



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第7卷 第4期

Vol.7 No.4

中国科学院 主办
生态环境研究中心
科学出版社 出版

4
2013

目次

水污染防治

SBR 单级自养脱氮系统氮素转化途径	吕永涛	王磊	孙婷	王旭东	王志盈(1201)				
基于 SIMULINK 的硝化反应动力学模型的仿真	罗飞杭	杨朝晖	卢慧	罗远玲	战琪(1206)				
不同来源高浓度有机废水的集中处理	张伟军	高雅	马士龙	张明	王东升	徐岳阳(1213)			
纯种氨氧化菌短程反硝化特性	周莉	李正魁	王易超	范念文(1219)					
常温 CSTR 部分亚硝化影响因素及工况优化研究	仲航	李冬	吴迪	曾涛涛	刘丽倩	苏东霞	张杰(1225)		
温度和污泥浓度对碱性条件下剩余污泥水解酸化的影响	苏高强	王淑莹	郑冰玉	彭永臻(1231)					
双向旋流污水净化器处理溢流污水	臧宝凤	黄勇强	徐明力	史凯	朱艳(1237)				
铁碳布空气阴极微生物燃料电池的产电性能	唐玉兰	何亚婷	于鹏飞	孙红	于燕	彭漫(1241)			
十溴联苯醚共存条件下水中 Zn(II) 的生物吸附	白洁琼	尹华	叶锦韶	彭辉	叶芊	何宝燕	李跃鹏	张娜	彭素芬(1245)
微波辅助疏水膜的清洗	尹子飞	王军	纪仲光	侯得印(1251)					
厌氧反应器废水资源化过程在线监测系统	王顺利	尚丽平	李占锋	邓琥	刘先勇(1256)				
不同因素对人工湿地基质脱氮除磷效果的影响	陈丽丽	赵同科	张成军	李鹏	李新荣	董若征(1261)			
新型化粪池处理生活污水启动阶段的实验	陈志强	关华滨(1267)							
pH 值对“Fe ⁰ -厌氧微生物”体系去除 2,4,6-三氯酚过程的影响	吴金钢	戴友芝	郭丽丽	汪桂芝	李小娜(1273)				
二氧化钛颗粒制备及其对水中三价砷的去除	谢冬梅	曹林洪	崔金立(1279)						
氨基化凹土对水中焦性没食子酸的吸附	王春香	张艳	薛爱莲	周守勇	赵宜江	陈智栋(1285)			
吸附氧化/纳滤/吸附组合工艺处理丙烯腈工业废水	李薇	展侠	李继定	郑冬菊(1290)					
不同水生植物去除水体氮磷的效果	何娜	孙占祥	张玉龙	刘鸣达(1295)					
增蓝剂停留时间及对水质和浮游植物影响分析	李岩	张饮江	刘晓培	吴昊	张乐婷	段婷	黎臻	张曼曼(1301)	
温度对亚硝化及氧化亚氮释放的影响	郭宁	张建	孔强	苗明升	田琳(1308)				
超滤膜深度处理染整废水的膜污染机理	付乐乐	李方	吴亮	王歌(1313)					
混凝沉淀去除丙烯酸丁酯废水浊度物质	谷小凤	宋玉栋	周岳溪	马力强	李军	王俊(1319)			
连片生态浮床对微污染河水的净化效果	段金程	张毅敏	张红卫	高月香	晁建颖(1324)				
循环式活性污泥工艺协同处理榨菜废水与城镇污水脱氮效果	何强	丁文静	司马卫平(1331)						
微孔曝气变速氧化沟循环特性的中试研究	杨亚红	彭党聪	李磊	郑阳光	韩芸(1336)				
不同类型潜流湿地处理养猪废水的对比	李鹏宇	王振	袁林江	董健	刘琳	朱葛夫	刘超翔(1341)		
粉煤灰制备混凝剂及其对黄河水的处理效果	李玉梅	陈莉荣	杜明展(1346)						
利用沉水植物生长期收割进行富营养化水体生态管理的实地研究	姜义帅	陈灏	马作敏	李静(1351)					
浊度仪法快速测定水体中硫酸盐含量	薛秀玲	李孟迪(1359)							
MBR 净化受污染地表水的自然启动及稳定运行除污染特性	杨威	赵秋静	韩正双	李凯	梁恒	李圭白(1363)			
RBF 与 Elman 神经网络在人工湿地复合基质去污效果预测中的应用	梁启斌	刘云根	田昆	王万宾(1368)					
稳定表流湿地中污泥的形成及除污效果	张龙飞	王成端	王志帅(1373)						
新型多功能螯合树脂的合成及对水中 Cd(II) 离子的吸附特征	王佳佳	马慧敏	张田林(1378)						
多孔镁铝复合氧化物对水溶液中 Cr(VI) 的吸附性能	王秀娟	王海增(1383)							
啤酒废水常温厌氧消化启动及运行实验	林长松	徐龙飞	谈林友(1389)						
硫化物沉淀法处理含铅废水	何绪文	胡建龙	李静文	张晶晶	王建兵	葛鹏(1394)			
无机陶瓷膜处理油田采出水	丁慧	彭兆洋	李毅	温沁雪	陈志强(1399)				
减压蒸馏耦合微电解处理六硝基萘二段洗水	车冉	郝志	叶正芳(1405)						
水解-复合生物滤池工艺处理盐化工工业废水	管硕	张鸿涛	吴春旭	程林波	宁涛(1411)				

响应面法优化聚丙烯酸/腐殖酸/累托石吸附剂的制备条件	陈芳艳	叶伟	孙怡涵	贾丽萍	唐玉斌(1417)
生物制剂法治理藻类水华	周晓云	黄瑞敏	刘欣	文淦斌	(1425)
不同流量分配比对多级 A/O 工艺去除有机物及脱氮的影响	王敏	张智	陈杰云	范功端	金可
.....	梁鹏	胡玲			(1430)
光催化氧化-Fenton 组合方法降解高浓度正丙醇废水	曾惠明	程慎玉	沈晓莉	马欢林	(1435)
纳滤膜在垃圾渗滤液深度处理中应用	宁桂兴	张忻	王凯	姜安平	汪桂林(1440)

