

文章编号:1672-6561(2012)04-0080-08

水稻秸秆和椰壳生物质碳对菲的吸附动力学对比

古小敏, 吴宏海, 张立国, 李 静, 刘晓华, 管玉峰

(华南师范大学 化学与环境学院, 广东 广州 510006)

摘 要:以水稻秸秆为前驱物质,在 700 °C 高温条件下酸处理制备含灰分和去除灰分的 2 种水稻秸秆生物质碳吸附剂;对这 2 种生物质碳的内部结构与表面形态进行粒度与扫描电镜显微观察与分析,并与椰壳生物质碳进行对比;然后,以菲为目标污染物,采用批处理试验方法,系统考察上述 3 种生物质碳对菲的吸附性能及其结构特征的异同。结果表明:酸处理制成的去除灰分水稻秸秆生物质碳有效提高了比表面积、孔容与碳含量;水稻秸秆生物质碳对菲的吸附能力很强,并且吸附率很快,在 1 min 内吸附率就可达到 70%;上述 3 种生物质碳对菲的吸附能很好地遵循伪二级动力学方程,而且伪二级吸附速率常数随菲初始质量浓度的增大而逐渐减小,说明其主要受颗粒内部扩散控制。由此可见,酸处理水稻秸秆生物质碳是一种理想的污染土壤修复材料。

关键词:水稻秸秆;椰壳;生物质碳;菲;吸附;动力学方程;土壤污染

中图分类号:P579

文献标志码:A

Comparison of Adsorption Kinetics of Rice Straw and Coconut Shell Biomass Carbons to Phenanthrene

GU Xiao-min, WU Hong-hai, ZHANG Li-guo, LI Jing, LIU Xiao-hua, GUAN Yu-feng

(School of Chemistry and Environment, South China Normal University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Rice straw as precursor matter was pyrolyzed at 700 °C to prepare rice straw biomass carbons with and without ash; internal structure and surface morphology of the two kinds of rice straw biomass carbons were shown by SEM and particle size analysis, and were compared with that of coconut shell biomass carbon; taking phenanthrene as the target contaminant, the adsorption of the three kinds of biomass carbons to phenanthrene was analyzed systemically, and the difference of structure characteristics was discussed. The results showed that rice straw biomass carbon without ash treated by acid efficiently improved the specific surface area, pore volume and carbon content; the adsorption of biomass carbons to phenanthrene was stronger, and the adsorption rate was fast and reached to 70% within 1 min; the adsorption of the three kinds of biomass carbons to phenanthrene followed pseudo-second-order kinetics equation, and rate constant of the equation gradually decreased with the increase of initial mass concentration of phenanthrene, so that the rate was mainly controlled by particle internal diffusion. In general, rice straw biomass carbon treated by acid was an ideal material for the remediation of contaminated soil.

Key words: rice straw; coconut shell; biomass carbon; phenanthrene; adsorption; kinetics equation; soil pollution

收稿日期:2012-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41072034,40773080);广东省自然科学基金项目(10151063101000028)

作者简介:古小敏(1987-),女,广东梅州人,工学硕士研究生,E-mail:minnieku@hotmail.com。

0 引言

菲是一种相对稳定的灰水性多环芳烃,它作为石油和煤炭加工工业的副产品,已成为土壤沉积物、地表与地下水环境中常见的有机污染物^[1-5]。生物质碳具有高度稳定性和极强的吸附性能,且广泛分布于大气与地表环境中,其对有机污染物(如菲)的吸附作用是非常重要的环境化学过程,能够控制污染物在环境中的迁移、转化与生物有效性以及最终归宿^[6-8],从而影响环境系统中污染物和营养元素的行为^[9]。当前,在全球范围内每年有约 43 000 t 多环芳烃(PAHs)释放到大气中,由于 PAHs 具有较高的亲脂性,可以通过食物链进入人体,对人类健康和生态环境产生很大的潜在危害,已引起国内外学者的高度关注^[10]。由于生物质碳在全球气候变化、碳生物地球化学循环以及环境系统中发挥着重要的作用,所以长期以来都是国内外大气科学、地质学和环境科学领域研究的热点^[11]。

中国农作物秸秆生物质资源很丰富^[12-13],过去常当作农业废弃物无组织焚烧,不仅污染空气,而且造成资源的极大浪费。基于此,笔者试图寻求水稻秸秆的无害化利用。通过对水稻秸秆热解、酸处理制成含灰分和去除灰分的 2 种生物质碳吸附剂,并通过表征手段研究酸处理对 2 种生物质碳的比表面积和表面形态的影响,并开展这 2 种生物质碳与椰壳生物质碳对菲的吸附试验对比研究,深入考察它们对菲的吸附动力学规律,以期为水稻秸秆的资源化利用提供理论与试验依据。

1 材料与方法

1.1 主要试剂和仪器设备

主要试剂有:菲(HPLC 级),纯度大于 97%,购买自日本 Fluka 公司;椰壳生物质碳,分析纯。仪器设备有:电热恒温鼓风干燥箱(HG-9146A 型,上海精宏实验设备有限公司);气浴恒温振荡器(ZD-85A 型,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司);低速离心机(KDC-40 型,科大创新股份有限公司中佳分公司);比表面积测定仪(ASAP 2000 型, Micromeritics 公司)。

