氧降低,水质恶化,鱼类等生物死亡的现象^[1]。有效地控制水体中氮磷的含量是解决水体富营养化

的有效途径。近年来,对于水体中氮磷的去除方法,对磷酸盐的去除方法主要有生物法、化学沉淀法、吸附法等^[2-3],对氨氮的去除方法有硝化-反硝化法、空气吹脱法、吸附法等^[4-5]。生物法脱氮,尽管效果较好,但是存在易造成二次污染等问题^[6],吸附法具有设备占地面积小、工艺简单、去除效率高等优点,是一种能有效去除水中氮磷的技术。

目前,生物质炭(biochar)作为一种新兴的环保吸附材料,越来越受到人们的关注。生物质炭是生物质在缺氧条件下通过热化学转化得到的固态产物^[7]。生物质炭自身有着特殊的物理、化学和微观结构特性,生物炭具有特殊的孔隙结构和较大的比表面积使得

收稿日期:2017-04-26 录用日期:2017-09-25

基金项目:中央高校基金资助项目(CDJZR14215501)

作者简介:刘 项(1972—),男,四川泸县人,硕士研究生,工程师,主要从事环境影响评价、清洁生产审核工作。

E-mail:341759425@qq.com

*通信作者:南红岩 E-mail:1161454533@qq.com

它具有良好的吸附特性^[8],以及能较好地固持养分物质和无机化合物^[9];生物炭独特的芳香化结构使得其具有较好的稳定性及其固碳减排效应^[10-12];生物炭表面活性官能团影响着其与离子之间的相互作用^[13-16]。生物质炭的原料较为广泛,以往的取材大部分着眼于农业废弃物,本研究原材料选取园林绿化废弃物刺桐,不仅将城市园林绿化废弃物资源化利用,变废为宝,也为生物炭的制备原料选取开辟了一个新的途径。

1 材料与方法

1.1 材料

采用园林绿化废弃物刺桐作为原材料制备生物炭。刺桐取自重庆大学B校区四月中旬园林绿化废弃物。将刺桐叶子去除,保留枝条,切碎至直径达到2~3 cm,106℃烘干备用。经处理后刺桐原材料在热解炉通氮气进行热解,升温速率5~10℃·min⁻¹,分别升温至300、500℃和700℃,恒温30 min,将得到的生物炭研磨,过100目筛,制成粉状生物炭备用。300、500、700℃温度下的生物炭分别记为BC300、BC500、BC700。

1.2 生物炭基本性质测定

生物炭基本性质的测定:生物炭的pH值和电导率采用pH计和电导率仪测定(固液比=1:20),生物炭阳离子交换量的测定参照NY/T 1121.5—2006《石灰性土壤阳离子交换量的测定》。生物炭元素分析用元素分析仪测定。

1.3 吸附动力学实验

为探究不同热解温度下所得的生物炭对水溶液中氨氮和磷的吸附性能,分别开展了生物炭对水溶液中氨氮和磷的吸附动力学实验。本实验分别称取0.8 g BC300、BC500和BC700于50 mL离心管中,分别加入40 mL氯化铵溶液(含氨氮40 mg·L⁻¹)或磷酸二氢钾溶液(含磷40 mg·L⁻¹),调节溶液pH值为7.0,于恒温振荡器内(200 r·min⁻¹,29±0.5℃)振荡,添加氯化铵溶液的离心管振荡45、135、270、450、645、1 335、1 440 min,添加磷酸二氢钾溶液的离心管振荡10、20、30、45、135、270、450、645、1 335、1 440 min,之后分别将振荡后得到的上清液离心、过滤,并稀释一定的倍数。吸附量计算如式(1)所示:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{w} \quad (1)$$

式中: q_e 为吸附结束时单位质量吸附剂的吸附量,

mg·g⁻¹; C_0 和 C_e 分别为溶液中氨氮的初始浓度和吸附平衡时浓度,mg·L; V 为溶液体积,L; W 为生物质炭的投加量,g。

分别用准一级动力学方程和准二级动力学方程对实验数据进行拟合。吸附动力学方程分别为:

$$\text{准一级动力学方程: } q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$$

$$\text{准二级动力学方程: } \frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

式中: q_e 为单位质量吸附剂在达到平衡时的吸附量,mg·g⁻¹; q_t 为 t 时间内的吸附量,mg·g⁻¹, k_1 、 k_2 为各动力学方程的吸附速率常数。

1.4 吸附热力学实验

采用批量吸附实验测定所制备的生物炭对氨氮和磷的吸附等温线。分别称取0.8 g BC300、BC500和BC700于50 mL离心管中,分别加入40 mL含氨氮5、10、20、40、80、160 mg·L⁻¹的氯化铵溶液或含磷5、10、20、40、80、160 mg·L⁻¹的磷酸二氢钾溶液,调节溶液pH值为7.0,于恒温振荡器内(200 r·min⁻¹,29±0.5℃)振荡吸附24 h;振荡结束后取上清液离心、过滤,并稀释一定的倍数。吸附量计算如式(1)。

