

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对萘的吸附性能

黄华¹, 王雅雄¹, 唐景春^{1,2,3*}, 朱文英¹

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071; 3. 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071)

摘要: 以玉米秸秆为原料, 在 300、500 和 700℃ 这 3 个温度下烧制生物炭, 使用元素分析仪测定其元素组成, 扫描电镜观测其表面特性, 并采用批量吸附实验研究了生物炭对萘的吸附特性。结果表明, 随烧制温度升高, 玉米秸秆生物炭的碳元素含量从 66.79% 上升到 76.30%, 氢和氧元素从 4.92% 和 19.25% 下降到 3.18% 和 9.53%; H/C、O/C 和 (O+N)/C 值降低, 芳香性和疏水性增强, 极性降低。扫描电镜结果显示玉米秸秆生物炭主要是片状颗粒, 孔隙少, 生物炭表面粗糙程度随温度升高增加。对萘的动力学吸附曲线符合 Lagergren 准二级模型, 初始吸附速率与平衡吸附量随烧制温度上升而上升; 等温吸附曲线可用 Freundlich 模型进行描述, 生物炭的吸附能力随烧制温度升高而增强, 非线性先下降后上升。玉米秸秆生物炭表面形态上具有显著特点, 且不同烧制温度对其元素组成、表面特征和对萘的吸附行为有显著影响。

关键词: 玉米秸秆; 生物炭; 温度; 吸附; 萘

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1884-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.036

Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene

HUANG Hua¹, WANG Ya-xiong¹, TANG Jing-chun^{1,2,3}, ZHU Wen-ying¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, Tianjin 300071, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Tianjin 300071, China)

Abstract: Biochar was made from maize stalk under three different temperatures of 300, 500 and 700℃. The elemental composition of biochar was measured by elemental analyzer. Scanning electron microscope (SEM) was used to measure the surface morphology. Sorption of naphthalene to biochar was researched by batch sorption experiments. Results showed that, with the increase of temperature, C content increased from 66.79% to 76.30%, H and O contents decreased from 4.92% and 19.25% to 3.18% and 9.53%, respectively; H/C, O/C, (O+N)/C, aromaticity and hydrophobicity increased, and polarity decreased. SEM results showed that maize stalk biochar was platy particles, and its roughness of surface increased with increasing temperature. The sorption of naphthalene on biochar followed the Lagergren pseudo-second order dynamic sorption model. Initial sorption rate and equilibrium sorption capacity increased as preparation temperatures increased at the same initial concentration of naphthalene. The isotherm sorption behavior can be described by the Freundlich model, which indicated that, as pyrolysis temperature increased, the sorption capacity of biochar increased, and nonlinearity increased first and then decreased. Biochar derived from maize stalk had distinct features when compared with other feedstocks, and its elemental composition, surface features and sorption behaviors were significantly influenced by pyrolysis temperature.

Key words: maize stalk; biochar; temperature; sorption; naphthalene

生物炭 (biochar) 是一种在限氧和相对低温 (<700℃) 的条件下, 由生物质原料热解产生的富碳、细颗粒、多孔材料^[1]。为减少大气 CO₂ 浓度并缓解温室效应, 生物炭首先作为碳固定载体而被提出^[2, 3]。同时, 由于大的表面积、多孔结构和特殊的表面组成, 生物炭在土壤保水^[4, 5]、固持营养元素^[6, 7]、吸附固定重金属^[8~10] 和有机污染物^[11~13] 及抑制温室气体的释放^[14, 15] 等方面都表现出了足够的潜力, 因而受到越来越多环境相关研究者的重

视。然而, 无论是生物炭的稳定性还是吸附能力, 都与生物炭本身组成、结构和性质高度相关, 并受到原料差异^[16]、制备方法^[17] 和烧制温度^[18, 19] 等因素的影响。

收稿日期: 2013-08-22; 修订日期: 2013-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31270544); 教育部博士点基金 (博导类) 项目 (20120031110015); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2013AA06A205); 天津市科技支撑重点项目 (11ZCGYSF01400)

作者简介: 黄华 (1987~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为固体废物处理与处置, E-mail: Volinton@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: tangjch@nankai.edu.cn