1.2 水稻秸秆生物质碳的制备与表征

水稻秸秆采自广东省兴宁县水稻田。经过 4 次水洗,去除表面黏附物,自然风干 48 h,然后在 70 ℃ 烘箱中烘干 24 h;粉碎,过 0.250 mm 孔径的筛子,后装于棕色玻璃瓶中保存。水稻秸秆生物质碳制备

采用限氧升温碳化法^[14]。称取 20 g 的秸秆粉末于坩埚中,盖上盖子,置于 700 ℃ 的马弗炉中热解碳化 6 h;冷却至室温后取出,获得含灰分的水稻秸秆生物质碳,标记为 BC,置于棕色玻璃瓶中保存。将碳化产物的一部分,用 200 mL 1 mol · L⁻¹ 的 HCl 溶液浸泡搅拌 12 h,然后用蒸馏水洗至洗涤液的 pH 值为 6.5~7.0;连续进行 2 次酸处理,最后在 100 ℃ 烘箱中干燥 24 h,制得去除灰分的水稻秸秆生物质碳,标记为 BCH,置于棕色玻璃瓶中保存。采用扫描电镜对上述制得的 BC、BCH 以及购买的椰壳生物质碳(AC)进行形态观察;并用比表面积测定仪与激光粒度分析仪测定上述 3 种生物质碳吸附剂的比表面积、孔容及孔径分布。

1.3 菲的测定条件

采用岛津 LC-10AT 型高效液相色谱仪进行液相中菲浓度的测定,其中检测器为 SPD-10Avp 紫外-可见光检测器,色谱柱为 C18 反相色谱柱(250 × 4.6 mm)。测定条件为:流动相为甲醇与水(体积比为 85:15)的混合物,流动相流速为 1.00 mL · min⁻¹,进样体积为 20 μL,检测波长为 254 nm。

1.4 菲的吸附试验方法与步骤

准确称取一定量的菲,先溶解在甲醇中,配制成 1 g · L⁻¹ 的菲标准储备溶液,后置于冰箱内保存备用。背景溶液有:0.005 mol · L⁻¹ 的 CaCl₂ 溶液,保持试验溶液中一定的离子强度;100 mg · L⁻¹ 的 NaN₃ 溶液,抑制微生物降解;5 mg · L⁻¹ 的 NaHCO₃ 溶液,保证试验溶液 pH 值稳定在 7.0 左右。将菲储备溶液按比例分别加入背景溶液中,便可配制一系列不同浓度的菲工作液。其中,甲醇的体积分数控制在 2 × 10⁻³ 以下^[15],以防止共溶剂效应的影响。

吸附平衡试验:称取 10 mg 水稻秸秆生物质碳于 20 mL 钳口顶空瓶中,然后依次加入 20 mL 系列浓度的菲工作液,用压盖器将带聚四氟乙烯垫片的铝盖封住瓶口,在恒温(25 ± 0.5)℃、振荡速度为 200 r · min⁻¹、避光的条件下(防止菲的挥发和光解)在恒温振荡器上振荡 3 h。平衡后取出,采用低速离心机在 3 500 r · min⁻¹ 转速下离心 10 min,上清液过 0.45 μm 滤膜,然后用高效液相色谱仪测定菲的质量浓度,最后根据菲的初始质量浓度和吸附后上清液质量浓度计算生物质碳材料对菲的吸附量。每个试验组设置 1 个空白样、3 个平行样。

菲的吸附动力学试验:采用批处理试验方法,称取 10 mg 水稻秸秆生物质碳于 20 mL 钳口顶空瓶

中,加入 20 mL 系列质量浓度的菲工作液,然后用压盖器将带聚四氟乙烯垫片的铝盖封住瓶口,并在恒温(25 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 、振荡速度为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 以及避光的条件下振荡一定时间。吸附一定时间后取出,测定菲的平衡质量浓度。并根据菲的初始质量浓度和平衡质量浓度,计算相应生物质碳对菲的吸附量。每个试验组设置 1 个空白样、3 个平行样。

2 结果与讨论

2.1 生物质碳的结构与表面形态特征

表 1 列出 3 种生物质碳的比表面积和孔径分析结果。图 1 显示了孔径与孔容的关系。从表 1 可以看出,去除灰分的水稻秸秆生物质碳(BCH)较之含灰分的水稻秸秆生物质碳(BC)和椰壳生物质碳(AC)具有高得多的比表面积,然而 BC 的比表面积和孔容却均比椰壳生物质碳低得多。主要原因可能是:生物质碳在碳化过程中,产生的焦油等物质占据在水稻秸秆的孔状结构中,致使 BC 的比表面积减小,而由于盐酸能把焦油从生物质碳的孔状结构中洗脱下来,所以能增加 BCH 的比表面积;水稻秸秆灰分的主要成分有金属氧化物,盐酸可以将附着于生物质碳上的金属氧化物洗脱下来,从而增加水稻秸秆生物质碳的比表面积^[16-17]。

表 1 3 种生物质碳的表面物理化学性质

Tab. 1 Physicochemical Surface Properties of Three Kinds of Biomass Carbons

吸附剂类型	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	平均孔径/nm	孔容/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$
AC	95.60	3.67	0.09
BC	40.82	2.55	0.02
BCH	336.00	3.03	0.25