用Langmuir和Freundlich等温吸附方程对实验数据进行拟合。吸附方程分别为:

$$\text{Langmuir 等温吸附方程: } \frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_m} + \frac{C_e}{q_m}$$

$$\text{Freundlich 等温吸附方程: } q_e = K_F C_e^{1/n}$$

式中: q_e 为单位质量的吸附剂在达到吸附平衡时的吸附量,mg·g⁻¹; q_m 为最大吸附量,mg·g⁻¹; C_e 为平衡时氨氮或磷的浓度,mg·L⁻¹; K_L 、 K_F 、 n 均为常数。

1.5 不同pH条件下生物炭对水中氨氮和磷的吸附

分别称取0.8 g BC300、BC500和BC700生物炭于50 mL离心管中,分别加入40 mL氯化铵溶液(含氨氮40 mg·L⁻¹)或磷酸二氢钾溶液(含磷40 mg·L⁻¹),用HCl和NaOH调节溶液pH值为3、7、11,于恒温振荡器内(200 r·min⁻¹,29±0.5℃)振荡;振荡结束后取上清液离心、过滤,并稀释一定的倍数。吸附量的计算根据式(1)。

2 结果与讨论

2.1 生物炭的基本特征及理化性质

2.1.1 基本理化性质

随着碳化温度的升高,热解得到的生物炭颜色由棕色变为黑色,最后变为深黑色。张璐等^[17]阐述不同颜色玉米秸秆生物炭添加到土壤里,可加深土壤颜

色,有利于土壤对阳光的吸收,提高土壤温度,从而增强土壤中微生物的活性。不同热解温度下刺桐生物炭的基本理化性质如表 1 所示。由表 1 可知,随着碳化温度的升高,生物炭的产率逐渐降低。这是由于碳化温度越高,碳化越彻底,碳化过程中产生的挥发性物质越多,生物炭的残留量越少,导致产率越低。生物炭的 pH 均呈碱性,且随着热解温度的升高,碱性增强。因为高温生物炭中的酸性物质含量较少,pH 值相应就会有所增加^[18]。也有研究表明^[19-22],生物炭的这种碱性特征可能与生物炭的灰分有关。生物炭的碱性特征可使其作为一种较好的酸性土壤改良剂。生物炭的电导率也随温度升高而增大。生物炭阳离子交换量呈现先增加后降低的趋势,且在高温 700 °C 热解得到的生物炭阳离子交换量显著降低。李力等^[23]研究表明,热解温度较高时生物炭中纤维素分解较完全,炭化程度较高,表面含氧官能团较少,故阳离子交换量较低。此外,由表 1 可以看出,随刺桐热解温度从 300 °C—500 °C—700 °C 的变化,刺桐生物炭元素含量发生了变化,其中 C 含量先降低后升高,N 含量先升高后降低,而 H、O 的含量降低。有研究表明^[24-25],随着热解温度的升高,含氧官能团脱水、脱羧使得大量的 O、H 损失,且大量生物炭的制备过程中,均出现了热解过程有机组分富集碳、去除极性官能团的现象。此外生物炭中 H/C、O/C 分别用来反映生物炭芳香性、亲水性^[26]。表中可知,这三者大体上均随着热解温度的升高而减

小,这表明升温过程芳香性增强、亲水性有减弱的趋势。这与郎印海等^[27]研究结果一致。

2.1.2 生物炭形态特征

不同热解温度下生物炭的扫描电镜图如图 1 所示。由图 1 可以看出,随着热解温度的升高,即 300 °C 到 500 °C,生物炭孔隙由少变多,由小变大,这些细小的微孔逐渐变得越来越清晰。可能随着热解温度的升高,生物炭内部的挥发性成分从这些小孔中溢出,使得小孔增多。这些小孔很可能是有效提高生物炭的吸附性能的关键结构^[28]。然而,当热解温度升高到 700 °C,这些小孔消失一部分,可能是由于过高温下生物炭生成过程中伴随着大量的焦油析出,造成孔隙堵塞,所以在扫描电镜下很难观察到。有类似的研究中发现,当生物炭热解温度过高,生物炭表面重新凝聚堵塞了生物炭的毛孔,这也会降低生物炭的吸附性能^[29-31]。

2.2 生物炭对氨氮和磷的吸附动力学特征

生物炭对水中氨氮和磷的吸附动力学特征如图 2 所示,相应的拟合参数如表 2 所示。图中表明,生物炭对氨氮的吸附明显发生在最初的 300 min 内,吸附速率较快,且在该过程中,生物炭对氨氮的吸附量 BC700>BC500>BC300。在 675 min 时,吸附基本达到平衡,在后期的吸附平衡阶段,生物炭对氨氮的吸附量 BC300>BC500>BC700。此过程可以看出高温热解得到的生物炭对氨氮吸附速率较快,随着时间的增

