

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁根涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体增殖与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用

马锋锋, 赵保卫*

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要: 以玉米芯为原料, 采用限氧热解法制备了不同温度(200 ~ 600℃)的玉米芯生物炭, 研究玉米芯生物炭对水中对硝基苯酚(PNP)的吸附行为, 并对其吸附机制进行了探讨。结果表明, 热解温度对生物炭的物理化学性质影响较大, 随着热解温度的升高, 含氢、氧官能团逐渐消失, 生物炭的极性降低, 芳香性增强。等温吸附曲线可以被 Freundlich 模型很好地描述, 生物炭的性质对其吸附 PNP 有着重要影响, Freundlich 模型回归参数(n 和 K_F)与玉米芯生物炭的芳香性、亲水性和极性指数[H/C、O/C、(O+N)/C]呈良好的线性关系。定量描述了表面吸附和分配作用的相对贡献, PNP 在低温(200℃)制备生物炭上的吸附主要为分配作用, 而高温(300 ~ 600℃)制备的生物炭对 PNP 的吸附为 $\pi-\pi$ 电子受体-供体作用和孔填充效应为主的表面吸附机制。

关键词: 生物炭; 玉米芯; 吸附; 对硝基苯酚; 热解温度

中图分类号: X131.2; X712 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0837-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201608101

Sorption of *p*-Nitrophenol by Biochars of Corncob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures

MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei*

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Sorption of *p*-nitrophenol (PNP) on biochars prepared from pyrolysis of corncob in the temperature range of 200–600°C (CC200–CC600) was investigated. Sorption mechanisms were discussed. Pyrolysis temperature showed a pronounced effect on properties of biochars. Decreases in molar H/C, O/C and (O+N)/C ratios were resulted from removal of H- and O-containing functional groups with increasing pyrolysis temperature, and produced biochars with low polarity and high aromaticity. The isotherms data were well described by the Freundlich model. Batch sorption experiments showed that the PNP sorption was strongly dependent on the properties of biochars. A linear relationship was observed between sorption parameters (n and K_F) and properties of biochars such as molar elemental ratios [H/C, O/C, and (O+N)/C]. The sorption and partition fractions were quantified by isotherm separation method. PNP sorption on biochar produced at 200°C was linear due to partition on uncarbonized organic matter in biochar, while PNP sorption on biochars produced at 300–600°C was nonlinear and adsorption-dominant for all the biochars via $\pi-\pi$ electron donor-acceptor interaction and pore-filling.

Key words: biochar; corncob; sorption; *p*-nitrophenol; pyrolysis temperature

生物炭(Biochar)是生物质在限氧条件和较低温度(<700℃)下热解制备的富碳颗粒^[1]。生物炭在土壤改良、土壤固碳和土壤污染控制与修复等应用中潜力巨大,生物炭以其优良的环境效应成为环境领域的研究热点之一^[2]。生物炭成本低廉且具有丰富的表面官能团和较大的比表面积等特征,这些特征使其对有机污染物有良好的吸附固定能力^[3]。吸附是决定土壤中有机污染物赋存状态的关键过程,向有机污染土壤中添加生物炭可显著降低污染物在土壤中的迁移性和生物有效性^[4]。如添加生物炭可显著增强土壤对邻苯二甲酸二乙酯(DEP)的吸附性能,降低了 DEP 在土壤中的生物有效性^[5]。因此,研究生物炭对有机污染物的吸附性能和机制具有重要意义。

生物炭的性质(比表面积、表面官能团和元素组成等)会对有机污染物的吸附性能产生很大影响^[6,7]。影响生物炭性质的因素主要有热解温度、热解时间、升温速率和生物质原料等,其中热解温度对生物炭的性质影响最为重要^[8]。生物炭的性质随着热解温度的不同呈现较大差异,从而影响有机污染物的吸附性能和吸附机制^[7-9]。目前,生物炭吸附有机污染物的研究主要集中于生物炭对农药或

收稿日期: 2016-08-15; 修订日期: 2016-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(21167007, 21467013); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20136204110003); 兰州交通大学青年科学基金项目(2013015)

作者简介: 马锋锋(1985~),男,博士研究生,主要研究方向为污染控制化学, E-mail: mayibo1985@126.com

* 通信作者, E-mail: zhbw2001@sina.com

疏水性有机物的吸附^[2,6-8,10,11],对极性有机污染物的吸附研究较少,尤其是不同热解温度制备的生物炭对极性有机污染物的吸附性能和机制报道很少.对硝基苯酚(PNP)是一种重要的精细化工中间体,主要用作医药和农药的原料,也用作合成皮革防腐剂和酸碱指示剂,在生产过程中大量的 PNP 释放到环境中. PNP 由于其对水生生物、植物和人类的潜在危害而被美国环保署列为优先控制污染物,同时也是污染土壤、地下水和渗滤液中常见的污染物^[12]. 因此,研究生物炭对极性有机污染物 PNP 的吸附性能和机制可以为 PNP 在添加生物炭土壤中的环境化学行为提供科学依据.

