ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 34 卷　第 4 期
2013 年 4 月 15 日

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 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ 化学组成与时空分布特征 …… 云慧, 何凌燕, 黄晓锋, 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,孙嗣旸,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)
三峡库区沉积物秋末冬初的磷释放通量估算 …… 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国有,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,邵亚平,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,吴旸,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)
铝盐混凝除砷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水源水中 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 γ 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,管运涛(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,杜兴治,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,张洪勋(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, 龚伊, 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, 黄筒易, 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 污染塿土的淋洗修复 …… 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_4^{3-} 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势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)

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[1],彭丹[1],郭楚玲[1,2*],朱超飞[1],薛秀玲[3],党志[1,2]

(1. 华南理工大学环境科学与工程学院,广州 510006; 2. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室,广州 510006; 3. 华侨大学化工学院,厦门 361021)

摘要: 利用绿色木霉对玉米秸秆进行固态发酵,通过单因素改性实验(改性时间、固液比和改性温度)制备溢油吸附剂 TCS (*Trichoderma viride* modified corn stalk),并模拟溢油环境测定 TCS 的吸油量. 研究表明,25℃下,改性 6 d、固液比 1∶4时,制得的 TCS 吸油量最大,达到 13.84 $g \cdot g^{-1}$,相对原材料 RCS(Raw corn stalk,吸油量为 6.58 $g \cdot g^{-1}$)提高了 110.33%. 对 RCS 和 TCS 进行扫描电子显微镜(SEM)分析显示制得的 TCS 表面变得更加粗糙; 傅里叶红外光谱分析(FT-IR)表明玉米秸秆纤维素组分被部分降解; X 射线衍射分析(XRD)得到改性后的材料结晶度降低; 纤维素、半纤维素和木质素等组分测定进一步表明生物改性降低了玉米秸秆中纤维素及半纤维素的含量,这些均说明改性后材料吸油量增加的原因. 吸附动力学及保油性能测试表明,TCS 具有快速的吸油速率,80 $r \cdot min^{-1}$ 条件下振荡 1 h 后即达到吸附平衡; 且在吸附饱和后滴淌 10 min 仍能保持最初吸油量的 74.87%,具有良好的保油性能.

关键词:玉米秸秆; 绿色木霉; 固态发酵; 溢油吸附剂

中图分类号: X705 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2013)04-1605-06

Preparation and Performance Investigation of *Trichoderma viride*-Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills

LAN Zhou-lin[1], PENG Dan[1], GUO Chu-ling[1,2], ZHU Chao-fei[1], XUE Xiu-ling[3], DANG Zhi[1,2]

(1. School of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China; 3. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This work aims at preparing oil spill sorbent (TCS, *Trichoderma viride*-modified corn stalk) through solid-state fermentation of corn stalk by *Trichoderma viride*. Single-factor experiments, including the effect of modification time, solid-liquid ratio of modification and modification temperature, and adsorption experiments simulating oil spill condition, were carried out. The results indicated that the maximum oil adsorption of TCS, 13.84 $g \cdot g^{-1}$, could be obtained under the conditions of 6 days of modification, with a solid-liquid ratio of 1∶4 and a modification temperature of 25℃. This oil absorption was 110.33% of that of the raw material (RCS, Raw Corn Stalk). Comparing RCS and TCS by means of Scanning Electron Microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) and X-ray Diffraction (XRD), the results separately showed that TCS had rougher surface, lower cellulose content and higher instability, which explains the increase of oil absorption. Also, the component analysis indicated that bio-modification could reduce the contents of celluloses and hemicelluloses from corn stalk. Besides, sorption kinetics and oil retention performance test showed that, TCS, which could reach adsorption equilibrium after 1h of 80 $r \cdot min^{-1}$ oscillating, had fast oil adsorption rate, and it also had good oil retention performance, which could keep 74.87% of the initial adsorption rate when trickling 10 min after reaching adsorption equilibrium.

Key words: corn stalk; *Trichoderma viride*; solid-state fermentation; oil spill sorbent

石油是由烷烃、环烷烃和芳香烃等复杂的有机化合物组成的混合物,其中芳香烃类具有“三致”作用[1]. 由于炼油厂排放及船舶营运泄漏等原因,世界各地每年约 120 万 t 的石油进入水体[2],妥善处理海上溢油一直是人们关注的课题. 目前,处理海上石油污染的主要方法包括[3]:①物理修复; ②化学处理; ③生物修复技术等. 其中,物理修复中使用的溢油吸附剂具有快速、大量去除和回收漏油的可能性,因而受到广泛关注[4].