大气污染防治

Fenton 试剂法降解餐厨垃圾异味	狄彦强	刘杰民	刘思园	颜鲁春	冯振华(1445)
特殊植物类群空气凤梨对大气污染物甲醛的净化	李俊霖	李鹏	王恒蓉	郑桂灵	(1451)
天津市纪庄子污水处理厂恶臭气体排放研究	王钊	王秀艳	高爽	白志鹏	(1459)
碳纳米管/二氧化钛/壳聚糖催化薄膜光催化活性及苯降解机理	曾丽萍	张泉	张国强		(1465)
不锈钢烧结纤维毡外加粉体助剂过滤烟尘微粒	包力	杨国华	李邯鹏	王炳辉	杜珂
.....	黄三				(1472)
西安市冬、夏两季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征分析	张承中	丁超	周变红	陶李	刘立忠(1477)

固体废物处置

一株氧化亚铁硫杆菌的分离及其浸出废旧线路板中铜的效果	张婷	朱能武	许治国	石超宏	(1482)
玉米秸与鸡粪混合厌氧消化产气性能与协同作用	冯亚君	袁海荣	张良	李超	高健
.....	赵明星	阮文权			(1495)
磁化焙烧-磁选法回收循环流化床固硫灰中铁	巫侯琴	李军	卢忠远	徐龙华	管波
.....	韦燕飞				(1500)
掺固硫灰 AC-13 型沥青混合料配合比设计	侯莉	赵智	卢忠远	宋丽贤	彭洪
.....	陈培军	李军			(1505)
鸡毛不溶解蛋白海绵膜的制备与表征	庄媛	吴小倩	曹张军	赵晓祥	周美华(1510)
利用废弃物衍生燃料的热化学处理法制富含氢气合成气				吴畏	(1515)
两相厌氧消化工艺处理鸡粪	倪哲	潘朝智	牛冬杰	陈玲	(1522)
添加氮损失抑制剂对蓝藻泥堆肥质量的影响	任云	崔春红	刘奋武	占新华	周立祥(1527)
臭氧化法深度处理生活垃圾焚烧厂沥滤液	穆永杰	叶杰旭	孙德智		(1535)
液晶显示器玻璃基板回收工艺	孙媛媛	李龙珠	唐惠东		(1541)
废旧线路板真空热解油合成热固性酚醛树脂					
.....	朱灶	蔡思涵	孙水裕	刘敬勇	张荣学
.....	徐东军	钟胜	杨帆	李神勇	许娉婷(1545)

土壤污染防治

均匀电场下多环芳烃在土壤中的迁移	王翠苹	许伟	孙红文		(1550)
堆肥污泥重金属在黄土中的淋滤特征	马可婧	张明泉	蔡圆		(1557)
Fenton 氧化技术处理稠油污染土壤	刘其友	李琳	张云波	赵东风	赵朝成(1563)
汞、铅、铬污染土壤的微生物修复	李梦杰	王翠玲	李荣春	洪俊彦	严亮
.....	刘丽	庄立			(1568)
生物强化修复石油污染土壤	张秀霞	滕芝	吴佳东		(1573)
石油烃对翅碱蓬生理特性的影响及植物-微生物联合降解	高乃媛	刘宪斌	赵兴茹		(1578)

噪声污染防治

高速列车纵向对称面气动噪声计算及外形优化	肖友刚	张平			(1583)
----------------------------	-----	----	--	--	--------

环境生物技术

润滑油高效降解菌的筛选及降解性能	郭晓燕	张志红	沈齐英	李翠清	(1589)
------------------------	-----	-----	-----	-----	--------

相关研究

侧入式搅拌槽中多相流场特性的数值模拟	张林进	陈功国	柏杨	叶旭初	(1594)
--------------------------	-----	-----	----	-----	--------

