农业资源与环境学报
2019年1月·第36卷·第1期：115-120
Journal of Agricultural Resources and Environment
January 2019·Vol.36·No.1：115-120

张新旺，李保鹏，沈建国，等. 餐厨垃圾生物质炭制备及其吸附水中亚甲基蓝性能[J]. 农业资源与环境学报，2019，36(1)：115-120.
ZHANG Xin-wang, LI Bao-peng, SHEN Jian-guo, et al. Research on the adsorption performance of kitchen waste biochar for methylene blue[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 115-120.

餐厨垃圾生物质炭制备及其吸附水中亚甲基蓝性能

张新旺，李保鹏，沈建国，臧志林，马小涵，辛言君*

（青岛农业大学资源与环境学院，青岛市农村环境工程研究中心，山东 青岛 266109）

摘　要：以餐厨垃圾为原材料，通过高温热解法和共沉淀法制备了餐厨垃圾生物质炭（Natural kitchen waste biochar，NKB）和磁性餐厨垃圾生物质炭（Magnetic kitchen waste biochar，MKB），研究了热解温度、热解时间、吸附剂量、吸附时间和溶液pH值等条件对生物质炭吸附水中亚甲基蓝（MB）性能的影响。结果发现，在热解温度450 ℃、热解时间1 h条件下制备的NKB对MB吸附性能最好；在生物质炭投加量1.0 g·L^{-1}、吸附时间20 min、pH值为9的条件下，MKB对MB的去除率和吸附量分别为97.94%和9.2 mg·g^{-1}，分别比NKB提高18.54个百分点和1.6 mg·g^{-1}；经过多次再生后，MKB对MB的吸附去除率仍在90%以上；吸附过程符合Langmuir等温吸附模型。研究表明，餐厨垃圾生物质炭经过赋磁可提高对亚甲基蓝的吸附性能，碱性条件下吸附性能较好，且能多次循环再生。

关键词：餐厨垃圾；生物质炭；磁性；亚甲基蓝；吸附

中图分类号：S156.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-6819(2019)01-0115-06　　**doi**: 10.13254/j.jare.2017.0315

Research on the adsorption performance of kitchen waste biochar for methylene blue

ZHANG Xin-wang, LI Bao-peng, SHEN Jian-guo, ZANG Zhi-lin, MA Xiao-han, XIN Yan-jun*

(Qingdao Engineering Research Center for Rural Environment, College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Natural kitchen waste biochar(NKB) and magnetic kitchen waste biochar(MKB) were prepared by pyrolysis and coprecipitation method using food waste as raw material. The effects of pyrolysis temperature, pyrolysis time, adsorbent dosage, adsorption time and the pH of solution on the adsorption capacity of methylene blue(MB) were investigated. The results showed that the optimum adsorption capacity of NKB was obtained at the pyrolysis temperature of 450 ℃ and the pyrolysis time of 1 h. When the MKB was 1.0 g·L^{-1}, the adsorption time was 20 min, and pH was 9, the adsorption capacity and removal rate of MB arrived 97.94% and 9.2 mg·g^{-1}, which was 18.54% and 1.6 mg·g^{-1} higher than that of NKB, respectively. For MKB, after 4 cycles regeneration, the removal rate of MB was still above 90%. The adsorption process of kitchen waste biochar for MB could be described by Langmuir isothermal adsorption model.

Keywords: kitchen waste; biochar; magnetic; methylene blue; adsorption

近年来，我国染料产业蓬勃发展，染料废水产量巨大，渐渐成为威胁国内水环境安全的重要因素[1]。不同的吸附剂也不断地被应用于处理染料废水[2]，工业上使用较多的有离子交换树脂、钢渣、活性炭等。其中，离子交换树脂无毒、回收率高、可重复利用[3]，但操作相对复杂；钢渣等天然矿物密度大，在水中的沉降速度快、易于固液分离，但易溶出离子，造成二次污染[4]。活性炭的比表面积较大、孔隙多，具有较强的吸附性能，但是处理废水的成本较高，而生物质炭类似于活性炭，其碳含量高、吸附能力强，具有多孔性、多用途，且原料来源广泛，价格低廉，是一种理想的净水材料[5]。