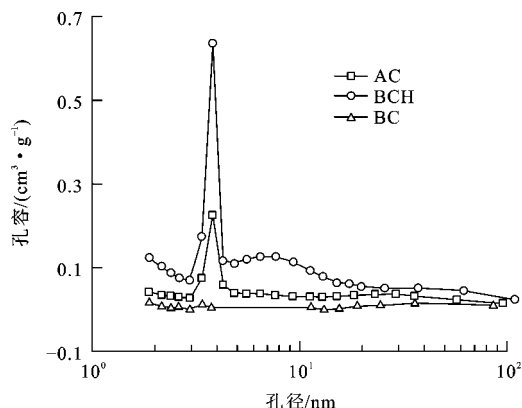


图 1 3 种生物质碳的孔容与孔径的关系

Fig. 1 Relationships Between Pore Volume and Diameter of Three Kinds of Biomass Carbons

从图 2 可以看出,在放大倍数为 2 000 倍的扫描电镜下,可观察到水稻秸秆生物质碳有丰富的蜂窝状孔隙结构,这些孔隙结构使得水稻秸秆生物质碳具有很大的比表面积。而且,在碳化过程中,水稻秸秆的半纤维素、纤维素和木质素发生脱水、联结中断反应,最后发生聚合反应。从图 3 可以看出,BCH 的介孔特征很明显,而 BC 的内部孔道则因堵塞而几乎不起作用(N_2 吸附-解吸曲线重合)。

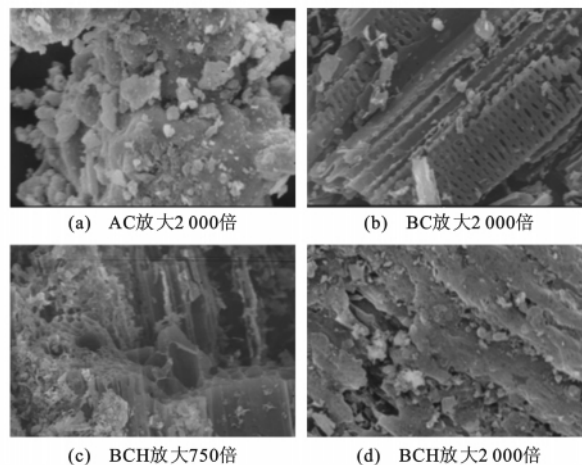


图 2 3 种生物质碳的扫描电镜形态照片

Fig. 2 Morphological Images of Three Kinds of Biomass Carbons by SEM

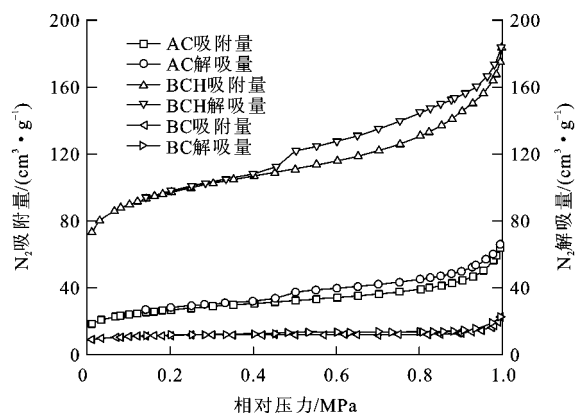


图 3 3 种生物质碳对 N_2 的吸附-解吸曲线

Fig. 3 Adsorption-desorption Curves of Three Kinds of Biomass Carbons to N_2

从图 2 还可以看出,去除灰分的水稻秸秆生物质碳孔状结构较之椰壳生物质碳发育得更好,水稻秸秆生物质碳表面粗糙且高低不平,具有丰富的很发达蜂窝状孔隙结构,因而孔隙结构向生物碳内部延伸,从而增加水稻秸秆生物质碳的比表面积。水稻秸秆的主要成分是纤维素,其主要结构为筛管和导管,这是水稻秸秆生物质碳能够具备很大比表面积的根本原因^[18],从而使得水稻秸秆生物质碳能够

对有机污染物(如菲)具有很强的吸附能力。然而,由于潜在的内部空隙可能被其他物质填充堵塞,从而严重影响上述生物质碳去除污染物的吸附性能,所以提高内部孔隙的孔容及贯通性是非常重要的技术控制环节。

2.2 生物质碳对菲的吸附时间曲线

吸附速率反映单位时间内不同吸附剂对菲的吸附快慢。选用质量浓度分别为 0.2、0.4、0.5、0.6、0.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的菲工作液,并用固液比为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的生物质碳,研究不同初始质量浓度对吸附速率的影响。图 4~6 为吸附量与吸附反应时间的关系曲线。由图 4~6 可以看出,菲在不同初始质量浓度下的吸附动力学曲线有相同的趋势。随着吸附时间的增加,菲吸附量在第 1 个时间段内(吸附时间小于 1 min)急剧上升,其吸附率可达到 70%,此阶段的吸附为快速吸附过程;吸附量在第 2 个时间段(1~20 min)随时间缓慢上升,此阶段的吸附率增加近 30%;第 3 个时间段(吸附时间大于 20 min),吸附已达到平衡。可见,生物质碳对菲的吸附是一个快速过程,菲吸附量在 20 min 内即可达到最大值。