溢油吸附剂主要分为无机矿物材料、有机合成材料和有机天然材料三类[5]. 良好的溢油吸附剂应当具有高的吸附容量、低密度、适当的保油能力和良好的生物降解性能[6]. 无机矿物材料作为溢油吸附剂时,浮力低,吸油量较小,并且难以现场处理. 有机合成材料多数以石油副产品为合成单体,制备

收稿日期: 2012-06-29; **修订日期**: 2012-09-02

基金项目: 广州市科技计划项目(2012J4100005); 广东省自然科学基金项目(10151064101000041); 广州珠江新星专项(2011J2200064)

作者简介: 蓝舟琳(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为污染物的生物修复,E-mail:zhoulinlan@126.com

* 通讯联系人,E-mail:clguo@scut.edu.cn

成本高,不可生物降解,且吸油后处理麻烦[7,8]. 而有机天然材料,如玉米秸秆、稻草等生物质材料,廉价易得,吸油饱和的材料可以直接燃烧,既解决了材料后处理的问题,又提供了一种燃料. 这一切都促使人们寻求制备环境友好且来源广泛的溢油吸附剂. 我国是个农业大国,木质生物质等天然有机材料来源广泛,农作物秸秆年产量超过 7 亿 t,其中的玉米秸秆高达 3.2 亿 $t \cdot a^{-1}$[9,10],这使得具有环境友好型的玉米秸秆具有制备溢油吸附剂的可能性.

然而,玉米秸秆虽然具备一定的吸油能力,但是其吸附量较小,因此有必要通过改性来提高其吸附效果[11]. 在现有的改性方法中,生物改性相比物理改性和化学改性而言,由于其具有改性过程能耗小、不会产生二次污染等优点,近年来成为人们研究的热点[12,13]. 另外,利用固态发酵方式改性玉米秸秆制备溢油吸附剂这一研究见诸报道的极少,关于这方面的研究将可以为该领域的研究人员提供参考借鉴. 本研究利用可降解纤维素的绿色木霉,以固态发酵的方式来降解玉米秸秆中的部分纤维素,从而制备秸秆类溢油吸附剂,并对其吸油性能进行初步评价.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验使用的菌种购自广东省微生物菌种保藏中心的 1 株绿色木霉 GIM3.141,保存在 4℃下的马铃薯葡萄糖琼脂斜面培养基上. 实验中绿色木霉进行固态发酵使用的营养液为 Mandel 营养液,其配方如下:KH_2PO_4 2.0 g,$CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0.4 g,$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.3 g,$(NH_4)_2SO_4$ 2.8 g,Urea(H_2NCONH_2) 0.3 g,蔗糖 12 g,微量元素($FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 5.0 mg,$MnSO_4 \cdot H_2O$ 1.6 mg,$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 1.4 mg,$CoCl_2$ 2.0 mg),蒸馏水 1 L.

实验用的玉米秸秆取自广州一个农场,洗净烘干后粉碎筛分得 20 ~ 40 目玉米秸秆待用. 实验供试原油取自广州石化黄埔分公司,置于通风橱中 48 h,以去除原油中的易挥发有机组分. 测得其基本性质如下:密度为 0.85 $g \cdot mL^{-1}$,黏度为 28.4 MPa·s,表面张力为 25.2 $mN \cdot m^{-1}$.

1.2 实验方法

1.2.1 单因素实验设计

为了减少工作量,以最小的成本找到最佳的吸附剂制备条件,在参考他人文献的基础上,以绿色木霉的最佳生存条件为基础,设计如下实验方案. 在 100 mL 锥形瓶中加入 1.5 g 玉米秸秆(已经过 121℃高温湿热灭菌),均匀地滴加入相应量的绿色木霉菌悬液 10^7 个孢子·mL^{-1}(投菌量为 2%)和 Mandel 营养液,在下列设计好的条件下进行固态发酵培养[14].

①在 30℃和固液比(玉米秸秆:营养液)为 1 g:3 mL 时,分别培养 2、4、6、8、10、12 和 14 d,测定改性后材料的吸油量,确定最佳改性时间. ②在 30℃和最佳改性天数时,分别以 1∶1、1∶2、1∶3 和 1∶4 和 1∶5 这 5 种固液比进行培养,确定最佳固液比. ③在最佳改性天数和最佳固液比时,在 25、30、35 和 40℃的条件下培养,确定最佳改性温度.