2005 年,我国秸秆总产量高达 6~8 亿 t,其中玉米秸秆产量位居第二,仅略低于水稻秸秆^[20],极具循环利用潜力。因此,对不同方法、不同制备条件下的玉米秸秆生物炭的组成、结构和性质的研究是生物炭研究的一个重要方面。Lee 等^[21]研究了 450℃ 快速热解和 700℃ 气化制备玉米生物炭的 CEC 特征。Yuan 等^[22]对包含玉米秸秆在内的不同生物炭限氧热解过程碱的产生进行了研究。Oliveira 等^[19]和 Mumme 等^[23]则进行了玉米青储饲料水热合成法制备玉米生物炭的研究。生物炭对 PAHs 的吸附同样是一个研究热点。Sun 等^[24]研究了脱灰对生物炭吸附菲的影响。文献[25~30]分别做了橘子皮、松针和水稻秸秆对萘、1-萘酚和菲的吸附研究。陈宁等^[31]研究了滇池污泥生物炭对菲的吸附。然而,关于玉米秸秆生物炭对萘吸附的研究还鲜见报道。

本研究以玉米秸秆为原料,用限氧热解法在 300~700℃ 下制备了秸秆生物炭;用元素分析(CHNO)和电镜扫描两种方法表征生物炭的组成与结构;采用批量平衡法测定了生物炭对萘这种典型的 PAHs 的吸附动力学和等温吸附平衡,并使用 3 种吸附动力学模型和 3 种等温吸附模型进行拟合,以期筛选到能够准确反映玉米秸秆生物炭对萘的动力学方程及等温吸附模型。并进一步探讨了不同烧制温度对玉米秸秆生物炭的性质及对萘吸附的影响,以期为其在环境领域的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品与试剂

玉米秸秆采自天津周边农村,经自来水洗净、风干和破碎后,转入粉碎机处理 5 min,所得粉末置于塑封袋中备用。萘为分析纯,纯度>99%,摩尔质量、水中溶解度(C_s , 25℃)、辛醇/水分配系数($\lg K_{ow}$)、分子面积(根据范德华半径)和分子体积分别为 128.2 g·mol⁻¹、32.0 mg·L⁻¹、3.30、0.732 nm² 和 0.252 nm³。

1.2 生物炭的制备方法

生物炭的烧制采用限氧控温炭化法,具体步骤如下:称取 20 g 玉米秸秆碎末于坩埚中,盖好盖子并用锡箔纸包裹后放入马弗炉,于一定温度(300、500 和 700℃)下炭化 3 h,自然冷却至室温后取出称重,计算炭化产率。将炭化产物研磨并过 60 目筛,用 300 mL 1 mol·L⁻¹ 盐酸处理 4 h 以去除碳酸钙等灰分物质,抽滤,用蒸馏水洗涤至洗液呈中性后放入

80℃ 烘箱烘 24 h,转入塑封袋中保存备用,标记为 MS300、MS500 和 MS700(MS 代表玉米秸秆,数字代表炭化温度)。

1.3 生物炭表征方法

称取 400 mg 粉碎后的玉米秸秆、炭化后未酸洗的生物炭以及 MS300、MS500 和 MS700 生物炭于坩埚中,放于 750℃ 马弗炉中敞口灼烧 4 h 得到玉米秸秆和生物炭的灰分,根据灼烧前后质量平衡计算出灰分含量。用 CHN 元素分析仪(北京利曼科技有限公司,EA3000)测定 MS300、MS500 和 MS700 中的 C、H 和 N 的百分含量,O 元素含量通过差减法求得。样品平行测定 3 次,用平均值计算各吸附剂中有机质组分的 H/C 和 (O+N)/C 的原子比。

取适量玉米秸秆生物炭分散于含有导电胶的铜柱表面,对样品表面进行喷金处理,然后使用日本日立公司 S-3500N 型扫描电镜(SEM)进行表面形貌分析。

1.4 吸附实验

采用批量平衡法测定生物炭对萘的吸附动力学曲线及吸附等温线,具体步骤如下:以甲醇作为溶剂配制 2 000 mg·L⁻¹ 的萘储备液,于 4℃ 下避光保存。移取 30 mL 背景溶液和萘储备液配置的 8 mg·L⁻¹ 萘溶液于装有 50.0 mg 不同温度下制得的生物炭的样品瓶中,混匀后放入摇床于 20℃ ± 0.5℃、分别在 150 r·min⁻¹ 避光条件下振荡 1、2、4、6、9、12、18 和 24 h,结束后以 2 500 r·min⁻¹ 离心并取上清液。用紫外分光光度计以背景溶液为空白,278 nm 波长下测定。以背景溶液加生物炭及 8 mg·L⁻¹ 萘溶液不加生物炭作为对照,每个样点做 2 个重复。背景溶液是 5 mmol·L⁻¹ CaCl₂ 与 200 mg·L⁻¹ HgCl₂ 混合溶液,CaCl₂ 保证溶液一定离子强度,HgCl₂ 抑制微生物作用。

