

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 ..... 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子浓度特征分析 ..... 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 ..... 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM<sub>2.5</sub> 化学组成与时空分布特征 ..... 云慧,何凌燕,黄晓峰,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 ..... 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 ..... 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 ..... 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 ..... 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 ..... 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 ..... 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 ..... 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 ..... 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 ..... 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 ..... 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 ..... 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 ..... 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 ..... 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 ..... 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 ..... 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 ..... 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 ..... 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 ..... 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 ..... 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 ..... 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除磷影响因素及机制研究 ..... 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 ..... 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 ..... 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的  $\gamma$  辐照还原降解研究 ..... 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 ..... 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 ..... 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 ..... 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 ..... 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 ..... 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 ..... 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪助(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 ..... 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 ..... 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 ..... 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 ..... 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 ..... 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 ..... 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 ..... 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 ..... 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 ..... 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 ..... 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 ..... 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 ..... 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 ..... 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 ..... 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 ..... 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 ..... 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征 ..... 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 ..... 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 ..... 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 ..... 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 ..... 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 的脱除性能 ..... 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 ..... 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 ..... 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 ..... 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 ..... 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

# 不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响

蒋田雨<sup>1,2</sup>, 姜军<sup>2</sup>, 徐仁扣<sup>2\*</sup>, 周立祥<sup>1</sup>, 王世梅<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 研究了添加花生秸秆炭和稻草炭对 2 种可变电荷土壤的 pH 和吸附 Pb(II) 的影响, 结果表明, 添加生物质炭使土壤 pH 提高了 1.04 ~ 3.00 个单位, 且土壤 pH 增加幅度随生物质炭制备温度的升高而增加. 等温吸附实验的结果表明, 添加生物质炭增加了 Pb(II) 在可变电荷土壤表面的吸附量, 当 Pb(II) 初始浓度为  $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, Pb(II) 的吸附量提高了 12.6% ~ 57.6%. 土壤对 Pb(II) 的吸附量随体系 pH 升高而增加. Freundlich 方程和 Langmuir 方程可以很好地拟合添加生物质炭后 2 种土壤对 Pb(II) 的吸附等温线, 且 Freundlich 方程拟合效果更好,  $r$  值均在 0.94 以上. 从 Freundlich 和 Langmuir 方程中表征吸附容量的  $k$  和  $Q_m$  结果可以看出, 花生秸秆炭促进 Pb(II) 吸附的效果优于稻草炭, 400°C 下制备的生物质炭促进 2 种土壤吸附 Pb(II) 的效果优于 300°C 和 500°C 下制备的生物质炭. 解吸实验结果表明, 添加秸秆炭处理土壤表面吸附 Pb(II) 的解吸量高于对照处理, 但解吸量远低于吸附量, 说明生物质促进土壤吸附 Pb(II) 的机制涉及静电吸附和非静电吸附.

**关键词:** 制备温度; 生物质炭; 可变电荷土壤; Pb(II); pH; 吸附/解吸

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1598-07

## Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils

JIANG Tian-yu<sup>1,2</sup>, JIANG Jun<sup>2</sup>, XU Ren-kou<sup>2</sup>, ZHOU Li-xiang<sup>1</sup>, WANG Shi-mei<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Effects of incorporation of the biochars generated from rice straw and peanut straw at different temperatures on soil pH and Pb(II) adsorption were investigated with two variable charge soils. The soil pH increased by 1.04-3.00 units, and the increase in soil pH increased with the rise of pyrolysis temperature of the biochar. Results from adsorption isotherm experiments indicated that the incorporation of the biochar enhanced the adsorption of Pb(II) by two soils. The adsorption of Pb(II) was increased by 12.6% - 57.6%, when the initial concentration of Pb(II) is  $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ . The adsorption also increased with rising pH. Freundlich and Langmuir equations can be used to fit the adsorption isotherms of Pb(II), but the Freundlich equation fitted the adsorption data better, the  $r$ -values are above 0.94. Soils incorporated with peanut straw char have a greater adsorption capacity for Pb(II) than these incorporated with rice straw char as predicted by the parameters of  $k$  and  $Q_m$  in Freundlich and Langmuir equations, respectively. The biochars generated at 400°C have a greater enhancement on Pb(II) adsorption by soils than 300°C and 500°C. Desorption results showed that the desorption of Pb(II) for the treatments with biochar added was greater than that for the control, but the amount of desorbed Pb(II) was much lower than that of adsorbed Pb(II). These results suggested that the enhanced adsorption of Pb(II) by incorporation of the biochars involved at least two mechanisms; electrostatic adsorption and non-electrostatic adsorption.

**Key words:** pyrolysis temperature; biochar; variable charge soils; Pb(II); pH; adsorption and desorption

我国南方热带和亚热带地区分布着大面积的可变电荷土壤, 这些土壤铁/铝氧化物含量较高, pH 值和阳离子交换量 (CEC) 较低, 因此这类土壤中重金属活性和生物有效性较北方恒电荷土壤高, 也更容易受重金属的污染. 进入土壤的重金属不能被降解, 在土壤中逐渐累积, 会对生态环境和人类健康造成威胁. 因此, 需要对重金属污染土壤进行修复或采取有效措施钝化污染土壤中的重金属.