基于上述,本文考察了热解温度对玉米芯生物炭性质的影响,研究了玉米芯生物炭对 PNP 的吸附特征,并探讨了生物炭性质和吸附性能之间的关系以及吸附机制,以期预测不同热解温度制备的生物炭吸附极性有机污染物的吸附性能和机制提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 生物炭的制备

本实验所用的玉米芯采自甘肃省武威市周边农村. 将玉米芯清洗干净并烘干,粉碎,过 2 mm 筛,将原料均匀装入干净的坩埚内,盖上盖子,置于一定温度(200、300、400、500、600℃)的马弗炉中炭化 6 h; 经冷却后用 1 mol·L⁻¹ 的 HCl 溶液处理,反复用去离子水浸洗至中性; 烘干后过 80 目筛,装于棕色瓶中待用. 制得的生物炭标记为 CC200、CC300、CC400、CC500 和 CC600,其中 CC 代表玉米芯生物炭,数字代表热解温度.

1.2 生物炭的表征

生物炭灰分含量通过将生物炭在 800℃ 下烧灼 2 h 所得剩余量获得. 用元素分析仪(varioELcube, 德国)测定 5 种生物炭中的 C、H 和 N 含量,O 含量经扣除灰分后利用质量平衡法计算得出. 生物炭样品平行测定 2 次,用平均值计算生物炭中有机质组成的 H/C 和(N+O)/C 的原子比. 用比表面积和孔径分析测定仪(Micromeritics ASAP 2010,美国)测定生物炭的比表面积(SA)和孔体积. 采用溴化钾压片法,使用傅里叶红外光谱仪(FTIR, Nexus 870, 美国)进行红外光谱特征分析.

1.3 吸附等温线

分别准确称取一系列 0.10 g 的 CC200、CC300、CC400、CC500 和 CC600 于 50 mL 的具塞

锥形瓶中,分别加入 20 mL 浓度为 10 ~ 600 mg·L⁻¹ 的 PNP 溶液,背景溶液为 0.01 mol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 和 NaN₃ 混合液,以控制离子强度和抑制微生物的降解作用. 将上述吸附体系置于恒温振荡器(THZ-82A,江苏丹阳门石英玻璃厂)中(25℃ ± 1℃)在 150 r·min⁻¹ 下振荡 24 h,过 0.45 μm 滤膜,滤出液中 PNP 的浓度采用紫外分光光度计(UV-1800,上海美谱达仪器有限公司)测定,检测波长为 317 nm.

生物炭吸附 PNP 的吸附量(q_e)计算公式如下:

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (1)$$

式中, c_0 和 c_e 分别为初始溶液浓度和吸附时间 t (h) 时溶液中 PNP 的浓度(mg·L⁻¹), V 为 PNP 溶液体积(mL); m 为 CCBC 的质量(g).

1.4 数据分析

本研究中采用 Freundlich 模型对等温吸附数据进行拟合,模型公式如下:

$$q_e = K_F c_e^{1/n} \quad (2)$$

式中, c_e 为 PNP 的平衡浓度(mg·L⁻¹); q_e 为吸附平衡时的吸附量(mg·g⁻¹); K_F (L·mg⁻¹) 和 n 分别为 Freundlich 模型参数.

实验所得数据利用 Excel 2007 和 Origin 8.0 软件进行处理和制图.

2 结果与讨论

2.1 玉米芯生物炭的性质分析

玉米芯在不同温度(200 ~ 600℃)下限氧热解得到的生物炭的产率、灰分含量、SA、孔体积和元素组成见表 1. 随着炭化温度的升高,玉米芯生物炭的产率急剧降低,由 CC200 的 67.64% 降低到 CC600 的 26.49%,而灰分含量由 1.57% 增加到 4.49%; 生物炭的 C 元素含量由 53.39% 增大到 81.21%,H 和 O 元素含量分别从 5.12% 和 39.33% 下降到 1.74% 和 11.53%,说明玉米芯在热解过程中发生了脱氢和脱氧反应^[10]. 生物炭的原子比 H/C、O/C 和(O+N)/C 分别表征生物炭的芳香性、亲水性和极性大小,H/C 比值越小则芳香性越高,O/C 和(O+N)/C 比值越大,则亲水性和极性越大^[13]. 由表 1 可知,随着炭化温度的升高,生物炭的芳香化程度增加,而亲水性和极性降低. 同时,玉米芯生物炭的 SA 呈现规律性的变化,CC200 的 SA 很小,随着热解温度的升高,SA 逐渐增大,但并非呈线性关系,到 600℃ 时增大到 34.11 m²·g⁻¹.