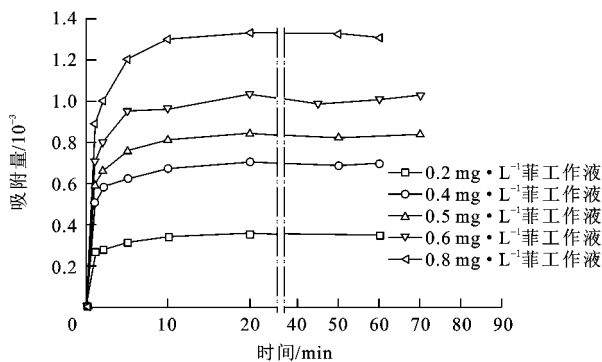


图 4 含灰分的水稻秸秆生物质碳对菲的吸附量随时间的变化

Fig. 4 Relationships of Phenanthrene Absorbed by Rice Straw Biomass Carbon with Ash to Time

2.3 生物质碳对菲的动力学方程

常用动力学方程主要有:伪一级动力学方程、修正伪一级动力学方程、伪二级动力学方程以及颗粒扩散方程等 4 种。笔者分别采用上述 4 种动力学方程对获得的 3 种生物质碳对菲的吸附速率进行拟合^[19-20],以期阐明吸附机理及其制约因素。

伪一级动力学方程 Q_1 为

$$Q_1 = \ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (1)$$

修正伪一级动力学方程 Q_2 为

$$Q_2 = q_t/q_e + \ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (2)$$

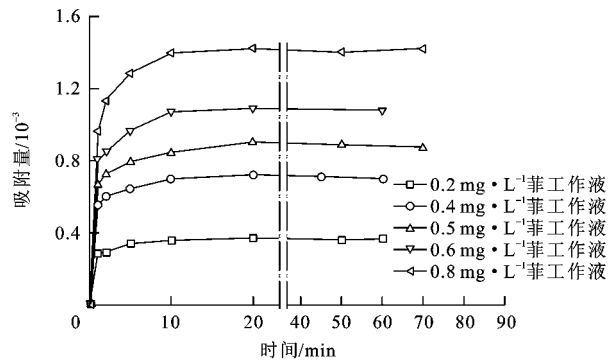


图 5 椰壳生物质碳对菲的吸附量随时间的变化

Fig. 5 Relationships of Phenanthrene Absorbed by Coconut Shell Biomass Carbon to Time

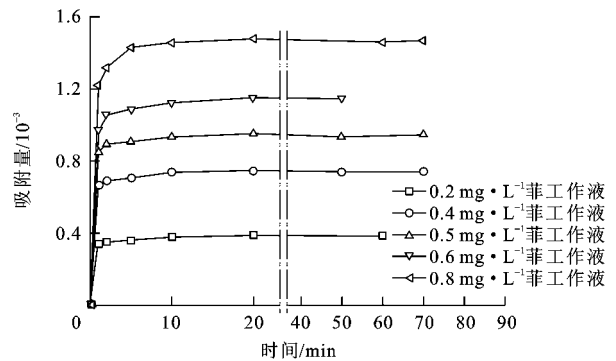


图 6 去除灰分的水稻秸秆生物质碳对菲的吸附量随时间的变化

Fig. 6 Relationships of Phenanthrene Adsorbed by Rice Straw Biomass Carbon Without Ash to Time

伪二级动力学方程 Q_3 为

$$Q_3 = t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e \quad (3)$$

颗粒扩散方程 Q_4 为

$$Q_4 = q_t = k_p t^{0.5} \quad (4)$$

式中: t 为吸附时间; q_e 为吸附平衡时的吸附剂对菲的吸附量; q_t 为 t 时刻吸附剂对菲的吸附量; k_1 为伪一级吸附速率常数; K_1 为修正伪一级吸附速率常数; k_2 为伪二级吸附速率常数; k_p 为颗粒扩散方程常数。

表 2 和图 7 分别对椰壳生物质碳吸附菲的数据进行动力学方程的拟合;表 3 和图 8 分别为对含灰分的水稻秸秆生物质碳吸附菲的数据进行动力学方程的拟合;表 4 和图 9 分别对去除灰分的水稻秸秆生物质碳吸附菲的数据进行动力学方程的拟合。由表 2~4 可以看出,伪一级动力学方程判决系数 R^2 为 0.709~1.000;修正伪一级动力学方程 R^2 为 0.721~0.999;伪二级动力学方程 R^2 为 0.997~1.000。相对而言,伪二级动力学方程能更好地描述 3 种生物

表 2 不同动力学模式对椰壳生物质碳吸附菲的拟合结果

Tab. 2 Fitting Results of Phenanthrene Adsorbed by Coconut Shell Biomass Carbon for Different Kinetics Models

菲工作液质量 浓度/(mg · L ⁻¹)	伪一级动力学方程		修正伪一级动力学方程		伪二级动力学方程		颗粒扩散方程	
	k_1/min^{-1}	R^2	K_1/min^{-1}	R^2	$k_2/10^{-3} \text{ min}^{-1}$	R^2	$k_p/10^{-3} \text{ min}^{-1}$	R^2
0.2	0.230	0.991	0.207	0.994	6.040	0.999	0.037	0.953
0.4	0.209	0.981	0.189	0.977	3.451	0.998	0.063	0.966
0.5	0.147	0.976	0.127	0.986	2.985	0.999	0.079	0.954
0.6	0.298	0.968	0.272	0.955	1.554	0.997	0.124	0.997
0.8	0.316	0.993	0.286	0.989	1.132	0.999	0.191	0.914