目前常用的钝化重金属的方法包括: 工程治理措施、物理化学方法、电动修复方法和生物修复方

法等<sup>[1]</sup>. 一般而言, 工程治理措施工程量大、投资费用高, 且会引起土壤肥力下降, 置换出的污染土壤存在二次污染风险. 物理化学修复和电动修复方法修复费用高、操作复杂, 难以大面积推广; 生物修复方法修复周期长<sup>[2]</sup>. 施用改良剂增加土壤对重金

收稿日期: 2012-06-16; 修订日期: 2012-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971135); 国家科技支撑计划项目 (2012BAJ24B06)

作者简介: 蒋田雨 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤表面电化学, E-mail: tyjiangandhwt@sina.cn

\* 通讯联系人, E-mail: rkxu@issas.ac.cn

属的固定是一种快速并且廉价的污染土壤修复方法. 常用的改良剂有石灰、磷酸盐和工业废弃物等. 石灰通过提高土壤 pH 达到降低有效态重金属含量的效果, 然而随着土壤 pH 的变化, 这些重金属会再次活化<sup>[3]</sup>; 添加磷酸盐需超过正常土壤本体值的 20 倍以上才能达到较好的效果, 这会导致土壤的营养过剩, 甚至污染周围水体; 而工业废弃物本身含有一定量的有害物质, 存在二次污染的风险<sup>[3]</sup>.

农作物秸秆作为一种固体废弃物, 收获季节大量焚烧导致空气质量严重恶化<sup>[4-6]</sup>; 将农作物秸秆等农业废弃物经过低温热解制备成生物质炭, 由于其在土壤中不易被微生物分解, 是一种长效土壤改良剂<sup>[7]</sup>. 近来的研究还表明, 生物质炭具有较高 pH、巨大的比表面积和丰富的含氧官能团<sup>[8]</sup>, 对重金属有较强的吸附能力和很高的吸附容量<sup>[8,9]</sup>, 因此向土壤中添加生物质炭可促进酸性土壤对 Pb(II)、Cu(II)、Cd(II) 等重金属的吸附<sup>[10-12]</sup>. 增加土壤对重金属的固定量, 降低土壤中重金属的活性<sup>[13]</sup>. 生物质炭对土壤吸附重金属的促进作用涉及静电作用、表面络合反应和表面沉淀等多种机制<sup>[10,11,13,14]</sup>. 不同温度下制备的生物质炭化学性质存在差异, 对土壤 pH 和 CEC 等性质的影响程度也不相同<sup>[13]</sup>, 因此其对重金属在土壤表面的吸附的影

响也应有所不同, 然而相关研究还比较缺乏.

本研究用稻草和花生秸秆在 300、400 和 500℃ 下焖烧制备生物质炭, 分析了添加生物质炭对可变电荷土壤 pH 和吸附 Pb(II) 的影响, 并探讨影响机制. 研究结果不仅可为重金属污染土壤修复方法的建立提供理论依据, 还可为农业废弃物处置开辟新途径, 具有重要的理论和实际意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土样

供试砖红壤发育于玄武岩, 采自海南澄迈, 红壤发育于花岗岩, 采自海南昆仑, 均为自然植被覆盖下的底层土壤. 土壤样品经自然风干、磨细过 60 目筛备用, 供试土样的基本性质列于表 1. 采用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消煮, 原子吸收分光光度法 (novAA350, Analytik Jena) 测定土壤 Pb 背景值; 按 1:2.5 的土/水比制备悬液, 用玻璃电极法测定土壤 pH; 用重铬酸钾氧化法测定土壤有机质含量; 土壤游离氧化铁和游离氧化铝用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠法提取, 土壤无定形氧化铁和无定形氧化铝用酸性草酸铵提取, 提取液中的 Fe 和 Al 用等离子发射光谱法测定 (Optima 8000, PerkinElmer); 土壤 CEC 用醋酸铵法测定.

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of studied soils

土壤	Pb 背景值 /g·kg <sup>-1</sup>	pH	黏粒含量 /g·kg <sup>-1</sup>	有机质含量 /g·kg <sup>-1</sup>	游离态氧化物/g·kg <sup>-1</sup>		无定形氧化物/g·kg <sup>-1</sup>		CEC /cmol·kg <sup>-1</sup>
					Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
海南澄迈砖红壤	nd <sup>1)</sup>	4.74	740	7.9	145.9	23.7	2.9	5.2	5.6
海南昆仑红壤	nd	4.84	550	8.4	33.8	12.4	0.7	3.3	5.1

1) nd: 未检出

### 1.2 生物质炭及其改良土壤样品的制备

生物质炭的制备: 将秸秆风干、粉碎、过 10 目筛, 然后取适量秸秆置于陶瓷坩埚中、轻轻压实、盖紧, 将坩埚置于马弗炉内, 分别在 300、400 和 500℃ 下焖烧 4 h<sup>[6]</sup>. 冷却后取出坩埚, 将生物质炭磨细过 60 目筛备用.

分别称取土壤样品 200 和 190 g, 然后分别添加 0 g 和 10 g 秸秆炭, 混合均匀后置于塑料杯中. 用去离子水将土壤含水量调节至田间持水量的 70%, 恒温 25℃ 下培养 30 d, 将土样风干、磨细过 60 目筛备用.