收稿日期：2017-12-10　　**录用日期**：2018-02-02
作者简介：张新旺(1993—)，男，山东济宁人，硕士研究生，从事生物质固体废物资源化利用研究。E-mail：928428972@qq.com
***通信作者**：辛言君　E-mail：xintom2000@126.com
基金项目：国家自然科学基金项目(51478490，51408350)
Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51478490，51408350)

目前，餐厨垃圾产生量很大、成分复杂、容易产生渗沥液等二次污染物[6]。常见的餐厨垃圾处理方式主要有生态饲料加工、厌氧消化、好氧堆肥、蚯蚓堆肥和生物产电等[7-9]。但均存在着资源化利用效率低、经济效益不够理想等缺陷，亟需开发新的处理技术，在提高餐厨垃圾资源化利用效率的同时降低资源浪费，减少环境污染。餐厨垃圾含有大量的蛋白质、碳水化合物（淀粉、纤维素、半纤维素）和脂类，是制备生物质炭的优质原料。用餐厨垃圾制备生物质炭，不仅可以减少环境污染，减轻能源压力[10]，而且可实现废物的资源化利用。本文以餐厨垃圾为原材料，制备了餐厨垃圾生物质炭（Natural kitchen waste biochar，NKB）和磁性餐厨垃圾生物质炭（Magnetic kitchen waste biochar，MKB），探究热解时间和热解温度对NKB吸附性能的影响，确定NKB最佳制备条件，并对最佳制备条件制得的NKB进行赋磁，研究接触时间、投加量、pH对MB去除率的影响以及MKB多次再生后吸附性能的变化。

1 材料与方法

1.1 试验材料

餐厨垃圾是从青岛农业大学歌斐木餐厅收集，餐厨垃圾成分复杂，剔除塑料、木棒、纸巾等杂质后，主要成分是米饭、蔬菜和肉类，其组分及含量见表1。

收集的餐厨垃圾经自然风干、粉碎后过150目筛（即0.106 mm孔径），然后将过筛样品用蒸馏水洗去表面杂质，在1 mol·L^{-1}的HCl溶液中浸泡24 h，然后用蒸馏水洗至中性，取出后在烘箱中于80 ℃下烘干12 h，置于干燥器中保存备用。

试验中使用的$Fe_2(SO_4)_3\cdot nH_2O$、$FeSO_4\cdot 7H_2O$、$(NH_4)_2Fe(SO_4)_2\cdot 7H_2O$、$K_2Cr_2O_7$均为分析纯，购自天津博迪化工股份有限公司，亚甲基蓝（MB，分析纯）购自天津市恒兴化学试剂制造公司，NaOH、无水乙醇（均为分析纯）购自莱阳市康德化工有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 NKB与MKB的制备

NKB采用慢速热解法制备，把粉碎的餐厨垃圾置于坩埚中，放入真空箱式气氛炉内，通入氮气保护气，在250、350、450、550 ℃温度下，分别热解1 h和2 h制备8种NKB（分别记为NKB-250-1，NKB-350-1，NKB-450-1，NKB-550-1，NKB-250-2，NKB-350-2，NKB-450-2，NKB-550-2）。

MKB采用共沉淀法制备，取10 g NKB磨细后过150目筛，置于100 mL除氧去离子水中，用磁力搅拌器将混合液搅拌20 min，制得浊液A。取3.7 g $Fe_2(SO_4)_3\cdot nH_2O$（n=6~9）和4.0 g $FeSO_4$，分别溶于260 mL和30 mL除氧去离子水中，获得$Fe_2(SO_4)_3$和$FeSO_4$溶液，混合获得溶液B。将溶液A与B混合后，缓慢搅拌以混合均匀，同时用胶头滴管缓缓先加入NaOH溶液至pH>10，再取部分上清液加入铁氰化钾溶液，未生成蓝色沉淀，说明二价铁已完全沉淀，然后再熟化24 h。将熟化后的浊液过滤，用蒸馏水和无水乙醇交替洗涤至上清液呈中性，磁力回收烘干后制得MKB。

