

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

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

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响

张仲胜, 吕宪国*, 宋晓林

(中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102)

摘要: 在充分调查三江平原不同土地利用方式下土壤中锰含量及其形态分布特征的基础上, 探讨了环境因子与土壤中不同锰形态的关系, 以揭示锰形态变化对土地利用变化改变的响应。湿地土壤中总锰 (Mn_{tot}) 含量处于较低水平。不同土地利用方式下, 林地土壤中 Mn_{tot} 要高于湿地和农田。湿地垦殖为旱田, 土壤 Mn_{tot} 有增加趋势; 湿地垦殖为水田, 土壤 Mn_{tot} 有减少趋势。三江平原土壤中锰主要以残渣态 (Mn_{res}) 和可还原态 (Mn_{red}) 为主, 可交换态 (Mn_{ext}) 与可氧化态锰 (Mn_{oxi}) 含量次之。湿地、旱田及水稻田这 3 种土地利用方式下, 土壤中可氧化态锰含量占总锰比例差异显著。湿地垦殖方向不同, 对土壤中可氧化态锰影响最大。三江平原土壤中 Mn_{tot} 及不同锰形态含量主要受到土壤中 S、pH、DOC 这 3 种环境因子影响。

关键词: 三江平原; 土地利用; 锰; 形态分布; 环境因子

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2782-06

Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China

ZHANG Zhong-sheng, LÜ Xian-guo, SONG Xiao-lin

(Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Institute of Northeast Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130102, China)

Abstract: A detailed investigation was conducted to study the variations of manganese contents and fractions in soil under different land use patterns in Sanjiang Plain, Northeast China. The purpose of this work was to study the changes of manganese and its fractions during wetland cultivation and their relationships with environment factors. The results indicated that the total manganese contents (Mn_{tot}) were relatively low in wetland soils. When wetland was cultivated into dry farmland (corn field), Mn_{tot} showed an increasing trend, and when wetland was cultivated into rice paddy, Mn_{tot} manifested a decreasing trend. Among the four fractions of manganese in soil, the residual part (Mn_{res}) and the reducible part (Mn_{red}) were predominant while the acid extractable part (Mn_{ext}) and the oxidizable part (Mn_{oxi}) were secondary. During the cultivation of wetlands to corn field or rice paddy, Mn_{oxi} was the only part with significant change. Mn_{tot} and the transformations among manganese fractions were affected by many environmental factors, with sulfur content, pH and dissolved organic carbon playing leading roles.

Key words: Sanjiang Plain; land use; manganese; distribution and fractions; environmental factors

锰是植物必需的微量元素, 具有双阈值特性, 锰不足或者过剩均会影响植物的正常生理功能^[1~3]。锰参与植物细胞内的氧化还原过程, 促进酶合成并使之活化^[4]。土壤中锰不足时, 植物生长不良; 锰过量时, 将破坏植物叶绿体, 导致植物光合速率降低^[5], 引起严重的氧化胁迫, 损伤植物膜系统, 破坏植物超微结构^[6], 使植物叶片萎蔫坏死、叶片厚度减少, 生物量降低^[7,8]。

土壤中锰的赋存形态较为复杂, 主要以二、三、四价存在, 并保持平衡^[9]。土壤溶液中锰主要以 Mn^{2+} 形态存在^[1], $Mn(III)$ 和 $Mn(IV)$ 主要以氧化物形态存在, 并形成土壤中近 20 种锰氧化物矿物^[10]。土壤中锰赋存形态可以采用化学连续提取法进行分离, 根据提取剂的种类可划分为水溶态、交换态、有机质结合态和矿物态^[11~13]。成土母质^[14]、pH^[15]、氧化还原电位^[16,17]、土壤含水量和有机

质^[18]、施肥、耕作制度^[19]、土地利用方式^[20]及生物因素均能够影响土壤中锰的赋存形态, 其中最直接的是土壤通气状况和 pH^[21~24]。

土地利用方式的改变, 往往导致土壤的物理、化学及生物条件改变, 继而引起土壤微量元素的生物可利用性变化^[25,26]。开垦将导致土壤中 DTPA 可提取部分的锰减少^[27], 引起植物可以利用的锰不足, 影响植物正常生理活动; 而当土壤中锰含量升高时, 将增加地表水体中锰的含量, 危害生态系统和人群健康^[29], 并对地表植被恢复造成威胁^[28]。