表 1 生物炭的基本性质

Table 1 Properties and elemental composition of biochars

生物炭	元素组成/%				H/C	O/C	产率/%	pH	EC/ μS·cm ⁻¹	灰分/%	CEC/ cmol·kg ⁻¹
	C	H	O	N							
BC300	60.30	4.22	21.93	2.52	0.84	0.27	63.39	7.54	2 000	11.36	16.95
BC500	56.32	2.48	19.46	3.39	0.53	0.26	37.66	9.68	2 080	16.74	27.85
BC700	72.14	1.67	8.38	2.14	0.28	0.09	35.57	10.1	3 000	21.36	6.96

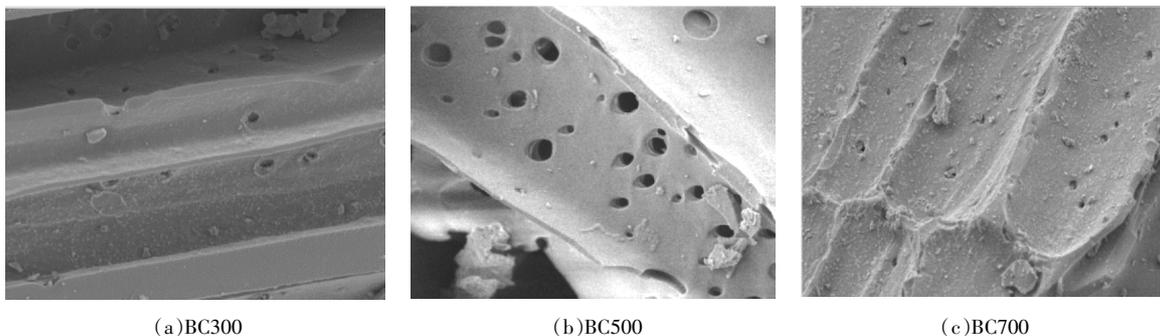


图 1 生物炭 SEM 图(10 μm)

Figure 1 The SEM of biochar(10 μm)

加,最终达到吸附平衡时期,低温制得的生物炭对氨氮的吸附效果优于高温制得的生物炭。生物炭对磷的吸附明显则发生在最初的 60 min 内,吸附速率较快,且在该过程中,生物炭对磷的吸附量均为 BC700>BC500>BC300。显然,高温得到的生物炭对磷的吸附效果更好。这与 Hollister 等^[32]研究橡木生物炭时,发现随热解终温增加,生物炭对 $PO_4^{3-}-P$ 吸附量增大的结论一致。上述生物炭对水中氨氮的吸附均未在 500 °C 达到最好的吸附效果,这似乎与 500 °C 热解得到的生物炭具有较好的孔隙结构理应有较好的吸附能力的结论相悖^[33-34],但是生物炭对氨氮的吸附是一个复杂的过程,它不仅与生物炭的形态结构有关,还受到生物炭的表面电荷^[35]、阳离子交换量^[36-37]、表面官能团^[32,38-39]等多种理化性质共同影响。

比较表 2 中的拟合数据,3 种温度下的生物炭准二级动力学方程的相关系数优于准一级动力学方程的相关系数,理论吸附量也与实际吸附量较接近,说明这 3 种温度的生物炭对水中氨氮和磷的吸附均更符合准二级动力学方程。Zhu 等^[40]、邢英等^[41]和张爱莉等^[42]研究了不同原料热解得到的生物炭对氨氮的吸

附性能均与本实验得到的结论一致,即均符合准二级动力学方程。准二级动力学方程包含了吸附的所有过程,如外部液膜扩散、表面吸附和颗粒内部扩散等,能够全面反映氨磷在刺桐生物炭上的吸附^[43],同时也说明了刺桐生物炭对氨磷的吸附动力学主要受化学作用控制,而不是受物质传输步骤所控制^[44]。

2.3 生物炭对氨氮和磷的吸附热力学特征

不同热解温度的生物炭对氨氮和磷的等温吸附线如图 3 所示。图 3 中表明生物炭对氨氮和磷的吸附量均与初始浓度呈正相关。实验过程中用 Langmuir 和 Freundlich 方程来拟合不同温度的生物炭对氨氮的吸附性能如表 3 所示。表中可知,Langmuir 方程能较好地描述生物炭对氨氮的吸附热力学过程。Ding 等^[45]也研究了竹炭对氨氮的吸附,结果表明竹炭对氨氮的等温吸附行为能更好地符合 Langmuir 方程,最大吸附量达到为 $0.852 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。邢英等^[41]研究了桉树废木屑制备的生物炭来吸附水中的氨氮,结果表明生物炭对氨氮的吸附等温线符合 Langmuir 方程,最大吸附量为 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。本次实验得到与其一致的结论,氨氮吸附等温线符合 Langmuir 方程,但 BC300、