1.2.2 表面形貌分析

利用JSM-7500F型扫描电子显微镜（SEM）在扫描电压2.00 kV下，观察各组NKB的微观形貌结构。

1.2.3 吸附性能评价

以生物质炭对MB的色度去除率评价其吸附性能。在664 nm下采用可见分光光度计测溶液的吸光度。

MB的去除率和吸附量公式：

$$\eta=\frac{(C_0-C_t)}{C_0}\times 100\% \quad (1)$$

$$q=\frac{(C_0-C_t)\times V}{m} \quad (2)$$

式中：C_0为MB溶液的初始浓度，mg·L^{-1}；C_t为吸附平衡后上清液中MB的浓度，mg·L^{-1}；q为生物质炭对MB的吸附量，mg·g^{-1}；V是试验所取MB溶液体积，mL；m为生物质炭的投加质量，g；η为去除率。

表1 餐厨垃圾组分（%）

Table 1 Characteristics of kitchen waste components（%）

含水率（湿基）	含固率	纤维素	脂类	淀粉	有机碳
80.4±1.0	19.6±1.0	16.8±0.5	13.0±0.8	31.6±1.5	40.3±0.2

2 结果与讨论

2.1 退火温度对NKB表面形貌的影响

不同退火温度下NKB的SEM如图1所示。从图1可以看出，伴随退火温度上升与热解时间的延长，NKB的形貌发生了明显的变化。随着温度的升高，NKB的孔结构逐渐扩张变大，逐渐出现大量直径0.5 μm的密集缠绕的虫状实心棒结构，当温度达到550 ℃时，孔结构难以维持炭的基本骨架而破碎。

2.2 退火温度对NKB吸附性能的影响

不同温度下制备的NKB吸附MB性能如图2所示。从图2可以看出，随热解温度的增加，去除率呈现上升趋势，NKB-450-1具有最大的吸附去除率，其

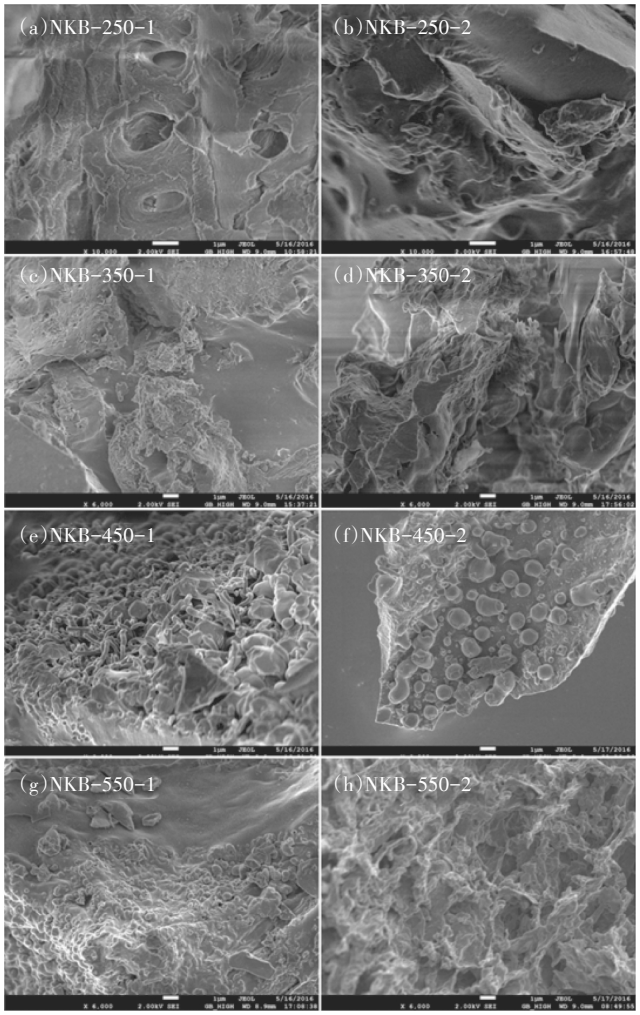

图1 不同制备条件下生物质炭SEM图(×10 000倍)

