

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.009

香蒲根富Fe生物炭制备及其光催化降解有机污染物

胡波¹, 周奥², 牛慧斌^{2,3}, 赢登宇², 方艳芬², 黄应平^{2,3}

(1. 湖北泰盛化工有限公司, 湖北 宜昌 443007; 2. 三峡大学 生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 超富集植物常用来去除土壤中的有害金属, 这些废弃植物的后续转化研究对碳的可持续性利用具有重要意义。通过厌氧热裂解法将富集Fe后的香蒲根制备为Fe/生物炭(Fe/BC)材料, 并采用扫描电子显微镜、能谱分析仪、X射线衍射仪和原子吸收光谱仪等对Fe存在的形貌、含量及化学组成进行了表征。结果表明, Fe主要以球形的Fe₂O₃镶嵌在生物炭表面, 并且负载量达到64.76 mg/g。在宽pH(3~9)条件下, Fe/BC/H₂O₂体系能高效地降解有机染料磺酰罗丹明B(SRB), 降解率可达90%(2 h), 且突破了传统Fenton体系必须在强酸性条件下使用的局限。自由基捕获实验发现羟基自由基为该体系的主要活性物种。Fe/BC/H₂O₂体系在经过5次循环后对SRB仍能保持81.6%的降解率, 且此过程中无Fe离子溶出, 表明Fe/BC作为催化剂具有优异的稳定性。

关键词: Fe污染; 超富集; 生物炭; Fenton体系; 光催化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0055-06

Preparation of Fe-enriched Biochar from *Typha Orientalis Presl* Root and Its Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants

HU Bo¹, ZHOU Ao², NIU Hui-bin^{2,3}, YING Deng-yu², FANG Yan-fen²,
HUANG Ying-ping^{2,3}

(1. Hubei Trisun Chemical Co. Ltd., Yichang 443007, China; 2. College of Biology and Pharmacy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Hyperaccumulators are commonly used to remove harmful metals from soil, and subsequent transformation studies of these waste plants are of great significance for sustainable carbon utilization. Fe/biochar (Fe/BC) materials were made from the Fe-enriched *Typha Orientalis Presl* root by anaerobic pyrolysis. The morphology, content and chemical composition of Fe over Fe/BC samples were analyzed by scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), X-ray diffractometer (XRD) and atomic absorption spectrometry (AAS). The results showed that Fe was mainly embedded in the surface of biochar in the form of spherical Fe₂O₃, and the Fe loading was 64.76 mg/g. Further, the Fe/BC/H₂O₂ system could efficiently degrade the organic dye sulforhodamine B (SRB) under wide pH of 3-9 conditions, with a high degradation rate of 90% (2 h), which was a breakthrough that the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21972073、21677086、22076089); 中国博士后基金资助项目(2018M640721); 国家重点研发计划项目(2016YFD0800904); 湖北省引智项目(2019BJH004)

通信作者: 方艳芬 E-mail: chem_ctgu@126.com

traditional Fenton system must be used under strong acid conditions. The radical-trapping experiments unfolded that hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) was the main active species in the above system. The Fe/BC/ H_2O_2 system still maintained a degradation rate of 81.6% for SRB after 5 cycles, and no Fe ions were dissolved during this process, indicating that Fe/BC has excellent stability as a catalyst.

Key words: Fe pollution; hyper-enrichment; biochar; Fenton system; photocatalytic

铁(Fe)是一种地球丰度较大的金属元素,其含量居于第二位^[1-3]。随着铁矿物的开采加剧^[4-5],释放到环境中的铁日益增多,造成环境中铁严重超标^[6]。植物修复技术是目前最为常见的金属污染物处理技术^[7-9],研究发现某些超富集植物(如香蒲)能高效并特异性地富集Fe,其对Fe的去除能力高达80%^[10-11]。但是这些富集铁后的植物应妥善处理,才能有效地避免铁二次污染。