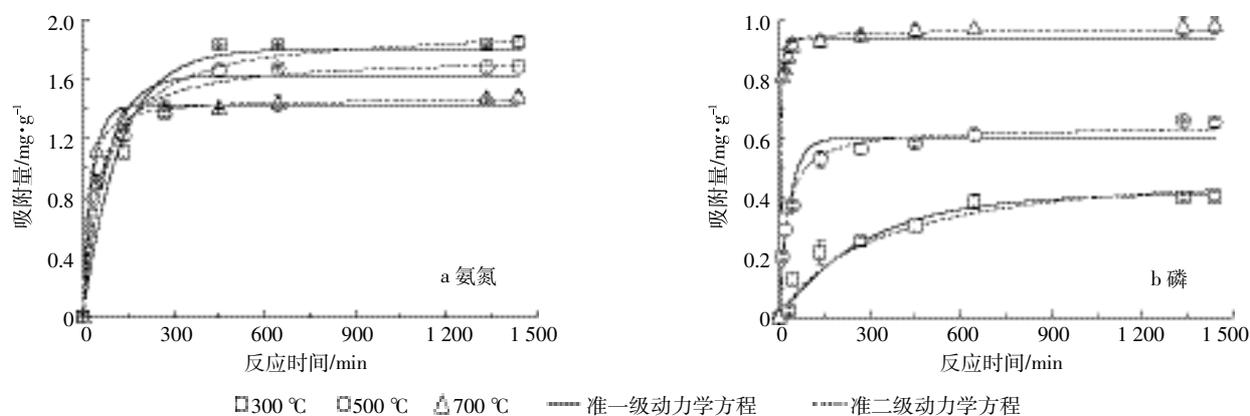


图 2 刺桐生物炭对氨氮和磷的吸附动力学

Figure 2 The kinetics of biochar to the adsorption of ammonia nitrogen and phosphorus

表 2 生物炭对氨氮和磷的吸附动力学参数

Table 2 Kinetics parameters of ammonia nitrogen and phosphorus by the biochar deduced from pseudo-first-order and pseudo-second-order models

吸附物质	生物炭类型	$Q_e / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (实验值)	准一级动力学方程			准二级动力学方程		
			$Q_e / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	K_1 / min^{-1}	R^2	$Q_e / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$K_2 / \text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	R^2
氨氮	BC300	1.849	1.803	0.008 3	0.924	1.956	0.413	0.959
	BC500	1.686	1.625	0.013 3	0.957	1.752	0.709	0.989
	BC700	1.481	1.422	0.033 2	0.991	1.473	2.774	0.999
磷	BC300	0.410	—	—	—	—	—	—
	BC500	0.658	0.604	0.029 2	0.952	0.643	3.737	0.988
	BC700	0.982	0.941	0.175	0.978	0.965	26.49	0.996

BC500、BC700 对氨氮的最大吸附量分别 3.04、3.13、3.03 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由此可见,500 $^{\circ}\text{C}$ 热解得到的生物炭对水中氨氮吸附性能相对最好。此外,当初始磷含量低于 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,BC300 吸附效果最差,但当初始磷浓度高于 80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,BC300 吸附效果最好。实验中发现,较低的初始浓度,BC300 对磷有负吸附效果,故仅考虑 BC500 和 BC700 对磷的吸附热力学拟合方程。表中表明 BC500 和 BC700 对磷的吸附均较好地符合

Langmuir 方程。Langmuir 等温方程是假定固体分子由大量的吸附活性中心组成,当表面吸附活性中心全部被占满时,吸附量达到饱和值,吸附质在吸附剂表面呈单分子层分布^[46]。因此,该种生物炭对氨氮和磷的吸附均为单分子层吸附。

