



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7期

Vol.7 No.7

中国科学院
生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

7
2013

目次

水污染防治

铁碳微电解-Fenton 法预处理苯胺基乙腈生产废水	方俊华	刘 兰	穆军伟 (2401)
曝气生物滤池深度处理混合印染废水	陆洪宇	马文成	张 梁 陈志强 (2409)
不同的消毒方式对砂滤池出水消毒效果的影响		李 芳	陆少鸣 (2414)
耐低温贫营养好氧反硝化菌群脱氮特性及安全性	黄廷林	李 娜	张海涵 王 堃 刘婷婷 (2419)
生物氧化磁黄铁矿产生铁离子		李 杰	朱 琳 李睿华 (2424)
改性玉米芯吸附溶液中的铀	李小燕	刘义保	李 寻 张 明 刘云海 (2429)
曝气量对悬浮系统单级自养脱氮性能的影响	吕永涛	王 磊	孙 婷 王旭东 王志盈 (2433)
PAFC 对水体中持久性有机污染物 PFOA 的混凝效果	赵 莉	杨 柳	常 青 李宗硕 刘鹏宇 高彩丽 (2437)
聚合氯化铝与粉末活性炭联合强化混凝处理垃圾渗滤液		郑淑平	李亚静 孙力平 (2443)
超声前处理强化活性炭吸附活性艳红 X-3B 染料废水			
..... 陈 蓉 武 超 王 宏 王永忠 张倩茹 李淑哲 王智彬 廖 强 朱 恂 (2447)			
基于成本-效能分析的氧化沟工艺运行条件优化			
..... 李 峥 齐 嵘 安 伟 顾 剑 文 洋 李生涛 杨 敏 (2453)			
应用于维生素 C 凝结水处理反渗透膜清洗策略	肖入峰	刘景洋	张建强 孙晓明 (2459)
密集生长条件下丝状菌结构分析		李志华	莫丹丹 王晓昌 (2466)
我国不同区域水源水拉森指数比较分析	刘 娟	于建伟	安 伟 魏 魏 杨 敏 (2471)
低曝气下 PAC 强化 SBR 工艺同步脱氮除磷	卢 慧	杨朝晖	罗远玲 罗飞杭 汪理科 邓久华 (2475)
不同改性方式对控释碳源材料脱氮性能的影响	余三江	汪家权	林 函 褚华男 王曼曼 (2481)
不同污泥源条件下 ANAMMOX 启动及其与反硝化协同脱氮对比	于德爽	王晓霞	李 津 李宁宁 李伟刚 (2487)
进口高效菌用于青藏铁路污水处理应急保障的可行性研究		王亚娥	王 霞 李 杰 董贵奇 (2494)
高岭土与腐殖酸对混凝过程中药物去除效能的影响		吴运松	封 莉 张立秋 (2501)
厌氧后猪场废水资源化制备微生物絮凝剂	邱国良	杨春平	郭俊元 彭蓝艳 (2506)
全细胞脂肪酶(菌)对 SBR 系统中活性污泥性能的影响	宋慧婷	袁 珍	王 蕊 詹 威 罗培元 (2511)
响应曲面优化法合成 CTMAB-膨润土吸附剂	孟瑞军	杨玺萌	李 鑫 余晓皎 黄媛媛 张 科 (2517)
修复铬污染地下水的可渗透反应墙介质筛选	王兴润	翟亚丽	舒新前 朱文会 何 洁 刘 锋 于泓锦 (2523)
电-Fenton 法预处理干法腈纶生产废水	魏 健	邓雪娇	宋永会 肖书虎 徐东耀 (2529)
聚丙烯超滤膜的低温等离子体改性方法比较	许小艳	杨 庆	李树金 张彦成 李 鹏 (2536)
鸟粪石循环利用处理高氨氮废水的热解行为		曾庆玲	王 露 沈春花 李 飞 (2541)
V ₂ O ₅ -TiO ₂ -AlF ₃ /Al ₂ O ₃ 催化臭氧氧化 2,4-滴丙酸的氧化效能		蓝小飞	曹利刚 恽正兴 童少平 (2547)
磷酸钙盐结晶除磷工艺性能研究	陈小光	张 萌	厉 帅 蒋 演 郑 平 (2552)
Fe(Ⅲ)-酒石酸盐配合物体系的光解特性		封享华	牟 娟 丁世敏 (2557)
聚乙烯醇-海藻酸钠固定铜绿微囊藻对磷的吸附	贲 月	陈一明	刘云国 卢 明 曾晓霞 (2563)
盐液浸提辅助微波再生废油脱水树脂及机制分析		吴 云	张贤明 陈国需 (2569)
Fenton 氧化降解垃圾渗滤液中 COD 的动力学研究	陈云嫩	刘春花	范景彪 丁丽超 (2574)
广西城镇污水处理厂建设和运行的现状分析	成官文	朱宗强	徐子涵 蒙金结 梁宁书 覃许江 (2579)
昆明主城区城市地表径流污染特征分析			谷 雨 张乃明 (2587)
好氧颗粒污泥动态膜生物反应器工艺参数及运行性能		桂永馨	黄天寅 李文卫 姚 嘉 (2596)
醇对柴油微乳体系性能的影响	冷立健	袁兴中	曾光明 黄华军 王雪丽 段 严 祝慧娜 李 辉 (2601)
5 种水培植物对富营养化水体的净化能力	刘晓丹	李 军	龚一富 周友凤 朱正刚 周占清 (2607)
MnO ₂ 表面结合 Fe(Ⅱ)对三氯乙烯的还原脱氯作用		杨吉睿	顾晓清 孙红文 马小东 (2613)
氯离子对氨氮电化学氧化的影响		朱 艳	汪家权 陈少华 胡 洁 (2619)

低动力复合净水系统净化生态农庄景观池水质	金树权	陈若霞	周金波	王扬军	姚红燕	冯善根(2624)
一体式 A/O 反应器中不同碳硫比对除碳脱臭效率的影响	姜丹妮	吴忆宁(2629)				
活性炭-臭氧体系处理含氰废水的作用机理						
..... 尚会建	周艳丽	蒋良鹤	赵彦	张少红	赵丹	张高
不同材料负载 Ani/TiO ₂ 光降解印染废水	郑学明(2635)	龚艳伟	李晓秀	樊颜波(2641)		

大气污染防治

纳米片自组装原位 N 掺杂 (BiO) ₂ CO ₃ 分级微球的可控合成及其优异可见光催化性能						
..... 董帆	刘海涛	傅敏	张海东	蒋彦可	边际	吴忠标(2648)
氧化物催化剂对非热等离子体催化降解甲苯的影响						
..... 张玮	杨懿	王沛涛	吴军良	付名利	黄碧纯	叶代启(2655)
中空纤维膜吸收甲苯气体	黄倩茹	叶杞宏	李华琴	罗雨薇	魏在山(2662)	
输煤皮带转载点密闭罩流场模拟与结构优化	吕太	车晟	郭澄昆	王旭东(2667)		
旋风分离器排气管最佳插入深度的实验与分析	杨景轩	马强	孙国刚(2673)			