表 1 生物炭的产率、灰分含量、比表面积、孔体积、元素组成和原子比

生物炭	产率 /%	灰分 /%	SA /m ² ·g ⁻¹	孔体积 /cm ³ ·g ⁻¹	元素组成				原子比		
					C/%	H/%	N/%	O/%	H/C	O/C	(O + N)/C
CC200	67.64	1.57	0.11	0.013	53.39	5.12	0.59	39.33	1.15	0.55	0.56
CC300	36.21	1.97	0.77	0.019	71.79	4.51	0.95	20.78	0.75	0.22	0.23
CC400	30.81	2.94	3.43	0.016	76.63	3.41	0.49	16.53	0.53	0.16	0.17
CC500	27.43	3.28	6.58	0.044	79.65	2.36	0.56	14.15	0.35	0.13	0.14
CC600	26.49	4.49	34.11	0.059	81.21	1.74	1.03	11.53	0.26	0.11	0.12

玉米芯生物炭的傅里叶变换红外光谱(FTIR)如图 1 所示. 从中可知,玉米芯生物炭含有丰富的官能团: 3 400 cm⁻¹附近的宽峰为羟基(—OH)的伸缩振动,2 916 cm⁻¹和2 850 cm⁻¹附近的吸收峰为脂肪性—CH₂—不对称和对称 C—H 伸缩振动峰,1 718

cm⁻¹附近处是—COOH 中 C=O 的伸缩振动吸收,1 612 cm⁻¹处的吸收峰是芳环 C=O、C=C 的伸缩振动,1 457 cm⁻¹和1 378 cm⁻¹处的吸收峰为芳香性 O—H 和 C=O 振动吸收,1 162 cm⁻¹和1 052 cm⁻¹处为碳水化合物中 C—O—C 的伸缩振动吸收峰^[14].

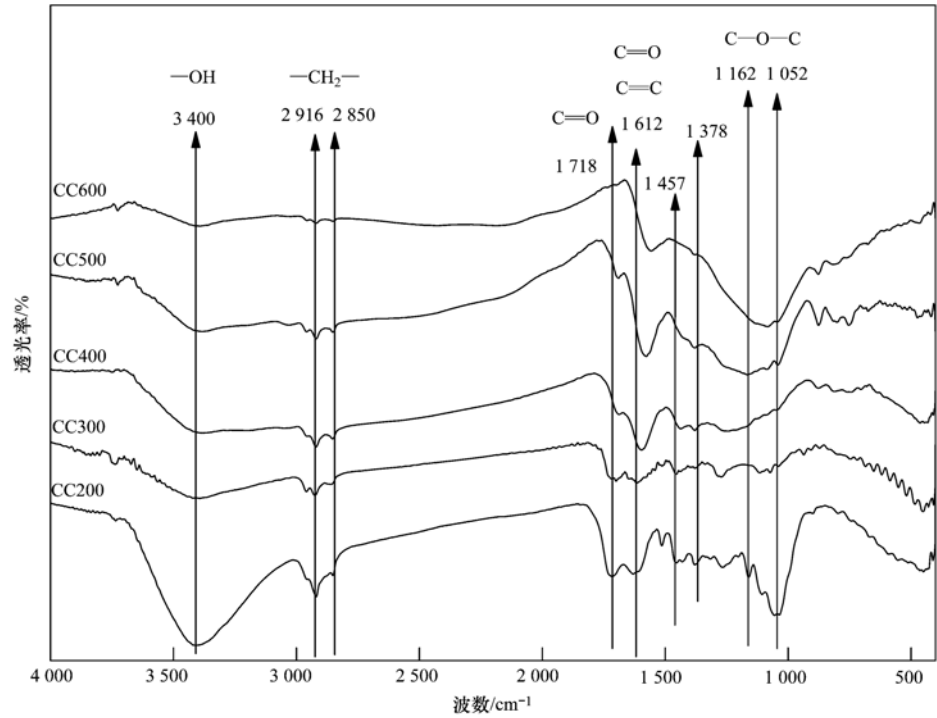


图 1 玉米芯生物炭 CC200 ~ CC600 的红外光谱图

Fig. 1 FTIR spectra of corn cob derived biochars (CC200-CC600)

随着热解温度的升高,—OH(3 400 cm⁻¹)的伸缩振动峰减弱,这主要是由于结合水的脱离导致氢键结合的—OH 逐渐断裂. 含氧官能团—COOH 的 C=O (1 718 cm⁻¹)、碳水化合物的 C—O—C (1 162 cm⁻¹和1 052 cm⁻¹)随着热解温度的升高而逐渐消失,表明玉米芯生物炭极性组分如纤维素含量逐渐减少. 脂肪性—CH₂—(2 916 cm⁻¹和2 850 cm⁻¹)伸缩振动峰逐渐减弱,表明玉米芯生物炭中脂肪性烷基链数量减少. 玉米芯生物炭的 FTIR 图谱与其元素组成分析结果一致.

2.2 吸附等温线

玉米芯生物炭对 PNP 的吸附等温线可用 Freundlich 模型很好地拟合(图 2),模型拟合参数见表 2. 由图 2 和表 2 可知,玉米芯生物炭对 PNP 具有较强的吸附能力,当 PNP 初始浓度较小时(小于 100 mg·L⁻¹),随着热解温度升高,玉米芯生物炭对 PNP 的吸附能力逐渐增大,而当初始浓度较高时(100 ~ 600 mg·L⁻¹),玉米芯生物炭对 PNP 的吸附能力大小顺序为 CC400 > CC600 > CC500 > CC300 > CC200,无明显规律,说明玉米芯生物炭对 PNP 的