2.4 不同 pH 条件下生物炭对氨氮和磷的吸附效果

初始溶液 pH 对氨氮的吸附效果的影响如图 4 所示。生物炭对不同初始 pH 氨氮溶液的吸附效果

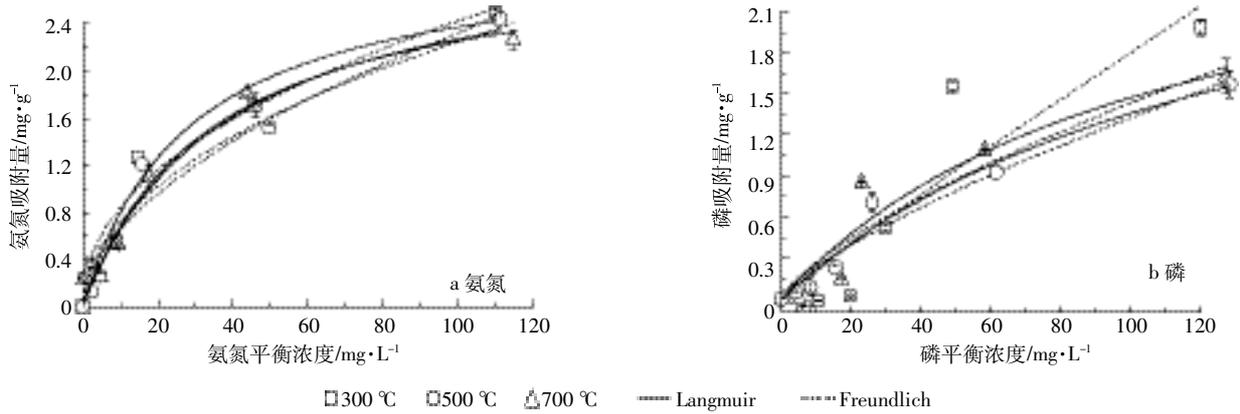


图 3 刺桐生物炭对氨氮和磷的等温吸附线

Figure 3 Biochar sorption isotherm to ammonia nitrogen and phosphorus

表 3 生物炭对氨氮和磷的吸附等温式拟合参数

Table 3 Isotherm parameters of ammonia nitrogen and phosphorus sorption by biochar from Langmuir and Freundlich models

吸附物质	生物炭类型	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
		$Q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$K_L/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	R^2	$K_F/[\text{mg}^{(1-1/n)}\cdot\text{L}^{1/n}\cdot\text{g}^{-1}]$	$1/n$	R^2
氨氮	BC300	3.04	0.035 9	0.96	0.294 9	0.457 5	0.95
	BC500	3.13	0.026 6	0.96	0.186 8	0.547 8	0.94
	BC700	3.03	0.029 2	0.97	0.241 0	0.485 4	0.91
磷	BC300	—	—	—	—	—	—
	BC500	3.21	0.007 322	0.96	0.044 3	0.737 7	0.94
	BC700	3.05	0.009 416	0.90	0.053 4	0.714 7	0.85

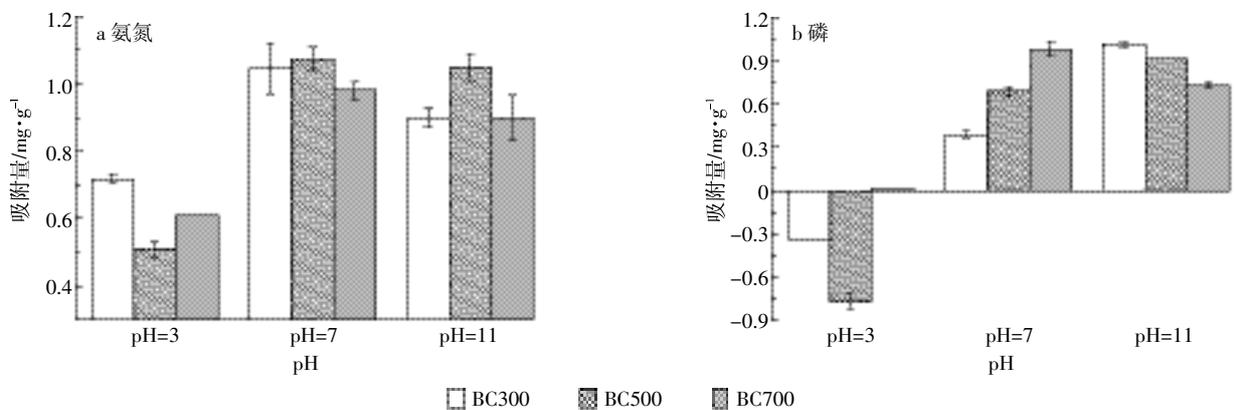


图 4 不同 pH 生物炭对氨氮和磷的吸附

Figure 4 Biochar adsorption to ammonia nitrogen and phosphorus with different pH

pH7>pH11>pH3。由于 pH=3 时,溶液中 H^+ 和 NH_4^+ 与生物炭之间的吸附存在竞争关系^[47],使得生物炭对氨氮的吸附效果较差,而 pH=11 时,溶液中的氨氮主要以游离态的 $NH_3 \cdot H_2O$ 形式存在^[48],不利于生物炭对氨氮的吸附,故该条件下生物炭对氨氮的吸附效果也略差。由图 4 可以看出,pH=3 时,BC300 对氨氮的吸附效果最好,而 pH=7 和 pH=11 时,均是 BC500 对氨氮的吸附效果更好,这与前文 2.3 得出的结论相符。