### 1.3 Pb(II) 的吸附/解吸实验

配制 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的 Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液, 以此作母液配制浓度为 0.1、0.25、0.5、1.0、1.5 和 2.0 mmol·L<sup>-1</sup> 的 Pb(II) 溶液用于等温吸附实验, 支持电

解质为 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> NaNO<sub>3</sub>. 当研究 pH 对 Pb(II) 吸附影响时, Pb(II) 溶液浓度为 2.0 mmol·L<sup>-1</sup>.

称取 0.500 g 土壤样品于 80 mL 塑料瓶中, 将瓶和土一起称重计为 W<sub>1</sub>(g). 加入 25 mL 不同浓度的 Pb(II) 溶液, 用 HNO<sub>3</sub> 和 NaOH 将悬液 pH 调节至目标值, 在恒温 25℃ 水浴中振荡 1 h, 用 HNO<sub>3</sub> 和 NaOH 再次调节 pH 至目标值, 反复 3 次, 直至 pH 值控制在目标值 ±0.1 内, 3 500 r·min<sup>-1</sup> 离心 5 min, 过滤得吸附平衡液. 含有土壤和残留溶液的瓶子再次称重并记为 W<sub>2</sub>(g), 加入 25 mL 的 1 mol·L<sup>-1</sup> NaNO<sub>3</sub> 以解吸吸附的 Pb(II), 将土样与溶液混合均匀后振荡 1 h, 离心过滤得解吸液. 用原子吸收分光光度法 (novAA350, Analytik Jena) 测定吸附平衡液和解吸液中 Pb(II) 的含量, 用差减法计算土壤对 Pb(II) 的吸附量, 用以下公式计算 Pb(II) 的解吸量:

$$\text{Pb}(\text{II})_{\text{des}} (\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}) = \{ \text{Pb}(\text{II})_{\text{Na}} \times (25 + W_2 - W_1) - \text{Pb}(\text{II})_{\text{ad}} \times (W_2 - W_1) \} \times 1000 / 0.5$$

式中,  $\text{Pb}(\text{II})_{\text{Na}}$  为解吸液中  $\text{Pb}(\text{II})$  的浓度 ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $\text{Pb}(\text{II})_{\text{ad}}$  为平衡液中  $\text{Pb}(\text{II})$  的浓度 ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

#### 1.4 生物质炭性质的测定

准确称取生物炭样品各 0.500 g, 每份样品中加入 20 mL 去离子水, 25°C 下用磁力搅拌器搅拌 2 h, 然后用已标定的 0.1 mol·L<sup>-1</sup> HCl 于 25°C 条件下用电位滴定仪 (T90, Mettler Toledo) 进行滴定, 设置滴定终点 pH 为 7.0、5.0 和 2.0, 滴定速率为 0.5 mL·min<sup>-1</sup>, 分别计算出各 pH 下的含碱量<sup>[15]</sup>.

预先将 1.00 g 生物质炭 (炭: 水 = 1:40) 用 1:1 (体积比) HCl 调节至 5.0, 并维持 7 d, 60°C 下烘干后供酸性官能团测定用. 称取 0.100 g 此生物质炭于 50 mL 塑料瓶中, 分别加入 10 mL 0.05 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 NaOH 溶液, 并设不加生物质炭的处理作为对照. 将样品于 25°C 条件下连续振荡 24 h, 通过 0.45 μm 滤膜过滤, 取 5 mL 滤液, 加入 10 mL 0.05 mol·L<sup>-1</sup> HCl 预酸化后, 用 0.05 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 滴定多余 HCl, 设置滴定终点 pH 为 7.0, 滴定速率为 1.0 mL·min<sup>-1</sup>. 根据消耗的 HCl 量计算出酸性官能团的数量.

将 1 mg 经烘干 (105 ~ 110°C) 处理的生物质炭与 KBr 混合, 压片后经 Nicolet380 红外分光光度计 (Thermo Fisher Scientific) 从 4000 ~ 800 cm<sup>-1</sup> 进行连续扫描, 得到样品的傅里叶红外光谱 (FTIR). 用 ASAP2020 (Micromeritics) 测定生物质炭比表面积和中孔分布, 相对压力 ( $p/p_0$ ) 为 0.05 ~ 0.35, 由 N<sub>2</sub> 吸附等温线计算得到生物质炭的 BET 比表面积.

文中所用化学试剂均购于南京化学试剂有限公司, 所有试剂均为分析纯.

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物质炭的基本性质

一般而言, 秸秆生物质炭含一定量的碱性物质<sup>[4]</sup>, 表 2 中数据表明同种原料制备的生物炭的含碱量随烧制温度的升高而增加, 说明高温条件下制备的生物炭含碱量较多, 400°C 制备的稻草炭较 300°C 制备的稻草炭, 含碱量提高了 1.27 ~ 1.68 倍, 500°C 制备的稻草炭较 300°C 制备的稻草炭, 提高 1.46 ~ 2.39 倍; 相应花生秸秆炭为 1.55 ~ 1.81 倍、1.92 ~ 3.53 倍. 但是同种制备温度和 pH 条件下, 稻草炭含碱量较花生秸秆炭低, 花生秸秆炭含碱量

是稻草炭的 1.17 ~ 2.84 倍. 因此, 制备温度和原料种类是影响生物炭含碱量的 2 个重要因素.