称取 50.0 mg 不同温度下制得的生物炭于样品瓶中,分别加入 30 mL 不同初始浓度(MS300 和 MS500 的初始浓度范围为 2、4、6、8、10 和 12 mg·L⁻¹,MS700 为 2、6、8、10、12、14 和 16 mg·L⁻¹)的萘溶液。混匀后放入摇床于 20℃ ± 0.5℃、150 r·min⁻¹ 避光振荡 24 h,结束后 2 500 r·min⁻¹ 离心并取上清液测定。以背景溶液加生物炭和不同浓度萘溶液不加生物炭作为对照,每个样点两个重复。

1.5 数据处理

产率、灰分和元素组成数据使用 SPSS 18 软件进行方差分析,Turkey 检验。吸附动力学实验数据

采用 Lagergren 准一级吸附动力学模型、Lagergren 准二级吸附动力学模型与颗粒内扩散模型进行模拟. 等温吸附实验数据采用 Henry、Freundlich 与双模式模型进行模拟. 实验所得数据使用 Origin 8.0 进行拟合.

2 结果与讨论

2.1 玉米秸秆生物炭的组成

生物炭产物产率和元素组成见表 1. 结果表明, 生物炭产率从 300℃ 的 49.33% 下降为 700℃ 的 28.32%; 随着秸秆中有机质不断分解, 生物炭中灰分则不断积累, 未酸洗和酸洗后灰分分别从 14.12% 和 7.15% (300℃) 上升为 21.40% 和 10.78% (700℃). 与已报道的相同烧制温度的松针、橘子皮和水稻秸秆生物炭相比较, 玉米秸秆生物炭灰分含量低于松针和水稻秸秆生物炭, 较橘子皮生物炭高^[25, 26, 28]. 不同烧制温度下, 酸洗均使灰分减少了 50% 以上, 表明酸洗对于去除玉米秸秆生

物炭灰分的效果明显.

生物炭元素组成的变化受烧制温度的影响也较大: 碳元素含量随烧制温度升高而升高, 即从 66.79% (300℃) 上升到 76.30% (700℃). 氧元素含量下降, 即从 19.25% (300℃) 下降到 9.53% (700℃), 说明限氧热解过程是有机组分富碳、去极性官能团的过程. 氢元素含量在 300℃ 到 500℃ 显著下降 ($P < 0.05$), 而 MS500 和 MS700 的差异不显著 ($P > 0.05$).

原子比 H/C、O/C 和 (O + N)/C 可以分别表征生物炭样品的芳香性、亲水性与极性^[32], 其中 O/C 与 (O + N)/C 随烧制温度的升高而下降, 表明玉米秸秆生物炭的亲水性和极性随烧制温度的上升而降低. H/C 从 0.88 (300℃) 下降到 0.53 (500℃), 表明生物炭的芳香性显著增大 ($P < 0.05$), 而 500℃ 与 700℃ 下制得的样品芳香性则没有显著变化 ($P > 0.05$). 生物炭极性降低而芳香性增高, 说明其从“软碳质”过渡到了“硬碳质”^[33].

表 1 玉米秸秆生物炭的产率、灰分含量、元素组成和原子比¹⁾

样品名称	处理温度 /℃	产率 /%	灰分/%		C、H、N、O 所占质量分数/%				原子比		
			未酸洗	酸洗	C	H	N	O	H/C	O/C	(O + N)/C
MS300	300	49.33 ^a	14.12 ^a	7.15 ^a	66.79 ^a	4.92 ^a	1.88	19.25 ^a	0.88 ^a	0.22 ^a	0.24 ^a
MS500	500	32.53 ^b	20.84 ^b	10.56 ^b	72.12 ^b	3.18 ^b	—	14.15 ^b	0.53 ^b	0.15 ^b	0.15 ^b
MS700	700	28.32 ^c	21.40 ^c	10.78 ^b	76.30 ^c	3.38 ^b	—	9.53 ^c	0.53 ^b	0.09 ^c	0.09 ^c