生物炭对不同初始 pH 磷的吸附效果如图 4 所示。图中表明 pH=3 时,生物炭对磷的吸附效果较差,甚至出现负吸附的情况。pH=7 时,随着热解温度的升高,得到的生物炭对磷的吸附量增加。pH=11 时,BC300 和 BC500 对磷的吸附量均高于 pH=7 时生物炭对磷的吸附量。由于 pH=3 时,溶液中磷大部分以负一价的 $H_2PO_4^-$ 形式存在,pH=11,溶液中磷主要以负二价的 HPO_4^{2-} 形式存在,可能碱性条件下,负二价磷酸盐形式比负一价磷酸盐形式与生物炭的结合有更好的竞争力,Yao 等^[49]将这一现象归因于生物炭表面的 MgO 微粒,MgO 的零点电荷点很高,当溶液 pH 值低于 MgO 的零点电位时,羟基化后的 MgO 能对磷酸盐产生静电吸引,从而去除溶液中的磷。

3 结论

在不同的热解温度下(300、500、700 °C)制备生物炭,用动力学方程和等温吸附方程分别拟合生物炭对氨氮和磷的吸附性能。等温吸附方程拟合结果表明:生物炭对水中氨氮和磷的吸附量均随着氨氮和磷的初始浓度的增加而增大,且均能较好地拟合 Langmuir 吸附方程,即吸附以单分析层吸附为主,且 BC500 吸附效果最好;动力学方程拟合结果表明:不同热解温度下得到的生物炭对氨氮和磷的吸附速率较快的过程分别发生在最初的 300 min 和 60 min 内,且均能较好地拟合准二级动力学方程,即吸附以化学吸附为主;此外,生物炭对不同初始 pH 氨氮和磷溶液的吸附效果分别为 pH7>pH11>pH3 和 pH11>pH7>pH3,即中性条件下更利于生物炭对氨氮的吸附,碱性条件下更利于生物炭对磷的吸附,故在利用生物炭吸附氮磷时,要考虑生物炭吸附环境的 pH 值,使得生物炭发挥其最大作用。

参考文献:

[1] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社,1995.

JIN Xiang-can. Chinese lake environment[M]. Beijing: Ocean Press, 1995. (in Chinese)

- [2] Saad R, Belkacemi K, Hamoudi S. Adsorption of phosphate and nitrate anions on ammonium-functionalised MCM-48: Effects of experimental conditions[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2007, 311(2): 375-381.
- [3] Ma Z, Li Q, Yue Q, et al. Adsorption removal of ammonium and phosphate from water by fertilizer controlled release agent prepared from wheat straw[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 171(3): 1209-1217.
- [4] Karadag D, Koc Y, Turan M, et al. Removal of ammonium ion from aqueous solution using natural Turkish clinoptilolite[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136(3): 604-609.
- [5] Feng Y, Yu Y Z, Duan Q N, et al. The characteristic research of ammonium removal in grain-slag biological aerated filter(BAF)[J]. *Desalination*, 2010, 263(1-3): 146-150.
- [6] 何 岩, 赵由才, 周恭明. 高浓度氨氮废水脱氮技术研究进展[J]. 工业水处理, 2008, 28(1): 1-4.
HE Yan, ZHAO You-cai, ZHOU Gong-ming. The research progress of nitrogen removal technology in high concentration ammonia nitrogen wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2008, 28(1): 1-4. (in Chinese)
- [7] IBI-STD-01. 1. 2013. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil international biochar initiative[S]. 2013.
- [8] Joseph S D, Campsarbertain M, Lin Y, et al. An investigation into the reactions of biochar in soil.[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 501-515.
- [9] 何绪生, 耿增超, 余 雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, SHE Diao, et al. The production, agricultural significance and domestic and foreign dynamics of biochar[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 1-7. (in Chinese)
- [10] Yakov K, Irina S, Chen H, et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(2): 210-219.
- [11] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, et al. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil.[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(4): 574-581.
- [12] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447: 143-144.
- [13] 陈学榕, 黄 彪, 江茂生. 杉木间伐材炭化过程的 FTIR 光谱比较分析[J]. 化工进展, 2008, 27(3): 429-434.
CHEN Xue-rong, HUANG Biao, JIANG Mao-sheng. Comparative analysis of FTIR spectra in the carbonization process of fir thinning wood[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2008, 27(3): 429-434. (in Chinese)
- [14] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-793.
- [15] Preston C M, Schmidy M W I. Black(pyrogenic) carbon: A synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions[J]. *Biogeosciences*, 2006(3): 397-420.