CONTENTS

Nitrogen conversion pathway of autotrophic nitrogen removal process in single SBR	Lü Yongtao Wang Lei Sun Ting Wang Xudong Wang Zhiying(1201)
Stimulation based on SIMULINK for nitrification reaction kinetics model	Luo Feihang Yang Zhaohui Lu Hui Luo Yuanling Zhan Qi(1206)
Central treatment of wastewater with high organic content from different industrial sources	Zhang Weijun Gao Ya Ma Shilong Zhang Ming Wang Dongsheng Xu Yueyang(1213)
Shortcut denitrification characterization of immobilized AOB	Zhou Li Li Zhengkui Wang Yichao Fan Nianwen(1219)
Research on influencing factors and operation optimization for CSTR partial nitrification at normal temperature	Zhong Hang Li Dong Wu Di Zeng Taotao Liu Liqian Su Dongxia Zhang Jie(1225)
Effect of temperature and sludge concentration on hydrolysis and acidification of waste activated sludge under alkaline condition	Su Gaoqiang Wang Shuying Zheng Bingyu Peng Yongzhen(1231)
Treatment of overflow using two-way cyclone flocculation hydrocyclone	Zang Baofeng Huang Yongqiang Xu Mingli Shi Kai Zhu Yan(1237)
Electricity generation performance of microbial fuel cells with carbon cloth as air-cathode and iron as cathode catalyst	Tang Yulan He Yating Yu Pengfei Sun Hong Yu Yan Peng Man(1241)
Biosorption of zinc(II) in water with decabromodiphenyl ethers	Bai Jieqiong Yin Hua Ye Jinshao Peng Hui Ye Qian He Baoyan Li Yuepeng Zhang Na Peng Sufen(1245)
Microwave assisted cleaning of hydrophobic membrane	Yin Zifei Wang Jun Ji Zhongguang Hou Deyin(1251)
Online monitoring system of anaerobic reactor in processes of transforming wastewater into resources	Wang Shunli Shang Liping Li Zhanfeng Deng Hu Liu Xianyang(1256)
Influences of different factors on effect of matrix nitrogen and phosphorus removal in substrates of constructed wetland	Chen Lili Zhao Tongke Zhang Chengjun Li Peng Li Xinrong Dong Ruozheng(1261)
Experiment on start-up phase of new modified septic tanks treating domestic sewage	Chen Zhiqiang Guan Huabin(1267)
Effect of pH values on process for removal of 2,4,6-trichlorophenol by Fe⁰-anaerobic microbe system	Wu Jingang Dai Youzhi Guo Lili Wang Guizhi Li Xiaona(1273)
Preparation and evaluation of TiO₂ granule for As(III) removal from water	Xie Dongmei Cao Linhong Cui Jinli(1279)
Adsorption of pyrogallol from aqueous solution by amine modified attapulgite	Wang Chunxiang Zhang Yan Xue Ailian Zhou Shouyong Zhao Yijiang Chen Zhidong(1285)
Treatment of wastewater from acrylonitrile industries with combined processes of adsorption oxidation, nanofiltration and adsorption	Li Wei Zhan Xia Li Jiding Zheng Dongju(1290)
Efficiency of removing nitrogen and phosphorus from simulated wastewater using hydrophytes	He Na Sun Zhanxiang Zhang Yulong Liu Mingda(1295)
Retention time and effects on water quality and phytoplankton of water shade agent-True Blue	Li Yan Zhang Yinjiang Liu Xiaopei Wu Hao Zhang Leting Duan Ting Li Zhen Zhang Manman(1301)
Effect of temperature on ammonification and nitrous oxide emission in partial nitrification	Guo Ning Zhang Jian Kong Qiang Miao Mingsheng Tian Lin(1308)
Fouling mechanism in advanced treatment of dyeing wastewater by ultrafiltration membrane ...	Fu Lele Li Fang Wu Liang Wang Ge(1313)
Removal of turbidity from butyl-acrylate wastewater by coagulation-sedimentation	Gu Xiaofeng Song Yudong Zhou Yuexi Ma Liqiang Li Jun Wang Jun(1319)
Purification effect of ecological floating beds of flakiness connection in slightly polluted river water	Duan Jincheng Zhang Yimin Zhang Hongwei Gao Yuexiang Chao Jianying(1324)
Nitrogen removal efficiency of co-processing pickle wastewater and municipal sewage by cyclic activated sludge system(CASS) process ...	He Qiang Ding Wenjing Sima Weiping(1331)
Pilot study on flow characteristics of a variable-velocity oxidation ditch with fine bubble	Yang Yahong Peng Dangeong Li Lei Zheng Yangguang Han Yun(1336)
Comparison of two different constructed wetland systems to treat swine wastewater	Li Pengyu Wang Zhen Yuan Linjiang Dong Jian Liu Lin Zhu Gefu Liu Chaoxiang(1341)
Preparation of coagulant from fly ash and its application in Yellow River water treatment	Li Yumei Chen Lirong Du Mingzhan(1346)
Field study on effect of harvesting submerged plant during growing season for ecological management of eutrophicated water	Jiang Yishuai Chen Hao Ma Zuomin Li Jing(1351)
Rapid determination of sulfate in water by turbidimetry	Xue Xiuling Li Mengdi(1359)
Pollutants removal characteristics of natural start-up and steady operation of membrane bioreactor (MBR) for treating polluted surface water	Yang Wei Zhao Qiujing Han Zhengshuang Li Kai Liang Heng Li Guibai(1363)
Application of RBF and Elman neural network in prediction on pollutant removal efficiency of constructed wetland with different compound substrates	Liang Qibin Liu Yungen Tian Kun Wang Wanbin(1368)
Sludge formation and decontamination effect of stable surface flow wetland systems	Zhang Longfei Wang Chengduan Wang Zhishuai(1373)
Synthesis of multifunctional chelating resin and its adsorption properties for Cd(II) in water ...	Wang Jiajia Ma Huimin Zhang Tianlin(1378)