1.2.2 吸油实验

将 20 g 原油加入装有 150 mL 蒸馏水的 250 mL 烧杯中,静置形成约 0.5 cm 厚的油层. 将 0.2 g 吸附剂放入 200 目不锈钢制成的小网中,小网置于烧杯,使其上的材料没于油膜以下. 将上述装置放入 THZ-82A 型恒温振荡器中,在室温、80 $r \cdot min^{-1}$转速下振荡一定时间后,取出小网沥干 10 min,用重量法称重 3 次取平均值得吸油量[11]. 其计算公式如下:

$$q = \frac{m_2 - (m_1 + m_0)}{m_1}$$

式中,q 为材料吸油量($g \cdot g^{-1}$);m_0 为空网质量(g);m_1 为吸附剂质量(g);m_2 为吸油后的吸附剂和空网的总质量(g). 实验计算时去除空网粘附的油量.

1.2.3 纤维素、半纤维素和木质素含量测定

利用范氏洗涤法[15,16]测量 RCS 和 TCS(由最优条件制备得到)2 种材料中纤维素、半纤维素和木质素的含量.

1.2.4 材料表征

利用扫描电子显微镜观察 RCS 和 TCS 的微观表面形貌. 通过傅里叶变换红外谱仪(Vector 33 型,德国 Bruker 公司)和全自动 X 射线衍射仪(D/max-ⅢA,日本理学公司)分别观察材料红外图谱中官能团的变化以及分析 XRD 谱图中晶形结构和结晶度的变化.

2 结果与讨论

2.1 单因素实验结果

单因素实验为寻求制备最高吸油量的溢油吸附剂提供依据.

图 1 显示的是改性时间对 TCS 吸油量的影响.

从中可以看出，随着绿色木霉改性玉米秸秆时间的延长，制得的溢油吸附剂吸油量逐渐增多，并且在改性时间为 6 d 时吸油量达到最大值 11.57 $g \cdot g^{-1}$，相比未进行生物改性（即改性 0 d）的 TCS 吸油量 6.58 $g \cdot g^{-1}$ 提高了 75.84%；当改性时间超过 6 d 后，制得的溢油吸附剂吸油量稍有下降，但相比原材料吸油量仍然有所增加. 吸油量的增加是由于绿色木霉在其生长过程中可以降解玉米秸秆上的部分纤维素和半纤维素，从而使改性后的秸秆相对原材料而言表面结构部分被破坏，变得粗糙多褶，从而更易粘附原油；另外，原油也得以渗入到材料内部，被大量吸附. 随着绿色木霉的生长，其所降解的玉米秸秆纤维素和半纤维素增多，玉米秸秆材料被进一步分解，使材料本身的空间结构遭到破坏，导致吸附达到饱和时原油较易从材料脱落，材料无法再粘附较多原油[17]. 因此，当绿色木霉降解适量的玉米秸秆纤维素时，可使吸油量最大，如图 1 显示的在 6 d 时所对应的条件. 在下述实验中，将以 6 d 为初始条件对固液比进行优化分析.

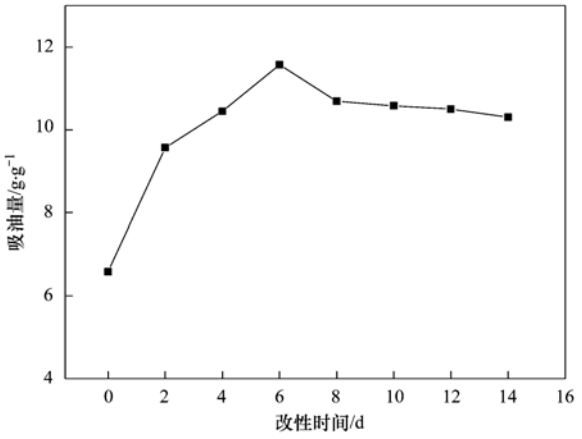


图 1　改性时间对 TCS 吸油量的影响

Fig. 1　Effect of modification time on the adsorption of TCS

改性时的固液比对 TCS 的吸油量影响如图 2 所示. 从中可知，随着固态发酵中固液比的减小，制得的溢油吸附剂吸油量变化较小，但在固液比为 1∶4时，吸油量达到最大值 13.25 $g \cdot g^{-1}$，是 RCS 吸油量 6.58 $g \cdot g^{-1}$ 的两倍，即最佳固液比选择为 1∶4. 从图 3 改性温度对 TCS 吸油量的影响可得，随着绿色木霉改性玉米秸秆温度的增大，制得的溢油吸附剂吸油量逐渐减小，在改性温度为 25℃时，改性制得的 TCS 吸油量达到最大值 13.84 $g \cdot g^{-1}$，是 RCS 吸油量 6.58 $g \cdot g^{-1}$ 的 110.33%. 其原因是由于水分和温度影响绿色木霉的生长状况. 当培养天数确定时，在适当的固液比和温度条件下，绿色木霉才具备良好的活性，从而降解适量的玉米秸秆纤维素和半纤维素. 一方面可使材料表面更加粗糙，另一方面不至使材料降解过多，从而可以获得最佳的吸油量.