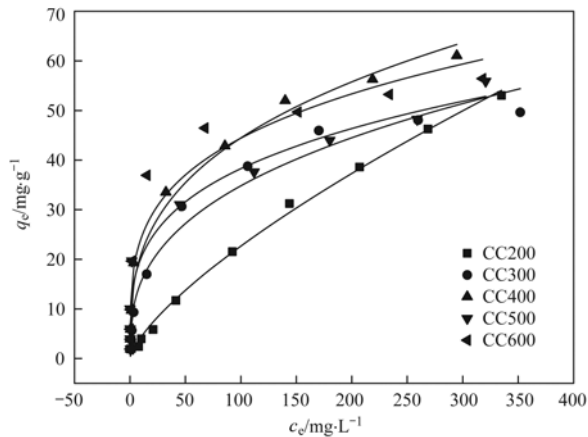


图2 玉米芯生物炭 CC200 ~ CC600 吸附 PNP 的吸附等温线
Fig. 2 Sorption isotherms of PNP by corn cob derived biochars (CC200-CC600)

吸附是多种吸附机制共同作用的结果. 吸附等温线在 PNP 初始浓度较低时呈非线性吸附, 在高浓度时呈线性吸附. 由表 2 可得, 所有的 Freundlich 模型的 n 值均小于 1 (0.264 ~ 0.719), 表明 PNP 在玉米芯生物炭上的吸附等温线均为非线性的. 随着热解温度的升高, n 值逐渐减小, 表明热解温度越高的生物炭, 其对 PNP 的吸附等温线非线性程度增加. Freundlich 模型的吸附常数 K_F 值随着热解温度的升高而增大, 表明热解温度高的生物炭对 PNP 的吸附能力越大, 这主要是热解温度越高, 生物炭比表面积增大, 同时芳香性增加造成的^[15,16].

2.3 生物炭性质对其吸附 PNP 的影响
吸附材料自身的物理化学性质对其吸附有机物

表 2 生物炭对 PNP 的等温吸附曲线回归参数

生物炭	Freundlich 回归			线性回归			
	n	K_F	R^2	线性方程	R^2	$K_p/L \cdot g^{-1}$	$q_{max}/mg \cdot g^{-1}$
CC200	0.719	0.825	0.996 4	$q_e = 0.115c_e + 14.892$	0.997 8	0.115	14.892
CC300	0.355	6.792	0.968 7	$q_e = 0.020c_e + 42.585$	0.982 9	0.020	42.585
CC400	0.327	9.865	0.980 1	$q_e = 0.058c_e + 43.728$	0.996 1	0.058	43.728
CC500	0.277	10.691	0.951 2	$q_e = 0.086c_e + 27.553$	0.984 4	0.086	27.553
CC600	0.264	13.181	0.920 1	$q_e = 0.040c_e + 43.717$	0.999 1	0.040	43.717