Adsorption behavior of Cr(VI) from aqueous solution on porous Mg/Al mixed oxides	Wang Xiujuan Wang Haizeng(1383)
Start-up and operation of anaerobic digestion of brewery wastewater at ambient temperature ...	Lin Changsong Xu Longfei Tan Linyou(1389)
Treatment of wastewater containing lead by sodium sulfide precipitation	He Xuwen Hu Jianlong Li Jingwen Zhang Jingjing Wang Jianbing Ge Peng(1394)
Treatment of oilfield produced water by inorganic ceramic membrane	Ding Hui Peng Zhaoyang Li Yi Wen Qinxue Chen Zhiqiang(1399)
Treatment of hexanitrostilbene wastewater by vacuum distillation coupling in micro-electrolysis	Che Ran Hao Zhi Ye Zhengfang(1405)
Salt chemical industrial wastewater treatment using hydrolysis-combined biological filter process	Guan Shuo Zhang Hongtao Wu Chunxu Cheng Linbo Ning Tao(1411)
Optimization of preparation conditions of polyacrylic acid/humic acid/rectorite adsorbent based on response surface methodology	Chen Fangyan Ye Wei Sun Yihan Jia Liping Tang Yubin(1417)
Control of algal bloom with immobilized biological catalyst	Zhou Xiaoyun Huang Ruimin Liu Xin Wen Ganbin(1425)
Influence of different influent flow distribution ratios on biological nitrogen and carbon removal by multi-stages A/O process	Wang Min Zhang Zhi Chen Jieyun Fan Gongduan Jin Ke Liang Peng Hu Ling(1430)
Treatment of wastewater containing high concentration of 1-propanol with UV photocatalysis/Fenton reagent	Zeng Huiming Cheng Shenyu Shen Xiaoli Ma Huanlin(1435)
Application of nanofiltration technology in treatment of urban soil composting leachate	Ning Guixing Zhang Xin Wang Kai Jiang Anping Wang Guilin(1440)
Treating food waste odor by Fenton reagent method	Di Yanqiang Liu Jiemin Liu Siyuan Yan Luchun Feng Zhenhua(1445)
Purification of air pollutant—formaldehyde with special plant group—epiphytic <i>Tillandsia</i>	Li Junlin Li Peng Wang Hengrong Zheng Guiling(1451)
Research of odor emission in Jizhuangzi Sewage Treatment Plant in Tianjin	Wang Zhao Wang Xiuyan Gao Shuang Bai Zhipeng(1459)
Photocatalytic degradation activity and mechanism of CNTs/TiO ₂ /CS Film of gas phase benzene	Zeng Liping Zhang Quan Zhang Guoqiang(1465)
Filtering soot particles by stainless steel sintered fiber felt combining with powder	Bao Li Yang Guohua Li Hanpeng Wang Binghui Du Ke Huang San(1472)
Pollution characteristics of carbon aerosol in PM _{2.5} of Xi'an during winter and summer	Zhang Chengzhong Ding Chao Zhou Bianhong Tao Li Liu Lizhong(1477)
Isolation of an <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> strain and its performance in bioleaching of copper from waste printed circuit boards	Zhang Ting Zhu Nengwu Xu Zhiguo Shi Chaozhong(1482)
Performance and synergistic effect of anaerobic co-digestion of corn stover and chicken manure	Feng Yajun Yuan Hairong Zhang Liang Li Chao Gao Jian Li Xiujin(1489)
Biogas production potential of Taihu cyanobacteria at different storage times	Zhao Mingxing Ruan Wenquan(1495)
Recycling of the iron resources of CFBC fly ash by magnetizing roasting-magnetic separation	Wu Houqin Li Jun Lu Zhongyuan Xu Longhua Guan Bo Wei Yanfei(1500)
Mix design of AC-13 asphalt concrete with circulating fluidized bed combustion ash	Hou Li Zhao Zhi Lu Zhongyuan Song Lixian Peng Hong Chen Peijun Li Jun(1505)
Preparation and characterization of sponge film based on feather reduction residue	Zhuang Yuan Wu Xiaoqian Cao Zhangjun Zhao Xiaoxiang Zhou Meihua(1510)
Hydrogen-rich synthesis gas production via thermochemical of refuse derived fuel	Wu Wei(1515)
Treatment of chicken manure by two-phase anaerobic digestion reactor	Ni Zhe Pan Chaozhi Niu Dongjie Chen Ling(1522)
Effect of adding nitrogen loss inhibitor on quality of dehydrated blue-green algae compost	Ren Yun Cui Chunhong Liu Fenwu Zhan Xinhua Zhou Lixiang(1527)
Advanced treatment of leachate from MSW incineration by ozonation	Mu Yongjie Ye Jiexu Sun Dezhi(1535)
Recovery process of glass substrate from liquid crystal display	Sun Yuanyuan Li Longzhu Tang Huidong(1541)
Synthesis of thermosetting PR with WPCB vacuum pyrolysis oils	Zhu Zao Cai Sihan Sun Shuiyu Liu Jingyong Zhang Rongxue Xu Dongjun Zhong Sheng Yang Fan Li Shenyong Xu Pingting(1545)
Migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils under uniform electric field	Wang Cuiping Xu Wei Sun Hongwen(1550)
Leaching characteristics of heavy metals in compost sludge in loess	Ma Kejing Zhang Mingquan Cai Pu(1557)
Heavy oil-contaminated soils remediation by Fenton oxidation	Liu Qiyou Li Lin Zhang Yunbo Zhao Dongfeng Zhao Chaocheng(1563)
Microorganism remediation of Hg, Pb and Cr contaminated soil	Li Mengjie Wang Cuiling Li Rongchun Hong Junyan Yan Liang Liu Li Zhuang Li(1568)
Bioaugmentation remediation of petroleum contaminated soil	Zhang Xiuxia Teng Zhi Wu Jiadong(1573)
Influence of oil in soil on growth and physiological indexes of <i>suaeda heteroptera</i> and plant-microbial remediation	Gao Naiyuan Liu Xianbin Zhao Xingru(1578)
Numerical prediction of aerodynamic noise radiated from longitudinal symmetric plane of high-speed train and shape optimization	Xiao Yougang Zhang Ping(1583)
Screening of lube oil biodegradation strain and degrading characteristics	Guo Xiaoyan Zhang Zhihong Shen Qiying Li Cuiqing(1589)
Numerical simulation on field characteristics of multiphase flow in side-entering stirred tank	Zhang Linjin Chen Gongguo Bai Yang Ye Xuchu(1594)

汞、铅、铬污染土壤的微生物修复

李梦杰^{1,2} 王翠玲¹ 李荣春^{1*} 洪俊彦² 严亮³ 刘丽³ 庄立³

(1. 云南农业大学食用菌研究所, 昆明 650201; 2. 普洱滇洪俊生物科技开发有限公司, 普洱 665000;
3. 普洱茶研究院, 普洱 665000)

摘要 利用裂褶菌(*Schizophyllum commune*) GGHN08-116 菌株, 以棉籽壳、玉米秸等为固体发酵底物修复受汞、铅、铬污染的土壤。通过菌丝穿透重度重金属土壤实验, 研究了菌丝在穿透土壤过程对交换态重金属的影响以及该菌株子实体对重金属离子的富集能力, 同时, 通过盆栽实验研究了在重度重金属污染土壤上, 施用不同比例的固体发酵料对污染土壤中汞、铅、铬及其胡萝卜根茎质量、产量的影响, 研究表明, 该菌株能穿透厚度为 5 cm 的土壤, 并有子实体生成, 土壤 pH 值略有下降, 与对照差异不显著; 与对照相比, 土壤中交换态汞、铬含量均显著下降, 而交换态铅差异不显著, 子实体中除汞含量符合标准外, 铅、铬均超出了 GB 7096-2003, GB 2762-2005 规定标准。在固体发酵料处理下土壤中交换态汞、铅、铬含量均显著下降, 胡萝卜根茎中均未检测到汞、铅含量, 铬含量也符合 GB 2762-2005 规定标准。GGHN08-116 菌株及其固体发酵产物具有修复受重金属污染土壤的能力。

关键词 裂褶菌 重金属 固体发酵底物 微生物修复

中图分类号 X53 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2013)04-1568-05

Microorganism remediation of Hg, Pb and Cr contaminated soil

Li Mengjie^{1,2} Wang Cuiling¹ Li Rongchun¹ Hong Junyan² Yan Liang³ Liu Li³ Zhuang Li³