表 2 生物质炭滴定至 pH 7.0、5.0 和 2.0 时的含碱量

pH	制备温度 /°C	稻草炭含碱量 /cmol·kg <sup>-1</sup>	花生秸秆炭含碱量 /cmol·kg <sup>-1</sup>
7.0	300	14.02	17.79
	400	23.64	27.68
	500	33.64	62.83
5.0	300	54.62	94.63
	400	69.83	165.26
	500	81.34	206.84
2.0	300	109.15	218.88
	400	139.19	396.35
	500	159.66	422.09

400°C 烧制的花生秸秆炭和稻草炭的 FTIR 图谱 (图 1) 表明, 两种生物炭都含有一定的含氧官能团, 主要为羧基和糖类 C—OH, 这与 Yuan 等<sup>[8]</sup> 报道的结果相似. Boehm 滴定法可对生物炭表面的含氧官能团进行定量区分, 结果表明 300、400 和 500°C 烧制的稻草炭和花生秸秆炭总酸性基团量分别为 0.79、0.62、0.60 和 1.22、1.25、1.06 mmol·g<sup>-1</sup>. 300°C 制备的稻草炭酸性官能团总量是 400°C 和 500°C 制备稻草炭的 1.27、1.32 倍; 相应花生秸秆炭为 0.98、1.15 倍, 说明同种原料制备的生物炭的含氧官能团数量随制备温度的升高而降低, 与文献中报道的结果相似<sup>[16,17]</sup>. 在相同的制备温度下, 花生秸秆炭的酸性官能团含量明显高于稻草炭. 300°C、400°C 和 500°C 下烧制的花生秸秆炭的含氧官能团的数量分别是相应温度下稻草炭的

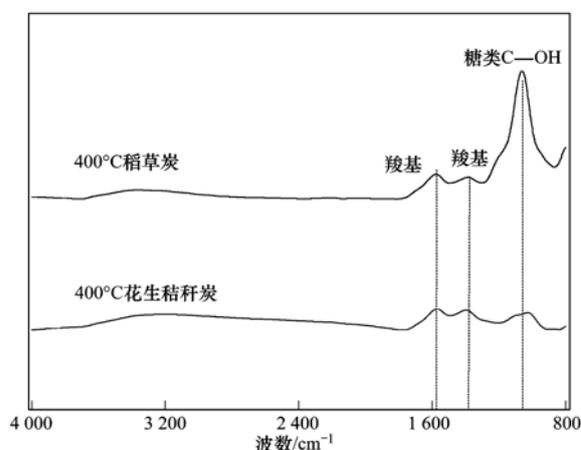


图 1 400°C 烧制的稻草炭和花生秸秆炭的 FTIR 图

Fig. 1 FTIR spectra of the biochars produced from straws of rice and peanut at 400°C

1.54、2.02 和 1.77 倍。因此,制备温度和原料种类是决定生物质炭酸性官能团数量的 2 个主要因素<sup>[18]</sup>。

300、400 和 500℃ 下制备的稻草炭的比表面积分别为 26.45、13.65 和 43.97  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ; 花生秸秆炭的比表面积分别为 0.28、2.34 和 128.83  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

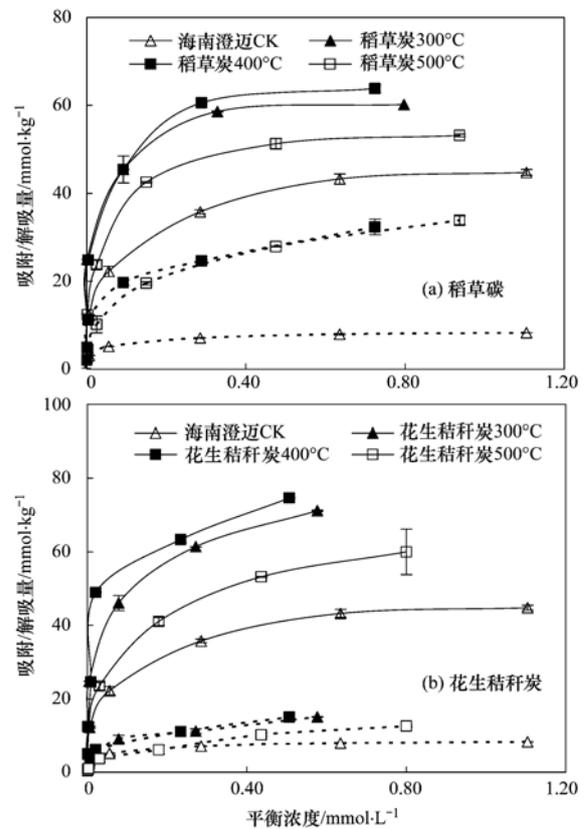
## 2.2 生物炭对土壤 pH 的影响

秸秆生物质炭含有一定量的碱性物质,可以中和土壤酸度,因此向酸性可变电荷土壤中添加生物质炭可提高土壤 pH<sup>[12]</sup>。由于同种物料制得的生物炭的含碱量随制备温度升高而增加,因此向土壤中添加相同量的生物炭后,土壤 pH 随生物炭的热解温度的升高而升高。添加 300、400 和 500℃ 下制备的稻草炭后,海南澄迈砖红壤 pH 分别提高 1.04、1.31 和 1.66; 相应地花生秸秆炭使土壤 pH 分别提高了 2.23、2.48 和 3.00。添加这 3 个温度下制备的稻草炭使海南昆仑红壤 pH 分别提高 1.12、1.39 和 1.75,花生秸秆炭使该土壤的 pH 分别提高 2.32、2.56 和 3.09。相同热解温度下,花生秸秆炭对土壤酸度的改良效果优于稻草炭。添加生物质炭后土壤 pH 的升高幅度与生物质炭的含碱量大小一致,说明生物质炭对土壤酸度改良效果主要决定于生物质炭的含碱量。