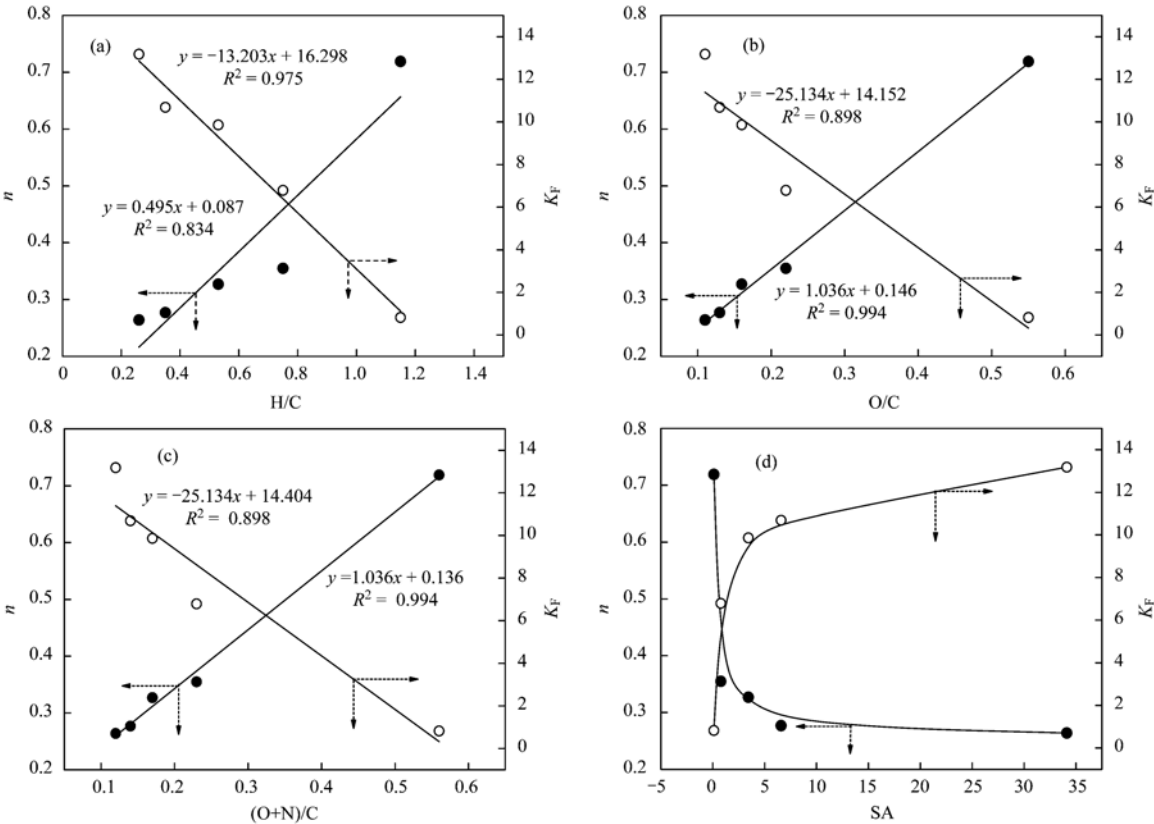


图3 PNP 的 Freundlich 回归参数(n 和 K_F) 与玉米芯生物炭 H/C、O/C、(O+N)/C 和 SA 之间的关系
Fig. 3 Correlation between Freundlich regression parameters (n and K_F) and the H/C, O/C, and (O+N)/C atomic ratio and the specific surface area (SA) of corn cob derived biochars

的行为有着决定性的作用^[2]. 玉米芯生物炭吸附 PNP 的 Freundlich 模型回归参数(n 和 K_F)与玉米芯生物炭的芳香性、亲水性和极性指数 $[H/C、O/C、(O+N)/C]$ 呈良好的线性关系[如图 3(a)~3(c)], 即 $K_F = -13.203(H/C) + 16.298$ ($R^2 = 0.975$)、 $n = 0.495(H/C) + 0.087$ ($R^2 = 0.834$)、 $K_F = -25.134[O/C \text{ 或 } (O+N)/C] + 14.152$ ($R^2 = 0.898$)和 $n = 1.036[O/C \text{ 或 } (O+N)/C] + 0.136$ ($R^2 = 0.994$), 根据这些线性方程可预测不同热解温度制得的生物炭对 PNP 的吸附性能. 生物炭吸附 PNP 的 Freundlich 模型的 n 值与其芳香性、亲水性和极性指数 $[H/C、O/C、(O+N)/C]$ 呈良好的线性正相关, 表明热解温度越高, 生物炭芳香性越高, 其对 PNP 的吸附等温线非线性越强, 推测生物炭对

PNP 的吸附作用力主要为 $\pi-\pi$ 电子受体-供体相互作用^[17,18]. 生物炭吸附 PNP 的 Freundlich 模型的 K_F 值与其芳香性、亲水性和极性指数 $[H/C、O/C、(O+N)/C]$ 呈良好的线性负相关, 表明热解温度越高, H/C 越小, 生物炭对有机污染物的吸附能力越大. 玉米芯生物炭吸附 PNP 的 Freundlich 模型回归参数与其芳香性、亲水性和极性指数 $[H/C、O/C、(O+N)/C]$ 呈良好的线性关系, 表明生物炭中的有机组分对其吸附 PNP 起到决定性的作用^[19]. 玉米芯生物炭吸附 PNP 的 Freundlich 模型回归参数(n 和 K_F)与玉米芯生物炭的比表面积(SA)线性相关性很差, n 值随着 SA 的增加而减小[见图 3(d)], 这主要是由于随着热解温度的升高, 生物炭的碳化程度增加, 其比表面积和微孔数目随之增加, 而微孔率