目前,对超富集植物的处理方法主要包括焚烧^[12-13]、灰化^[14-15]和堆肥^[16],但这些方法可能导致金属再次回到环境中,引发二次污染。相比焚烧法,厌氧热解法能有效保留碳,对实现双碳目标具有重要意义^[17-19]。前期研究表明,由水葫芦富集Fe制备的Fe/生物炭(Fe/BC)在电场作用下可活化 H_2O_2 ,但由于Fe的负载量仅为27.9 mg/g,无法直接活化 H_2O_2 ^[20]。另外,还发现由鸢尾制备的Mn/BC可与 H_2O_2 构成类Fenton体系,但对有机染料的降解速率仅为 0.0037 min^{-1} ^[21],这可能与其负载量低有关。因此,选择对Fe具有超高富集能力的香蒲根制备生物炭材料,期望进一步提高Fe/BC的催化活性。

笔者采用厌氧热解法将富集Fe的香蒲转化为Fe/BC,并通过扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)、X射线衍射仪(XRD)和原子吸收光谱仪(AAS)等技术对样品进行初步表征,考察Fe/BC在不同含量 H_2O_2 和不同pH条件下对有机污染物磺酰罗丹明B(SRB)的降解效率,并通过5次循环实验以SRB降解率和Fe溶出量来表征Fe/BC的稳定性。本研究采取厌氧热裂解方式来处理超富集植物香蒲,将得到的含Fe生物炭材料构建类Fenton催化氧化体系,并应用于有机污染物的氧化,为超富集植物的后处理提供了一种新思路,有望实现“以废治废”的绿色循环目标。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

磺酰罗丹明B(SRB): $1.7\times 10^{-5}\text{ mol/L}$ 水溶液;

双氧水:采用硫代硫酸钠法对 H_2O_2 标准液进行标定,测定其浓度为 7.4 mol/L ;对苯醌(BQ)、异丙醇(IPA)、盐酸、氢氧化钠、 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、硝酸、氢氟酸均为分析纯;实验用水均为二次蒸馏水。

AR224CN电子分析天平(Ohaus), Delta320 pH计, D/max2500型X射线衍射仪(Rigaku), XL30扫描电子显微镜(Philips), UV-3010紫外可见分光光度计(Hitachi), SpectrA66原子吸收光谱仪。

1.2 Fe/BC的制备

香蒲移栽于三峡大学求索溪,取长势相同的植株,实验组添加 100 mg/L 的 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 灌溉,空白组添加蒸馏水,总灌溉体积为1 L。两组香蒲生长两个月后,收集植株根部,分别将根碎片放入管式电阻炉中,在 N_2 氛围下以 $17\text{ }^\circ\text{C/min}$ 升到 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 灼烧2 h,然后自然冷却。烧制的生物炭粗品加入到 3 mol/L 的NaOH溶液中,在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下搅拌2 h,再用去离子水洗净,抽滤,烘干,研磨成粉末,过80目筛网,即可得到BC与Fe/BC两种生物炭样品。

1.3 Fe/BC的物理性质表征

采用扫描电子显微镜(SEM)分析生物炭样品的形貌和大小,采用能谱仪(EDS)对样品元素种类与含量进行分析。采用X射线粉末衍射分析仪(XRD)测试生物炭样品的晶相、结晶性以及晶粒尺寸,利用Cu $\text{K}\alpha$ 射线作为X射线粉末衍射测试的辐射源,扫描角度范围为 $5^\circ\sim 60^\circ$,扫描速度为 $8^\circ/\text{min}$,工作电压和工作电流分别为 2.40 kV 和 40 mA 。

利用原子吸收光谱仪(AAS)测定生物炭样品中Fe的负载量,具体方法为:称取1 g样品于消解罐中,分别加入5 mL硝酸和1 mL氢氟酸,放入消解炉中 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 消解10 h,取出放置在通风橱中自然冷却,再用5%的 HNO_3 溶液定容至50 mL;制作Fe标准曲线后,采用原子吸收光谱仪火焰法测定消解后的样品中Fe的负载量。

1.4 Fe/BC对SRB的降解实验

在50 mL光反应试管中,依次加入6 mg生物炭

样品, 1 mL、 5×10^{-4} mol/L 的 SRB, 500 μ L H_2O_2 (7.4 mol/L) 溶液, 加蒸馏水至体积为 30 mL, 进行暗吸附反应 90 min, 以达到吸附脱附平衡。吸附平衡后将试管放入可见光反应器 ($\lambda=420$ nm, 400 W 碘钨灯) 中, 间隔 30 min 取一次样。将样品离心分离后, 取上清液测定 SRB 在最大吸收波长 ($\lambda=566$ nm) 处的吸光度值, 并根据 C/C_0-t 绘制降解动力学曲线, 计算反应动力学常数 k (min^{-1})。此外, 通过添加 0、50、200、500、1 000 μ L 的 H_2O_2 (7.404 mol/L) 至上述降解体系, 绘制不同 H_2O_2 添加量下 Fe/BC 对 SRB 的降解动力学曲线。用 NaOH 或者 HCl 调节反应体系的 pH 分别为 3、6 和 9, 绘制不同 pH 条件下 Fe/BC 对 SRB 的降解动力学曲线。