固体废物处置

酸改性沸石对污泥调理的影响	赵瑞娟	李小明	杨麒	陈畅亚	罗琨(2678)	
碱预处理污泥产酸效果及其生物群落研究	刘亚利	袁一星	杜茂安	康晓荣(2685)		
污泥脱水性能的关键影响因素研究	刘轶	周健	刘杰	杨志	龙熙(2689)	
酸碱联合调节剩余污泥对有机质的释放和脱水性能的影响	苑宏英	牛四芳	宋建阳	祁丽	汤韬(2694)	
磷酸活化-微波热解法制备污泥吸附剂	张伟	杨柳	李黎武	徐舜开	张骅(2699)	
餐厨垃圾自然升温堆肥工艺研究	郭倩倩	吴拥军	韩丽珍	王婧	薛伟	卢彪(2705)
水解溶菌酶污泥减量过程中的微生物群落变化	宋勇	施周	陈世洋	罗璐(2711)		
典型建筑固体废弃物再生骨料对环保砖性能的影响	程国淡	张凯松	寇世聪	潘智生(2716)		
电镀污泥的还原焙烧-酸浸	顾冬梅	邓开宇	陈炯	程洁红(2721)		
芦苇和香蒲在人工湿地城市污泥处理系统中的应用	张纯	裴丽蓉	汪彩文	汪爱河(2728)		
柠檬酸盐络合铜在污泥上的吸附			贾鹏	俞马宏(2733)		

土壤污染防治

不同纳米修复剂对污染土壤中胡萝卜吸收、转运 Cd 的影响	王萌	刘继芳	陈世宝	马义兵(2738)		
焦化厂污染土壤堆肥修复过程的毒性变化		张旭红	董芬	林爱军(2745)		
降解菌 ZQ ₃ 与紫茉莉对芫污染土壤的联合修复	赵媛媛	张万坤	马慧	白鹏	林景卫	钟鸣(2752)
不同利用方式土壤中磷的吸附与解吸特性	邱亚群	甘国娟	刘伟	刘妍	侯红波	彭佩钦
微生物矿化修复重金属污染土壤					彭佩钦	高铁军(2757)
土壤粒径及有机质对多溴二苯醚热脱附的影响	傅海辉	黄启飞	朱晓华	何洁	唐振武	孟昭福(2769)
重金属离子在钠基膨润土中的吸附特征与机理			杨秀敏	钟子楠	潘宇	程晓霞(2775)
柠檬酸对褐土中 DTPA 提取态铜、镉含量及对紫花苜蓿吸收铜、镉的影响						
..... 刘芳	陈娇君	刘世亮	刘红恩	介晓磊	王书凤(2781)	

环境生物技术

降解聚丁二酸丁二醇酯菌株的诱变选育及降解性能	董骞	梁英梅	田呈明	梅雪立(2788)		
影响钝顶螺旋藻固碳的环境因子优化	杨玉娟	任洪艳	缪恒锋	阮文权(2795)		

CONTENTS

Pretreatment of N-phenylglycinonitrile wastewater by combining iron-carbon micro-electrolysis with Fenton reagent	Fang Junhua Liu Lan Mu Junwei(2401)
Advanced treatment of mixing dyeing wastewater using biological aerated filter process	Lu Hongyu Ma Wencheng Zhang Liang Chen Zhiqiang(2409)
Influence of different disinfecting modes on disinfection efficiency of outlet water from sand filter	Li Fang Lu Shaoming(2414)
Denitrification characters and safety of communities of cold tolerant oligotrophic and aerobic denitrifying bacteria	Huang Tinglin Li Na Zhang Haihan Wang Kun Liu Tingting(2419)
Production of iron ions from biooxidation of pyrrhotite	Li Jie Zhu Lin Li Ruihua(2424)
Adsorption of uranium in aqueous solution by modified corn cob	Li Xiaoyan Liu Yibao Li Xun Zhang Ming Liu Yunhai(2429)
Effect of aeration on single-stage autotrophic nitrogen removal in suspended system	Lü Yongtao Wang Lei Sun Ting Wang Xudong Wang Zhiying(2433)
Coagulation effects of persistent organic pollutant PFOA in water by PAFC	Zhao Li Yang Liu Chang Qing Li Zongshuo Liu Pengyu Gao Caili(2437)
Enhanced coagulation of landfill leachate with combination of polyaluminum chloride and powdered activated carbon	Zheng Shuping Li Yajing Sun Liping(2443)
Enhancement of activated carbon adsorbing reactive brilliant red X-3B dye wastewater by ultrasound pretreatment	Chen Rong Wu Chao Wang Hong Wang Yongzhong Zhang Qianru Li Shuzhe Wang Zhibin Liao Qiang Zhu Xun(2447)
Operational strategy optimization of full-scale oxidation ditch process based on cost-performance analysis	Li Zheng Qi Rong An Wei Gu Jian Wen Yang Li Shengtao Yang Min(2453)
Cleaning strategy of reverse osmosis membrane for treating C condensate	Xiao Rufeng Liu Jingyang Zhang Jianqiang Sun Xiaoming(2459)
Structure of filamentous microorganisms under overspreading growth condition	Li Zhihua Mo Dandan Wang Xiaochang(2466)
Comparison and analysis of the Larson ratios of source waters in different areas of China	Liu Juan Yu Jianwei An Wei Wei Wei Yang Min(2471)
Powder activated carbon strengthening SBR for simultaneous nitrogen and phosphorus removal under limited aeration	Lu Hui Yang Zhaohui Luo Yuanling Luo Feihang Wang Like Deng Jihua(2475)
Influence of different modified methods on denitrification performance of controlled-release carbon-source materials	Yu Sanjiang Wang Jiaquan Lin Han Chu Huanan Wang Manman(2481)
Comparison of ANAMMOX start-up and its synergistic effect with denitrifying with different seeding sludge sources	Yu Deshuang Wang Xiaoxia Li Jin Li Ningning Li Weigang(2487)
Feasibility study of drawing imported efficient microorganism into sewage treatment along Qinghai-Tibet railway in an emergency	Wang Yae Wang Xia Li Jie Dong Guiqi(2494)
Influences of kaolin and humic acid on removal of pharmaceuticals in coagulation processes	Wu Yunsong Feng Li Zhang Liqiu(2501)
Preparation of biofloculant using anerobic treated piggery wastewater as substrate	Qiu guoliang Yang Chunping Guo Junyuan Peng Lanyan(2506)
Influence of whole cell lipases on capability of activated sludge in SBR system	Song Huiting Yuan Zhen Wang Rui Zhan Wei Luo Peiyuan(2511)
Preparation of CTMAB-bentonite adsorbent with response surface methodology	Meng Ruijun Yang Ximeng Li Xin Yu Xiaojiao Huang Yuanyuan Zhang Ke(2517)
Selection of permeable reactive barrier media for remediation of contaminated groundwater with chromium	Wang Xingrun Zhai Yali Shu Xinqian Zhu Wenhui He Jie Liu Feng Yu Hongjin(2523)
Pretreatment of dry-spun acrylic fiber manufacturing wastewater by electro-Fenton process	Wei Jian Deng Xuejiao Song Yonghui Xiao Shuhu Xu Dongyao(2529)
Comparison of modification methods of polypropylene ultrafiltration membrane by low temperature plasma	Xu Xiaoyan Yang Qing Li Shujin Zhang Yancheng Li Peng(2536)
Thermal decomposition behavior of struvite in recycling treatment of high ammonia-nitrogen wastewater	Zeng Qingling Wang Lu Shen Chunhua Li Fei(2541)
Oxidative efficiency of ozonation of 2-(2,4-dichlorophenoxy) propionic acid in the presence of V_2O_5 - TiO_2 - AlF_3/Al_2O_3	Lan Xiaofei Cao Ligang Yun Zhengxing Tong Shaoping(2547)
Performance of calcium phosphates crystallization process for phosphorus removal	Chen Xiaoguang Zhang Meng Li Shuai Jiang Yan Zheng Ping(2552)
Photolysis characteristics of $Fe(III)$ -tartrate complex system	Feng Xianghua Mou Juan Ding Shimin(2557)
Adsorption of phosphorus by polyvinyl alcohol-sodium alginate immobilized <i>Microcystis aeruginosa</i>	Ben Yue Chen Yiming Liu Yunguo Lu Ming Zeng Xiaoxia(2563)
Regenerating resin used for dewatering of waste oil by salt solution leaching assisting microwave and mechanism analysis	Wu Yun Zhang Xianming Chen Guoxu(2569)
Study on kinetics of treating COD from landfill leachate by Fenton oxidation	Chen Yunnan Liu Chunhua Fan Jingbiao Ding Lichao(2574)
Analysis on construction and operation of municipal wastewater treatment plants in Guangxi	Cheng Guanwen Zhu Zongqiang Xu Zihan Meng Jinjie Liang Ningshu Qin Xujiang(2579)
Characterization of urban surface runoff in main districts of Kunming	Gu Yu Zhang Naiming(2587)