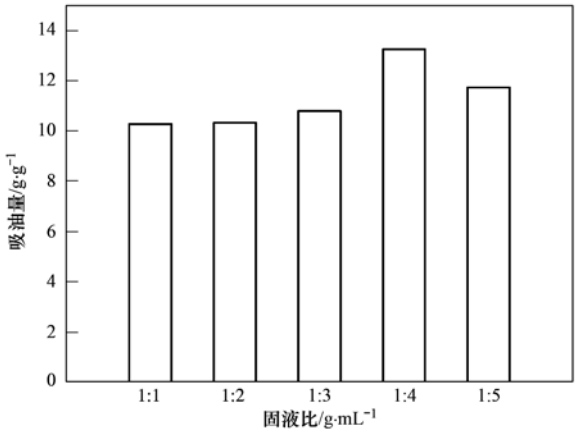
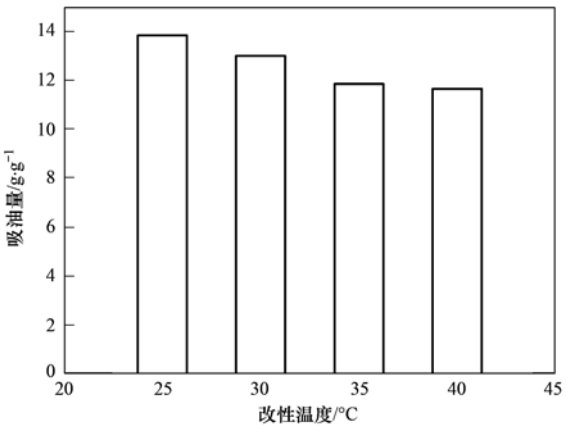


图 2　固液比对 TCS 吸油量的影响

Fig. 2　Effect of solid-liquid ratio on the adsorption of TCS



25℃下绿色木霉的活性过低，在此未列出相关数据

图 3　改性温度对 TCS 吸油量的影响

Fig. 3　Effect of modification temperature on the adsorption of TCS

由上述分析可以得出，最佳的改性条件为：改性 6 d、固液比为 1∶4、改性温度为 25℃. 经过测试，由此制得的吸附剂的最大吸油量为 13.84 $g \cdot g^{-1}$. 在生物改性的过程中，绿色木霉可降解玉米秸秆中的纤维素成分[14]，使得材料结构被破坏；与此同时，绿色木霉的菌丝可机械穿插玉米秸秆，对其施加一定的物理破坏作用[18]. 这都使得材料变得粗糙多褶，有利于原油更好地粘附在材料表面上；另外，材料结构的破坏有利于原油缓慢地深入到材料内部，更多地被材料吸附，这些都会提高材料的吸油量.