1.5 氧自由基检测

在上述降解体系中分别加入异丙醇 (IPA) 和对苯醌 (BQ), 分别捕获光催化降解过程中产生的羟基自由基 ($\cdot OH$)、超氧自由基 ($O_2^{\cdot -}$)。两种捕获剂的浓度均为 1×10^{-4} mol/L, 通过对比加入捕获剂前后 SRB 的降解动力学来判断自由基的类型。

1.6 催化剂循环实验

在以上降解实验一个周期结束后, 加热使体系中 H_2O_2 排尽, 再添加 1 mL、 5×10^{-4} mol/L SRB 和 500 μ L H_2O_2 进入下一周期, 测定体系中 SRB 的降解速率 (C/C_0) 和 Fe 溶出量, 循环次数为 5 次。

2 结果与讨论

2.1 Fe/BC 的形貌、组成分析

通过 SEM 对 BC 和 Fe/BC 样品的表面形貌进行观察, BC 样品表面光滑, 而 Fe/BC 样品表面存在着大量块状颗粒。Fe/BC 样品的 EDS mapping 图表明, Fe 均匀地分布在生物炭表面。

采用 EDS 对 BC 和 Fe/BC 样品的表面元素进行分析, 两种样品的元素组成主要为 C、O、Si、Ca, 原子百分比分别为 9.93%、68.25%、14.62%、7.20% 和 8.71%、62.06%、10.30%、11.87%。此外, BC 表面未检测到 Fe, 而 Fe/BC 表面检测到 Fe 元素, 原子百分比为 7.06%, 表明制得的 Fe/BC 成功富集了 Fe。通过 XRD 对样品中 Fe 的化学组成进行分析, 这两种生物炭样品均含有 SiO_2 的衍射峰 (JCPDS No. 70-3755) 和 $CaSiO_3$ 的特征衍射峰 (JCPDS No. 29-0372), 这与其他文献中报道的生物炭组成一致^[22-23]。同时, 与 BC 相比, Fe/BC 样品在 $2\theta=$

35.68° 处出现了 Fe_2O_3 的衍射峰 (JCPDS No. 25-1402), 说明 Fe/BC 中的 Fe 是以 Fe_2O_3 形式存在。

通过 AAS 技术对 Fe/BC 中 Fe 的负载量进行测定, 与 BC 相比 (11.62 mg/g), Fe/BC 样品中铁含量高达 64.76 mg/g。BC 样品中也能检测出较高含量的铁, 一方面是由于空白组 (消煮液) 的硝酸存在铁杂质, 含量约为 3.50 mg/g, 另一方面是由于植物细胞本身也含有微量铁元素。

2.2 Fe/BC/ H_2O_2 类 Fenton 体系降解效能

2.2.1 降解动力学

为考察 Fe/BC 是否具有催化性能, 在生物炭投量为 0.2 g/L、SRB 浓度为 1.7×10^{-5} mol/L、 H_2O_2 投量为 0.12 mol/L、初始 pH 为 6.2 条件下, 研究了 Fe/BC 对 SRB 的去除效率, 结果见图 1。