Operating process parameters and performance of aerobic granular sludge dynamic membrane bioreactor	Gui Yongxin Huang Tianyin Li Wenwei Yao Jia(2596)
Effects of cosurfactant alcohol on performance of diesel microemulsions	Leng Lijian Yuan Xinzhong Zeng Guangming Huang Huajun Wang Xueli Duan Yan Zhu Huina Li Hui(2601)
Purification of eutrophic water by five aqua-cultured plants	Liu Xiaodan Li Jun Gong Yifu Zhou Youfeng Zhu Zhenggang Zhou Zhanqing(2607)
Reductive dechlorination of trichloroethylene by surface-bound Fe(II) associated with manganese dioxide	Yang Jirui Gu Xiaoqing Sun Hongwen Ma Xiaodong(2613)
Effect of chloride ion on ammonia electrochemical oxidation	Zu Yan Wang Jiaquan Chen Shaohua Hu Jie(2619)
Purification of landscape pool water in ecology village by low-power compound water purification system	Jin Shuquan Chen Ruoxia Zhou Jinbo Wang Yangjun Yao Hongyan Feng Shangen(2624)
Effect of different COD/SO ₄ ²⁻ ratios in integrated A/O wastewater treatment systems on simultaneous organics and undesirable odor removal	Jiang Danni Wu Yining(2629)
Mechanism for treating cyanide wastewater by activated carbon and ozone	Shang Huijian Zhou Yanli Jiang Lianghe Zhao Yan Zhang Shaohong Zhao Dan Zhang Gao Zheng Xueming(2635)
Photocatalytic degradation of dyeing wastewater by different materials loaded Ani/TiO ₂	Gong Yanwei Li Xiaoxiu Fan Yanbo(2641)
Controlled synthesis and excellent visible light photocatalytic performance of in situ N-doped (BiO) ₂ CO ₃ hierarchical microspheres self-assembled by nanosheets	Dong Fan Liu Haitao Fu Min Zhang Haidong Jiang Yanke Bian Ji Wu Zhongbiao(2648)
Impact of oxide catalysts on toluene destruction by non-thermal plasma	Zhang Wei Yang Yi Wang Peitao Wu Junliang Fu Mingli Huang Bichun Ye Daiqi(2655)
Removal of toluene from air by a hollow fiber membrane absorption	Huang Qianru Ye Qihong Li Huaqin Luo Yuwei Wei Zaishan(2662)
Flow field simulation and structure optimization of confined hood at transshipment point of coal conveyor belt	Lü Tai Che Sheng Guo Chengkun Wang Xudong(2667)
Experiment and analysis of vortex finder optimum length in cyclone separator	Yang Jingxuan Ma Qiang Sun Guogang(2673)
Effect of acid-modified zeolite on conditioning of sludge	Zhao Ruijuan Li Xiaoming Yang Qi Chen Changya Luo Kun(2678)
Studies on microbial structure and volatile fatty acids accumulation with different alkaline pretreatment	Liu Yali Yuan Yixing Du Maoan Kang Xiaorong(2685)
Key influencing factors of sludge dewatering performance	Liu Yi Zhou Jian Liu Jie Yang Zhi Long Xi(2689)
Effect of co-adjusting excess sludge with acid and alkaline on release of organic matter and dewatering performance	Yuan Hongying Niu Sifang Song Jianyang Qi Li Tang Tao(2694)
Preparation of sludge adsorbents by phosphoric acid activation-microwave pyrolysis method	Zhang Wei Yang Liu Li Liwu Xu Shunkai Zhang Hua(2699)
Study on natural composting process of kitchen waste	Guo Qianqian Wu Yongjun Han Lizhen Wang Qiang Xue Wei Lu Biao(2705)
Changes of microbial ecological communities of activated sludge in a sludge reduction process using lysozyme	Song Yong Shi Zhou Chen Shiyang Luo Lu(2711)
Effect of typical construction solid waste on properties of environment-friendly block	Cheng Guodan Zhang Kaisong Kou Shicong Poon Chi Sun(2716)
Reduction roasting-sulphuric acid leaching of electroplating sludge	Gu Dongmei Deng Kaiyu Chen Xian Cheng Jiehong(2721)
Application of reeds and cattails in constructed wetlands for treatment of municipal sludge	Zhang Chun Pei Lirong Wang Caiwen Wang Aihe(2728)
Adsorption of Cu(II) onto sludge in the presence of citrate	Jia Peng Yu Mahong(2733)
Effects of nanoscale amendments on uptake and transfer of Cd by carrot (<i>Daucus carota</i>) in polluted soils	Wang Meng Liu Jifang Chen Shibao Ma Yibing(2738)
Change in toxicity during compost remediation of contaminated soil in a coking plant	Zhang Xuhong Dong Fen Lin Aijun(2745)
Microbial-phytoremediation of pyrene contaminated soil using pyrene-degrading strain ZQ ₅ with <i>Mirabilis Jalapa</i>	Zhao Yuanyuan Zhang Wankun Ma Hui Bai Peng Lin Jingwei Zhong Ming(2752)
Characteristics of phosphate adsorption and desorption in soils under different utilization	Qiu Yaqun Gan Guojuan Liu Wei Liu Yan Hou Hongbo Peng Peiqin Gao Tiejun(2757)
Remediation of heavy metal contaminated soils by bacteria biomineralization	Xu Yanbo Qian Chunxiang Lu Zhaowen(2763)
Effects of soil particle size and organic matter content on thermal desorption of polybrominated diphenyl ether	Fu Haihui Huang Qifei Zhu Xiaohua He Jie Tang Zhenwu Meng Zhaofu(2769)
Adsorption characters and mechanisms of heavy metal ions in Na-bentonite	Yang Xiumin Zhong Zinan Pan Yu Cheng Xiaoxia(2775)
Effect of citric acid(CA) on DTPA extractable Cu & Cd content in cinnamon soil and Cu & Cd uptake by alfalfa	Liu Fang Chen Jiaojun Liu Shiliang Liu Hongen Jie Xiaolei Wang Shufeng(2781)
Mutation breeding of poly(butylene succinate)-degrading strain and its degradability	Dong Qian Liang Yingmei Tian Chengming Mei Xueli(2788)
Optimization of environmental factors affecting potential of carbon fixation of <i>Spirulina platensis</i>	Yang Yujuan Ren Hongyan Miao Hengfeng Ruan Wenquan(2795)