## 2.3 Pb(II) 在可变电荷土壤表面的吸附机制

添加 5% 秸秆炭后 2 种土壤对 Pb(II) 的吸附等温线如图 2 和图 3 所示,结果表明生物质炭显著促进了 2 种可变电荷土壤对 Pb(II) 的吸附,但促进作用的大小与生物质炭制备过程的热解温度有关。由图 2(a) 可以看出,对于海南澄迈砖红壤,当 Pb(II) 平衡浓度小于 0.40  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,400℃ 稻草炭与 300℃ 稻草炭的促进效果相似; 但当 Pb(II) 平衡浓度大于 0.40  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,400℃ 稻草炭对 Pb(II) 吸附的促进作用大于 300℃ 稻草炭; 500℃ 稻草炭的促进作用小于 300℃ 和 400℃ 下制备的稻草炭。图 2(b) 不同温度下制备的花生秸秆炭对砖红壤中 Pb(II) 吸附促进作用的大小顺序与稻草炭相似。图 3 中不同温度下两种秸秆制备的生物质炭对海南昆仑红壤吸附 Pb(II) 的促进作用的大小顺序与砖红壤中相似。这主要因为热解温度影响生物质炭的性质,导致不同温度下制备的生物质炭对 Pb(II) 吸附的促进程度有所不同。

图 2 和图 3 中结果还表明,添加生物质炭处理土壤表面吸附的 Pb(II) 被中性盐解吸的量也高于



实线为吸附; 虚线为解吸, 下同

图 2 添加 5% 秸秆炭对 Pb(II) 在海南澄迈砖红壤表面吸附等温线和解吸等温线的影响

Fig. 2 Adsorption and desorption isotherms of Pb(II) on Oxisol from Hainan with and without rice straw and peanut straw derived biochars incorporation

对照处理。通过静电吸附机制被土壤表面吸附的 Pb(II) 可被中性盐解吸<sup>[19]</sup>, 因此添加生物质炭增加了可变电荷土壤表面对于 Pb(II) 的静电吸附<sup>[12]</sup>。生物质炭表面含丰富的含氧官能团, 因此带有较多的负电荷, 这是生物质炭增加可变电荷土壤对 Pb(II) 静电吸附的主要原因。生物质炭的加入显著提高了土壤对 Pb(II) 的吸附, 但固定后的 Pb(II) 如果容易被解吸下来, 在某些特定情况下, 经过富集后的重金属可能会大量释放, 因此有必要对生物质炭影响 Pb(II) 吸附的机制进行研究。

为了定量比较静电吸附与非静电吸附的相对贡献, 根据图 2 和图 3 中的解吸量除以吸附量计算得到吸附 Pb(II) 的解吸率, 代表了静电性吸附占总吸附量的百分比, 结果列于表 3 中。结果表明, 在相同平衡浓度下, 添加稻草炭提高了 2 种土壤表面吸附 Pb(II) 的解吸率, 说明稻草炭主要增加可变电荷土壤对 Pb(II) 的静电吸附量。与稻草炭相反, 添加花生秸秆炭降低了 2 种可变电荷土壤表面吸附

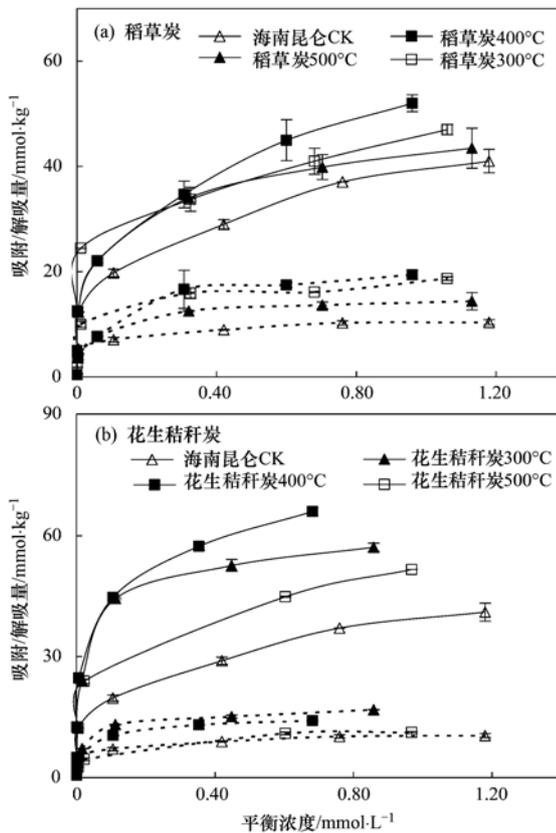


图3 添加5%秸秆炭对Pb(II)在海南昆仑红壤表面吸附等温线和解吸等温线的影响

Fig. 3 Adsorption and desorption isotherms of Pb(II) on Ultisol from Hainan with and without rice straw and peanut straw derived biochars incorporation