Figure 1 Biochar SEM diagram in different preparation conditions(×10 000 times)

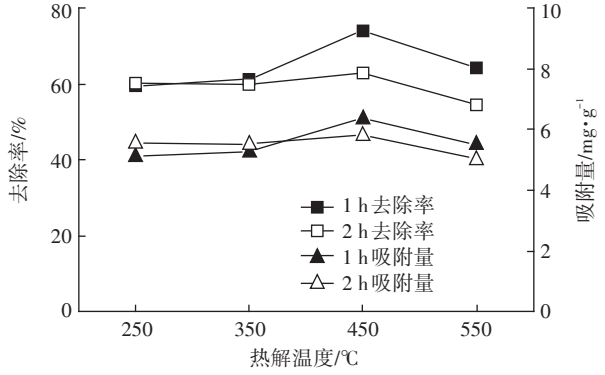

图2 不同热解温度下生物质炭吸附MB的性能

Figure 2 The properties of biochar adsorption MB prepared under different temperatures

对MB的吸附去除率和吸附量分别为74.1%和6.37 mg·g^{-1}，NKB-250-1和NKB-350-1对MB的吸附去除率较低，只有60%左右，吸附量仅为5.2 mg·g^{-1}左右。此外，NKB-550-2对MB的吸附去除率最低，仅有54.7%。可能是由于250 ℃至350 ℃间，是预炭化阶段，孔隙结构尚未达到丰富的水平，在450 ℃下孔隙结构最大化(见图1e、图1f)，在550 ℃下，炭的骨架结构被高温破坏(见图1g、图1h)，导致吸附性能下降[11-13]。故MKB的原材料选定为450 ℃、1 h条件下制取的NKB-450-1。

2.3 不同反应条件对生物质炭吸附性能的影响

在25 ℃恒温振荡的条件下，探究吸附剂投加量、接触时间、pH对MB去除率的影响。

2.3.1 生物质炭投加量对吸附性能的影响

选取450 ℃、1 h制备的NKB和MKB各0.005、0.01、0.02、0.05、0.1、0.2 g置于50 mL浓度为10.0 mg·L^{-1}的MB溶液中(即生物质炭投加量为0.1、0.2、0.4、1.0、2.0、4.0 g·L^{-1})，恒温振荡20 min后过滤，测定其吸光度。不同投加量生物质炭对MB的吸附去除率和吸附量如图3所示。

从图3可以获知，随着投加量的增加，NKB和MKB对MB的去除率逐渐上升，然后趋于平稳，当投加量超过1.0 g·L^{-1}时，随着投加量的增加，NKB和MKB对MB的去除率和吸附量增加缓慢且有限，主要原因是吸附剂剂量增加后，MB无法与吸附剂充分接触，导致去除率维持稳定[14]。本研究中吸附剂投加量取1.0 g·L^{-1}为宜，这与邓潇等[15]研究结果一致。当NKB投加量为1.0 g·L^{-1}时，对MB的去除率和吸附量分别为69.12%和6.06 mg·g^{-1}，而MKB对MB的去除率和吸附量达到93.03%和8.23 mg·g^{-1}，比NKB分别提高了23.91个百分点和2.17 mg·g^{-1}。