不同纳米修复剂对污染土壤中胡萝卜 吸收、转运 Cd 的影响

王 萌 刘继芳 陈世宝* 马义兵

(农业部植物营养与施肥重点实验室/中国农科院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要 通过盆栽实验研究不同纳米修复剂(羟基磷灰石 HAP、赤泥 RM、 Fe_3O_4 、胡敏酸- Fe_3O_4)对2种不同污染土壤 Cd 吸收、转运的影响。结果表明,上述纳米修复剂均可显著增加胡萝卜植株生物量,显著提高植株 Cd 胁迫的耐受指数;不同土壤施用不同纳米修复剂均显著降低胡萝卜植株 Cd 的含量,并且随着修复剂施加浓度的增加而显著降低;与对照相比,植株茎叶 Cd 含量最大降低达 78.8%,根中 Cd 的含量最大降低 67.8%;添加不同修复剂能不同程度地降低了土壤中 Cd 的转运系数和富集系数,这可能与施用不同纳米修复剂促进了土壤中非残留态 Cd 向残留态 Cd 的转化有关,总体而言,不同纳米型修复剂对降低 Cd 的有效性顺序为:RM ~ HAP > 胡敏酸- Fe_3O_4 > Fe_3O_4 。

关键词 纳米修复剂 污染土壤 镉 形态 转运系数

中图分类号 X53 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2013)07-2738-07

Effects of nanoscale amendments on uptake and transfer of Cd by carrot (*Daucus carota*) in polluted soils

Wang Meng Liu Jifang Chen Shibao Ma Yibing

(Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization; Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract A pot experiment was conducted to study the effects of different nanoscale amendments (hydroxyapatite, red mud, Fe_3O_4 , humic acid (HA)- Fe_3O_4) on the uptake and transfer of Cd by carrot in two kinds of Cd-polluted soils. The results showed that nanoparticles (NPs) mentioned above could increase plant biomass and tolerance index (TI) of carrot significantly. The application of NPs could decrease the concentration of Cd of different carrot parts, the Cd concentrations in both shoots and roots of carrot decreased with increasing quantities of added NPs. The Cd concentrations in shoots of carrot decreased 78.8%, and in roots 67.8% with the most scope respectively, as compared with the control treatment. The application of nanoscale amendments in polluted soils could decrease transfer factors (TF) and biological concentration factors (BCF) of Cd by carrot with different extent, the transformation of soil Cd from nonresidual fractions to residual fraction substantially after addition of the nano-amendments may contribute to the decrease of TF and BCF. In general, the efficiency of different amendments on the Cd bioavailability reduction followed this order at the equivalent additions: RM ~ HAP > HA- Fe_3O_4 > Fe_3O_4 .

Key words nanoscale amendments; polluted soils; cadmium; fractions; transfer factors

目前,在重金属污染土壤防治研究中,寻求环境友好型的高效重金属钝化(络合)剂成为近年来国内外研究新的热点之一。近年来,随着环境分子科学的快速发展,纳米科学和纳米技术在污染环境修复研究中越来越受到重视。纳米颗粒由于其大量的微界面及微孔性,可以强化各种界面反应,如对重金属的表面及专性吸附反应等,在环境重金属污染治理中将发挥显著作用^[1]。目前,纳米技术在环境污染控制的应用研究,主要集中在纳米新材料的制备

与应用技术、环境微界面过程等,如氧化物矿物膜及其微界面、气溶胶界面反应、各种纳米材料制备及其在污染物的催化与降解的应用等,具体而言,主要集

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划项目(2008AA10Z404);
农业行业专项(201103007, 200903015);国家自然科学基金
资助项目(21077131)

收稿日期:2012-03-06; **修订日期:**2012-05-16

作者简介:王萌(1987~),女,硕士研究生,主要从事重金属污染与防治研究工作。E-mail: wangmeng19880204@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sbchen@mail.caas.net.cn

中在对有机/无机污染废水处理、对污染气体的催化净化等领域,而在污染土壤修复中的应用还鲜见报道^[1,2]。本研究在前期研究的基础上^[3,4],采用盆栽实验的方法,探讨了 4 种不同种类纳米颗粒修复剂对镉(Cd)污染土壤的修复效果,包括对植株生物量及 Cd 含量变化的影响,并对添加不同纳米型修复剂后土壤中 Cd 形态变化及其与 Cd 有效性的变化等进行了测定与分析,以期为重金属污染土壤的原位高效修复技术提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤分别采自中国农科院山东省德州(DZ)、湖南省祁阳(QY)长期定位实验站。采集 0~20 cm 的耕层土壤,将土样风干后过 2 mm 的尼龙筛备用。所采集土壤的基本理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤的理化性质		
Table 1 Basic properties of the soil used in this study		
地 点	德州 (DZ)	祁阳 (QY)
土壤类型	潮 土	红 壤
pH	8.9	5.3
有机碳(%)	0.69	0.87
碳酸钙(%)	6.17	0.09
CEC cmol (+/-/kg)	8.33	7.47
Fe ₂ O ₃ 全量 (mg/kg)	644.2	1 146.4
粘粒 (%)	18	46
粉粒 (%)	18	35
砂粒 (%)	64	19
Cd 全量 (mg/kg)	0.149	0.121