表3 海南澄迈砖红壤和昆仑红壤在 pH 5.0 时Pb(II)的静电吸附/总吸附的百分比  
Table 3 Percentage of electrostatic adsorption of Pb(II) by Oxisol and Ultisol at pH 5.0

土壤	处理	制备温度/°C	Pb(II) 吸附平衡浓度/mm <sup>3</sup> ·L <sup>-1</sup>		
			0.20	0.50	0.75
澄迈砖红壤	对照	—	34.78%	31.29%	27.03%
	稻草炭	300	41.67%	46.83%	53.33%
		400	40.85%	44.24%	50.77%
		500	42.22%	44.87%	55.24%
	花生秸秆炭	300	17.89%	20.29%	21.05%
		400	16.45%	20.13%	20.25%
		500	17.91%	20.20%	20.76%
昆仑红壤	对照	—	34.78%	30.65%	27.78%
	稻草炭	300	47.33%	42.67%	39.02%
		400	44.51%	41.67%	38.30%
		500	36.30%	36.80%	35.50%
	花生秸秆炭	300	26.88%	27.18%	28.75%
		400	26.47%	26.44%	25.67%
		500	25.63%	26.38%	24.42%

根据 Langmuir 方程计算的最大吸附量  $Q_m$  可以进一步比较海南澄迈砖红壤在添加不同温度和物料制备的生物炭后对Pb(II)吸附容量的影响. 添加

Pb(II)的解吸率,说明添加花生秸秆炭主要增加土壤表面对Pb(II)的非静电吸附量. 2种生物质炭对Pb(II)吸附机制影响的差异与其表面酸性官能团数量一致,如上文所述花生秸秆炭表面酸性官能团的总量显著高于稻草炭,这些官能团可与  $Pb^{2+}$  形成络合物,增加土壤对Pb(II)的专性吸附.

当比较2种土壤的吸附等温线时,可以发现海南澄迈砖红壤的吸附量大于海南昆仑红壤,这是因为海南昆仑红壤发育于花岗岩母质,其黏粒和铁铝氧化物含量低于发育于玄武岩母质的海南澄迈砖红壤,这是昆仑红壤的吸附量低于澄迈砖红壤的主要原因.

### 2.4 等温吸附模型对实验结果的拟合

为了定量表征生物质炭对Pb(II)吸附等温线的影响,分别用 Langmuir 方程 [ $Q = cQ_m / (Q + 1/k)$ ] 和 Freundlich 方程 ( $\ln c = \ln k + 1/n \ln c$ ) 拟合Pb(II)的吸附等温线. 两方程中  $Q$  为Pb(II)吸附量 ( $mmol \cdot kg^{-1}$ ),  $c$  为吸附平衡液中Pb(II)浓度 ( $mmol \cdot L^{-1}$ ),  $k$  为常数. Langmuir 方程中  $Q_m$  为Pb(II)最大吸附量 ( $mmol \cdot kg^{-1}$ ), Freundlich 方程中  $n$  也为常数.

两方程对吸附等温线拟合所得参数值列于表4中,结果表明 Freundlich 方程拟合效果更佳,相关系数  $r$  在 0.94 以上 ( $P = 0.0$ ); Langmuir 方程的拟合结果较差,但相关系数  $r$  也在 0.84 以上.

300、400 和 500°C 稻草炭使砖红壤对Pb(II)的  $Q_m$  分别增加 45.8%、57.3% 和 23.1%; 添加相应温度下制备的花生秸秆炭分别使Pb(II)的  $Q_m$  分别增加

表 4 Freundlich 和 Langmuir 方程拟合吸附等温线的相关参数

Table 4 Parameters of Freundlich and Langmuir equations for Pb( II ) adsorption of different soils

处理	Freundlich 方程			Langmuir 方程		
	$k$	$n$	$r$	$k$	$Q_m$	$r$
澄迈砖红壤-对照	36.97	3.33	0.96	6.98	43.95	0.88
澄迈砖红壤-300℃ 稻草炭	63.43	1.61	0.99	26.71	64.07	0.98
澄迈砖红壤-400℃ 稻草炭	71.52	7.14	0.98	26.86	69.13	0.86
澄迈砖红壤-500℃ 稻草炭	60.34	4.55	0.98	30.75	54.11	0.99
澄迈砖红壤-300℃ 花生秸秆炭	81.45	4.76	0.98	19.02	75.99	0.97
澄迈砖红壤-400℃ 花生秸秆炭	95.58	4.76	1.00	59.10	76.34	0.86
澄迈砖红壤-500℃ 花生秸秆炭	66.02	4.00	0.97	19.16	60.08	0.91
昆仑红壤-对照	38.86	3.33	0.99	6.98	43.86	0.88
昆仑红壤-300℃ 稻草炭	51.42	1.61	0.99	89.20	48.13	0.93
昆仑红壤-400℃ 稻草炭	54.60	7.14	0.96	151.77	52.83	0.71
昆仑红壤-500℃ 稻草炭	47.52	4.55	1.00	16.21	51.88	0.96
昆仑红壤-300℃ 花生秸秆炭	62.18	4.76	0.94	42.36	55.95	0.97
昆仑红壤-400℃ 花生秸秆炭	71.52	4.76	1.00	15.76	70.42	0.95
昆仑红壤-500℃ 花生秸秆炭	52.45	4.00	0.97	66.79	48.20	0.89