2.2　纤维素、半纤维素和木质素含量测定

通过测定材料中纤维素、半纤维素及木质素的含量，从侧面说明绿色木霉在改性过程中对玉米秸秆所起的作用. 如表 1 所示，TCS 相对于 RCS 的纤

表 1 RCS 和 TCS 中各组分含量

Table 1 Concentration of the components from RCS and TCS

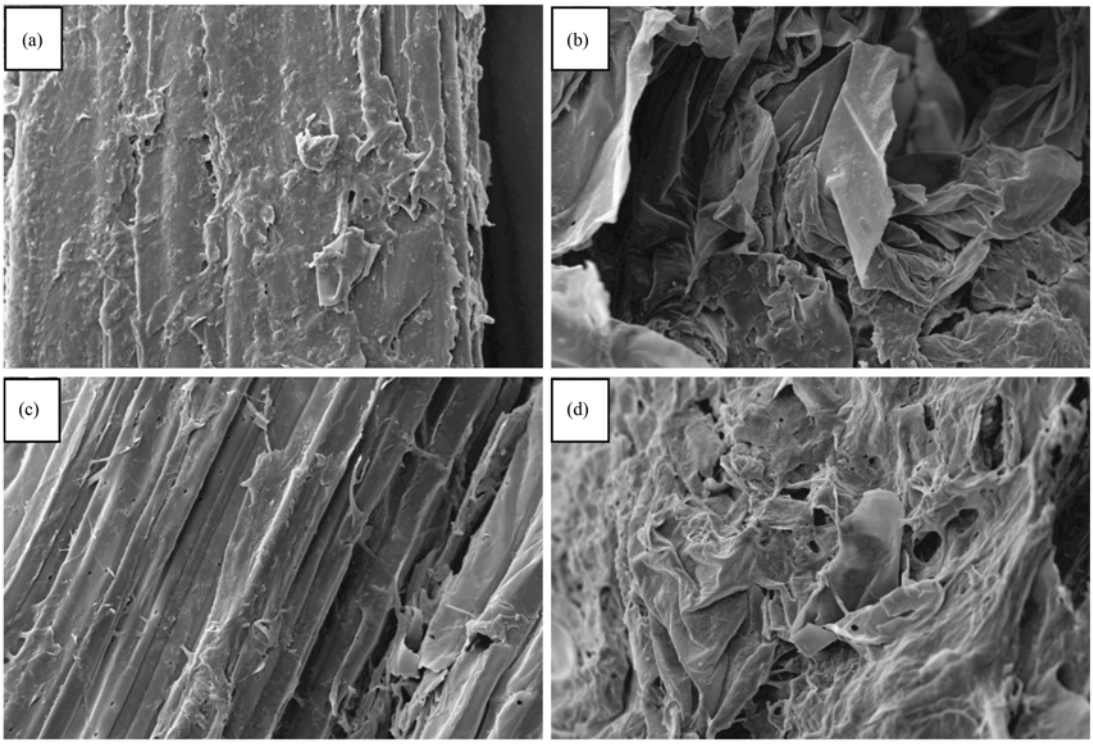
组分	纤维素/%	半纤维素/%	木质素/%
RCS	44.79	23.91	13.88
TCS	40.89	20.09	15.13

维素和半纤维素含量均有所下降,这是由于在生物改性过程中,绿色木霉降解了玉米秸秆中的部分纤维素和半纤维素,使制得的 TCS 中纤维素和半纤维素的含量降低所致; 同时,材料结构遭到破坏,木质素的比例相对上升. 这些都为吸附剂提供更多的吸附空间,并且也进一步辅助说明了改性材料吸油量增大的原因.

2.3 材料表征

2.3.1 扫描电子显微镜(SEM)分析

玉米秸秆粉碎后会暴露出内部的结构,对比图 4(a)和图 4(c)可以看出,RCS 表层碎屑平整致密,而经过生物改性后制得的 TCS,则因为材料被绿色木霉降解而变得粗糙褶皱. 对比图 4(b)和图 4(d),原材料 RCS 内芯碎屑表面光滑,而改性后制得的 TCS 变得粗糙多褶. 上述表明,玉米秸秆经过生物改性后,其表面粗糙度增加,因而使得材料具有较大的吸油容量[11].



(a)和(b): RCS; (c)和(d): TCS (放大倍数均为 2 000 ×)

图 4 RCS 和 TCS 的扫描电镜图

Fig. 4 Scanning electron micrographs of RCS and TCS

2.3.2 红外光谱(FT-IR)分析

根据 Liu 等[19]的报道,在波数为3 419、2 921、1 377、1 055和 899 cm^{-1}处的吸收峰为纤维素本身的特征吸收峰. 图 5 的红外光谱图显示,相比化学改性[20],生物改性并没有引进新的基团; 但是,对比 RCS 和 TCS 在 899 cm^{-1}处的吸收峰消失,表明 TCS 中的纤维素及糖类环振动消失[21]; 而其他上述吸收峰均有出现,可见生物改性并没有完全破坏玉米秸秆中纤维素的结构. 这说明纤维素部分被绿色木霉降解,可作为扫描电镜观察到的材料表面变得粗糙的一个佐证.

2.3.3 X 射线衍射(XRD)分析

X 射线衍射谱图(XRD)可以反映物质晶形结构和结晶度的变化. 纤维素的结晶度是指其结晶部分占纤维素总量的比例,将样品用 X 射线从 5° ~ 60°进行扫描,根据下面的 Segal 公式计算材料的纤维素结晶度[22]:

$$\mathrm{CrI} = \frac{I_{22.1^\circ} - I_{16.3^\circ}}{I_{22.1^\circ}}$$

其中,CrI 为 X 射线结晶度指数; $I_{22.1^\circ}$和 $I_{16.3^\circ}$分别是接触角为 22.1°和 16.3°时对应的峰强度.