注:CEC 为阳离子交换量,使用非缓冲的硫脲银方法测定^[5];土壤电导率在土水比为 1:5 条件下测定^[6];有机碳含量以总碳与无机碳含量之差获得^[7,8];土壤质地通过沉降法测定^[9]。

1.2 纳米修复剂

赤泥原材料采自山东铝业股份有限公司,为 Bayer 法工艺炼铝尾渣,经 105℃ 烘干 24 h 后,经过纳米球磨机加工制备成纳米级赤泥(RM);纳米羟基磷灰石(HAP)为市售羟基磷灰石试剂经过利用球磨法制备而成;纳米四氧化三铁(Fe₃O₄)颗粒及胡敏酸包裹的四氧化三铁(HA-Fe₃O₄)制备方法参见参考文献[9]。利用 N₂-吸附法(BET- N₂, Nova Station C)对上述不同纳米型颗粒修复剂的比表面进行了测定,同时利用激光粒度测定仪对颗粒的平

均粒径进行了测定等。供试不同纳米颗粒的基本性质如表 2 所示。

表 2 供试纳米材料性质			
Table 2 Characteristics of NPs used for the experiments			
纳米材料	平均粒径 (nm)	比表面积(m ² /g)	纯度 (%)
RM	112.0 ± 10.8	77.4 ± 5.6	90.3
HAP	89.3 ± 4.9	127.4 ± 2.3	96.5
Fe ₃ O ₄	20.1 ± 1.4	252.4 ± 11.2	99.2
HA-Fe ₃ O ₄	30.5 ± 3.1	202.8 ± 12.6	99.6

1.3 盆栽实验

供试作物为胡萝卜(*Daucus carota*)。称取过 2 mm 尼龙筛的 300 g 的风干土,分别添加 2 个 Cd 浓度:1.0、5.0 mg/kg (3CdSO₄ · 8H₂O, 分析纯),然后按照土壤质量(W/W)的 1%、2% 添加不同纳米修复剂,以不添加修复剂为对照(CK)。再加入去离子水保证最大田间持水量 70%,并进行充分搅拌,每个处理 3 次重复。为了防止营养匮乏,每盆施加等量的氮、磷、钾做底肥,其中 N(尿素)用量为 429.2 mg/kg、P(磷酸二氢钾)用量为 263.2 mg/kg、K(氯化钾)用量为 428 mg/kg,随后装入高 10 cm、直径 7 cm 的钵盆中。土壤平衡 2 周后,将预发芽的胡萝卜种子播种在钵盆里,每盆播种 10 粒,一周后定植为 5 株,放置在恒温 25℃ 的人工气候箱进行培养,培养期间环境温度为:光照/黑暗 22℃/20℃,相对湿度 80%,光照/黑暗时间为 14 h/10 h,生长过程中用去离子水浇灌,保持土壤含水量为田间持水量的 70%。植株生长 5 周后收获。收获后将植株分为根部和茎叶,用去离子水洗净植株表面土壤颗粒后,在烘箱中 105℃ 杀青,然后 60℃ 烘干 24 h,称量其干物质重,研磨至 100 目,备用;同时将盆栽土壤风干、混匀,磨细后过 0.25 mm 尼龙筛,备用。

1.4 分析测试

1.4.1 植株 Cd 含量测定

将植株样品(根、茎叶)粉末转移到消解罐中,加浓硝酸(优级纯)4 mL, H₂O₂ 2 mL。加盖拧紧,摇匀,静置,过夜。次日,上机消解,160℃ 赶酸至尽干,5% 硝酸转移定容到 25 mL 容量瓶中,利用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7500a)进行测定^[10]。

1.4.2 土壤 Cd 含量测定

称取 0.50 g 过 1 mm 尼龙筛的风干后的盆栽土壤于消解罐中,加浓硝酸(优级纯)5 mL,氢氟酸 4

mL。加盖拧紧,摇匀,静置,过夜。次日,上机消解,160℃赶酸至尽干,5% 硝酸转移定容到 50 mL 容量瓶中,利用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7500a)进行测定^[10]。

1.4.3 土壤 Cd 形态测定

采用连续提取法,在 Tessier 的形态分级方法的基础上进行部分改进^[11]。称取 1.0 g 过 0.25 mm 尼龙筛的风干后的盆栽土壤于 50 mL 离心管中,按照表 3 操作步骤进行连续提取。

表 3 土壤不同形态镉的连续提取法
Table 3 Procedure for sequential extraction of Cd from soils and corresponding phases

组 分	缩 写	提取步骤
交换态	EX	16 mL 1 mol/L MgCl ₂ , pH 7.0, 震荡 1 h, 8 000 r/min 离心 20 min
有机结合态	OB	40 mL 0.1 mol/L Na ₄ P ₂ O ₇ , 震荡 24 h, 8 000 r/min 离心 20 min
碳酸盐态	AC	16 mL 1 mol/L NaOAc, pH 5.0 (HOAc), 震荡 5 h, 8 000 r/min 离心 20 min
不定形铁-铝 氧化物结合态	OX	40 mL 0.175 mol/L (NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ /0.1 mol/L H ₂ C ₂ O ₄ 暗处震荡 4 h, 8 000 r/min 离心 20 min
残留态	RES	上述残留物用 15 mL HCl/HNO ₃ /HClO ₄ (3:1:3, V/V) 在 150℃ 加热, 至溶液清澈, 8 000 r/min 离心 20 min

1.5 数据处理与分析

数据用 Microsoft Excel、Origin8.0 及 SPSS13.0

软件进行数据统计, LSD 法检测差异显著性($p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 不同纳米修复剂对植株 Cd 胁迫耐受指数的影响

耐受指数反应了植株在逆境环境中对生长限制因子胁迫反应的程度。为了研究不同纳米型修复剂对污染土壤中胡萝卜对 Cd 胁迫反应的变化, 本研究对不同处理下胡萝卜的 Cd 胁迫的耐受指数进行了测定, 耐受指数升高, 反应植物受污染胁迫程度的降低。不同纳米修复剂处理下胡萝卜植株耐受指数(TI)按下式计算^[12]:

$$TI = \frac{\text{纳米修复剂处理作物的生物量}}{\text{对照作物的生物量}} \times 100\%$$

不同处理下胡萝卜的 Cd 胁迫的耐受指数如表 4 所示。由表 4 可知, 在相同 Cd 添加浓度条件下, 不同土壤添加纳米修复剂后, 与对照相比, 植株的耐受指数均显著提高($p < 0.05$); 在相同土壤条件下, 随着外源 Cd 浓度的增加, 植株的耐受指数呈显著增加。这结果表明, 不同纳米修复剂可显著地增加胡萝卜植株茎叶生物量, 也不同程度地促进了胡萝卜地下部的生长, 增强了植株对 Cd 的耐受性。从表 4 还可以看出, 植株的耐受指数随着纳米修复剂添加量的增加而显著增加, 而不同纳米修复剂对植株耐受指数变化间有较大的差异。总体而言, 其中 RM 及 HAP 处理植株茎叶、地下部耐受指数增加较大, 其次为 Fe₃O₄ 及 HA-Fe₃O₄ 处理。