目前关于锰的研究主要集中在 3 个方面: 植物对锰的耐受机制及锰超富集植物^[29]; 土壤环境变

收稿日期: 2012-10-29; 修订日期: 2013-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101092, 41201081, 40830535)

作者简介: 张仲胜(1982~), 男, 博士, 主要研究方向为湿地重金属生物地球化学过程, E-mail: zzslycn@163.com

* 通讯联系人, E-mail: luxg@neigae.ac.cn

化对锰生物有效性及毒性的影响^[30],构建人工湿地去除含锰废水^[31,32]。有关湿地中锰形态分布及其影响因素的研究尚不多见。湿地是主要的耕地资源,世界上相当部分的耕地由湿地垦殖而来。土地利用方式的改变,不可避免地要影响土壤中不同锰形态的含量及分配规律。本研究考察了三江平原不同土地利用方式下土壤锰含量及形态分布特征,分析了不同环境因子对锰形态含量的影响,探讨了沼泽湿地农田化过程中锰形态变化,以期揭示沼泽湿地开发及人类活动对于湿地土壤质量的影响,为合理开发利用湿地资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江平原是我国最大的淡水沼泽集中分布地区之一。海拔 55 m,属于温带湿润大陆性季风气候,年均降水量 600 mm,并集中于 7~9 月。主要优势植被类型有小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)、漂筏苔草(*Carex pseudocuraica*)、毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)和乌拉苔草(*Carex meyeriana*)。土壤类型为泥炭沼泽土、腐殖质沼泽土、草甸沼泽土和潜育白浆土。近 50 年来,三江平原经历了数次大规模的农业垦殖过程,大量湿地被开垦为旱田或者水田。到 2005 年,三江平原湿地面积已经由 1954 年的 32.74% 减少到 8.81%,而耕地面积则由 1954 年的 15.91% 增加到 2005 年的 51.17%^[33]。

采样区设置在中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站(47°34′30.5″N, 133°29′45.2″E)中的试

验田。区内既有保存完好的原始小叶章湿地,也有有由自然小叶章湿地垦殖而来的旱田和水田,这为研究不同土地利用方式下土壤锰形态变化提供了良好研究样地。

1.2 样品采集及预处理

2010 年 8 月选择三江平原典型的自然小叶章湿地,小叶章湿地垦殖旱田、小叶章湿地垦殖水田、人工杨树林和自然岛状林湿地。小叶章湿地为沼泽化草甸,一年中要经历数次干湿交替过程。清除地表植物枯落物后采集地表 0~30 cm 土壤,每个采样地点采集 3~4 个重复。样品采集后,立即密封于聚乙烯塑料袋中保存。在实验室中,分拣去除石块及植物根系等杂物,室温下自然风干后碾磨过 80 目尼龙筛后,密封于聚乙烯塑料袋中保存待测。

1.3 化学分析

土壤中全 Al、Fe、Mn 含量测定采取 HClO₄-HNO₃-HF-HCl 法消解^[34];土壤 pH 测定采用 pHB-3 型 pH 计测定(土水比为 1:5);土壤有机质含量(SOM)测定采用高温外热重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定还原法测定;土壤硫含量(S)采用酸消化-硫酸钡比浊法测定;有效硫含量采用磷酸盐-乙酸浸提,硫酸钡比浊法测定(Sa);土壤溶解性有机碳(DOC)测定方法见文献[35]。

土壤中锰形态采用 BCR 连续提取法提取^[13],具体提取步骤如表 1 所示。锰含量采用电感耦合等离子体光谱仪 ICPS-7500 测定,仪器的检出限为 1.0 μg·L⁻¹。

表 1 BCR 连续提取法步骤

Table 1 Reagents and conditions of BCR producers used for Mn fractionation

步骤	提取剂	体积/mL	温度/℃	提取时间	锰形态
1	0.11 mol·L ⁻¹ CH ₃ COOH	40	22±5	振荡 16 h	可交换态
2	0.05 mol·L ⁻¹ NH ₄ OH·HCl pH = 1.5 (硝酸酸化)	40	22±5	振荡 16 h	可还原态
3	8.8 mol·L ⁻¹ H ₂ O ₂	10	22±5	消解 1 h,偶尔振荡	可氧化态
			85±2	消解 1 h	
	8.8 mol·L ⁻¹ H ₂ O ₂	10	85±2	消解 1 h	
3	1 mol·L ⁻¹ NH ₄ OAc (pH = 2)	50	22±5	振荡 16 h	
4	王水	50	130±2	消解 1 h	残渣态