由图 6 可以看出,对比生物改性前后的 RCS 和 TCS,二者的 XRD 谱图在接触角为 16.3°和 22.1°处出现典型纤维素 I 型特征峰[23],两者的特征峰没有

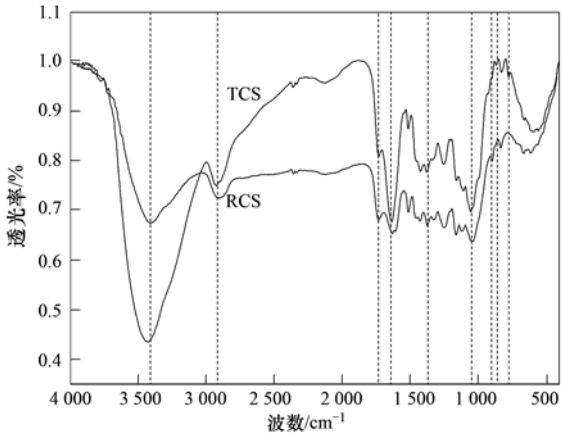


图 5　RCS 和 TCS 的红外谱图

Fig. 5　FT-IR spectra of RCS and TCS

偏移,这表明其晶形结构均为典型的纤维素 I 晶形结构,改性前后材料的晶形结构无变化,材料在改性后仍保持着纤维素本身的特性. 另外根据谱图上的 16.3°和 22.1°处的峰强度读数,可以计算出 RCS 和 TCS 的结晶度分别为 0.43 和 0.40,这说明生物改性降低了玉米秸秆材料的结晶度,TCS 比起 RCS 表面结构更加粗糙; 这与 SEM 显示的结果一致,表明 TCS 对油类物质具有更多的粘附位置,为材料大量吸油提供了有利条件.

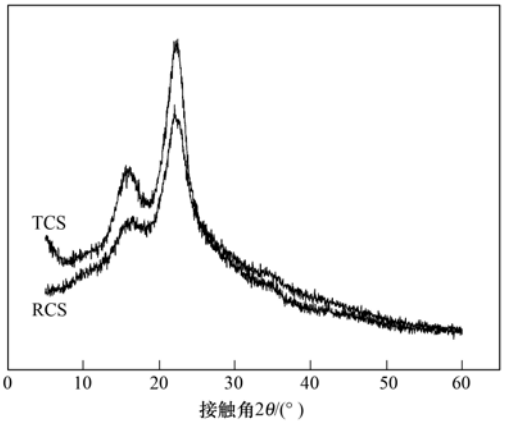


图 6　RCS 和 TCS 的 X 射线衍射图

Fig. 6　XRD patterns of RCS and TCS

2.4　材料吸油性能评价

2.4.1　保油性能分析

保油性能指材料吸油之后在一定的压力条件下依然可以保留的吸油比例,本实验在室温条件下测试 TCS 的保油性能. 如图 7 所示,在 TCS 吸附达到平衡后取出的前 1 min,原油迅速滴淌; 而在 1 ~ 10 min 的区域,原油滴淌趋于缓慢; 当滴淌时间超过 10 min 后,材料的吸油量仍有 13.35 $g \cdot g^{-1}$,为一开始(17.83 $g \cdot g^{-1}$)的 74.87%,可见材料具有较好的保油性能.