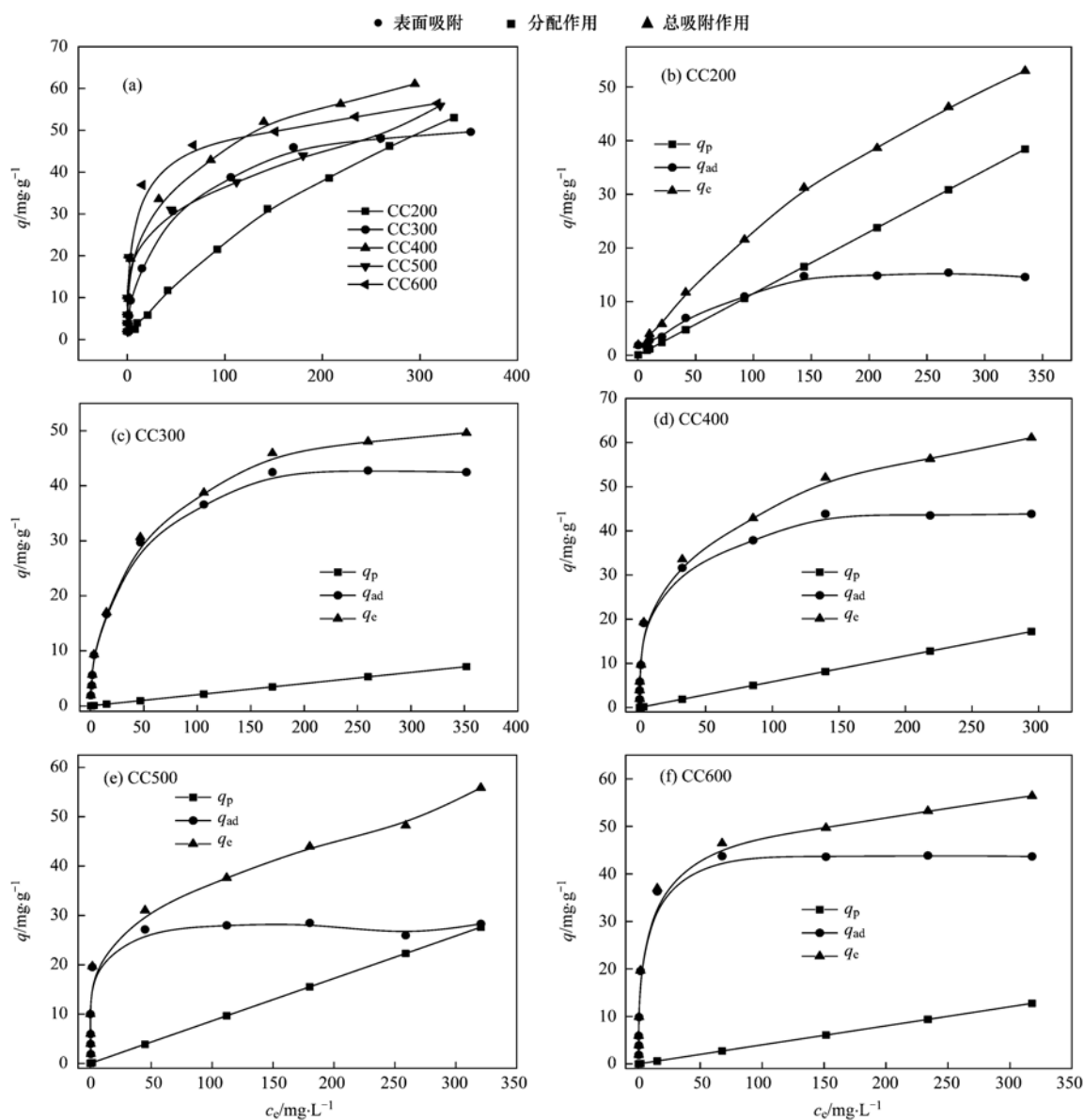
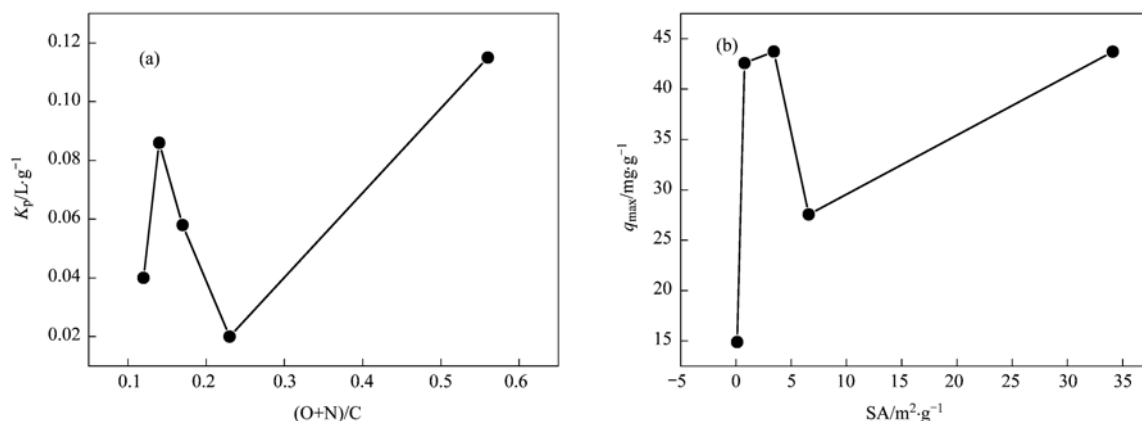


图4 表面吸附和分配作用对 PNP 在玉米芯生物炭上的总吸附作用贡献量

Fig. 4 Quantitative contributions of adsorption and partition to total sorption of PNP to corn cob biochars (CC200-CC600)



(a) PNP 的分配系数 (K_p) 和生物炭 $(O+N)/C$ 的关系; (b) 生物炭的最大吸附量与比表面积的关系

图 5 PNP 的吸附性能与生物炭的结构特征之间的关系

Fig. 5 Relationships between the adsorptive capacities and the structure characteristics of sorbents (CC200-CC600)

增加能使吸附等温线的非线性程度增大,说明孔填充效应可能是影响 PNP 在生物炭上吸附行为的因素之一^[11,20,21].