1.4 质量控制

为了保证样品分析质量,所有测试过程中均进行平行样和实验空白分析,保证两次测定结果误差在 10% 以内;锰形态分析中,4 种锰形态含量之和与土壤中 Mn_{tot} 含量之间误差保证在 15% 以内。

实验中所用的各种玻璃器皿均在 3.0 mol·L⁻¹

硝酸中浸泡过夜,使用前用足量的去离子水冲洗后烘干备用。所用的试剂均为分析纯或者优级纯。

数据分析采用 SPSS 13.0 软件,制图采用 Origin 7.5 软件。统计分析中所采用的相关性分析、单因素方差分析及多元线性回归分析均在 P = 0.05 水平检验。

2 结果与讨论

2.1 三江平原土壤基本理化性质及土壤锰含量

三江平原土壤基本理化性质如表 2 所示. 土壤中 Mn_{tot} 变化范围为 $107.73 \sim 2\,798.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $403.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤锰含量主要由土壤类型和成土母质决定, 变幅很大, 从痕量到 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 世界土壤锰含量平均约为 $800\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 我国土壤锰含量范围为 $10 \sim 5\,532\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $710\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 黑龙江省 A 层土壤中锰含量的背景值为 $1\,065\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 相比之下, 三江平原土壤中锰含量处于非常低的水平.

表 2 三江平原土壤化学组成特征

Table 2 Total Mn and other element contents in soil of Sanjiang Plain		
项目	范围	平均值
$Mn_{tot}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	107.73 ~ 2 798.99	403.24
Al/%	2.96 ~ 9.07	5.45
Fe/%	1.04 ~ 3.99	1.66
pH	4.48 ~ 6.84	5.80
SOM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.50 ~ 214.08	47.80
DOC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.81 ~ 170.15	58.92
S/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	93.06 ~ 961.17	273.60
Sa/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.80 ~ 59.28	12.96

2.2 三江平原土壤中不同锰形态含量

三江平原土壤中不同锰形态含量如表 3 所示. 土壤中锰主要以 Mn_{res} 和 Mn_{red} 为主, 分别占土壤中 Mn_{tot} 含量的 54.38% 和 29.17%, 土壤中 Mn_{ext} 与 Mn_{oxi} 含量大致相当, 分别占土壤中 Mn_{tot} 的 8.23% 和 8.66%.

表 3 三江平原土壤中不同锰形态含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Mn fraction contents in soil of Sanjiang Plain/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
项目	范围	平均值
Mn_{ext}	0.65 ~ 345.40	33.19
Mn_{red}	0.85 ~ 1 857.60	117.64
Mn_{oxi}	2.71 ~ 128.34	34.93
Mn_{res}	73.56 ~ 670.45	219.30

2.3 不同土地利用方式下土壤中锰含量特征

不同土地利用方式下, 土壤中 Mn_{tot} 含量差异较大(图 1). 不同土地利用方式下土壤 Mn_{tot} 含量存在显著性差异 ($F = 9.272, P < 0.001$), 表现出岛状林 > 人工杨树林 > 玉米地 > 小叶章湿地 > 水稻田的规律. 人工杨树林和岛状林等林地土壤中 Mn_{tot} 含量水平要高于湿地及农田. 在自然湿地、玉米地和水稻田这 3 种土地利用类型中, 玉米地土壤中 Mn_{tot} 含量要明显高于水稻田. 这可能与玉米地土壤透气性较

好、土壤中氧化还原电位较高、容易形成锰氧化物有关, 而水稻田由于地表具有积水, 氧化还原电位较低, 锰容易形成 Mn^{2+} 并且进入到地表水中. 由于水稻收获前需要将地表积水排走, 大量的锰可能随着地表水流迁移出土壤之外, 这可能是造成水稻田土壤中锰含量较低的重要原因.

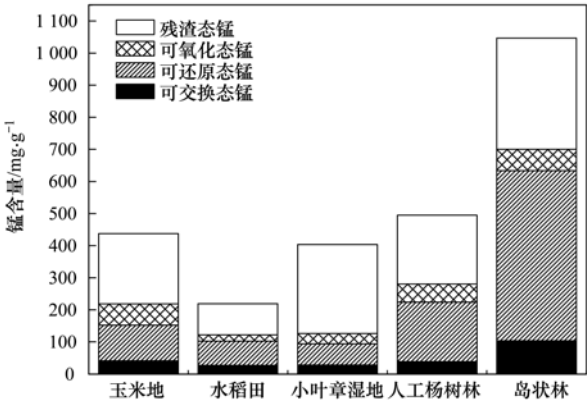


图 1 不同土地利用方式下土壤锰形态分布特征

Fig. 1 Mn_{tot} and manganese fractions in soils under different land use pattern