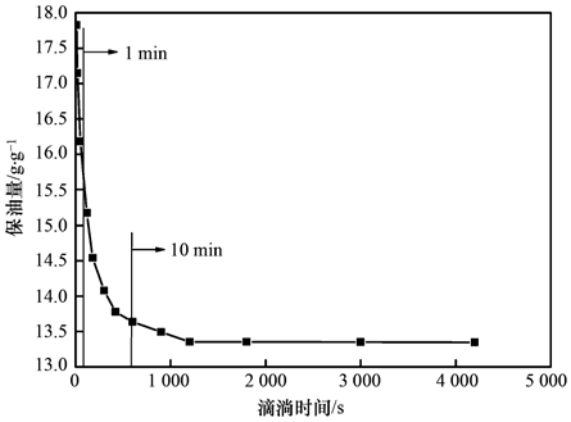


图 7　TCS 的保油性能分析

Fig. 7　Oil retention time of TCS

2.4.2　吸附动力学特征分析

吸附动力学特征是说明材料吸附效果的一项重要评价,图 8 显示了在不同时间下 RCS 和 TCS 吸油量的变化. RCS 在 1 min 内迅速吸附原油,之后吸油量有极为少量地增加,接着吸油速率与解吸速率逐渐趋于平衡,平衡吸油量为 6.56 $g \cdot g^{-1}$. TCS 对原油的吸附则分为 3 个阶段的变化:①在反应时间为 0 ~3 min 时,吸油量急剧增加. 这是因为此时材料的吸水率极低,且吸油速率远远大于解吸速率. ②在反应时间为 3 ~10 min 时,解析速率逐渐增大,使得吸油量由最大处逐渐减小; 然而由于材料具有良好的保油性能,从而使材料的吸油量仍然维持在较高水平. 随着吸附时间的延长,材料在水油界面的吸水量增加,材料的吸油量略微减少[24]. ③在反应时间大于 10 min 后,随着吸附时间的延长,由于原油缓慢进入材料纤维素的内部,因而材料吸油量缓慢增加并趋于平衡[25,26].

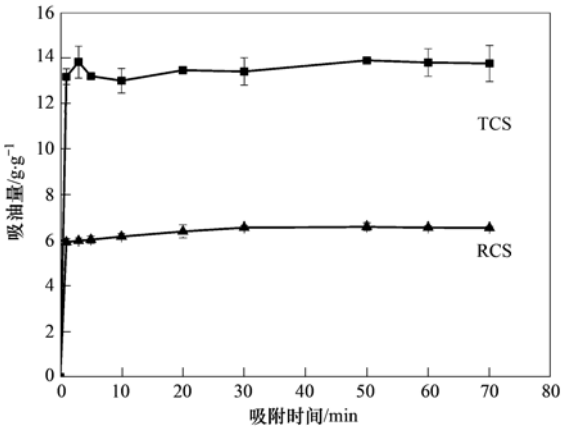


图 8　RCS 和 TCS 的吸附动力学特征

Fig. 8　Dynamic sorption characteristics of RCS and TCS

3 结论

(1)绿色木霉改性玉米秸秆的最佳条件为:在固液比为 1∶4、改性温度为 25℃时,培养改性 6 d,制得的 TCS 吸油量最大,达到 13.84 $g \cdot g^{-1}$,相对未改性的材料 RCS 提高了 110.33%.

(2)对改性前后的玉米秸秆材料中纤维素和半纤维素的含量分析表明,生物改性降低了材料中的纤维素及半纤维素的含量. SEM、FT-IR 和 XRD 分析表明,生物改性使得玉米秸秆表面变得粗糙,有利于材料更好地吸附原油.

(3)材料吸油性能评价显示 TCS 具有快速吸油和良好的保油性能.

(4)以玉米秸秆为原材料进行生物改性制备得到的溢油吸附剂 TCS 具备溢油吸附剂所应具有的良好性能,并且其材料来源及制备过程对环境友好,不产生二次污染,是一种具有较好应用前景的水体溢油吸附材料.

参考文献:

[1] 郑西来, 刘孝义, 席临平. 多孔介质吸附对石油污染物运移的阻滞效应研究[J]. 长春科技大学学报, 1999, **29**(1): 52-54.

[2] Schmidt-Etkin D. Chapter 2-Spill occurrences: a world overview [M]. Oil Spill Science and Technology, 2011. 7-48.

[3] Mullin J V, Champ M A. Introduction/overview to in situ burning of oil spills[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2003, **8**(4): 323-330.

[4] 哈丽丹·买买提, 库尔班江·肉孜, 阿不利米提, 等. 纤维素接枝甲基丙烯酸烷基酯制备吸油材料[J]. 石油化工, 2010, **39**(6): 664-668.

[5] Lim T, Huang X F. Evaluation of kapok (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) as a natural hollow hydrophobic-oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup[J]. Chemosphere, 2007, **66**(2): 955-963.

[6] Radetic M, Ilic V, Radojevic D, *et al*. Efficiency of recycled wool-based nonwoven material for the removal of oils from water [J]. Chemosphere, 2008, **70**(3): 525-530.

[7] 谷庆宝, 吴兵, 李发生, 等. 可生物降解吸油材料发展现状与研究进展[J]. 石油化工环境保护, 2002, **25**(2): 23-25.

[8] Wei Q F, Mather R R, Fotheringham A F. 用于回收泄漏石油的非织造吸油材料[J]. 产业用纺织品, 2004, **22**(3): 26-28.

[9] 张俊华. 玉米秸秆水解及其制备甲基呋喃类液体燃料的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[10] 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.

[11] 张思文, 党志, 彭丹, 等. H_2O_2/NaOH 改性玉米秸秆制备石油吸附剂的实验研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(11): 2384-2388.