表 4 不同纳米修复剂 (NPs) 处理下胡萝卜植株耐受指数的变化
Table 4 Changes of TI indexes of carrot under different nano-amendments treatments

生长参数	纳米材料	1% RM	2% RM	1% HAP	2% HAP	1% Fe ₃ O ₄	2% Fe ₃ O ₄	1% HA-Fe ₃ O ₄	2% HA-Fe ₃ O ₄
茎叶耐受 指数(%)	DZ-1	150	301	114	182	134	276	183	197
	DZ-5	239	581	118	425	137	205	134	253
	QY-1	326	418	321	933	396	670	274	297
	QY-5	106	133	255	912	102	262	159	236
地下部耐受 指数(%)	DZ-1	116	187	188	208	256	277	183	197
	DZ-5	432	542	105	111	135	593	284	452
	QY-1	106	209	262	642	156	267	139	125
	QY-5	314	310	395	946	308	295	163	355

注:处理 DZ-1、DZ-5、QY-1 和 QY-5 分别表示镉添加浓度分别为 1、5 mg/L 的德州和祁阳土壤 2.2 不同纳米修复剂对植株 Cd 含量的影响。

不同纳米修复剂对胡萝卜植株茎叶、地下部 Cd 含量的影响如图 1 所示。由图 1 可知,相同纳米修复剂施加量时,不同土壤中胡萝卜茎叶、地下部 Cd 含量随外源 Cd 添加量的增加而显著增加;从胡萝卜各部位 Cd 的分布来看,地下部 Cd 含量均高于茎叶部 Cd 含量。与对照相比,添加不同纳米型修复剂在不同程度上显著降低了植株茎叶和根中 Cd 的含量,且随着修复剂浓度的增加植株茎叶和根中 Cd 的含量显著降低($p < 0.05$),与对照相比,植株茎叶 Cd 含量降低最高达到 78.8%,根中 Cd 的含量降低最高达到 67.8%。其中,在碱性(pH 8.90)的土壤中,不同修复剂对降低土壤中 Cd 有效性顺序为:RM > HAP > Fe_3O_4 > HA- Fe_3O_4 处理;而在酸性土壤中,这个顺序则发生了改变。在不同 Cd 添加浓度的效果表现也不一致,在低浓度条件下表现为:RM > HAP ~ Fe_3O_4 ~ HA- Fe_3O_4 处理,而在高浓度条件下则为 RM ~ HAP > Fe_3O_4 ~ HA- Fe_3O_4 。这可能是在碱性条件下 RM、HAP 颗粒表面主要官能团羟基和羧基与氢氧根离子反应促使其带负电荷,Cd 离子可与氢氧根离子结合生成氢氧化镉沉淀,从而降低了 Cd 的有效性^[13],且 HAP 具有类生长素和细胞分裂素的特性,可刺激植物根系生长,进而扩大营养物的吸收面积^[14]。另外,RM 对土壤中 Cd 离子具有很强的吸附容量,可显著降低土壤中 Cd 的迁移性

和生物毒性^[15]。而在酸性土壤中,加入不同 RM、HAP 也在一定程度上提高了土壤的 pH(数据未列出),从而对土壤中 Cd 有效性的降低起到了一定的作用。不同修复剂对土壤中 Cd 有效性降低的机制可能是几种因素综合作用的结果。

2.2 不同纳米修复剂对 Cd 转运和富集系数的影响

在不同植物对重金属吸收、富集研究中,富集和转运系数通常被用来衡量不同植物对重金属的吸收和转移能力^[16]。本研究中,为了研究不同纳米修复剂对植株 Cd 吸收、转运的影响,转运系数(TF)的定义公式为:

TF = 植株茎叶 Cd 含量(mg/kg)/

根部 Cd 含量(mg/kg)

转运系数越大,则表明重金属从根系向地上部器官转运能力越强^[17]。而富集系数(BCF)则表示植株吸收累积土壤中重金属的能力,富集系数是植物中和土壤中重金属含量的比值,可以反映植物将重金属吸收转移到体内能力的大小,富集系数越高表明植物体内重金属富集浓度越大^[16]。其计算公式为:

BCF = 茎叶 Cd 含量(mg/kg)/

土壤中 Cd 含量(mg/kg)

添加不同修复剂对污染土壤中 Cd 富集和转运系数的影响如表 5 所示。由表 5 可知,与对照相比,不同修复剂处理的胡萝卜植株 Cd 的转运系数都在不同程度上显著降低($p < 0.05$),降低范围为 6.9% ~ 84.1%,其中降低最大的处理为 RM,其次为 HAP、 Fe_3O_4 、HA- Fe_3O_4 ,表明添加不同纳米修复剂后,Cd 主要累积在植株根部,有效束缚了 Cd 经由根部向木质部和地上部分的转移,从而降低了植物茎叶中 Cd 的含量。另外,从相同土壤不同 Cd 添加浓度下胡萝卜 Cd 的转运系数可以看出,植株 Cd 转运系数随外源 Cd 的添加而在一定程度有所增加。总体而言,在相同 Cd 处理浓度下,祁阳胡萝卜植株 Cd 的转运系数高于德州,这可能与祁阳红壤呈酸性,对 Cd 的吸持率较小而导致 Cd 的植物有效性增加及转运系数的增大。此外,从表 5 还可以看出,与对照相比,不同纳米修复剂处理也显著降低了土壤中 Cd 的富集系数,这结果表明,不同纳米修复剂处理显著降低了土壤中 Cd 的植物有效性能力。不同修复剂对降低土壤 Cd 富集系数有效性顺序大致为:RM > HAP ~ Fe_3O_4 ~ HA- Fe_3O_4 。

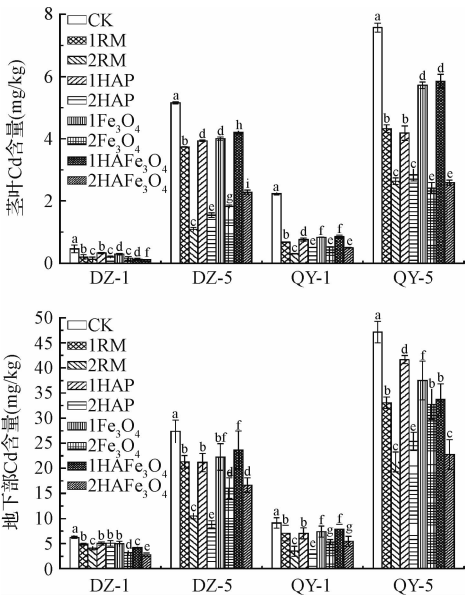


图 1 不同纳米修复剂对胡萝卜茎叶和地下部 Cd 含量的影响

Fig. 1 Influence of different nano-amendments on Cd contents in shoots and roots of carrot in soils