1) 表中同列内不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 生物炭的扫描电镜

扫描电镜结果如图 1 所示. 图 1(a)、1(b) 显

示, 与一些其他植物原料相较, 玉米秸秆天然孔隙较少. 图 1(c) 显示由此制得的生物炭孔隙也很少, 主

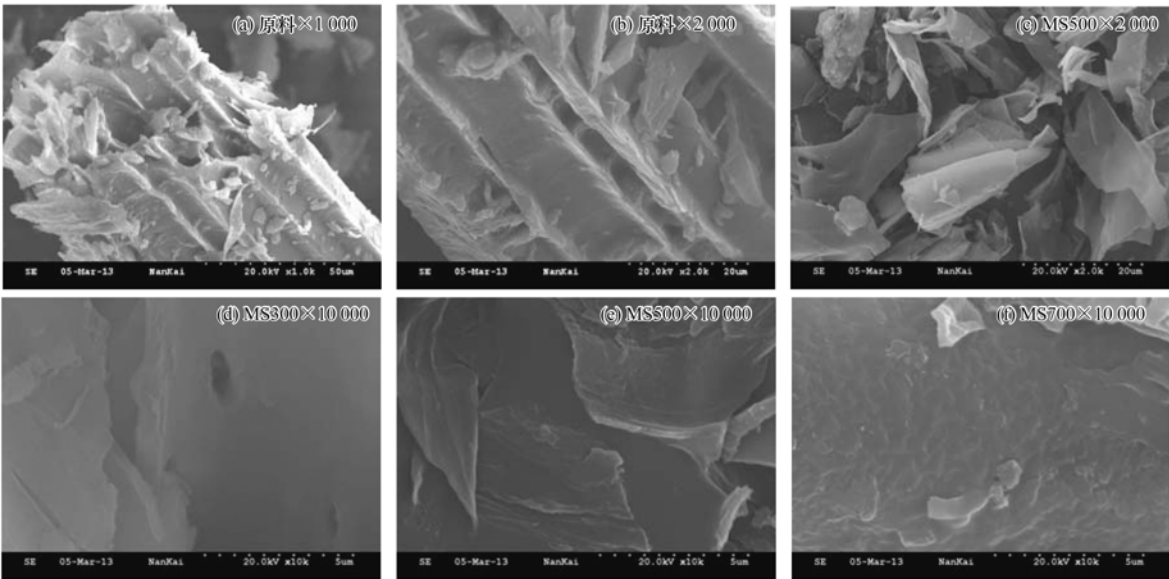


图 1 玉米秸秆生物炭样品扫描电镜
Fig. 1 SEM images of maize stalk biochar

要是一些碎片颗粒^[34, 35]。其次,随着热解温度的升高,玉米秸秆生物炭表面形貌发生了较大的变化。由图 1(d)~1(f)看出,MS300 表面相对比较光滑,没有明显的纹理。MS500 表面已经开始显示出纹理,但程度浅且没有明显的形状特征,而 MS700 纹理进一步加深并形成明显的鱼鳞形状。至于热解温度对颗粒尺寸的影响,本研究中未达到扫描电镜定性判定的水平。

2.3 玉米秸秆生物炭对萘的吸附动力学

玉米生物炭对萘的吸附动力学曲线如图 2(a)所示。吸附在 24 h 时基本达到平衡,此时各生物炭对萘的饱和吸附量的大小为 MS700 > MS500 >

MS300。含有快吸附和慢吸附的两相吸收过程是一个普遍存在的现象,是由生物炭表面的活性位点随时间饱和造成的。本实验中,吸附开始的 1 h,各生物炭对萘的吸附都表现为快吸附过程,MS300、MS500 和 MS700 分别吸附了饱和吸附量的 46.49%、57.88% 和 89.49%。随后是慢吸附过程。其中 MS700 的慢吸附过程较短,在 6 h 结束;而 MS300 和 MS500 的慢吸附过程历时较长,在 18 h 时结束。此时,各生物炭分别吸附了饱和吸附量的 99.28%、97.11% 和 98.16%。

使用 3 种吸附动力学曲线模型进行拟合,结果如表 2 和图 2(c)、2(d)。Lagergren 准一级动力学

表 2 萘在玉米秸秆生物炭上的吸附动力学回归参数¹⁾

样品名称	$q_{e,exp}$	Lagergren 准一级动力学模型 ²⁾			Lagergren 准二级动力学模型 ³⁾			颗粒内扩散模型 ⁴⁾			
		$q_{e,cal}$	k_1	r^2	$q_{e,cal}$	k_2	r^2	$q_{e,cal}$	k_{id}	C	r^2
MS300	3.11	1.49(0.16)	0.17(0.02)	0.912 2	3.24(0.03)	0.24(0.02)	0.999 1	3.34	0.37(0.05)	1.53(0.15)	0.786 1
MS500	3.86	1.95(0.14)	0.15(0.01)	0.963 4	4.00(0.06)	0.17(0.03)	0.996 2	4.00	0.41(0.02)	1.95(0.07)	0.954
MS700	4.7	0.44(0.05)	0.15(0.01)	0.935 4	4.73(0.01)	1.07(0.14)	0.999 9	4.77	0.11(0.01)	4.21(0.04)	0.830 9