[12] 周建斌, 叶汉玲, 张合玲, 等. 生物改性竹炭制备工艺及其应用的研究[J]. 水处理技术, 2008, **34**(10): 38-41.

[13] 许士玉, 周衙欣, 阳路, 等. 漆酶介体体系对竹子化机浆的生物改性[J]. 黑龙江造纸, 2011, (3): 11-14.

[14] 陈耀宁, 曾光明, 黄国和, 等. 培养条件对一株木霉产纤维素酶过程影响的研究[J]. 微生物学杂志, 2005, **25**(3): 5-9.

[15] 杨云贵, 龙明秀, 王莺, 等. 牧草、玉米青贮和作物秸秆营养价值的洗涤剂法评定[J]. 草地学报, 2004, **12**(2): 132-135.

[16] 范树国, 周丽娟, 邱璐, 等. 硫酸法测定 4 种常见农作物秸秆的木质素含量[J]. 江苏农业科学, 2010, (5): 395-398.

[17] Wei Q F, Mather R R, Fotheringham A F, *et al*. Evaluation of nonwoven polypropylene oil sorbents in marine oil-spill recovery [J]. Marine Polltuion Bulletin, 2003, **46**(6): 780-783.

[18] 韩阳. 黑曲霉对海带纤维素降解条件的研究[J]. 江苏农业科学, 2010, (3): 358-360.

[19] Liu C F, Xu F, Sun J X, *et al*. Physicochemical characterization of cellulose from perennial ryegrass leaves (lolium perenne)[J]. Carbohydrate Research, 2006, **341**(16): 2677-2687.

[20] 郑刘春. 玉米秸秆及其纤维素的改性和吸附水体镉离子的机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[21] 卢松. 微生物处理玉米秸秆的腐解特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.

[22] Segal L, Creely J J, Martin A E, *et al*. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-Ray diffractometer[J]. Textile Research Journal, 1959, **29**(10): 786-794.

[23] 宁欣强, 王远亮, 曾国明. 响应面法优化水/醇处理后汽爆玉米秸秆酶解[J]. 精细化工, 2011, **28**(6): 539-543, 567.

[24] Husseien M, Amer A A, El-Maghraby A, *et al*. Availability of barley straw application on oil spill clean up [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2009, **6**(1): 123-130.

[25] Khan E, Virojnagud W, Ratpukdi T. Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff[J]. Chemosphere, 2004, **57**(7): 681-689.

[26] Wei Q F, Mather R R, Fotheringham A F. Oil removal from used sorbents using a biosurfactant[J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(3): 331-334.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 34 No. 4

Apr. 15, 2013

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan ····· MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, *et al.* (1225)

Characterization of Water-soluble ions in $PM_{2.5}$ at Dinghu Mount ····· ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, *et al.* (1232)

Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing ····· HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, *et al.* (1236)

Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Species in Shenzhen ····· YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1258)

Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City ····· XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, *et al.* (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, *et al.* (1270)

Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method ····· ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, *et al.* (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, *et al.* (1298)

Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter ····· NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1333)

Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai ····· TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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 Flocs ····· HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, *et al.* (1363)

Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (*Rapana venosa*) Exposured to Organotin Compounds in Bohai Bay, China ····· AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, *et al.* (1369)

Bioaccumulation of Mercury in *Crassostrea* sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfuriaztion 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, *et al.* (1380)

Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process ····· CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, *et al.* (1386)

Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon ····· LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, *et al.* (1392)

Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon ····· WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, *et al.* (1402)

Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation ····· PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, *et al.* (1411)

Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process ····· YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1442)

Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System ····· ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, *et al.* (1448)

Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs ····· 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, *et al.* (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, *et al.* (1485)

Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on *Microcystis aeruginosa* ····· GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, *et al.* (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, *et al.* (1498)

Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment ····· WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, *et al.* (1510)

Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from *Pseudomonas aeruginosa* ····· SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, *et al.* (1517)

Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 ····· HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, *et al.* (1524)

Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities ····· QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, *et al.* (1531)

Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation ····· LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, *et al.* (1540)

Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media ····· YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, *et al.* (1545)

Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil ····· YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, *et al.* (1553)

Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot ····· GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, *et al.* (1561)

Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density ····· LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, *et al.* (1568)

Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils ····· SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, *et al.* (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, *et al.* (1590)

Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(Ⅱ) on Variable Charge Soils ····· JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, *et al.* (1598)

Preparation and Performance Investigation of *Trichoderma viride*-Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills ····· LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, *et al.* (1605)

Removal of PO_4^{3-} 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, *et al.* (1617)

Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon ····· LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, *et al.* (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, *et al.* (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