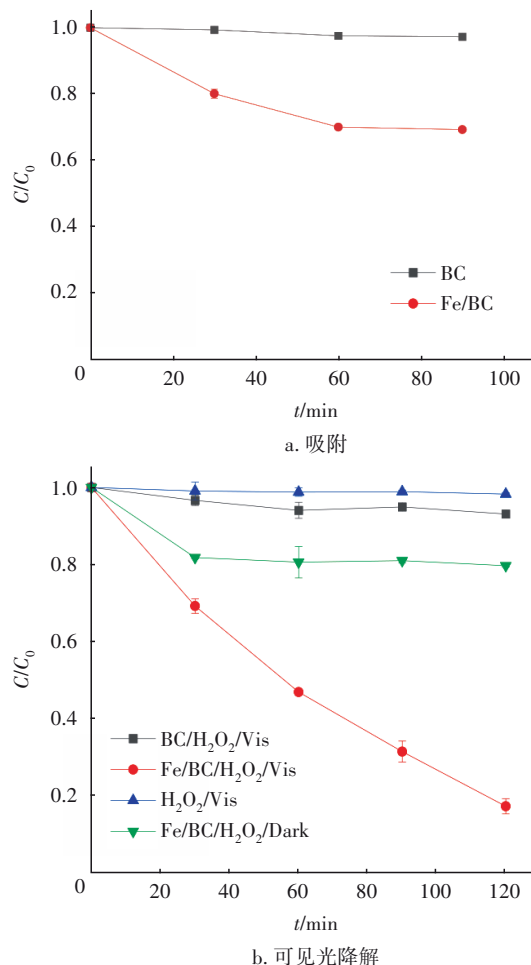


图1 两种生物炭降解SRB动力学

Fig.1 Kinetic curves of SRB removal by BC and Fe/BC

由图 1(a) 中的吸附动力学曲线可知, BC 对 SRB 基本不吸附 (吸附率约 3%), Fe/BC 对 SRB 的吸附率也较低 (约 30%), 约 90 min 可达到吸附脱附平

衡。经可见光($\lambda \geq 420$ nm)照射后,SRB的降解均符合一级动力学模型, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Vis}$ 体系对SRB的降解速率为 $1.2 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$, $\text{BC}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Vis}$ 体系对SRB的降解速率为 $5.3 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$, $\text{Fe}/\text{BC}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Dark}$ 体系对SRB降解速率为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$,只有 $\text{Fe}/\text{BC}/\text{H}_2\text{O}_2$ 体系在可见光下能有效地降解SRB(0.014 min^{-1}),在120 min时对SRB的降解率为81.6%,说明只有当可见光、 Fe/BC 和 H_2O_2 共同存在时,才能构成类Fenton体系,实现对SRB的降解。

2.2.2 H_2O_2 投加量对SRB降解的影响

在生物炭投量为0.2 g/L、SRB为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 、pH为6.2条件下,考察了 H_2O_2 投量对SRB降解的影响,结果见图2。

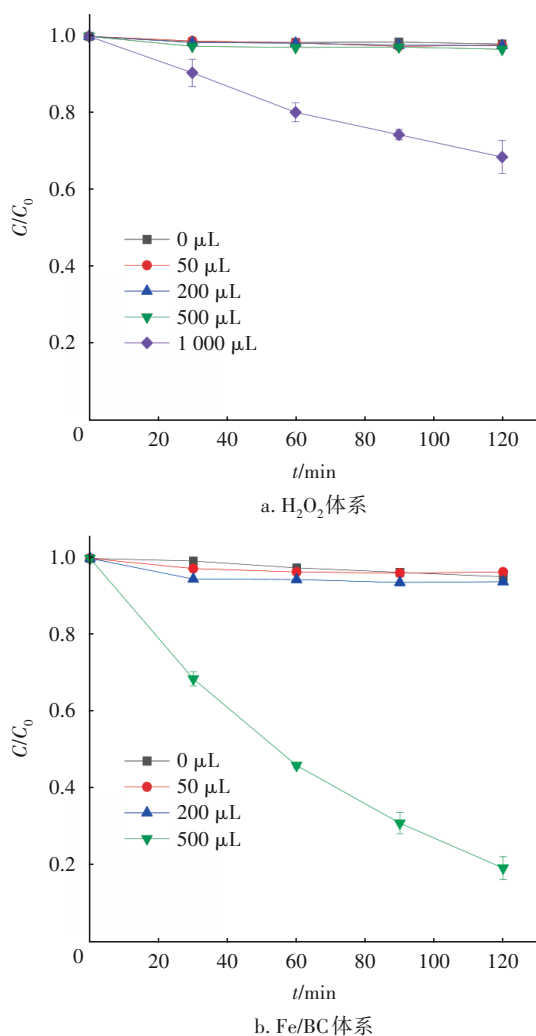


图2 不同 H_2O_2 投量下 H_2O_2 及 Fe/BC 体系降解SRB的动力学
Fig.2 SRB degradation kinetic curves of pure H_2O_2 and Fe/BC with different H_2O_2 dosages