- [16] Krull E S, Baldock J A, Skjemstad J O, et al. Characteristics of biochar: Organo-chemical properties[C]//Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management science and technology, London: Earthscan, 2009:53-65.
- [17] 张璐, 贾丽, 陆文龙, 等. 不同碳化温度下玉米秸秆生物炭的结构性质及其对氮磷的吸附特性[J]. 吉林大学学报, 2015, 53(4): 802-808.
ZHANG Lu, JIA Li, LU Wen-long, et al. The structure properties of corn straw biochar in different carbonized temperatures and its adsorption properties to nitrogen and phosphorus[J]. *Journal of Jilin University*, 2015, 53(4):802-808. (in Chinese)
- [18] 罗焯. 芦竹制备生物炭的特性表征及对土壤 N₂O 排放的抑制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
LUO Ye. The characterization of bamboo reed biochar and the inhibition ability to N₂O emission in the soil[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese)
- [19] Yao F X, Arbestain M C, Virgel S, et al. Simulated geochemical weathering of a mineral ash-rich biochar in a modified Soxhlet reactor[J]. *Chemosphere*, 2010, 80: 724-732.
- [20] Bostrom D, Skoglund N, Grimm A, et al. Ash transformation chemistry during combustion of biomass[J]. *Energy Fuels*, 2012, 26: 85-93.
- [21] Giron R P, Suarez-Ruiz I, Ruiz B, et al. Fly ash from the combustion of forest biomass(*Eucalyptus globulus* Bark): Composition and physicochemical properties[J]. *Energy Fuels*, 2012, 26:1540-1556.
- [22] Wang G L, Shen L H, Sheng C D. Characterization of biomass ashes from power plants firing agricultural residues[J]. *Energy Fuels*, 2012, 26: 102-111.
- [23] 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.
LI Li, LIU Ya, LU Yu-chao, et al. The research progress of the environmental effect and application of biochar[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(8): 1411-1421. (in Chinese)
- [24] Wang Y, Wang L, Fang G, et al. Enhanced PCBs sorption on biochars as affected by environmental factors: Humic acid and metal cations[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 172: 86-93.
- [25] Li Jianfa, Li Yimin, Wu Mingjun, et al. Effectiveness of low-temperature bio-char in controlling the release and leaching of herbicides in soil[J]. *Plant and Soil*, 2013, 370: 333-344.
- [26] Uchimiya M, Wartelle L H, Lima I M, et al. Sorption of deisopropylatrazine on broiler litter biochars[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(23): 12350-12356.
- [27] 郎印海, 王慧, 刘伟. 柚皮生物炭对土壤中磷吸附能力的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(4): 78-84.
LANG Yin-hai, WANG Hui, LIU Wei. Effect of pomelo peel biochars on adsorption performance of phosphorus in soil[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(4): 78-84. (in Chinese)
- [28] Yu X Y, Ying G G, Kookana R S. Sorption and desorption behaviors of diuron in soils amended with charcoal [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2006, 54: 8545-8550.
- [29] Kwon S, Pignatello J J. Effect of natural organic substances on the surface and adsorptive properties of environmental black carbon (char): Pseudo pore blockage by model lipid components and its implications for N₂-probed surface properties of natural sorbents [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(20): 7932-7939.
- [30] Pignatello J J, Kwon S, Lu Y. Effect of natural organic substances on the surface and adsorptive properties of environmental black carbon (char): Attenuation of surface activity by humic and fulvic acids [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(24): 7757-7763.
- [31] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review[J]. *Plant and Soil*, 2010, 337: 1-18.
- [32] Hollister C C, Bisogni J J, Lehmann J. Ammonium, nitrate, and phosphate sorption to and solute leaching from biochars prepared from corn stover(*Zea mays* L.) and oak wood(*Quercus* spp.) [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(1): 137.
- [33] Ohe K, Nagae Y, Nakamura S, et al. Removal of nitrate anion by carbonaceous materials prepared from bamboo and coconut shell[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2003, 36(4): 511-515.
- [34] 王章鸿, 郭海艳, 沈飞, 等. 热解条件对生物炭性质和氮、磷吸附性能的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2805-2812.
WANG Zhang-hong, GUO Hai-yan, SHEN Fei, et al. The effects of pyrolysis conditions on the properties and the adsorption ability to nitrogen and phosphorus of biochar[J]. *Journal of Environmental Science*, 2015, 35(9): 2805-2812. (in Chinese)
- [35] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467.
- [36] Asada T, Ishihara S, Yamane T, et al. Science of bamboo charcoal: Study on carbonizing temperature of bamboo charcoal and removal capability of harmful gases[J]. *Journal of Health Science*, 2002, 48(6): 473-479.
- [37] Shaaban A, Se S M, Dimin M F, et al. Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis[J]. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 2014, 107(5): 31-39.
- [38] Kameyama K, Miyamoto T, Shiono T, et al. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1131.
- [39] Wang Z H, Guo H Y, Shen F, et al. Biochar produced from oak sawdust by lanthanum (La)-involved pyrolysis for adsorption of ammonium (NH₄⁺), nitrate (NO₃⁻), and phosphate (PO₄⁻) [J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 646-653.
- [40] Zhu K, Fu H, Zhang J, et al. Studies on removal of NH₄⁺-N from aqueous solution by using the activated carbons derived from rice husk[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 43(8): 18-25.
- [41] 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.
XING Ying, LI Xin-qing, ZHOU Zhi-hong, et al. Study on the adsorption characteristics and kinetics of biochar to ammonium nitrogen in the water[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(4): 511-516. (in Chinese)
- [42] 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.
ZHANG Ai-li, ZHU Yi-nian, JI Rui-lin, et al. The research of the adsorption property and influencing factors of bamboo charcoal to ammonium nitrogen[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(6): 19-21. (in Chinese)
- [43] Chang M Y, Juang R S. Adsorption of tannic acid, humic acid, and dyes from water using the composite of chitosan and activated clay[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2004, 278(1):18-25.
- [44] 胡秋婵, 王 宁, 符 浩, 等. 苯胺-2, 4-二氨基酚共聚物吸附水中 Hg(II) 的动力学和热力学研究[J]. 环境化学, 2010, 29(6):1043-1047.
HU Qiu-chan, WANG Ning, FU Hao, et al. The kinetics and thermodynamic studies on the adsorption of Aniline-2, 4-diaminophenol copolymer to the Hg(II) in water[J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 29(6):1043-1047. (in Chinese)
- [45] Ding Y, Liu Y, Wu W, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2010, 213(1-4):47-55.
- [46] 吴云海, 谢正威, 胡 玥, 等. 茶叶渣吸附水中砷的动力学与热力学研究[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(4):859-862.
WU Yun-hai, XIE Zheng-wei, HU Yue, et al. The kinetics and thermodynamic studies on the adsorption of tea leaves to arsenic in water [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(4):859-862. (in Chinese)
- [47] 徐洪斌, 马勇光. 磷资源合理利用及回收[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(3):62-65.
XU Hong-bin, MA Yong-guang. The utilization and recycling of phosphorus resource[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2008, 15(3):62-65. (in Chinese)
- [48] 刘海伟, 刘 云, 王海云, 等. pH 和共存阳离子对草莓茎吸附水体氨氮的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(8):1884-1889.
LIU Hai-wei, LIU Yun, WANG Hai-yun, et al. The effect of pH and coexisting cation on the adsorption of strawberry stem to ammonia nitrogen in water[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8):1884-1889. (in Chinese)
- [49] Yao Y, Gao B, Inyang M, et al. Removal of phosphate from aqueous solution by biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1-3):501-507.