(1. Institute of Edible Fungi, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Puer Dian Hongjun Biotechnology Technology Development Co. Ltd., Puer 665000, China; 3. Puer Institute of Pu-Erh Tea, Puer 665000, China)

Abstract The strain GGHN08-116 of *Schizophyllum commune* was applied to remedy heavy metal (Hg, Pb and Cr) contaminated soil by using cottonseed-hulls and corn stalks as solid fermentation substrates. Through the growth and penetration of fungal hyphae in the soil, the contents of exchangeable heavy metal ions, and the fungal ability for accumulating these ions in contaminated soil were studied. Furthermore, by applying the solid fermentation substrates on contaminated soil in pots which planted carrots, the contents of Hg, Pb and Cr ions in soil and the quality and yield of carrot roots were observed. The results showed that the strain could penetrate into soil to 5 cm deep, and produce fruit bodies. The pH of treated soil was lower than the control, but with no significant differences. The contents of exchangeable Hg and Cr ions decreased significantly, but the contents of Pb had no significant differences compared to the control. Except Hg, the amounts of exchangeable Pb and Cr ions in the fungal fruit bodies were in excess of the specified standards GB 7096-2003 and GB 2762-2005. After the solid fermentation treatment, the contents of exchangeable Hg, Pb and Cr ions in soil significantly decreased; the Hg and Pb ions were not detected in the carrot roots and stalks, and the Cr contents in carrot were corresponded with the specified standard GB 2762-2005. Therefore, the strain GGHN08-116 and its solid fermentation products is able to remedy the Hg, Pb and Cr contaminated soil.

Key words *Schizophyllum commune*; heavy metals; solid fermentation materials; microbial bioremediation

目前,我国受汞、铅、镉等重金属污染的耕地面积近 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占总耕地面积的 20%^[1,2], 土壤受污染后, 不仅降低了土壤肥力, 破坏了土壤中微生物群落, 而且由于土壤污染衍生出来的食品安全问题更是直接危害着人类的健康^[3,4], 因此对重金属污染土壤的修复和治理已成为了当今亟待解决的问题。

污染土壤的微生物修复是近年来一个研究热

点^[5], 它利用微生物的生物活性使土壤中的重金属亲合吸附或转化, 其主要是使交换态重金属含量减少, 其它相对稳定的含量增加, 从而减小了被生物吸

基金项目 国家公益性行业(农业)科研专项(200803033-A0908)

收稿日期 2012-02-21; **修订日期** 2012-06-27

作者简介 李梦杰(1985~), 男, 硕士研究生, 主要从事环境的生物修复方面研究。E-mail: lmj851111@163.com

* 通讯联系人, E-mail: rongchunli@126.com

收的风险,降低污染程度^[6]。微生物修复法具有处理费用低,对环境影响小、效率高等优点,加之微生物自身具有种类繁多,数量庞大,比表面积大等特点^[7],所以利用一些真菌、细菌、放线菌等来修复重金属污染土壤具有很大的潜力,并且对重金属污染的耐性通常为真菌>细菌>放线菌^[8]。目前,大多数研究所用微生物种类主要还是从受污染土壤中分离得到,属于土壤微生物^[9,10],由于它们能在土壤中长时间生存,因此当大量施入土壤以后会造成土壤微生物群落的失衡,具有潜在的二次污染。白腐真菌是一类在腐木上生长的真菌,研究表明,某些种对污水中铅、镉等重金属具有很强的吸附作用^[11,12],然而利用白腐真菌固体发酵来修复受重金属污染土壤,该方法目前国内外尚未报道。

本实验所用白腐真菌菌株为裂褶菌 GGHN08-116,非土壤微生物,不能独立在土壤中生存,只有在底物存在的条件下才能在土壤中生存,底物营养枯竭,该菌也自然消失,因此,不会造成二次污染。本研究通过单纯的菌丝穿透土壤修复实验和菌丝与固体发酵产物复合修复2个方案,初步探讨了该真菌对汞、铅、铬污染土壤的直接和间接修复作用。

1 材料与方法

1.1 菌种来源

裂褶菌 GGHN08-116 菌株来自于云南农业大学食用菌研究所。

1.2 培养基

菌种复壮培养基:马铃薯 200 g/L 煮沸过滤,琼脂 15 g/L,葡萄糖 20 g/L,蛋白胨 3 g/L,磷酸二氢钾 3 g,硫酸镁 1.5 g,维生素 B₁ 100 mg/L, pH 自然。

固体发酵培养料:棉籽壳 30%,玉米秸 50%,麦麸 18%,石膏 1%,糖 1%,含水量为 55%, pH 自然。

1.3 实验材料

供试土壤:采自云南农业大学实验农场,采样深度为 0~20 cm,土壤样品经室温风干后过 2 mm 筛备用。土壤 pH 值 6.85,汞质量分数为 0.08 mg/kg,铅质量分数为 9.7 mg/kg,铬 17.3 mg/kg。

试剂:氯化汞、硝酸铅、重铬酸钾,均为分析纯。

供试种子:胡萝卜种子为四川东叶科技有限公司开发的红帅品种。

1.4 实验设计

方案 1:利用长 22 cm,宽 7 cm,高 11 cm 的玻璃缸装高 5 cm 的固体底料,在 121℃ 下高压灭菌 2 h,

冷却后接种菌株 GGHN08-116, 25℃ 培养,待菌丝长满培养基后,在固体发酵料表面加高度分别为 3.5、4.0、4.5、5.0 和 5.5 cm 的重度重金属土壤(氯化汞 3 mg/kg,硝酸铅 1 000 mg/kg,重铬酸钾 600 mg/kg),玻璃缸四周均用黑色纸张包被,防止子实体朝玻璃壁生长,每个处理 3 次重复,对照组(CK1)为没有固体底料的重度重金属土壤,同样置于玻璃缸内。