表 3 不同动力学模式对含灰分水稻秸秆生物质碳吸附菲的拟合结果

Tab. 3 Fitting Results of Phenanthrene Adsorbed by Rice Straw Biomass Carbon with Ash for Different Kinetics Models

菲工作液质量 浓度/(mg · L ⁻¹)	伪一级动力学方程		修正伪一级动力学方程		伪二级动力学方程		颗粒扩散方程	
	k_1/min^{-1}	R^2	K_1/min^{-1}	R^2	$k_2/10^{-3} \text{ min}^{-1}$	R^2	$k_p/10^{-3} \text{ min}^{-1}$	R^2
0.2	0.196	0.998	0.173	0.995	5.724	0.998	0.036	0.990
0.4	0.190	0.957	0.167	0.970	3.322	0.999	0.071	0.859
0.5	0.233	0.985	0.206	0.994	2.259	1.000	0.101	0.926
0.6	0.166	0.709	0.141	0.721	2.326	0.999	0.119	0.784
0.8	0.300	1.000	0.267	0.999	1.076	0.999	0.192	0.941

表 4 不同动力学模式对去除灰分水稻秸秆生物质碳吸附菲的拟合结果

Tab. 4 Fitting Results of Phenanthrene Adsorbed by Rice Straw Biomass Carbon Without Ash for Different Kinetics Models

菲工作液质量 浓度/(mg · L ⁻¹)	伪一级动力学方程		修正伪一级动力学方程		伪二级动力学方程		颗粒扩散方程	
	k_1/min^{-1}	R^2	K_1/min^{-1}	R^2	$k_2/10^{-3} \text{ min}^{-1}$	R^2	$k_p/10^{-3} \text{ min}^{-1}$	R^2
0.2	0.189	0.967	0.179	0.963	13.770	0.999	0.016	0.989
0.4	0.251	0.948	0.241	0.944	7.539	0.999	0.031	0.960
0.5	0.167	0.920	0.159	0.927	8.096	1.000	0.035	0.807
0.6	0.179	0.892	0.167	0.907	4.857	1.000	0.062	0.746
0.8	0.256	0.886	0.241	0.897	2.952	1.000	0.104	0.813

质碳对菲的吸附过程中的初始快速阶段,表明吸附主要受颗粒内部扩散控制。

综上所述,3种生物质碳材料对菲吸附的伪二级动力学方程的速率常数 k_2 都是随溶液菲初始质量浓度的提高而降低^[21]。如椰壳生物质碳的吸附速率常数 k_2 为 $(1.132 \sim 6.040) \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$,含灰分的水稻秸秆生物质碳吸附速率常数为 $(1.076 \sim 5.724) \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$,而去除灰分的水稻秸秆生物质碳吸附速率常数为 $(2.952 \sim 13.770) \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ 。从吸附速率常数的比较还可以看出,去除灰分的水稻秸秆生物质碳对菲的吸附速率远大于椰壳生物质碳,而含灰分的水稻秸秆生物质碳对菲的吸附速率则远小于椰壳生物质碳。若颗粒扩散方程的拟合曲线不经过原点,该吸附过程主要受颗粒内部扩散控制,但颗粒内部扩散控制不是唯一的速率控制步骤^[22]。因此,可推测去除灰分的水稻秸秆生物质碳

材料对菲的吸附,相对而言明显受到颗粒内部扩散控制,这与生物质碳孔隙结构分析结果一致。另外,生物质碳对菲的吸附强,而且通常表现出明显的非线性特征,除了疏水性物理吸附外,孔隙填充机制以及碳环C—C键特性应该发挥了重要作用。这些有待于通过吸附热力学研究来进一步阐明。由此可见,利用水稻秸秆制备高效、低成本生物质碳吸附剂材料具有很好的应用前景。

3 结 语

(1)去除灰分能够明显提高水稻秸秆生物质碳的比表面积与孔容,从而提高水稻秸秆对菲的吸附能力。3种生物质碳对菲的吸附性能与比表面积大小成正比,即比表面积大者对菲的吸附强,反之对菲的吸附减弱。未经过酸处理的水稻秸秆生物质碳的比表面积较之椰壳生物质碳小,因此对菲的吸附性