在纯 H_2O_2 体系中, H_2O_2 投量为0~500 μL 时并不

会降解SRB,当 H_2O_2 投加量为1 000 μL 时,SRB会被降解($k=3.1 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$),因此 H_2O_2 投量应控制在500 μL 以内。而在 Fe/BC 体系中当 H_2O_2 投加量低于500 μL 时,SRB几乎不被降解。当 H_2O_2 投加量为500 μL 时,对SRB具有良好的降解效果($k=0.012 \text{ min}^{-1}$)。因此, H_2O_2 最佳投加量为500 μL ,此时 H_2O_2 浓度为0.12 mol/L。

2.2.3 不同pH下 Fe/BC 对SRB的降解效果

pH是影响Fenton反应处理效果的重要因素之一^[24]。传统Fenton反应体系要求pH控制在3左右,因为 $\text{pH} > 6$ 时铁离子会发生聚集、沉降等作用,严重影响反应效果。当生物炭投量为0.2 g/L、SRB为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 、 H_2O_2 浓度为0.12 mol/L时, Fe/BC 在不同pH条件下对SRB的降解动力学曲线见图3。可见,催化剂 Fe/BC 添加 H_2O_2 降解SRB的效果由强到弱依次为酸性、中性、碱性。 $\text{Fe}/\text{BC}/\text{H}_2\text{O}_2$ 体系在中性条件下也具有较好的降解效果,反应120 min后降解率为73%,即使在 $\text{pH}=9$ 时降解率依然可达43%,这是由于 Fe/BC 上 Fe_2O_3 具有较好的稳定性,通过Fe界面催化机制构成了异相Fenton光催化体系。

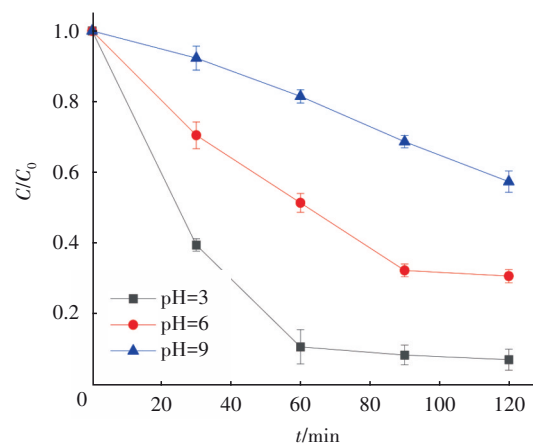


图3 Fe/BC 在不同pH条件下降解SRB的动力学
Fig.3 SRB degradation kinetic curves of Fe/BC under different pH conditions

2.3 自由基检测

为了确定 Fe/BC 活化 H_2O_2 产生的自由基种类,分别以异丙醇(IPA)为 $\cdot\text{OH}$ 捕获剂、对苯醌(BQ)为 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 捕获剂进行捕获实验^[25]。在生物炭投量为0.2 g/L、SRB为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 、 $\text{pH}=6.2$ 、 H_2O_2 投量为0.12 mol/L、 $\text{BQ}=1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 、 $\text{IPA}=1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 的条件下,不添加捕获剂时的降解率为81.1%,

添加 BQ 和 IPA 后的降解率分别为 58.1% 和 18.0%, 说明在该体系中 $\cdot\text{OH}$ 是主要活性物种。

2.4 循环利用效果

为了探究 Fe/BC 的稳定性, 进行了 5 次降解实验, 结果见图 4。在生物炭投量为 0.2 g/L、SRB 为 1.7×10^{-5} mol/L、pH=6.2、 H_2O_2 投量为 0.12 mol/L 的条件下, Fe/BC 体系对 SRB 的降解率分别为 93.3%、89.4%、90.0%、88.9%、81.6%。说明 Fe/BC 异相 Fenton 体系具有良好的稳定性。同时, 在各周期的溶液中均未检测到 Fe, 说明没有 Fe 的脱落, 这进一步证明了 Fe/BC 异相催化体系的稳定性。