不同土地利用方式下土壤中锰形态分布特征存在较大差异. 玉米地、水稻田、小叶章湿地和人工杨树林土壤中, Mn_{res} 为主要锰形态; 而在岛状林中, 土壤中锰形态主要以 Mn_{red} 为主, Mn_{res} 次之, 分别约占土壤中 Mn_{tot} 含量的 50.66% 和 33.06%. 不同土地利用方式下, Mn_{ext} 含量占土壤 Mn_{tot} 的比例变化不大. 玉米地、小叶章湿地和水稻田这 3 种土地利用方式下, 土壤中各种锰形态占 Mn_{tot} 的比例, 除了 Mn_{oxi} 占 Mn_{tot} 比例存在显著性差异之外 ($F = 3.652, P = 0.044$), 其余 3 种形态锰含量占总锰比例差异不明显, 表明湿地垦殖方向不同对土壤中可 Mn_{oxi} 的影响重大. 小叶章湿地垦殖为旱田时, 土壤中 Mn_{oxi} 含量升高, 垦殖为水田时, 土壤中 Mn_{oxi} 含量降低.

2.4 土壤中总锰及锰形态影响因素

相关性分析表明, 土壤中总锰含量及不同锰形态含量受到多种环境因子条件的影响, 如表 4 所示.

土壤中的锰主要源于成土母质的风化, 锰氧化物在土壤中分布广泛, 可形成 20 多种锰的氧化物. 由于锰具有多种价态, 受到多种环境因子的影响迁, 对环境条件尤其是 Eh 和 pH 变化敏感, 迁移能力较强. 多元线性回归分析表明, 三江平原土壤中 Mn_{tot} 主要受土壤中 S 含量的支配. S 是地壳中含量最丰富的元素之一. 关于土壤 S 含量对锰在土壤中的赋存价态及迁移影响的研究并不多. 在我国南方酸性

表 4 相关性分析¹⁾ ($n = 83$)
Table 4 Results of correlation analysis

	Mn	Mn _{ext}	Mn _{red}	Mn _{oxi}	Al	S	Sa	Fe	DOC	pH	SOM	Mn _{res}
Mn	1											
Mn _{ext}	0.942 **	1										
Mn _{red}	0.972 **	0.937 **	1									
Mn _{oxi}	0.742 **	0.630 **	0.616 **	1								
Al	-0.205	-0.257 *	-0.152	-0.291 **	1							
S	0.383 **	0.481 **	0.433 **	0.088	0.052	1						
Sa	0.099	0.226 *	0.040	0.225 *	-0.140	0.271 *	1					
Fe	-0.223 *	-0.281 *	-0.163	-0.186	0.576 **	-0.204	-0.213	1				
DOC	0.244 *	0.386 **	0.245 *	0.103	-0.164	0.450 **	-0.095	-0.317 **	1			
pH	-0.279 *	-0.297 **	-0.194	-0.554 **	0.317 **	-0.155	-0.464 **	0.346 **	-0.228 *	1		
SOM	-0.023	0.027	-0.010	0.015	-0.039	0.354 **	-0.043	-0.214	0.588 **	-0.355 **	1	
Mn _{res}	0.858 **	0.696 **	0.727 **	0.800 **	-0.253 *	0.124	0.092	-0.236 *	0.104	-0.298 **	-0.096	1

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

硫酸盐土壤中,土壤锰含量处于较低的状态,在 $0.25 \sim 0.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,这主要是由于酸性硫酸盐土壤中酸度较高,锰的活动性较强,在土壤中锰的淋溶和迁移系数较大,导致锰淋失严重^[1]. 三江平原土壤 S 含量与 Mn_{tot} 呈显著正相关关系. 由于沼泽湿地土壤水分含量很高,土壤中 Eh 较低, S 主要以 S^{2-} 或者有机硫形式存在^[36]. 土壤中 Mn 与 S^{2-} 或者有机硫(如—SH 等有机官能团)通过络合或者螯合等作用形成移动性较差的化合物而被固定. 如 MnS 的溶度积常数(K_{sp})较低, MnS (粉红)为 2.5×10^{-10} , MnS (绿)为 2.5×10^{-13} ,均不容易溶解.