2.3.2 吸附时间对吸附性能的影响

取450 ℃、1 h下制备的NKB和MKB各0.05 g，分

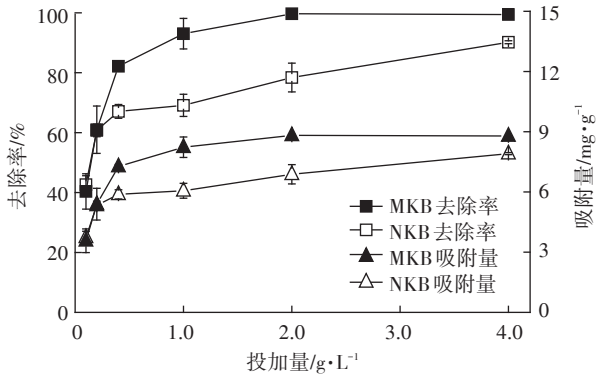

图3 投加量对生物质炭吸附MB性能的影响

Figure 3 The effect of adding quantity on the properties of biochar adsorption

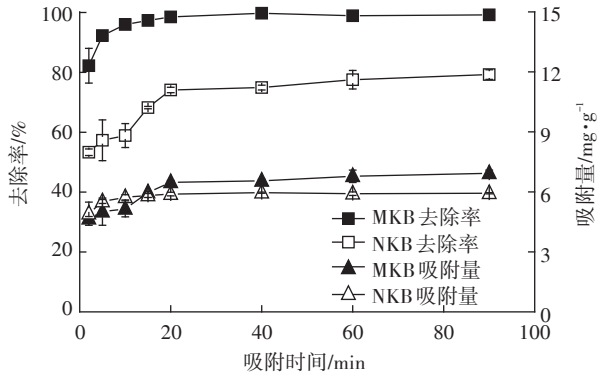

图4 吸附时间对生物质炭吸附MB性能的影响

Figure 4 Effect of adsorption time on the properties of biochar adsorption

别吸附50 mL浓度为10 mg·L^{-1} MB溶液2、5、10、15、20、40、60、90 min，测量吸光度。不同时间下生物质炭对MB去除率和吸附量如图4所示。

由图4可以看出，随着吸附时间的增加，去除率和吸附量呈上升趋势，然后趋于平稳，吸附速率逐渐减小。在20 min时，基本达到吸附平衡；20~90 min之间，去除率和吸附量基本保持不变，整个过程符合多孔吸附剂液相吸附的基本特点[16]，而且整个吸附过程在较短的时间内完成，很可能以物理吸附为主[17]。在20 min吸附平衡时，NKB对MB的去除率和吸附量分别为74.10%和5.89 mg·g^{-1}，而MKB对MB的去除率和吸附量达到98.52%和6.48 mg·g^{-1}，比NKB分别提高24.42个百分点和0.59 mg·g^{-1}。

2.3.3 pH对吸附性能的影响

称取0.05 g的NKB和MKB，在不同pH条件下，吸附10 mg·L^{-1}的MB溶液50 mL，恒温振荡20 min，测定吸光度，不同pH条件下生物质炭对MB去除率和吸附量如图5所示。

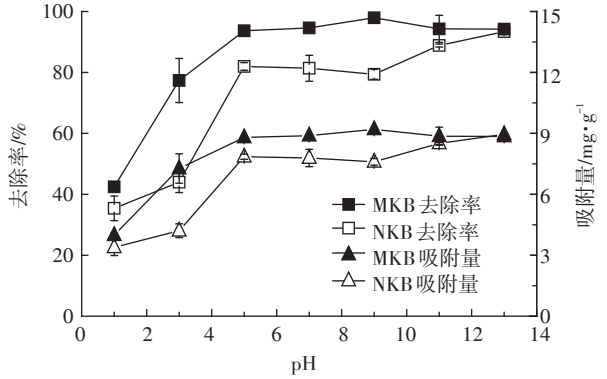

图5 pH对生物质炭吸附MB性能的影响

Figure 5 The effect of pH on the adsorption properties of biochar

从图5可以看出，相比于酸性条件，碱性条件更有利于MB的去除，其中MKB的最适pH为9，去除率和吸附量分别达到97.94%和9.2 mg·g^{-1}；NKB的最适pH为11，去除率和吸附量分别达到88.85%和8.51 mg·g^{-1}，与车晓冬等[18]研究结果相似。由于在酸性条件下，溶液中存在着水合氢离子以及一些络合基团，与同样带正电荷的MB阳离子形成一定的竞争吸附[19]，使得MB去除率较小，当溶液pH值高时，络合基团则会显示出更多有利的吸附基团，使得去除率相应升高[20]。