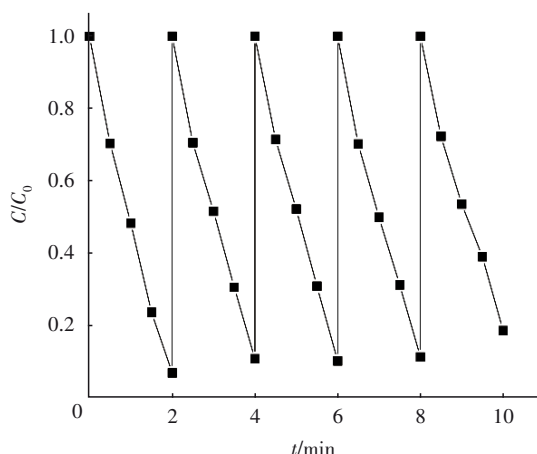


图4 循环实验动力学曲线

Fig.4 Kinetic curve of cyclic experiment

3 结论

香蒲对 Fe 的负载量可以达到 64.76 mg/g, 可以活化 H_2O_2 构成类 Fenton 体系, 相比于单纯 Fe^{2+} 与 H_2O_2 形成的传统 Fenton 体系, 其在中性、碱性条件下的反应更加稳定、高效。 $\cdot\text{OH}$ 是反应体系中产生的主要活性物种。Fe/BC/ H_2O_2 体系降解 SRB 的循环实验中无铁离子溶出, 说明其性质稳定。综上, 通过热裂解得到的 Fe/BC 作为异相 Fenton 光催化剂具有高效氧化去除有机污染物的能力, 为超富集植物的后处理提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] BUSIGNY V, PLANAVSKY N J, GOLDBAUM E, *et al.* Origin of the Neoproterozoic Fulu iron formation, South China: insights from iron isotopes and rare earth element patterns [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 242: 123-142.
- [2] DAUPHAS N, ROSKOSZ M, ALP E E, *et al.* Magma

redox and structural controls on iron isotope variations in earth's mantle and crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 398: 127-140.

- [3] GUALTIERI A F, ANDREZZI G B, TOMATIS M, *et al.* Iron from a geochemical viewpoint. Understanding toxicity/pathogenicity mechanisms in iron-bearing minerals with a special attention to mineral fibers [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2019, 133: 21-37.
- [4] D'ORAZIO M, CAMPANELLA B, BRAMANTI E, *et al.* Thallium pollution in water, soils and plants from a past-mining site of Tuscany: sources, transfer processes and toxicity [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 209: 106434.
- [5] ELMIRA T, REZA K, MOHAMMAD A, *et al.* A review of studies on sustainable development in mining life cycle [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 213-231.
- [6] 郭燕, 程瑞梅, 杨邵, 等. 三峡库区不同植被类型消落带土壤重金属含量的时空变异[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(8): 2497-2504.
GUO Yan, CHENG Ruimei, YANG Shao, *et al.* Temporal and spatial variation of soil heavy metal contents in different vegetation types in Three Gorges Reservoir area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(8): 2497-2504 (in Chinese).
- [7] SHAH V, DAVEREY A. Phytoremediation: a multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 18: 100774.
- [8] 黄丽萍, 周海东, 陈晓萌, 等. 典型挺水植物去除污水印记药物的特性研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(21): 107-113.
HUANG Liping, ZHOU Haidong, CHEN Xiaomeng, *et al.* Removal characteristics of typical wastewater-marking pharmaceuticals by emergent hydrophytes [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(21): 107-113 (in Chinese).
- [9] JASKULAK M, GROBELAK A, VANDENBULCKE F. Modelling assisted phytoremediation of soils contaminated with heavy metals-main opportunities, limitations, decision making and future prospects [J]. *Chemosphere*, 2020, 249: 126196.
- [10] 姚海兴, 叶志鸿. 湿地植物根表铁膜研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28: 2374-2380.
YAO Haixing, YE Zhihong. Iron plaques on wetland plant root surface: a review [J]. *Chinese Journal of*