表 5 不同纳米修复剂对植株 Cd 转运、富集系数的影响

Table 5 Influence of different nano-amendments on TF and BCF of Cd by carrot in soils

生长参数	纳米材料处理	CK	1% RM	2% RM	1% HAP	2% HAP	1% Fe ₃ O ₄	2% Fe ₃ O ₄	1% HA-Fe ₃ O ₄	2% HA-Fe ₃ O ₄
转运系数 (IF)	DZ-1	0.0743	0.0415	0.0316	0.0661	0.0401	0.0697	0.0507	0.0249	0.0228
	DZ-5	0.1884	0.1754	0.1038	0.1624	0.1752	0.1484	0.1139	0.1565	0.1054
	QY-1	0.2441	0.1144	0.0387	0.1079	0.1160	0.1020	0.1606	0.1278	0.1838
	QY-5	0.2606	0.1309	0.1240	0.1805	0.1620	0.1523	0.1337	0.1646	0.1197
富集系数 (BCF)	DZ-1	0.493	0.232	0.162	0.417	0.200	0.337	0.177	0.130	0.124
	DZ-5	1.165	0.821	0.256	0.761	0.337	0.731	0.474	0.952	0.554
	QY-1	2.385	0.729	0.122	0.776	0.632	1.047	0.588	0.876	0.528
	QY-5	1.674	0.998	0.564	1.061	0.628	1.452	0.561	1.663	0.354

注:处理 DZ-1、DZ-5、QY-1、QY-5 分别表示镉添加浓度分别为 1、5 mg/L 的德州和祁阳土壤 2.4 不同纳米修复剂对土壤中 Cd 形态变化的影响。

重金属对植物的毒性和危害程度,不但取决于重金属的浓度,而且也取决于该元素的赋存状态。土壤中重金属的不同形态从物理化学角度说,意味着重金属离子处于不同的能量状态,能量状态不同,重金属离子在土壤中的迁移性也不同,而迁移性的大小又决定了重金属的生物有效性^[18]。从表 6 可以看出,与对照相比,施用不同纳米修复剂显著改变了土壤 Cd 的赋存形态,其中,土壤非残留态〔交换态(EX)、有机结合态(OB)、碳酸盐态(AC)及不定形铁-铝氧化物结合态(OX)的总和的含量显著降低,而残留态(RES)含量显著增加。

在碱性土壤中,DZ-1 2% RM 处理中残留态含量较对照相比增加了 96.5%;在酸性土壤中,QY-5

2% HAP 残留态含量增加范围为 66.8% ~ 140%,增加最为显著的是 2% RM 处理。在污染土壤中,残留态 Cd 主要存在土壤矿物晶格内部,是最稳定的形态,活性极低,通常不能被植物吸收,因此,残留态的增加表明 Cd 在土壤中的迁移性和植株有效性的降低,从而降低 Cd 对植物的毒性。在相同处理下,不同纳米修复剂作用下 Cd 的残渣态含量存在一定差异,总体来看顺序为: HAP ~ RM > HA-Fe₃O₄ > Fe₃O₄,这一结果与不同修复剂对植物 Cd 吸收富集影响结果是一致的,同时说明在 Cd 污染土壤中添加不同纳米型修复剂后,Cd 有效形态降低是降低植物 Cd 转运、富集的主要机制之一。

表 6 不同纳米修复剂处理下土壤中 Cd 的形态(%)变化,非残留态:EX、OB、AC 和 OX(A + B + C + D)和残留态(E)

Table 6 Relative percentages (%) of Cd in total fraction (non-residual) of EX, OB, AC and OX (A + B + C + D) and fraction of residual (E) after treatment with different nano-amendments

处 理	DZ-1		DZ-5		QY-1		QY-5	
	A + B + C + D	E	A + B + C + D	E	A + B + C + D	E	A + B + C + D	E
CK	0.629	0.315 a	4.164	0.265 a	0.783	0.153 a	4.320	0.202 a
1% RM	0.324	0.553 b	4.134	0.417 b	0.734	0.204 b	4.033	0.304 b
2% RM	0.182	0.619 c	3.581	0.683 c	0.471	0.458 c	4.164	0.513 c
1% HAP	0.463	0.340 d	4.118	0.398 d	0.767	0.217 d	3.655	0.292 b
2% HAP	0.403	0.615 e	3.972	0.624 e	0.329	0.472 c	4.043	0.485 c
1% Fe ₃ O ₄	0.506	0.374 f	4.211	0.302 f	0.596	0.203 b	3.702	0.235 d
2% Fe ₃ O ₄	0.264	0.659 g	3.351	0.509 g	0.588	0.303 d	3.947	0.359 e
1% HA-Fe ₃ O ₄	0.498	0.472 h	3.512	0.381 h	0.788	0.187 b	3.115	0.224 ad
2% HA-Fe ₃ O ₄	0.235	0.702 c	3.535	0.575 i	0.561	0.383 e	4.147	0.337 f

注:相同列的的相同字母表示不显著($p < 0.05$)。

2.3 土壤中 Cd 形态变化对 Cd 植物有效性的影响

从图 2 可以看出,不同土壤中残渣态 Cd 含量和胡萝卜茎叶 Cd 含量呈明显的负相关,而胡萝卜茎叶 Cd 含量不同处理土壤中非残留态 Cd 浓度呈正相关关系(数据未列出)。在不同处理中,RM 和 HAP 使土壤中残留态 Cd 含量显著增加,这也与植株茎叶 Cd 含量减少相一致,这可能是由于 HAP 的主要官能团羟基和羧基与氢氧根离子反应促使其带负电荷,Cd 离子可与氢氧根离子结合生成 Cd (OH)₂ 沉淀,从而促使 Cd 由非残留态向残留态转化。另外,RM 能显著降低土壤中 Cd 的可交换态含量,而且 RM 所含的铁铝氧化物对重金属产生化学专性吸附并能稳定固定到氧化物晶格层间。此外,在本实验中,2 种不同土壤上 Cd 的形态也存在一定差异,这主要是由于土壤性质的差异性,尤其是土壤的有机质含量和 pH 的影响有关。