1 个月后检测上层土壤的交换态重金属质量分数,假如土表有子实体形成,检测子实体中重金属质量分数。

方案 2:按固体发酵配方将底物装袋、灭菌(17 cm×25 cm 聚丙烯袋)培养,待菌丝长满袋后,将菌料切成直径为 1 cm³ 左右的菌块。设 4 个处理,发酵料的添加比例分别为:S1 200 g/kg, S2 300 g/kg, S3 500 g/kg。每个处理 3 次重复。首先将供试土壤与发酵料按比例混匀,然后添加氯化汞:3 mg/kg,硝酸铅:1 000 mg/kg,重铬酸钾:600 mg/kg。含水量调为 60%,每盆播种 8 粒,出苗后每盆留 3 株。生长 4 个月后收获胡萝卜,采集土壤样品。分析土壤 pH 值,交换态汞、铅、铬含量,胡萝卜根茎产量和根茎中汞、铅、铬的含量,对照组(CK2)为无任何添加料的重度重金属土壤。

1.5 测定方法

土壤 pH 值(水土比 2.5:1)采用酸度计测定^[13];土壤交换态铅、铬采用 0.1 mol/L CaCl₂ 中性盐溶液提取(AAS 法测定)^[14];土壤交换态汞采用萃取剂 0.1 mol/L NH₄OAC,萃取时间 60 min,土液比 1:10^[15]。菌株子实体、胡萝卜中总汞(GB/T 5009.17-2003),铅(GB 5009.12-2010),铬(GB/T 5009.123-2003)。

1.6 数据处理

数据运算采用 Excel2003,统计分析采用 SPSS13.0 中单因素方差分析法(ANOVA),用新复极差法进行多重比较,在图中有相同字母数据为无显著差异,无相同字母数据为有显著差异($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 菌丝穿透土壤方案

2.1.1 菌丝的穿透临界值和穿透过程中对土壤 pH 值的影响

实验结果表明,菌株 GGHN08-116 菌丝能穿透土壤的临界值为 5 cm,覆土高度为 5 cm 及之前,土表都能长出子实体,而覆土高度至 5.5 cm 时,因菌

丝不能穿透,土表不能形成子实体。

在覆土高度为 3.5、4.0、4.5、5.0 和 5.5 cm 处理中,1 个月后测定的土壤 pH 值分别为 6.65、6.65、6.64、6.64、6.75,相比 CK1(6.82)均略有下降,原因可能是由于菌丝在穿透土壤的过程中释放一些次生代谢产物致使 pH 值下降,或者是由于重金属胁迫对土壤微生物种群结构和土壤理化性质产生的影响引起^[6]。不同处理之间与 CK1 差异不显著。

2.1.2 供试土壤的自净能力对交换态汞、铅、铬的影响

供试土壤中添加交换态重金属量与土壤中实际增加交换态重金属量(氯化汞 3 mg/kg,硝酸铅 1 000 mg/kg,重铬酸钾 600 mg/kg)之间并不是等量关系。实验表明,对照组(CK1)土壤中交换态重金属在前 22 天呈下降趋势,其中前期下降幅度较大,第 23 天开始基本稳定。1 个月后,CK1 中交换态汞含量为 1.73 mg/kg,仅为添加量的 57.7%;交换态铅含量为 776 mg/kg,为添加量的 77.6%;交换量铬为 428 mg/kg,为添加量的 71.3%。这种现象说明供试土壤自身具有一定的使交换态重金属固化的能力,具体可能是土样中腐殖酸、褐菌酸、蛋白质等有机物的作用^[16]。

2.1.3 菌丝穿透土壤对交换态汞、铅、铬的影响

表 1 结果表明,1 个月覆土高度为 3.5、4.0、4.5、5.0 和 5.5 cm 时,交换态汞、铬含量相比 CK 都显著下降,下降最大幅度分别为 70.5%、79.6%。这可能是菌丝在穿透土壤过程中分泌了某些具有络合交换态汞、铬的次生代谢物质,或者是菌丝细胞内具有能使金属离子络合的金属硫蛋白(MT)或其他金属结合蛋白^[17]。而交换态铅下降不显著,这说明了微生物对交换态重金属的固定具有一定的选择性。

表 1 不同处理对土壤中交换态汞、铅和铬的影响
Table 1 Effect of different treatment on extractable Hg,Pb and Cr in soil

覆土高度 (cm)	交换态 Hg (mg/kg)	交换态 Pb (mg/kg)	交换态 Cr (mg/kg)
CK1	1.73 ± 0.025a	776 ± 0.577a	428 ± 2.081a
3.5	0.51 ± 0.006 c	773 ± 4.041a	89.8 ± 0.551bc
4.0	0.51c	775 ± 1.732a	87.6 ± 0.651bc
4.5	0.52c	775a	87.6 ± 0.643bc
5.0	0.52c	775 ± 1.732a	87.4 ± 0.367c
5.5	0.58 ± 0.02b	775a	96.3 ± 3.391b

2.1.4 子实体中汞、铅、铬含量

覆土高度为 3.5、4.0、4.5 和 5.0 cm 时,4 个处理中子实体铅含量均超出了 GB 7096-2003(食用菌卫生标准)规定要求的 630% 及以上,铬含量均超出了 GB 2762-2005(食品中污染物限量)规定 340% 及以上,仅有汞含量符合并远远低于 GB 7096-2003(食用菌卫生标准)规定(见图 1)。由此说明,该菌株子实体对交换态铅具有很强的富集能力,最大富集率达 1.9%,交换态铬最大富集率为 2.6%(覆土高度为 4.5 cm 时,子实体中铬含量 2.3 mg/kg/土壤中交换态铬 87.6 mg/kg),而对交换态汞的富集能力不强,最大富集率为 0.78%(覆土高度为 3.5 cm、4.0 cm 时,子实体中汞含量 0.004 mg/kg/土壤中交换态汞 0.51 mg/kg)。由于子实体是由菌丝扭结形成原基,然后由原基发育而成的,所以引起上述现象原因可能是菌丝对铅、铬具有胞内的累积作用,而对汞累积作用相对较弱。