- Ecology, 2009, 28: 2374–2380 (in Chinese).
- [11] 吴秋燕. 香蒲植物对重金属耐性的研究进展[J]. 岳阳职业技术学院学报, 2015, 30: 91–94.
- WU Qiuyan. Advance of cattail plant tolerance to heavy metals [J]. Journal of Yueyang Vocational Technical College, 2015, 30: 91–94 (in Chinese).
- [12] CHIODINI A, BUA L, CARNELLI L, *et al.* Enhancements in biomass-to-liquid processes: gasification aiming at high hydrogen/ carbon monoxide ratios for direct Fischer-Tropsch synthesis applications [J]. Biomass and Bioenergy, 2017, 106: 104–114.
- [13] JIANG Y, AMEH A, LEI M, *et al.* Solid-gaseous phase transformation of elemental contaminants during the gasification of biomass [J]. Science of the Total Environment, 2016, 563/564: 724–730.
- [14] CHAMI Z A, AMER N, SMETS K, *et al.* Evaluation of flash and slow pyrolysis applied on heavy metal contaminated *Sorghum bicolor* shoots resulting from phytoremediation [J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 63: 268–279.
- [15] KUPPENS T, DAEL M V, VANREPELEN K, *et al.* Techno-economic assessment of fast pyrolysis for the valorization of short rotation coppice cultivated for phytoextraction [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88: 336–344.
- [16] KOVACS H, SZEMMELVEISZ K. Disposal options for polluted plants grown on heavy metal contaminated brownfield lands—a review [J]. Chemosphere, 2017, 166: 8–20.
- [17] MUKOME F N D, BUELOW M C, SHANG J T, *et al.* Biochar amendment as a remediation strategy for surface soils impacted by crude oil [J]. Environmental Pollution, 2020, 265: 115006.
- [18] WEI Z, WANG J J, MENG Y L, *et al.* Potential use of biochar and rhamnolipid biosurfactant for remediation of crude oil-contaminated coastal wetland soil: ecotoxicity assessment [J]. Chemosphere, 2020, 253: 126617.
- [19] QIU Z, TANG J W, CHEN J H, *et al.* Remediation of cadmium-contaminated soil with biochar simultaneously improves biochar's recalcitrance [J]. Environmental Pollution, 2020, 256: 113436.
- [20] CAO X Q, HUANG Y P, TANG C C, *et al.* Preliminary study on the electrocatalytic performance of an iron biochar catalyst prepared from iron-enriched plants [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 88: 81–89.
- [21] 牛慧斌, 顾彦, 张常安, 等. 富Mn鸢尾生物炭的制备及在类Fenton体系中的应用[J]. 高等学校化学学报, 2019, 40: 2598–2605.
- NIU Huibin, GU Yan, ZHANG Chang'an, *et al.* Preparation of biochar with Mn enriched in *Iris* and its application in Fenton-like system [J]. Chemical Journal of Chinese University, 2019, 40: 2598–2605 (in Chinese).
- [22] 李琪瑞, 许晨阳, 耿增超, 等. 纳米生物炭的制备方法比较及其特性研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40: 3124–3134.
- LI Qirui, XU Chenyang, GENG Zengchao, *et al.* Preparation methods and properties of nanobiochars [J]. China Environmental Science, 2020, 40: 3124–3134 (in Chinese).
- [23] 汤嘉雯, 陈金焕, 王凯男, 等. 加拿大一枝黄花生物炭对Cd²⁺的吸附特性及机理[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1339–1348.
- TANG Jiawen, CHEN Jinhuan, WANG Kainan, *et al.* Characteristics and mechanism of cadmium adsorption by *Solidago canadensis*-derived biochar [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(6): 1339–1348 (in Chinese).
- [24] 黄应平, 刘德富, 张水英, 等. 可见光/Fenton光催化降解有机染料[J]. 高等学校化学学报, 2005, 12: 2273–2278.
- HUANG Yingping, LIU Defu, ZHANG Shuiying, *et al.* Fenton photocatalytic degradation of organic dye under visible irradiation [J]. Chemical Journal of Chinese University, 2005, 12: 2273–2278 (in Chinese).
- [25] 周薇, 胡晓龙, 赵小蓉, 等. 石墨烯-溴氧化铋复合物的制备及可见光光催化性能研究[J]. 分子催化, 2014, 28(4): 367–375.
- ZHOU Wei, HU Xiaolong, ZHAO Xiaorong, *et al.* Preparation of graphene-BiOBr composite and the enhanced photocatalytic activity under visible-light irradiation [J]. Journal of Molecular Catalysis, 2014, 28(4): 367–375 (in Chinese).

作者简介: 胡波(1985–), 男, 湖北兴山人, 工学学士, 工程师, 主要研究方向为除草剂合成及其工业废水的降解。

E-mail: chem_ctgu@126.com

收稿日期: 2022-04-15

修回日期: 2022-05-24

(编辑: 李德强)