1) 括号内为标准差; 2) Lagergren 准一级动力学方程: $\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - k_1 t / 2.303$, 式中 q_t 、 q_e 分别为 t 时刻与平衡时生物炭对萘的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; k_1 是吸附速率常数, 单位分别为 h^{-1} ; r^2 为相关系数; 3) Lagergren 准二级动力学方程: $t/q_t = 1/k_2 q_e^2 + t/q_e$, 其中 k_2 为吸附速率常数, $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$; 4) 颗粒内扩散方程: $q_t = k_{id} t^{1/2} + C$, 其中 k_{id} 为吸附速率常数, $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$; C 为常数; exp 表示实验值, cal 表示计算值

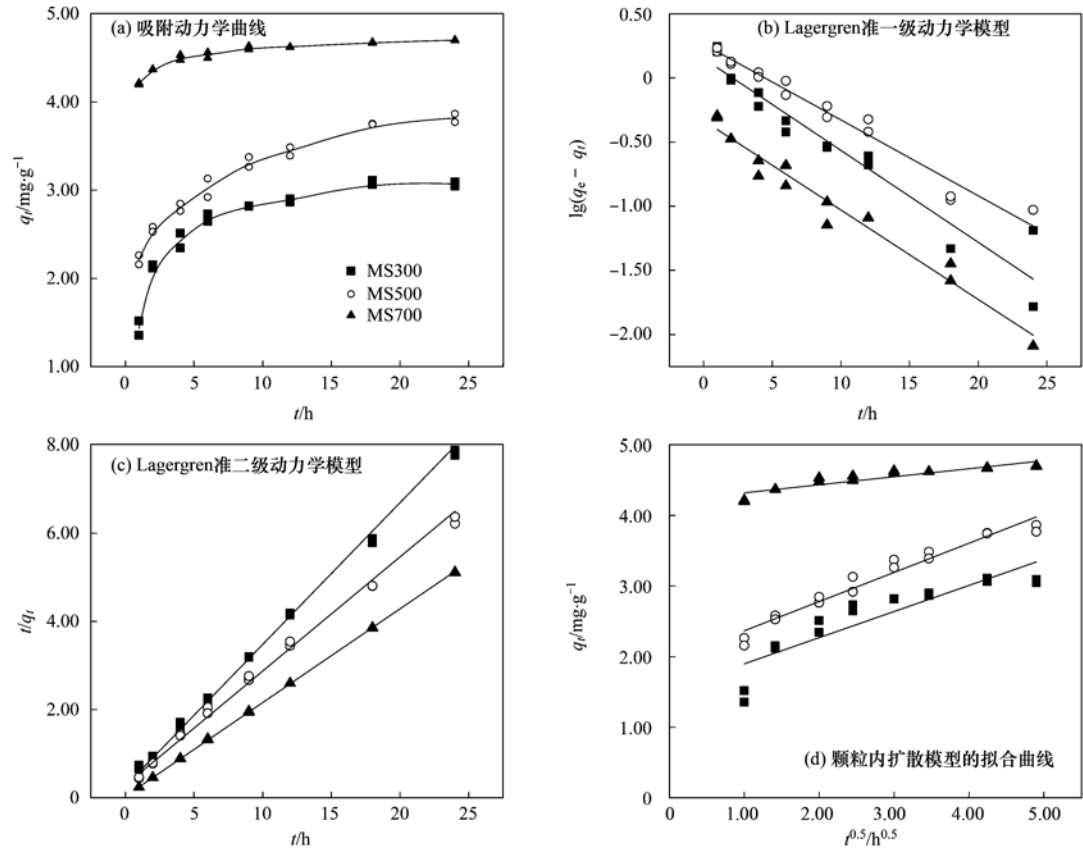


图 2 玉米秸秆生物炭对萘的吸附动力学曲线及拟合曲线

Fig. 2 Sorption kinetic and fitted curves of naphthalene by maize stalk biochar