2.3.4 再生次数对吸附性能的影响

在700 W功率下对MKB微波再生多次后继续吸附10 mg·L^{-1}的MB溶液20 min，结果如图6所示。

由图6可以看出，MKB在经过3次再生利用以后，对MB的去除率和吸附量均有所下降，在第4次再生后有所提升，但每次再生后对MB的去除率都能达到90%以上，吸附量达到6.75 mg·g^{-1}以上，MKB良好的再生能力说明它在解吸的过程中很稳定。因此，MKB表现了良好的解吸性能，这些可以显著降低吸附剂的成本，使其成为一种潜在的、有用的磁性吸附剂用于去除水中的污染物。

2.4 生物质炭对MB的吸附等温线

为了进一步探讨NKB、MKB对MB的吸附过程，称取0.05 g的MKB和NKB，25 ℃下吸附浓度为2、5、10、20、50、100 mg·L^{-1}的MB溶液。利用以下两种吸附模型对MB的吸附等温线进行拟合。

Langmuir模型：

$$\frac{C_e}{Q_e}=\frac{1}{Q_m K_L}+\frac{C_e}{Q_m} \quad (3)$$

Freundlich模型：

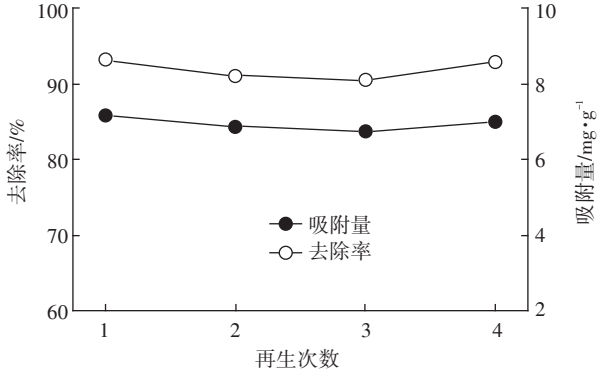

图6 再生次数对生物质炭吸附MB性能的影响

Figure 6 The influence of regeneration number on adsorption performance of biochar

$$\ln Q_e=\ln K_F+(1/n)\ln C_e \quad (4)$$

式中：C_e是吸附达到平衡时溶液浓度，mg·L^{-1}；Q_e是吸附达到平衡时吸附剂的吸附量，mg·g^{-1}；Q_m为吸附剂的最大吸附量，mg·g^{-1}；K_L是与生物质炭吸附相关的Langmuir常数，L·mg^{-1}；K_F是与结合能相关的Freundlich常数，mg$^{1-1/n}$·L$^{1/n}$·g^{-1}。

由图7和表2得知，Langmuir型吸附等温线的拟合效果更好，R^2值更接近1，说明MKB与NKB对MB的吸附更符合Langmuir型吸附，最大吸附量分别为85.91、36.67 mg·g^{-1}，说明MKB比NKB的吸附能力强，而且n>1，说明吸附容易进行[21]，表示生物质炭对MB的吸附是均匀的单分子层吸附[22]，被吸附的目标离子之间几乎没有相互作用。