72.9%、73.7% 和 36.7%。Freundlich 方程中, 表征吸附容量的参数  $k$  也表现相似的趋势。这些结果进一步说明不同温度下制备的稻草炭和花生秸秆炭, 可以增加可变电荷土壤对 Pb( II ) 的吸附容量, 400℃ 下制备的生物炭对增加 Pb( II ) 吸附容量的效果最好, 花生秸秆炭对增加 Pb( II ) 吸附容量的效果优于稻草炭。

## 2.5 pH 对 Pb( II ) 吸附的影响

pH 升高导致可变电荷土壤表面负电荷量增加, 从而提高了土壤对 Pb( II ) 静电吸附能力。如上所述, 添加秸秆炭增加了 2 种可变电荷土壤的 pH, 因此除秸秆炭本身增加土壤对 Pb( II ) 吸附能力的贡献外, 生物质炭还可以通过提高土壤 pH 增加土壤对 Pb( II ) 的吸附量。

选择对 Pb( II ) 吸附影响最大的 400℃ 制备的生物质炭研究其在 pH 3.0 ~ 5.0 范围内对 Pb( II ) 吸附的影响, 如图 4 所示。添加生物质炭均增加了土壤对 Pb( II ) 的吸附量, 且添加花生秸秆炭的增加幅度高于稻草炭, 这与相同 pH 条件下不同来源生物质炭对吸附等温线影响的结果一致。如 pH 4.0 时, 添加稻草炭使海南澄迈砖红壤和海南昆仑红壤对 Pb( II ) 的吸附量分别较对照提高 19.85  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 19.92  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 添加花生秸秆炭后, Pb( II ) 的吸附量分别增加 23.55  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 23.49  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。pH 5.0 时, 稻草炭使 Pb( II ) 吸附量分别提高 15.40  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 17.01  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 花生秸秆炭分别提高 35.20  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 25.65  $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

图 4 中 Pb( II ) 解吸量随 pH 的变化趋势与吸附量相似, 说明随 pH 升高土壤对 Pb( II ) 的静电吸附

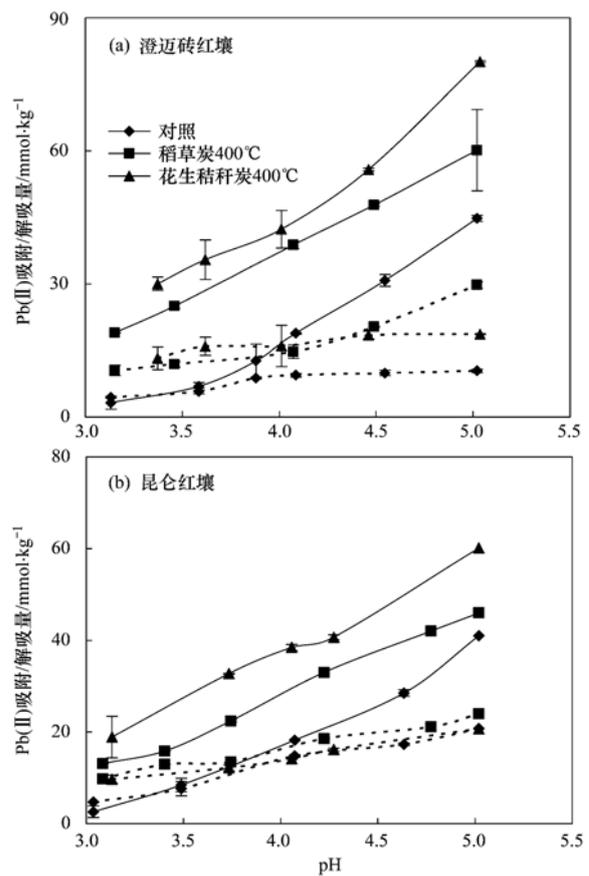


图 4 pH 对 Pb( II ) 在澄迈砖红壤和昆仑红壤表面吸附/解吸的影响

Fig. 4 Effects of pH on adsorption and desorption of Pb( II ) on Oxisol, and Ultisol sampled from Hainan with or without biochars incorporation

作用增加。添加稻草炭处理 Pb( II ) 解吸量-pH 曲线位于对照处理之上, 说明添加稻草炭增加了土壤对 Pb( II ) 的静电吸附量。另外, 稻草秸秆炭的解吸量大于花生秸秆炭的, 原因在于花生炭的含氧官能团

含量更高,因此它的非静电吸附比率较高,而解吸值则降低。

2种可变电荷土壤在添加生物质炭后对重金属Pb(II)的吸附量和解吸量均有所增强。解吸量可以近似代表土壤对Pb(II)的静电吸附量,因为以静电方式吸附的离子可被高浓度中性盐溶液所解吸<sup>[20]</sup>。热带、亚热带地区的可变电荷土壤,由于遭受强烈的风化和淋溶作用,土壤发育程度高,土壤呈酸性反应,且CEC低,对Pb(II)等重金属的吸附能力弱<sup>[21]</sup>。添加生物质炭使土壤表面负电荷数量增加,土壤对Pb(II)的静电吸附量增加。另一方面,生物炭表面含有丰富羧基和酚羟基等含氧官能团,可与Pb<sup>2+</sup>形成络合物,促进土壤对Pb(II)的专性吸附。因此,向可变电荷土壤中添加生物质炭可同时提高Pb(II)的静电吸附和专性吸附量,增加土壤对Pb(II)的固定能力。生物炭可中和土壤酸度,提高了土壤pH,这进一步增强土壤吸附和固定Pb(II)的能力。