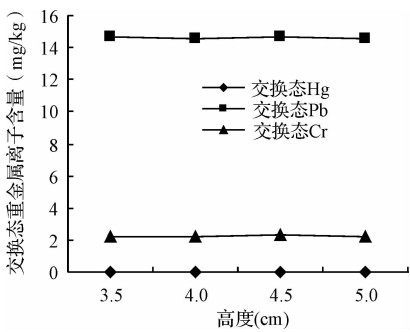


图 1 子实体汞、铅和铬含量

Fig. 1 Contents of Hg, Pb and Cr in fruiting body

2.2 菌丝与固体发酵产物的复合修复

2.2.1 复合修复对土壤 pH 值的影响

4 个月后,测定结果表明,土壤的 pH 值随着发酵料量的增多而下降(见图 2),S3 与 CK2 相比,下降了 5.4%。可能是两个方面原因,一方面是菌丝在穿透土壤过程中分泌出一些 pH 值较低的物质,另一个方面是发酵料在后期变为了有机肥,有机肥在矿化过程中分解出低分子量的有机酸和腐殖酸致使 pH 值下降^[18]。

2.2.2 复合修复对土壤交换态重金属的影响

4 个月后,测定结果表明(见表 2),菌丝及固体发酵产物复合修复能显著降低交换态汞、铅、铬的含量(见表 2),交换态汞与 CK2 相比,在 S1、S2 和 S3 处理中分别下降了 92.7%、93.2% 和 93.8%。交换

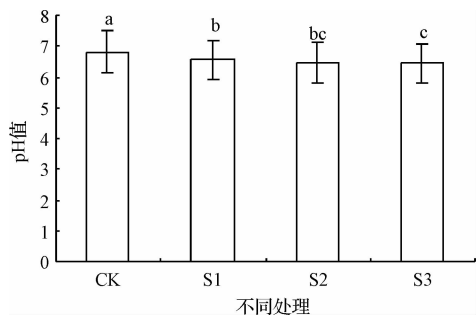


图2 不同处理对土壤 pH 值的影响
Fig.2 Effect of different treatments on soil pH

态铅与 CK2 相比,在 S1、S2 和 S3 处理中分别下降了 79.5%、80.1%、80.3%。交换态铬与 CK2 相比,在 S₁、S₂、S₃ 处理中分别下降了 80.0%、82.3%、83.3%。其中 CK2 中交换态铅和铬相比 CK1 略有变化,但幅度不大,这说明供试土壤的自净能力基本稳定。

表 2 不同比例发酵料对土壤交换态汞、铅和铬的影响
Table 2 Effect of different ratios solid fermentation materials on extractable Hg, Pb and Cr in soil (mg/kg)

处理	交换态 Hg	交换态 Pb	交换态 Cr
CK	1.73 ± 0.031a	815 ± 4.619a	408 ± 3.005a
S1	0.127 ± 0.002b	167 ± 4.041b	81.7 ± 0.404b
S2	0.118 ± 0.001b	162b	72 ± 1.323c
S3	0.107 ± 0.003b	160 ± 2.000b	68 ± 1.039c

2.2.3 复合修复对胡萝卜根茎富集汞、铅、铬的影响

利用发酵料与重度重金属土壤混合栽培胡萝卜,在 S1、S2、S3 处理中胡萝卜根茎中均未检测到汞、铅含量,且铬含量也符合 GB 2762-2005(食品中污染物限量)。对照组栽培中除汞符合规定外,铅、铬含量均超出规定标准(见表 3)。

表 3 胡萝卜根茎中汞、铅、铬的含量
Table 3 Contents of Hg, Pb and Cr in carrots roots (mg/kg)

处理	汞	铅	铬
CK	0.003 ± 0.017a	0.250 ± 0.017a	0.883 ± 0.005a
S1	0b	0b	0.040b
S2	0b	0b	0.038 ± 0.003b
S3	0b	0b	0.040 ± 0.001b

2.2.4 复合修复对胡萝卜产量的影响

结果表明,对照组中胡萝卜的平均产量为 264 g;处理 S1 中胡萝卜的平均产量 368 g;处理 S2 中胡萝卜的平均产量 384 g;处理 S3 中胡萝卜的平

均产量 388 g。添加不同比例的发酵料对胡萝卜的产量增长有显著性差异。实现增产可能主要是两个方面原因:对照组中重度重金属对微生物转化土壤氮素产生影响以及影响了胡萝卜生长生理代谢,从而抑制了胡萝卜的根茎产量^[19];固体发酵底料经菌丝充分分解后,增加了土壤有机质含量,以及 N、P、K 含量^[20]。

2.3 方案 1 与方案 2 之间的比较分析

方案 1 结果表明,该菌株菌丝在穿透重度重金属土壤过程中,对汞、铬污染土壤有显著的修复作用,而对铅污染土壤作用不显著。其中,方案 1 各处理中菌丝在土壤中存活的最大期限为 72 d,4 个月后再次对各处理中交换态重金属测定,结果表明,各处理间变化差异不明显,说明该菌株对土壤中重金属污染修复具有不可逆性。

方案 2 表明,重度重金属土壤经菌丝与发酵产物复合修复后,交换态汞、铅、铬含量均显著下降。其中,方案 2 中 3 个处理菌丝在土壤中存活的最大期限为 58 d,这表明随着发酵底物体积的变小,及其与土壤的接触面积增大,菌丝在土壤中存活期限缩短。

两方案之间比较表明,方案 2 复合修复对汞、铅、铬的修复能力均大于方案 1,这说明固体发酵产物同样具有修复汞、铅、铬污染土壤的能力,特别是对铅污染土壤有显著的修复作用。

3 结 论

(1)方案 1 结果表明,该菌株菌丝体在穿透重度重金属土壤过程中,土壤中交换态汞、铬含量显著下降,而菌株子实体却主要是对铅、铬的富集,对汞几乎不富集。

(2)方案 2 结果表明,重度重金属土壤经菌丝与发酵产物复合修复后,土壤中交换态汞、铅、铬含量均显著下降,而且胡萝卜产量均提高 39.3% 及以上,胡萝卜中没有检测到汞、铅含量,且铬含量也达到 GB 2762-2005 规定要求,CK 中除汞符合规定外,铅、铬含量均超出规定标准。