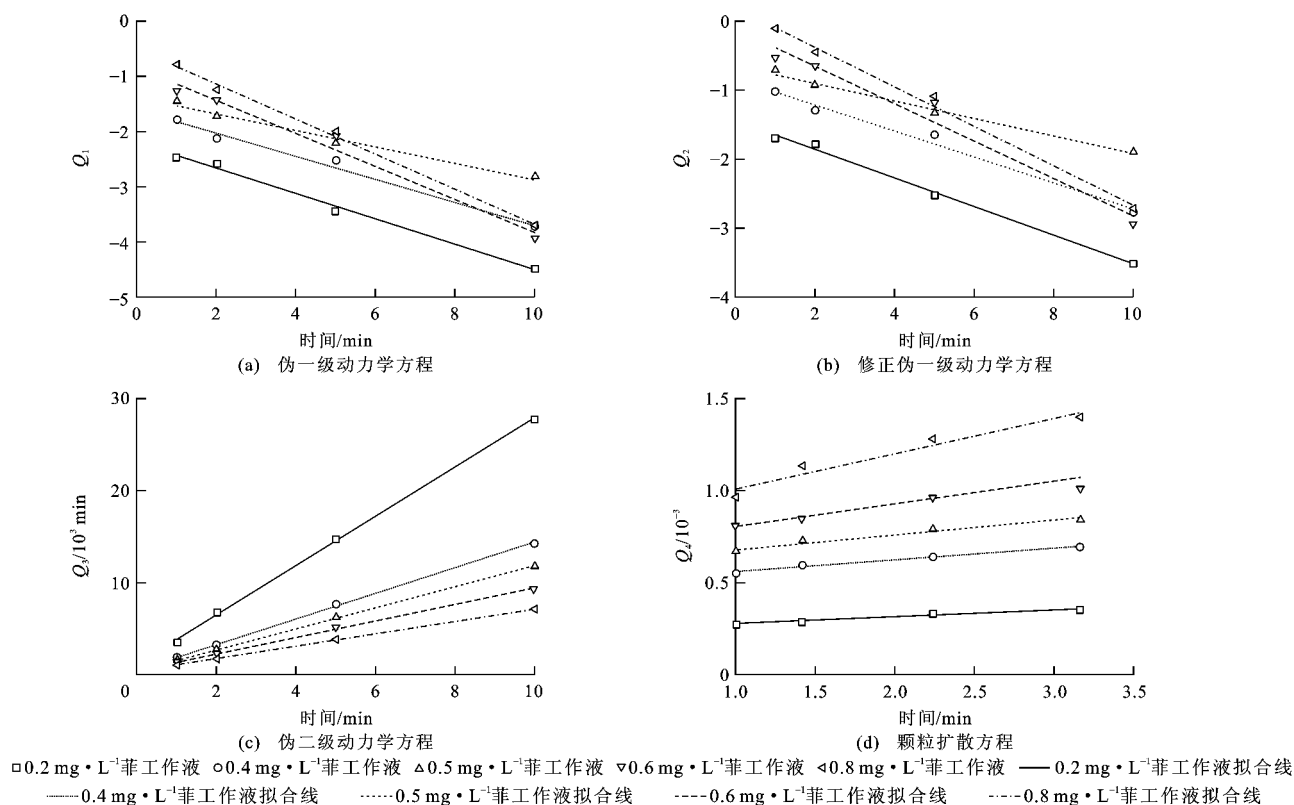


图7 不同动力学模式对椰壳生物质碳吸附菲的拟合线

Fig. 7 Fitting Curves of Phenanthrene Adsorbed by Coconut Shell Biomass Carbon for Different Kinetics Models

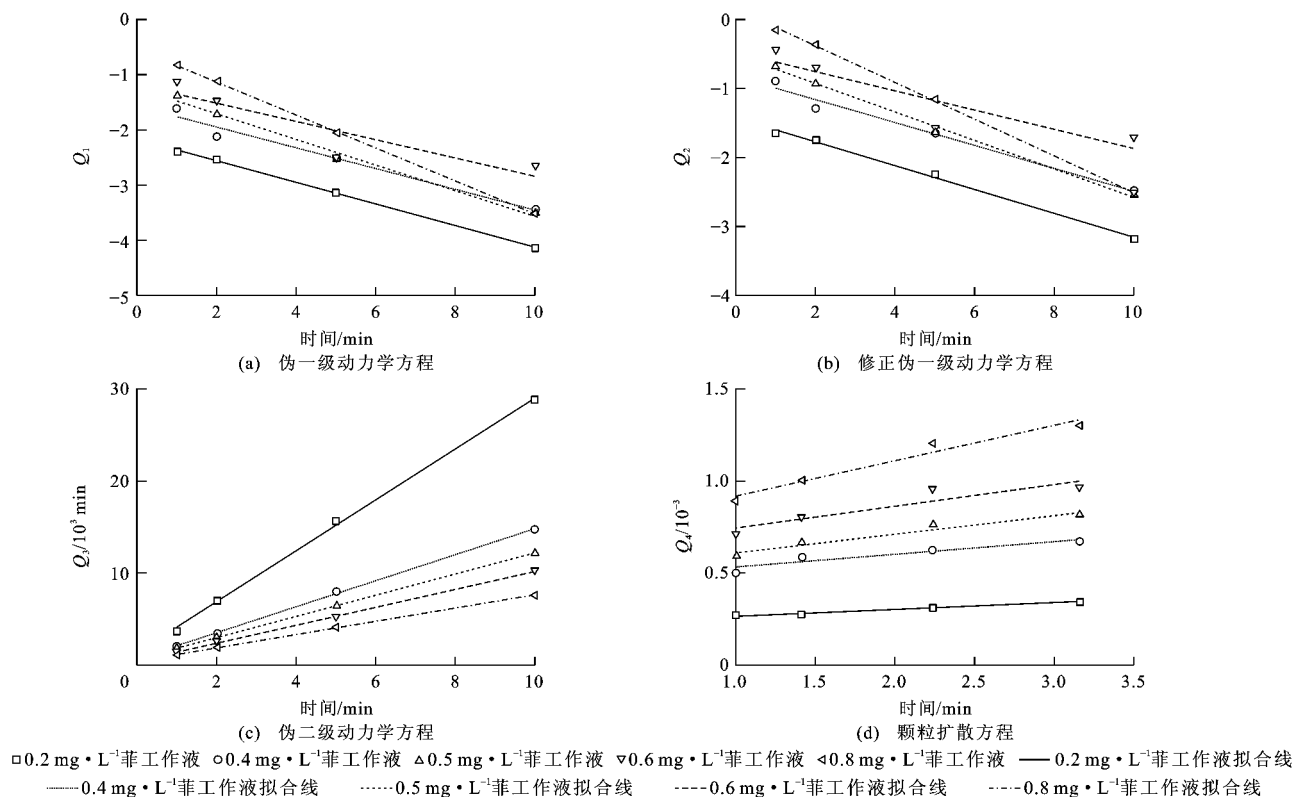


图8 不同动力学模式对含灰分的水稻秸秆生物质碳吸附菲的拟合线

Fig. 8 Fitting Curves of Phenanthrene Adsorbed by Rice Straw Biomass Carbon with Ash for Different Kinetics Models