### 3 结论

生物质炭含有大量的含碱物质,可显著提高2种可变电荷土壤pH,提高土壤对Pb(II)的吸附容量。生物质炭表面有丰富的羧基和酚羟基等含氧官能团,既可增加土壤表面的负电荷量,增加土壤对Pb(II)的静电吸附量;又可与Pb(II)发生络合反应,增加土壤对Pb(II)的专性吸附量。花生秸秆炭含氧官能团的数量多于稻草炭,因此前者主要增加土壤对Pb(II)的专性吸附,而后者主要增加土壤对Pb(II)的静电吸附。结果表明,400℃下制备的生物质炭促进土壤Pb(II)吸附的效果好于300℃和500℃下制备的生物质炭,Freundlich和Langmuir方程均可用于拟合土壤对Pb(II)的吸附等温线,Freundlich方程拟合效果更佳。

#### 参考文献:

- [1] 顾继光,林秋奇,胡韧,等. 土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及其研究展望[J]. 土壤通报, 2005, **36**(1): 128-133.
- [2] 朱永官,陈保冬,林爱军,等. 珠江三角洲地区土壤重金属污染控制与修复研究的若干思考[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1575-1579.
- [3] 丁文川,朱庆祥,曾晓岚,等. 不同热解温度生物炭改良铅和镉污染土壤的研究[J]. 科技导报, 2011, **29**(14): 22-25.
- [4] 陆炳,孔少飞,韩斌,等. 2007年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 186-194.
- [5] 尹聪,朱彬,曹云昌,等. 秸秆焚烧影响南京空气质量的成因探讨[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 207-213.
- [6] 张懿华,段玉森,高松,等. 上海城区典型空气污染过程中细颗粒污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(7): 1115-1121.
- [7] Kauffman N, Hayes D, Brown R. A life cycle assessment of advanced biofuel production from a hectare of corn[J]. Fuel, 2011, **90**(11): 3306-3314.
- [8] 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.
- [9] Tong X J, Li J Y, Yuan J H, et al. Adsorption of Cu(II) by biochars generated from three crop straws [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, **172**(2-3): 828-834.
- [10] Cao X D, Ma L, Gao B, et al. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(9): 3285-3291.
- [11] 蒋田雨,姜军,徐仁扣,等. 稻草生物质炭对3种可变电荷土壤吸附Cd(II)的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(6): 1111-1117.
- [12] 佟雪娇,李九玉,姜军,等. 添加农作物秸秆炭对红壤吸附Cu(II)的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(5): 37-41.
- [13] Jiang J, Xu R K, Jiang T Y, et al. Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted ultisol[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **229-230**: 145-150.
- [14] Uchimiya M, Chang S, Klasson K T. Screening biochars for heavy metal retention in soil: role of oxygen functional groups [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **190**(1-3): 432-441.
- [15] Salame I I, Bandosz T J. Surface chemistry of activated carbons: combining the results of temperature-programmed desorption, Boehm, and potentiometric titrations[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2001, **240**(1): 252-258.
- [16] Singh B, Singh B P, Cowie A L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment [J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, **48**(6-7): 516-525.
- [17] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, et al. Immobilization of heavy metal ions (Cu<sup>II</sup>, Cd<sup>II</sup>, Ni<sup>II</sup> and Pb<sup>II</sup>) by broiler litter-derived biochars in water and soil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, **58**(9): 5538-5544.
- [18] 徐仁扣,赵安珍,肖双成,等. 农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 142-146.
- [19] 于天仁,季国亮,丁昌璞,等. 可变电荷土壤的电化学[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [20] Xu R K, Xiao S C, Zhao A Z, et al. Effect of Cr(VI) anions on adsorption and desorption behavior of Cu(II) in the colloidal systems of two authentic variable charge soils [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, **284**(1): 22-29.
- [21] Naidu R, Kookana R S, Sumner M E, et al. Cadmium sorption and transport in variable charge soils: a review [J]. Journal of Environmental Quality, 1997, **26**(3): 602-617.

## CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM <sub>2.5</sub> at Dinghu Mount .....	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing .....	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Species in Shenzhen .....	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou .....	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China .....	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City .....	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors .....	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method .....	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changle River .....	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City .....	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed .....	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter .....	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan .....	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary .....	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland .....	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai .....	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas .....	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province .....	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes .....	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk ( <i>Rapana venosa</i> ) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China .....	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System .....	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm .....	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process .....	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon .....	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon .....	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation .....	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process .....	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon .....	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter .....	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX .....	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process .....	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System .....	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes .....	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method .....	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules .....	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes .....	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay .....	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment .....	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .....	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 .....	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities .....	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation .....	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media .....	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil .....	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot .....	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density .....	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils .....	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils .....	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant .....	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils .....	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills .....	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide .....	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC .....	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon .....	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application .....	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China .....	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

# 《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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