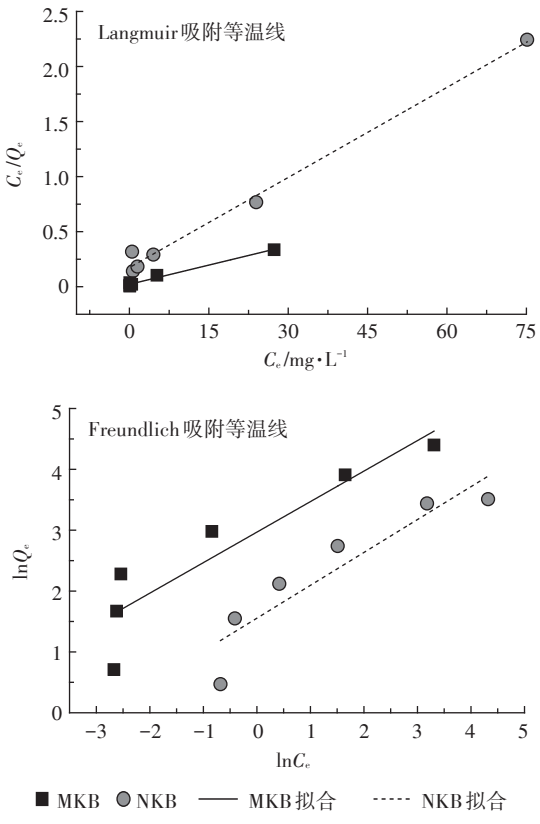

图7 生物质炭对MB的吸附等温线

Figure 7 Biochar adsorption isotherm of MB

表2 生物质炭对MB的吸附等温线拟合参数

Table 2 The adsorption isotherm parameters of biochar to MB

生物质炭	Langmuir模型			Freundlich模型		
	Q_m/mg·g^{-1}	K_L/L·mg^{-1}	R^2	K_F/mg$^{1-1/n}$·L$^{1/n}$·g^{-1}	n	R^2
MKB	85.91	0.53	0.986	19.1	4.66	0.813
NKB	36.67	0.16	0.991	1.99	1.85	0.822

3 结论

（1）在热解温度450 ℃、热解时间1 h条件下制备的NKB存在大量直径0.5 μm的密集缠绕的虫状实心棒结构，对MB有较好的吸附效果。

（2）不同反应条件下，MKB对MB的吸附量均高于NKB，说明生物质炭经过赋磁以后，对MB的吸附能力提高，碱性条件下吸附效果较好，经过4次吸附-脱附循环再生后，MKB对MB仍有很好的去除效果。

（3）NKB和MKB对MB的吸附过程符合Langmuir等温吸附过程，属于单分子层吸附，而且MKB对MB的饱和吸附量达到85.91 mg·g^{-1}。

参考文献：

[1] 任南琪，周显娇，郭婉茜，等. 染料废水处理技术研究进展[J]. 化工学报，2013，64(1)：84-94.
REN Nan-qi, ZHOU Xian-jiao, GUO Wan-qian, et al. A review on treatment methods of dye wastewater[J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(1): 84-94.

[2] 孟范平，易怀昌. 各种吸附材料在印染废水处理中的应用[J]. 材料导报，2009，23(7)：69-73.
MENG Fan-ping, YI Huai-chang. Application of different adsorbents on dyeing wasterwater treatment[J]. *Materials Review*, 2009, 23(7): 69-73.

[3] 杨金杯，陈玉成，余美琼，等. 001×14.5离子交换树脂对镍(Ⅱ)的吸附[J]. 环境工程学报，2013，7(8)：3019-3024.
YANG Jin-bei, CHEN Yu-cheng, YU Mei-qiong, et al. Adsorption of Ni(Ⅱ) by ion exchange resin[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(8): 3019-3024.

[4] 刘盛余，马少健，高　谨，等. 钢渣吸附剂吸附机理的研究[J]. 环境工程学报，2008，2(1)：115-119.
LIU Sheng-yu, MA Shao-jian, GAO Jin, et al. Study on the absorption mechanics of steel slag[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(1): 115-119.

[5] Xiao F, Huang J C. Comparison of biosorbents with inorganic sorbents for removing copper(Ⅱ) from aqueous solutions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(10): 3105-3109.

[6] 谢炜平，梁彦杰，何德文，等. 餐厨垃圾资源化技术现状及研究进展[J]. 环境卫生工程，2008，16(2)：43-48.
XIE Wei-ping, LIANG Yan-jie, HE De-wen, et al. Status and development of food residue resource technology[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2008, 16(2): 43-48.

[7] Li Y Y, Jin Y Y, Li J H, et al. Current situation and development of kitchen waste treatment in China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 31(2): 40-49.

[8] Wang S, Zeng Y. Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 248(1): 13-19.

[9] Shen J, Wang C, Liu Y, et al. Effect of ultrasonic pretreatment of the dairy manure on the electricity generation of microbial fuel cell[J]. *Bio-*

chemical Engineering Journal, 2017, 129(1):44-49.