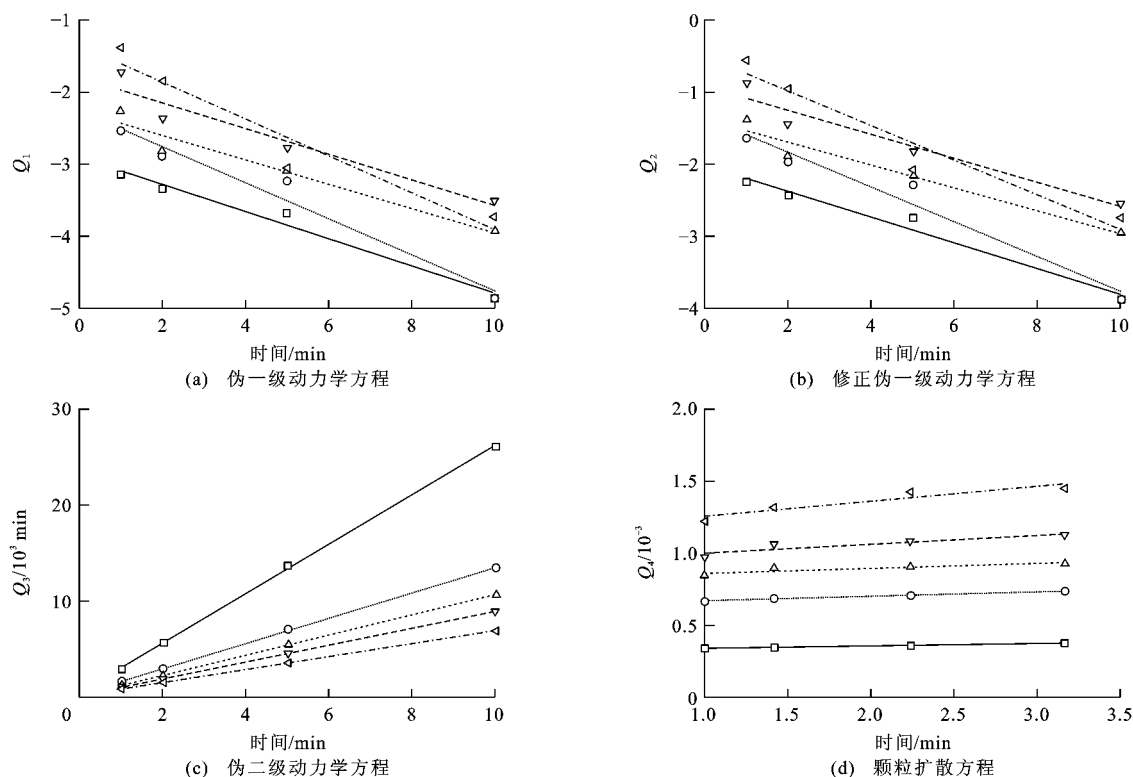


图9 不同动力学模式对去除灰分的水稻秸秆生物质碳吸附菲的拟合线

Fig. 9 Fitting Curves of Phenanthrene Adsorbed by Rice Straw Biomass Carbon Without Ash for Different Kinetics Models

能不如椰壳生物质碳,但经过酸处理的水稻秸秆生物质碳的比表面积明显增加并远大于椰壳生物质碳,因而经过酸处理后对菲的吸附速率也明显增大,远远大于椰壳生物质碳。

(2) 菲工作液在不同初始质量浓度下,生物质碳对菲的吸附动力学曲线呈现相同的趋势,而且生物质碳对菲的吸附是一个快速吸附过程,如20 min之内即可达到吸附平衡。而且,伪二级动力学方程可以较好地描述生物质碳对菲的吸附过程,伪二级吸附速率常数随着菲工作液初始质量浓度的增大而逐渐减小。这表明生物质碳在吸附菲的过程中,颗粒内部扩散是菲吸附速率的主要控制环节。由此可见,经过酸处理的水稻秸秆生物质碳可以作为一种理想的污染土壤修复材料,具有很好的应用前景。

参考文献:

References:

- [1] BRUN G L, VAIDYA O C, LÉGER M G. Atmospheric Deposition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons to Atlantic Canada: Geographic and Temporal Distributions and Trends 1980-2001[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(7): 1941-1948.