模型计算出的平衡浓度与实验值相差较大,其中 MS700 更是相差近 10 倍,说明该模型不适合用来说明玉米秸秆生物炭对萘的吸附. 颗粒物扩散模型计算结果与实验值较为接近,但相关系数低,其中 MS300 与 MS700 的相关系数不足 0.85. MS700 的吸附速率常数 k_{id} 最低与其早达到吸附平衡并不矛盾. 原因在于颗粒物扩散模型只反映了萘在生物炭颗粒内的扩散过程,可能还有其他的控制因素未包含在内,如孔扩散和膜扩散. 这一点表现在起点和终点的拟合效果不好^[36]. Lagergren 准二级动力学模型的拟合结果最好. 可以看出,当萘的初始浓度

一定时,玉米秸秆生物炭吸附量与初始吸附速率会随烧制温度升高而明显升高,与大豆秸秆和花生壳对三氯乙烯的吸附结果相同^[31]; 3 种样品的 k_2 值变化明显,说明对萘的吸附过程主要受快反应控制.

2.4 玉米秸秆生物炭质对萘的吸附等温特性

玉米秸秆生物炭对萘的吸附等温曲线如图 3 所示. 随烧制温度升高,溶液中萘的平衡浓度降低,平衡吸附量增大.

使用 Freundlich、Henry 和双模式这 3 种方程对实验数据进行拟合,结果见图 3(b)~3(d)和表 3. Henry 模型对 MS500 的拟合效果最好,而对 MS700 的

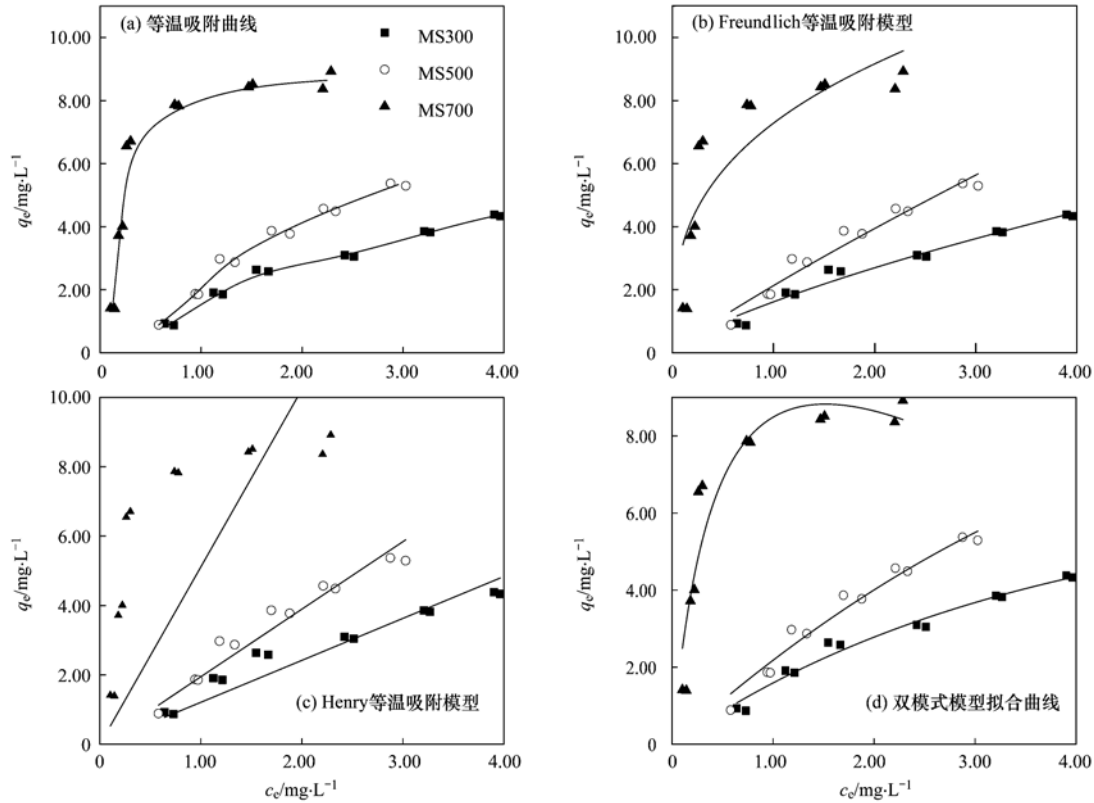


图 3 玉米秸秆生物炭质对萘的等温吸附曲线及拟合曲线
Fig. 3 Sorption isotherms and fitted curves of naphthalene by maize stalk biochar