2.4 吸附机制探讨

生物炭对水中有机污染物的吸附主要包括表面吸附和分配作用,表面吸附作用表现为其等温吸附曲线呈非线性、强的溶质吸附和竞争吸附,而分配作用则表现为线性、弱的溶质吸附和非竞争吸附^[22]. 为探讨生物炭吸附 PNP 的吸附机制及其与生物炭结构特征之间的关系,采用等温曲线分解法定量描述分配作用和表面吸附的作用^[9]:

$$q_e = q_{ad} + q_p = q_{ad} + K_p \times c_e \quad (3)$$

式中 q_e 、 q_{ad} 、 q_p 分别为总吸附量、表面作用吸附量和分配作用吸附量 ($mg \cdot g^{-1}$), c_e 为平衡浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); K_p ($L \cdot mg^{-1}$) 为分配系数. 由于在低浓度范围内,有机物主要被吸附于表面吸附位点,而在高浓度范围内,表面吸附达到饱和,表面饱和吸附量为 q_{max} ($mg \cdot g^{-1}$),总吸附量随着平衡浓度 c_e 的增加而以斜率 K_p ($L \cdot g^{-1}$) 线性增加. 对高浓度范围的等温曲线进行线性拟合,所得的斜率和截距分别为 K_p 和 q_{max} (见表 2). 表面吸附作用的贡献量为:

$$q_{ad} = q_e - q_p = q_e - K_p \times c_e \quad (4)$$

根据式 (3) 和 (4) 绘制了表面吸附和分配作用对总吸附量的相对贡献 (见图 4).

CC200 对水中 PNP 的吸附等温线基本呈直线 (图 4), PNP 浓度较低时,表面吸附大于分配作用,当浓度较高时 ($c_e > 100 mg \cdot L^{-1}$),分配作用大于表面吸附作用,说明其吸附机制主要为 PNP 在水-生物炭间的分配作用,而 CC300 ~ CC600 则表现出明显的非线性吸附,其表面吸附的作用大于分配作用

的贡献. 玉米芯生物炭表面吸附作用的贡献率大小顺序为: CC600 > CC300 > CC400 > CC500 > CC200. 随着热解温度的升高,生物炭的分配作用不再是吸附的主要作用,吸附作用是由表面吸附和分配作用共同作用的结果. CC300 和 CC400 的比表面积很低,但吸附性能较强,可能是由于其自身含有的无定形碳介质,生物炭的表面官能团和 PNP 的特殊作用引起的^[9].

玉米芯生物炭的分配系数 K_p 和生物炭 $(O+N)/C$ 的关系如图 5(a) 所示. 由图 5(a) 和表 2 可知,随着热解温度的升高,分配系数 K_p 从 0.115 $L \cdot g^{-1}$ 减小为 0.020 $L \cdot g^{-1}$,接着又上升为 0.086 $L \cdot g^{-1}$,而到 CC600, K_p 又减小到 0.040 $L \cdot g^{-1}$. 分配作用与生物炭极性指数 $(O+N)/C$ 的变化取决于生物炭中分配介质和有机物的“匹配性”^[9]. 根据分配机制和“相似相溶”原理,当热解温度较低时 (CC200),生物炭极性较强,PNP 与 CC200 的极性更为匹配,分配作用为主要的吸附机制. 当热解温度升高时,生物炭的非极性增强,造成 CC300 的 K_p 急剧减小,生物炭中的芳香 C 增多,PNP 的苯环是一个缺电子体系,其可以作为电子受体与生物炭之间产生 $\pi-\pi$ 电子受体-供体作用^[23,24]. 此外,孔填充作用可能是 PNP 在生物炭上吸附的主导因素,虽然 SA 和 q_{max} 没有明显的线性正相关关系 [见图 5(b)],但是整体趋势为 SA 值越大, q_{max} 有上升的趋势. 因此 SA 可能是影响生物炭吸附 PNP 的因素之一.

3 结论

(1) 玉米芯生物炭的理化性质随着热解温度的不同有着明显的区别. 随着热解温度的升高,玉米

芯生物炭的比表面积显著增大,但并非呈直线关系;生物炭的芳香度急剧升高,而亲水性和极性则降低.玉米芯生物炭的 FTIR 图谱分析也表明其极性官能团随着热解温度的升高其含量降低.

(2)玉米芯生物炭对 PNP 有较强的吸附能力,Freundlich 模型可以很好地拟合玉米芯生物炭对 PNP 的等温吸附曲线,随着热解温度的升高,Freundlich 模型的 n 值逐渐减小, K_F 值增大. n 和 K_F 值与玉米芯生物炭的芳香性、亲水性和极性指数 $[H/C、O/C、(O+N)/C]$ 呈良好的线性关系,所拟合线性回归方程可预测不同热解温度制备生物炭的吸附性能.

(3)生物炭对水中 PNP 的吸附机制包括分配作用和表面吸附作用.低温制备的生物炭(CC200)对 PNP 的吸附主要以分配作用为主,表面吸附作用对高温制备生物炭吸附 PNP 的贡献较大, $\pi-\pi$ 电子受体-供体作用和孔填充效应可能是高温生物炭吸附 PNP 的主要吸附机制.