[10] 徐　鹏, 穆献中. 餐厨垃圾在能源生产中的应用与发展[J]. 现代化工, 2016(5):12-16.
XU Peng, MU Xian-zhong. The application and development of kitchen waste in energy production[J]. *Modern Chemical Industry*, 2016(5):12-16.

[11] 周新华, 齐庆杰, 郝　宇, 等. 玉米秸秆热解规律的试验研究[J]. 可再生能源, 2005(6):21-23.
ZHOU Xin-hua, QI Qing-Jie, HAO Yu, et al. The experimental research on the pyrolysis characteristics of corn stalk at the different conditions[J]. *Renewable Energy*, 2005(6):21-23.

[12] 曹　俊, 肖　刚, 许　啸, 等. 木质素热解/炭化官能团演变与焦炭形成[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(1):83-87.
CAO Jun, XIAO Gang, XU Xiao, et al. Functional groups evolvement and charcoal formation during lignin pyrolysis carbonization[J]. *Journal of Southeast University*(*Nutural Science Edition*), 2012, 42(1):83-87.

[13] 杜海清. 木质类生物质催化热解动力学研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2008.
DU Hai-qing. Study on catalytic pyrolysis kinetics of wood biomass[D]. Harbin:Heilongjiang University, 2008.

[14] 张惠灵, 卢雪丽, 俞　琴, 等. 污泥棉花壳吸附剂处理亚甲基蓝的研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(10):124-128.
ZHANG Hui-ling, LU Xue-li, YU Qin, et al. Study on sludge cotton shell adsorbent of methylene blue[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(10):124-128.

[15] 邓　潇, 周　航, 陈　珊, 等. 改性玉米秸秆炭和花生壳炭对溶液中Cd^{2+}的吸附[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11):6325-6331.
DENG Xiao, ZHOU Hang, CHEN Shan, et al. The adsorption of Cd^{2+} in the solution of modified maize straw charcoal and peanut shell charcoal[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(11):6325-6331.

[16] Kojima N, Mitomo A, Itaya Y, et al. Adsorption removal of pollutants by active cokes produced from sludge in the energy recycle process of wastes[J]. *Waste Management*, 2002, 22(4):399-404.

[17] 曹　玮, 周　航, 邓贵友, 等. 改性谷壳生物炭负载磁性Fe去除废水中Pb^{2+}的效果及机制[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3):1437-1444.
CAO Wei, ZHOU Hang, DENG Gui-you, et al. Modified chaff biochar load magnetic Fe removal effect and mechanism of Pb^{2+} in waste water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(3):1437-1444.

[18] 车晓冬, 丁竹红, 胡　忻, 等. 微波加热硝酸氧化改性稻壳基生物质炭对Pb(Ⅱ)和亚甲基蓝的吸附作用[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9):1773-1780.
CHE Xiao-dong, DING Zhu-hong, HU Xin, et al. Microwave heating nitric acid oxidation modified rice husk based biomass carbon of Pb(Ⅱ) and methylene blue adsorption[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9):1773-1780.

[19] 吴海露, 车晓冬, 丁竹红, 等. 山核桃、苔藓和松针基生物质炭对亚甲基蓝及刚果红的吸附性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8):1575-1581.
WU Hai-lu, CHE Xiao-dong, DING Zhu-hong, et al. Study on the adsorption properties of methylene blue and Congo red with pecan, moss and pine needles[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1575-1581.

[20] 杨　勃. 市政污泥制备吸附剂的初步研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010.
YANG Bo. Preliminary study on preparation of adsorbent for municipal sludge[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2010.

[21] 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. Adsorption and kinetics of ammonium from aqueous medium onto biochar[J]. *Earth & Environment*, 2011, 39(4):511-516.

[22] 李国亭, 冯艳敏, 柴晓琪, 等. 镧改性活性炭纤维高效吸附去除对苯醌[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4):1638-1644.
LI Guo-ting, FENG Yan-min, CAI Xiao-qi, et al. Efficient adsorptive removal of p-benzoquinone by lanthanum modified activated carbon fibre[J]. Chinese *Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(4):1638-1644.