(3)综合以上 2 个方案可知,利用裂褶菌 GGHN08-116 菌株,以棉籽壳、玉米秸等农业废弃物为固体发酵底物修复受汞、铅、铬污染土壤具有实际的应用推广价值,利用此法不仅可以避免由农业废弃物引起的环境污染,而且能修复重金属污染的土壤,改善了土壤的理化性质。

参考文献

- [1] 朱荫渭, 周启星. 土壤污染与我国农业环境保护的现状、理论和展望. 土壤通报, **1999**, 30(3):132-135
Zhu Yinwei, Zhou Qixing. Soil pollution and the current situation, theories and outlooks for agriculture environmental protection in China. Chinese Journal of Soil Science, **1999**, 30(3):132-135 (in Chinese)
- [2] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展. 生态学报, **2001**, 21(7):1196-1203
Wei Chaoyang, Chen Tongbin. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad. Acta Ecologica Sinica, **2001**, 21(7):1196-1203 (in Chinese)
- [3] Nelson B. W., Pattee O. H., Sileo L., et al. Metal contamination in wildlife living near two zinc smelters. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, **1985**, 38(1):63-86
- [4] Cocchi L., Vescovii L., Petrini L. E., et al. Heavy metals in edible mushrooms in Italy. Food Chemistry, **2006**, 98(2):277-284
- [5] Wu H. Y., Ting Y. P. Metal extraction from municipal solid waste (MSW) incinerator fly ash—Chemical leaching and fungal bioleaching. Enzyme and Microbial Technology, **2006**, 38(6):839-847
- [6] 滕应, 黄昌勇. 重金属污染土壤的微生物生态效应及其修复研究进展. 土壤与环境, **2002**, 11(1):85-89
Teng Ying, Huang Changyong. Ecological effect of heavy metals on soil microbes and research advances on the mechanisms of bioremediation. Soil and Environment, **2002**, 11(1):85-89 (in Chinese)
- [7] 孙嘉龙, 肖唐付, 周连碧, 等. 微生物与重金属的相互作用机理研究进展. 地球与环境, **2007**, 35(4):367-374
Sun Jialong, Xiao Tangfu, Zhou Lianbi, et al. Studies on the mechanisms of interaction between microbes and heavy metals. Earth and Environment, **2007**, 35(4):367-374
- [8] Hiroki M. Effects of heavy metal contamination on soil microbial population. Soil Sci. Plant Nut., **1992**, 38(1):141-147
- [9] Bargagli R., Baldi. Mercury and mercury in higher fungi and their relation with the substrata in a cinnabar mining area. Chemosphere, **1984**, 13(9):1059-1067
- [10] Niku-Paavola M. L., Raaska L., Itavaara M. Detection of white rot fungi by non-toxic stain. Mycol. Res., **1990**, 94:27-31
- [11] 吴涓, 李清彪, 邓旭, 等. 白腐真菌吸附铅的研究. 微生物学报, **1999**, 39(1):87-90
Wu Juan, Li Qingbiao, Deng Xu, et al. Studies on bio-sorption of Pb^{2+} by *phanerochaete chrysosporium*. Acta Microbiologica Sinica, **1999**, 39(1):87-90 (in Chinese)
- [12] 江枝和, 翁伯琦, 王义祥, 等. 利用灰色系统分析姬松茸子实体中氨基酸含量与镉含量的关系. 农业环境科学学报, **2005**, 24(6):1259-1261
Jiang Zhihe, Weng Boqi, Wang Yixiang, et al. Grey-system-theory analysis of relation between Cd contents and amino acids contents in *Agaricus blazei* murill's fruitbodies. Journal of Agro-Environment Science, **2005**, 24(6):1259-1261 (in Chinese)
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, **1999**. 12-20
- [14] 李亮亮, 张大庚, 李天来, 等. 土壤有效态重金属提取剂选择的研究. 土壤, **2008**, 40(5):819-823
Li Liangliang, Zhang Dageng, Li Tianlai, et al. On relation between heavy metal available contents of soil determined by different extractants and of maize organs. Soils, **2008**, 40(5):819-823 (in Chinese)
- [15] 张利香, 侯明. 土壤中有效态汞的最佳萃取条件研究. 农业环境科学学报, **2006**, 25(6):1675-1678
Zhang Lixiang, Hou Ming. Study on the optimal extraction conditions of bioavailable Hg in soil. Journal of Agro-Environment Science, **2006**, 25(6):1675-1678 (in Chinese)
- [16] 王保军, 杨惠芳. 微生物与重金属的相互作用. 重庆环境科学, **1996**, 18(1):35-38
Wang Baojun, Yang Huifang. Interaction between microbes and heavy metals. Chongqing Environmental Science, **1996**, 18(1):35-38 (in Chinese)
- [17] 滕应, 骆永明, 李振高. 污染土壤的微生物修复原理与技术进展. 土壤, **2007**, 39(4):497-502
Teng Ying, Luo Yongming, Li Zhengao. Principles and techniques of microbial remediation of polluted soils. Soils, **2007**, 39(4):497-502 (in Chinese)
- [18] 刘磊, 肖艳波. 土壤重金属污染治理与修复方法研究进展. 长春工程学院学报(自然科学版), **2009**, 10(3):72-78
Liu Lei, Xiao Yanbo. Advance in the study on recovery and remediation of heavy metals pollution in soil. J. Changchun Inst. Tech. (Nat. Sci. Edi.), **2009**, 10(3):72-78 (in Chinese)
- [19] 李磊, 陈宏, 潘家星, 等. 改良剂对红蛋植物修复污染土壤重金属铅和镉效果的影响. 生态环境学报, **2010**, 19(4):822-825
Li Lei, Chen Hong, Pan Jiaying, et al. Effect of amendments on phytoremediation of *Echinodorus Osiris* in the soil contaminated by cadmium and lead. Ecology and Environmental Sciences, **2010**, 19(4):822-825 (in Chinese)
- [20] 刘雯雯. 利用菌糠制作生物有机菌肥的途径及其效果研究. 兰州: 甘肃农业大学硕士学位论文, **2008**
Liu Wenwen. The methods and effects of spent mushroom substrate as a kind of biofertilizer. Lanzhou: Master's Degree Thesis of Gansu Agricultural University, **2008** (in Chinese)