表 3 玉米秸秆生物炭对萘的等温吸附模型参数¹⁾

Table 3 Isothermal sorption parameters of naphthalene on maize stalk biochar					
样品名称	Freundlich 等温吸附模型 ^{a)}			Henry 等温吸附方程 ^{b)}	
	k_f	n	r^2	k_h	r^2
MS300	1.62 ± 0.09	0.73 ± 0.05	0.97	1.21 ± 0.05	0.89
MS500	2.13 ± 0.13	0.89 ± 0.08	0.95	1.95 ± 0.06	0.95
MS700	7.28 ± 0.47	0.33 ± 0.07	0.72	5.12 ± 0.83	-0.41
样品名称	双模式模型				r^2
	k_p	q_m	b		
MS300	-45.729 ± 8234.734	$(13.05 \pm 4494.04) \times 10^3$	0.01 ± 0.64		0.96
MS500	0.423 ± 3.283	18.19 ± 69.63	0.12 ± 0.31		0.97
MS700	-1.89 ± 1.91	15.49 ± 6.19	2.03 ± 1.08		0.85

1) Freundlich 等温吸附方程: $q_e = k_f c_e^n$, 其中 q_e 为吸附达到平衡时生物炭对萘的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; k_f 为 Freundlich 吸附常数, $[(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})^n]$; c_e 为吸附达平衡时溶液中萘的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; n 为非线性指数; Henry 等温吸附方程: $q_e = k_h c_e$, 其中 k_h 为 Henry 吸附平衡常数, $\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$; 双模式模型: $q_e = k_p c_e + q_m b c_e / (1 + b c_e)$, 其中 k_p 为分配平衡常数, $\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$; q_m 为单层吸附的饱和吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; b 为吸附结合能系数, $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$

拟合效果最差,相关系数为负值说明该模型不适合描述 MS700 对萘的吸附过程. 双模式模型拟合出的曲线的相关系数最好,但由于该模型的参数多,模型不稳定,拟合参数的误差极大,超过参数本身. 值得注意的是,对于 MS700 而言,双模式模型有最好的相关系数. 此外,与 MS300 和 MS500 的拟合参数比较,MS700 的拟合参数误差明显小得多. Freundlich 模型适用于非均匀表面的多分子层吸附过程,其对 MS300 和 MS500 模拟的相关系数超过 0.95 以上,但对 MS700 的相关系数差,为 0.72. 综合考虑, Freundlich 模型最适合描述生物炭对萘的吸附过程.

随烧制温度升高,样品吸附能力增强, k_f 从 1.62 上升至 7.28,与生物炭的芳香性和表面粗糙程度变化一致,与亲水性和极性变化相反. n 从 0.732 (MS300) 上升至 0.89 (MS500),之后降至 0.33 (MS700),说明吸附过程的非线性程度随烧制温度上升呈现先下降后上升的变化,这与 Henry 模型的拟合效果相一致(非线性程度越强, Henry 模型的相关系数越小),但与其他研究不同^[24, 25].

3 结论

(1)烧制温度升高,玉米秸秆生物炭的产率降低,灰分含量上升;元素组成中碳含量升高,氮与氧元素含量降低,氢含量先上升后下降,芳香性增强,亲水性和极性降低;样品表面随烧制温度升高而粗糙程度增强.

(2)对萘的吸附动力学符合 Lagergren 准二级动力学模型,饱和吸附量与初始吸附速率随样品烧制温度升高而增大,且此吸附过程主要受快反应控制.

(3)对萘的等温吸附线符合 Freundlich 模型,吸附能力随烧制温度升高而增强,吸附过程的非线性程度先上升后下降.

参考文献:

- [1] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: an introduction [A]. In: Biochar for Environmental Management: Science and Technology[C]. Routledge, 2009. 1-10.
- [2] Lehmann J. A handful of carbon [J]. Nature, 2007, **447** (7141): 143-144.
- [3] 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 等. 生物炭碳封存技术研究进展 [J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3327-3333.
- [4] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35** (4): 219-230.
- [5] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究 [J]. 中国农学通报, 2011, **27**(24): 207-213.
- [6] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. Plant and Soil, 2010, **333**(1-2): 117-128.
- [7] Yao Y, Gao B, Chen J J, et al. Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(15): 8700-8708.
- [8] 安增莉, 侯艳伟, 蔡超, 等. 水稻秸秆生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 [J]. 环境化学, 2011, **30**(11): 1851-1857.
- [9] 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 等. 土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 [J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3716-3721.
- [10] Inyang M, Gao B, Yao Y, et al. Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass [J]. Bioresource Technology, 2012, **110**: 50-56.
- [11] Chai Y Z, Currie R J, Davis J W, et al. Effectiveness of activated carbon and biochar in reducing the availability of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans in soils [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(2): 1035-1043.
- [12] Xu R K, Xiao S C, Yuan J H, et al. Adsorption of methyl violet from aqueous solutions by the biochars derived from crop residues [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(22): 10293-10298.
- [13] Ahmad M, Lee S S, Rajapaksha A U, et al. Trichloroethylene adsorption by pine needle biochars produced at various pyrolysis temperatures [J]. Bioresource Technology, 2013, **143**: 615-622.
- [14] Cornelissen G, Rutherford D W, Arp H P H, et al. Sorption of pure N₂O to biochars and other organic and inorganic materials under anhydrous conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(14): 7704-7712.
- [15] Wang C, Lu H H, Dong D, et al. Insight into the effects of biochar on manure composting: evidence supporting the relationship between N₂O emission and denitrifying community [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(13): 7341-7349.
- [16] Cantrell K B, Hunt P G, Uchimiya M, et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar [J]. Bioresource Technology, 2012, **107**: 419-428.
- [17] Sun K, Ro K, Guo M X, et al. Sorption of bisphenol A, 17 alpha-ethinyl estradiol and phenanthrene on thermally and hydrothermally produced biochars [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(10): 5757-5763.
- [18] Al-Wabel M I, Al-Omran A, El-Naggar A H, et al. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes [J]. Bioresource Technology, 2013, **131**: 374-379.
- [19] Oliveira I, Blohse D, Ramke H G. Hydrothermal carbonization of agricultural residues [J]. Bioresource Technology, 2013, **142**: 138-146.

- [20] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报, 2007, **52**(15): 1826-1831.
- [21] Lee J W, Kidder M, Ewans B R, *et al.* Characterization of biochars produced from cornstovers for soil amendment [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(20): 7970-7974.
- [22] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 3488-3497.
- [23] Mumme J, Echervogt L, Pielert J, *et al.* Hydrothermal carbonization of anaerobically digested maize silage [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(19): 9255-9260.
- [24] Sun K, Kang M J, Zhang Z Y, *et al.* Impact of deashing treatment on biochar structural properties and potential sorption mechanisms of phenanthrene [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(20): 11473-11481.
- [25] Chen B L, Chen Z M. Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures[J]. Chemosphere, 2009, **76**(1): 127-133.
- [26] 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.
- [27] 陈宝梁, 周丹丹, 朱利中, 等. 生物碳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.
- [28] 陈再明, 陈宝梁, 周丹丹. 水稻秸秆生物碳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.
- [29] Chen Z M, Chen B L, Chiou C T. Fast and slow rates of naphthalene sorption to biochars produced at different temperatures[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(20): 11104-11111.
- [30] Chen Z M, Chen B L, Zhou D D, *et al.* Bisolute sorption and thermodynamic behavior of organic pollutants to biomass-derived biochars at two pyrolytic temperatures [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(22): 12476-12483.
- [31] 陈宁, 吴敏, 许菲, 等. 滇池底泥制备的生物炭对菲的吸附-解吸[J]. 环境化学, 2011, **30**(12): 2026-2031.
- [32] Chen B L, Johnson E J, Chefetz B, *et al.* Sorption of polar and nonpolar aromatic organic contaminants by plant cuticular materials: role of polarity and accessibility [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(16): 6138-6146.
- [33] Gunasekara A S, Simpson M J, Xing B S. Identification and characterization of sorption domains in soil organic matter using structurally modified humic acids[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(5): 852-858.
- [34] Ahamad M, Lee S S, Oh S E, *et al.* Modeling adsorption kinetics of trichloroethylene onto biochars derived from soybean stover and peanut shell wastes[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(12): 8364-8373.
- [35] 张继义, 蒲丽君, 李根. 秸秆生物碳质吸附剂的制备及其吸附性能[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(增刊2): 104-109.
- [36] El-Ashtoukhy E S Z, Amin N K, Abdelwahab O. Removal of lead (II) and copper (II) from aqueous solution using pomegranate peel as a new adsorbent[J]. Desalination, 2008, **223**(1-3): 162-173.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行