参考文献:

- [1] 马锋锋,赵保卫,刁静茹,等.牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性[J].环境科学,2015,36(5):1678-1685.
Ma F F, Zhao B W, Diao J R, *et al.* Ammonium adsorption characteristics in aqueous solution by dairy manure biochar[J]. Environmental Science, 2015, 36(5): 1678-1685.
- [2] Ahmad M, Lee S S, Dou X M, *et al.* Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and tce adsorption in water [J]. Bioresource Technology, 2012, 118: 536-544.
- [3] Tan X F, Liu Y G, Zeng G M, *et al.* Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions [J]. Chemosphere, 2015, 125: 70-85.
- [4] 王子莹,邱梦怡,杨妍,等.不同生物炭吸附乙草胺的特征及机理[J].农业环境科学学报,2016,35(1):93-100.
Wang Z Y, Qiu M Y, Yang Y, *et al.* Sorption of acetochlor by biochars derived from wood dust and swine manure at different pyrolytic temperatures[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(1): 93-100.
- [5] Zhang X K, Sarmah A K, Bolan N S, *et al.* Effect of aging process on adsorption of diethyl phthalate in soils amended with bamboo biochar[J]. Chemosphere, 2016, 142: 28-34.
- [6] 吴晴雯,孟梁,张志豪,等.芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性[J].环境科学,2016,37(2):680-688.
Wu Q W, Meng L, Zhang Z H, *et al.* Sorption characteristics of phenanthrene and 1, 1-dichloroethene onto reed straw biochar in aquatic solutions[J]. Environmental Science, 2016, 37(2): 680-688.
- [7] Chen B L, Zhou D D, Zhu L Z. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(14): 5137-5143.
- [8] Devi P, Saroha A K. Effect of pyrolysis temperature on polycyclic aromatic hydrocarbons toxicity and sorption behaviour of biochars prepared by pyrolysis of paper mill effluent treatment plant sludge [J]. Bioresource Technology, 2015, 192: 312-320.
- [9] 陈宝梁,周丹丹,朱利中,等.生物炭质吸附剂对水中有机污染物的吸附作用及机理[J].中国科学B辑:化学,2008,38(6):530-537.
Chen B L, Zhou D D, Zhu L Z, *et al.* Sorption characteristics and mechanisms of organic contaminant to carbonaceous biosorbents in aqueous solution[J]. Science in China Series B: Chemistry, 2008, 51(5): 464-472.
- [10] 王菲,孙红文.生物炭对极性与非极性有机污染物的吸附机理[J].环境化学,2016,35(6):1134-1141.
Wang F, Sun H W. Sorption mechanisms of polar and apolar organic contaminants onto biochars [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(6): 1134-1141.
- [11] 颜钰,王子莹,金洁,等.不同生物质来源和热解温度条件下制备的生物炭对菲的吸附行为[J].农业环境科学学报,2014,33(9):1810-1816.
Yan Y, Wang Z Y, Jin J, *et al.* Phenanthrene adsorption on biochars produced from different biomass materials at two temperatures[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(9): 1810-1816.
- [12] Liu F, Wu Z L, Wang D X, *et al.* Magnetic porous silica-graphene oxide hybrid composite as a potential adsorbent for aqueous removal of *p*-nitrophenol[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 490: 207-214.
- [13] 陈再明,陈宝梁,周丹丹.水稻秸秆生物炭的结构特征及其对有机污染物的吸附性能[J].环境科学学报,2013,33(1):9-19.
Chen Z M, Chen B L, Zhou D D. Composition and sorption properties of rice-straw derived biochars [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 9-19.
- [14] Wang Y, Hu Y T, Zhao X, *et al.* Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence times[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(10): 5890-5899.
- [15] 周丹丹.生物炭质对有机污染物的吸附作用及机理调控[D].杭州:浙江大学,2008.
Zhou D D. Sorption characteristics and mechanisms of bio-chars with organic contaminants in water [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [16] Rajapaksha A U, Vithanage M, Ahmad M, *et al.* Enhanced sulfamethazine removal by steam-activated invasive plant-derived biochar[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 290: 43-50.
- [17] Sun K, Jin J, Keiluweit M, *et al.* Polar and aliphatic domains regulate sorption of phthalic acid esters (PAEs) to biochars[J]. Bioresource Technology, 2012, 118: 120-127.
- [18] Zheng H, Wang Z Y, Zhao J, *et al.* Sorption of antibiotic sulfamethoxazole varies with biochars produced at different temperatures [J]. Environmental Pollution, 2013, 181: 60-67.
- [19] Ahmad M, Lee Sang S, Rajapaksha A U, *et al.* Trichloroethylene adsorption by pine needle biochars produced at various pyrolysis temperatures [J]. Bioresource Technology,

- 2013, **143**: 615-622.
- [20] Chun Y, Sheng G Y, Chiou C T, *et al.* Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38** (17): 4649-4655.
- [21] Wang Z Y, Han L F, Sun K, *et al.* Sorption of four hydrophobic organic contaminants by biochars derived from maize straw, wood dust and swine manure at different pyrolytic temperatures [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 285-291.
- [22] Chiou C T, Cheng J Z, Hung W N, *et al.* Resolution of adsorption and partition components of organic compounds on black carbons [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (15): 9116-9123.
- [23] Bastami T R, Entezari M H. Activated carbon from carrot dross combined with magnetite nanoparticles for the efficient removal of p-nitrophenol from aqueous solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **210**: 510-519.
- [24] Kubicki J D. Molecular simulations of benzene and PAH interactions with soot [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (7): 2298-2303.

《环境科学》连续 5 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2016 年 11 月 22 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2016 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》再获“2016 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 5 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Mineralization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrins During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172