书 评

国家社科项目最终成果:陈润羊等著《西部地区新农村建设中环境经济协同模式研究》. 经济科学出版社,40万字,2017年12月出版。

该书在深入分析和梳理已有研究成果的基础上,通过对典型地区的实地调研,深入分析了西部地区新农村建设的现状、问题及趋势;在全面识别了新农村建设中环境问题的基础上,指出了新农村建设中环境保护的选择路径;搭建了新农村建设中经济发展与环境保护协同的体系框架,阐释了新农村建设复合系统中经济子系统和环境子系统作用的内在机理和外联联系;进行了环境经济耦合协调的量化测度,揭示了其时空演化的规律;基于协同的动力和区域差异,设计提炼了环境经济协同的总体模式和区域模式,并构建了西部地区新农村建设中经济发展与环境保护协同的机制;分析了西部地区新农村建设中环境经济协同的优势、劣势、机会和威胁,进而提出了环境经济协同的基本方略和对策建议。

该书突出新农村建设中经济发展与环境保护协同的主题,探究了乡村振兴中正确处理经济发展与环境保护关系的可行途径与模式,系统回答了实施乡村振兴战略中环境经济协同的目标、主体、策略、手段和领域等重要的理论和现实问题。

该书在农业经济与环境经济领域的学科交叉以及理论体系的整合研究上进行了新的探索,提出的环境经济协同发展的理论观点,对于当前和未来一段时期西部地区乃至全国的振兴乡村战略具有重要的实践指导意义。



作者简介:陈润羊,兰州财经大学农林经济管理学院副教授、首都经济贸易大学博士生。国家清洁生产审核师,兼任甘肃省环境科学学会理事。主要研究方向为环境经济与区域发展。主持完成国家社会科学基金项目、中华环保基金会课题、甘肃省高校科研项目、江西省高校人文社科重点项目等课题11项。作为核心成员参与完成环境保护部、科技部、国防科工局核能开发项目、新疆科技计划、甘肃省社科规划等课题10余项。承担了企业清洁生产审核、环境影响评价等项目20余项。出版《清洁生产与循环经济——基于生态文明建设的理论建构》、《新农村建设:环境保护的挑战与对策》等著作3部,发表学术论文30余篇。科研和教学成果获甘肃省高校社科成果奖一等奖、兰州财经大学教学成果一等奖等奖励6项。

兰州财经大学 陈润羊 电话:13919364335 电邮:chenrunyang@163.com