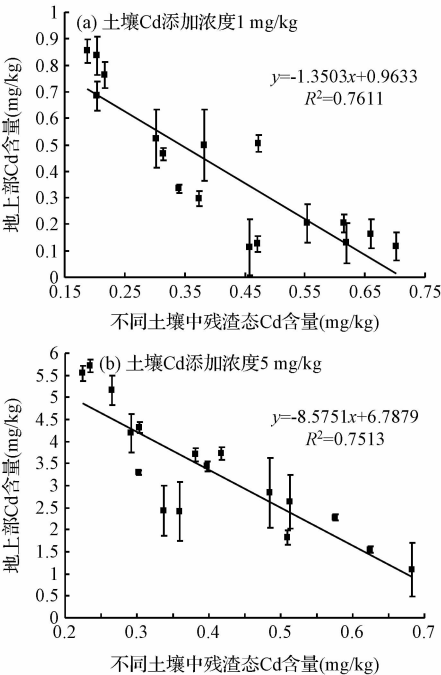


图 2 土壤中残渣态 Cd 含量与胡萝卜茎叶 Cd 含量关系
Fig. 2 Relationship between residual soil Cd and shoot Cd concentrations of carrot

3 结 论

(1)在重金属 Cd 污染土壤上添加不同纳米修复剂(HAP、RM、Fe₃O₄ 和 HA-Fe₃O₄)可以显著提高胡萝卜植株 Cd 胁迫的耐受指数,且植株的耐受指数随着纳米修复剂浓度的增加而增加。

(2)在不同土壤中,添加不同纳米修复剂均显著降低了胡萝卜植株 Cd 含量,植株茎叶 Cd 含量降低最高达到 78.8%,根中 Cd 的含量降低最高达到 67.8%;不同修复剂可以显著降低土壤中植株 Cd 的转运系数和富集系数,不同纳米修复剂修复效果上存在一定差异,大体顺序为:RM ~ HAP > HA-Fe₃O₄ > Fe₃O₄。

(3)土壤中添加不同纳米修复剂显著降低土壤中非残留态 Cd 含量,而增加土壤中残留态 Cd 含量,从而显著降低土壤 Cd 的生物有效性。

参 考 文 献

[1] 王萌,陈世宝,李娜,等. 纳米材料在污染土壤修复及污水净化中应用前景探讨. 中国生态农业学报, **2010**, 18 (2): 434-439
Wang Meng, Chen Shibao, Li Na, et al. A review on the development and application of nano-scale amendment in remediating polluted soils and waters. Chinese Journal of Eco-Agriculture, **2010**, 18(2): 434-439 (in Chinese)

[2] 贾大伟,田秉晖,张国珍,等. Fe₃O₄ 纳米磁性微粒对全氟辛酸磺酸盐的吸附. 环境工程学报, **2012**, 6(2): 389-392
Jia Dawei, Tian binghui, Zhang guozhen, et al. Adsorption of perfluorooctane sulfonate on Fe₃O₄ magnetic nanoparticles. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2012**, 6(2): 389-392 (in Chinese)

[3] Wang M., Chen L., Chen S. B., et al. Alleviation of cadmium-induced root growth inhibition in crop seedlings by nanoparticles. Ecotoxicology and Environmental Safety, **2012**, 79: 48-56

[4] Pleysier J. L., Juo A. S. R. A single-extraction method using silver-thiourea for measuring exchangeable cations and effective CEC in soils with variable charges. Soil Science, **1980**, 129(4): 205-211

[5] Rayment G. E., Higginson F. R. Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods. Melbourne VIC, Australia: Inkata Press, **1992**. 137-194

[6] Matejovic I. Determination of carbon and nitrogen in samples of various soils by the dry combustion. Communication in Soil Science and Plant Analysis, **1997**, 28 (17-18): 1499-1511

[7] Sherrod L. A., Dunn G., Peterson G. A., et al. Inorganic carbon analysis by modified pressure-calci-meter method. Soil Science Society of America Journal, **2002**, 66 (1): 299-305

[8] Bowm G. M., Hutka J. Particle size analysis. //McKenzie

- N., Coughlan K., Cresswell H. Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation, Victoria; CSIRO Publishing, **2002**, 224-239
- [9] 王萌,陈世宝,雷丽萍,等. 巯基修饰和胡敏酸包裹纳米 Fe₃O₄ 颗粒的制备及其对溶液中 Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺ 的吸附效果研究. 农业环境科学学报, **2011**, 30(8): 1669-1974
- Wang Meng, Chen Shibao, Lei Liping, et al. Adsorption studies on aqueous Cd²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺ ions by thiol and humic acid functionalized Fe₃O₄ nanoparticles. Journal of Agro-Environment Science, **2011**, 30(8): 1669-1974 (in Chinese)
- [10] 王立群. 镉污染土壤原位修复剂及其机理研究. 北京: 首都师范大学博士学位论文, **2009**
- Wang Liqun. Study on in-situ amendments on cadmium polluted soil and the mechanism. Beijing: Doctor Dissertation of Capital Normal University, **2009** (in Chinese)
- [11] Chen S. B., Zhu Y. G., Ma Y. B. The effect of grain size of rock phosphate amendment on metal immobilization in contaminated soils. Journal of Hazardous Materials, **2006**, B134: 74-79
- [12] Wilkins D. A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. New Phytologist, **1978**, 80: 623-633
- [13] 廖敏,谢正苗,黄昌勇. 镉在土水系统中的迁移特征. 土壤学报, **1998**, 35(2): 179-184
- Liao Min, Xie Zhengmiao, Huang Changyong. Transport characteristics of cadmium in soil-water system. Acta Pedologica Sinica, **1998**, 35(2): 179-184 (in Chinese)
- [14] 陈玉玲. 腐植酸对植物生理活动的影响. 植物学通报, **2000**, 17(1): 11-16
- Chen Yuling. Influences of humic acids on physiological activities of plants. Chinese Bulletin of Botany, **2000**, 17(1): 11-16 (in Chinese)
- [15] Liu Y., Lin C., Wu Y. Characterization of red mud derived from a combined Bayer Process and bauxite calcinations method. Journal of Hazardous Materials, **2007**, 146: 255-261
- [16] 李玉双,孙丽娜,孙铁珩,等. 超富集植物叶用红苘菜 (Beta vulgaris var. cicla L.) 及其对 Cd 富集特征. 农业环境科学学报, **2007**, 26(4): 1386-1389
- Li Yushuang, Sun Lina, Sun Tieheng, et al. Cadmium Hyperaccumulator Beta vulgaris var. cicla L. and Its Accumulating Characteristics. Journal of Agro-Environment Science, **2007**, 26(4): 1386-1389 (in Chinese)
- [17] 秦建桥,夏北成,赵鹏,等. 五节芒 (Miscanthus floridulus) 不同种群对镉积累与转运的差异研究. 农业环境科学学报, **2011**, 30(1): 21-28
- Qin Jianqiao, Xia Beicheng, Zhao Peng, et al. Accumulation and translocation of Cd in two Miscanthus floridulus populations. Journal of Agro-Environment Science, **2011**, 30(1): 21-28 (in Chinese)
- [18] 孙卫玲,赵蓉,张岚,等. pH 对铜在黄土中吸持及其形态的影响. 环境科学, **2001**, 22(3): 78-83
- Sun Weiling, Zhao Rong, Zhang Lan, et al. Effect of pH on copper sorption by the loess and its species. Environmental Science, **2001**, 22(3): 78-83 (in Chinese)