- [2] WEBER J W J, VOICE T C, PIRBAZARI M, et al. Sorption of Hydrophobic Compounds by Sediments, Soils and Suspended Solids II: Sorbent Evaluation Studies[J]. Water Research, 1983, 17(10): 1443-1452.
- [3] SORRELL R K, BRASS H J, REDING R. A Review of Occurrences and Treatment of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons in Water[J]. Environment International, 1980, 4(3): 245-254.
- [4] 刘晓华, 吴宏海, 管玉峰, 等. 针铁矿和蒙脱石对菲的吸附解吸行为与热力学研究[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 40-46.
LIU Xiao-hua, WU Hong-hai, GUAN Yu-feng, et al. Study on the Behaviors and Thermodynamics of Sorption and Desorption of Goethite and Turface to Phenanthrene[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 40-46.
- [5] 刘晓华, 吴宏海, 管玉峰, 等. 蒙脱石与滑石矿物对菲吸附-解吸行为的对比研究[J]. 矿物岩石, 2011, 31(3): 6-10.
LIU Xiao-hua, WU Hong-hai, GUAN Yu-feng, et al. Comparison of Sorption-desorption Behaviors of Both Montmorillonite and Talc Minerals for Phenanthrene [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31

- (3):6-10.
- [6] CHIOU C T. Partition and Adsorption of Organic Contaminants in Environmental Systems [M]. Amsterdam: John Wiley and Sons, 2002.
- [7] WEBER J W J, MCGINLEY P M, KATZ L E. A Distributed Reactivity Model for Sorption by Soils and Sediments 1: Conceptual Basis and Equilibrium Assessments[J]. Environmental Science and Technology, 1992, 26(10): 1955-1962.
- [8] XING B S, PIGNATELLO J J. Dual-mode Sorption of Low-polarity Compounds in Glassy Poly (Vinyl Chloride) and Soil Organic Matter[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(3): 792-799.
- [9] CORNELISSEN G, GUSTAFSSON Ö, BUCHELI T D, et al. Extensive Sorption of Organic Compounds to Black Carbon, Coal, and Kerogen in Sediments and Soils: Mechanisms and Consequences for Distribution, Bioaccumulation, and Biodegradation [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(18): 6881-6895.
- [10] 刘世荣. 微生物在多环芳烃降解应用中的机理及其研究趋势[J]. 现代商贸工业, 2008(8): 379-380.
- LIU Shi-rong. Mechanism and Research Trends of Microbial Degradation of PAHs[J]. Modern Business Trade Industry, 2008(8): 379-380.
- [11] 刘玉学, 刘 微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质碳环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.
- LIU Yu-xue, LIU Wei, WU Wei-xiang, et al. Environmental Behavior and Effect of Biomass-derived Black Carbon in Soil: A Review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 977-982.
- [12] 王 丽, 李雪铭, 许 妍. 中国大陆秸秆露天焚烧的经济损失研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 170-175.
- WANG Li, LI Xue-ming, XU Yan. The Economic Losses Caused by Crop Residues Burnt in Open Field in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(2): 170-175.
- [13] 汪海波, 秦元萍, 余 康. 我国农作物秸秆资源的分布、利用与开发策略[J]. 国土与自然资源研究, 2008(2): 92-93.
- WANG Hai-bo, QIN Yuan-ping, YU Kang. Utilization, Distribution and Exploitation Tactics of Crop Stalk Resources in China[J]. Territory and Natural Resources Study, 2008(2): 92-93.
- [14] CHUN Y, SHENG G Y, CHIOU C T, et al. Compositions and Sorptive Properties of Crop Residue-derived Chars [J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(17): 4649-4655.
- [15] NKEDI-KIZZA P, RAO P S C, HORNSBY A G. Influence of Organic Cosolvents on Sorption of Hydrophobic Organic Chemicals by Soils [J]. Environmental Science and Technology, 1985, 19(10): 975-979.
- [16] BRIDGWATER A V. Principles and Practice of Biomass Fast Pyrolysis Processes for Liquids [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999, 51(1/2): 3-22.
- [17] MEIER D, FAIX O. State of the Art of Applied Fast Pyrolysis of Lignocellulosic Materials: A Review [J]. Bioresource Technology, 1999, 68(1): 71-77.
- [18] WANG S L, TZOU Y M, LU Y H, et al. Removal of 3-chlorophenol from Water Using Rice-straw-based Carbon [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(1/2): 313-318.
- [19] 王 宇, 高宝玉, 岳文文, 等. 改性玉米秸秆对水中磷酸根的吸附动力学研究[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 703-708.
- WANG Yu, GAO Bao-yu, YUE Wen-wen, et al. Adsorption Kinetics of Phosphate from Aqueous Solutions onto Modified Corn Residue [J]. Environmental Science, 2008, 29(3): 703-708.
- [20] 舒月红, 贾晓珊. CTMAB-膨润土从水中吸附氯苯类化合物的机理——吸附动力学与热力学[J]. 环境科学学报, 2005, 25(11): 1530-1536.
- SHU Yue-hong, JIA Xiao-shan. The Mechanisms for CTMAB-bentonites to Adsorb CBs from Water in the Adsorption Kinetics and Thermodynamics View [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(11): 1530-1536.
- [21] YANG X Y, AL-DURI B. Kinetic Modeling of Liquid-phase Adsorption of Reactive Dyes on Activated Carbon [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 287(1): 25-34.
- [22] MOHAN S V, RAO N C, KARTHIKEYAN J. Adsorptive Removal of Direct Azo Dye from Aqueous Phase onto Coal Based Sorbents: A Kinetic and Mechanistic Study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 90(2): 189-204.