土壤中 Mn_{ext} 是指被土壤胶体表面吸附,通过离子交换吸附方式保持的二价锰形态. Mn_{ext} 几乎全部能被植物吸收,但是其含量一般较低,并且随着土壤条件,特别是 pH 和 Eh 的变化而有很大的差异^[1]. 在酸性或者强还原条件下, Mn_{ext} 可占 Mn_{tot} 的 20% ~ 30%,而在碱性或者氧化条件下很少超过 Mn_{tot} 的 0.1%^[11]. 土壤中 Mn_{tot} 、Al、Fe、S、pH、Sa 和 DOC 均与土壤中 Mn_{ext} 呈显著的正相关或者负相关关系. 多元线性回归分析表明土壤中 Mn_{ext} 主要受土壤中 Mn_{tot} 、Sa 和 DOC 含量的支配.

土壤中 Mn_{tot} 是 Mn_{ext} 的供应库,土壤中 Mn_{tot} 的增加,为锰的活化提供了物质基础. 关于 Sa 与 Mn_{tot} 关系研究并不深入. 土壤中 SO_4^{2-} 的存在增加对锰的活化具有重要作用^[37],无论是在酸性还是碱性土壤溶液中, MnSO_4 均是水溶态锰的重要组分. 在我国南方酸性硫酸盐土壤中,土壤中锰的活化度普遍很高,珠海地区土壤中锰活化度在 15.5% ~ 68.9% 之间变化. DOC 含量的增加,促进了土壤中微生物的活性,锰氧化物作为土壤中重要的电子受体,被微

生物通过生命活动将锰由高价的氧化态还原为低价的离子态,增加了锰的活化程度^[38]. 此外,DOC 中含有大量的可溶性的低分子量有机酸,通过络合反应进一步促进了土壤中锰的溶解^[18].

Mn_{red} 是指土壤中高价的锰氧化物中比较容易被还原的部分,这主要是一些具有较小晶粒和结晶程度的三价和四价氧化锰混合物. 三江平原土壤中 Mn_{red} 含量与土壤 Mn_{tot} 、S 及 DOC 含量呈显著正相关关系,并主要受土壤中 Mn_{tot} 和 S 含量影响.

土壤中的 Mn_{oxi} 主要是有机质结合态锰,是指与土壤中难溶性有机质结合的锰,包括以螯合作用结合的锰和难溶性有机酸锰盐. 土壤 Mn_{oxi} 主要与土壤 Mn_{tot} 和 Sa 呈显著正相关关系,与 Al 和 pH 呈显著负相关关系. 多元线性回归分析表明,土壤中 Mn_{tot} 与 pH 对 Mn_{oxi} 起支配作用.

虽然土壤中 Mn_{oxi} 主要与土壤有机质结合,但是 pH 对土壤 Mn_{oxi} 起支配作用. 由于湿地土壤有机质含量普遍较高,有机配位体充足^[39],能够与有机配位体通过螯合或者络合作用结合的离子态锰含量多少成为了决定土壤 Mn_{oxi} 多寡的主要限制因素. 较低的 pH 条件有利于土壤中锰活化形成较多的 Mn^{2+} ,从而导致土壤可氧化态锰含量的增加.

Mn_{res} 主要为被束缚在矿物晶格中的、难以移动和利用的锰形态. Al 含量和 Fe 含量均与 Mn_{res} 呈显著的负相关关系,可能是由于 Al、Fe 同 Mn 在矿物晶格中竞争结合点位,导致 Mn 的释放及活化,这是十分值得注意的. 由于目前三江平原大量抽取含有高浓度 Fe^{2+} 的地下水用于水田灌溉,湿地生态系统中 Fe 的输入,对于 Mn 的地化循环过程具有何种影响尚需要深入研究.

2.5 土地利用方式对土壤中锰形态分布的影响

在前人的研究中,通常将土壤中锰划分为七部分,即水溶态、可代换态、专性吸附态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机态和矿物结合态^[12]. BCR 化学连续提取法精简了提取过程,将土壤中的锰划分了为 4 种形态,即 Mn_{ext} 、 Mn_{red} 、 Mn_{oxi} 和 Mn_{res} ,其中 Mn_{ext} 包括了水溶态、可代换态、专性吸附态及碳酸盐结合态这 4 个部分^[13],这部分锰是土壤中生物可利用性最高的部分, Mn_{red} 和 Mn_{oxi} 则是 Mn_{ext} 的潜在供应库. 这 3 种形态是土壤中锰较活跃的部分,可以相互转化,环境条件变化时,这 3 种形态间的相互转化过程构成了锰形态变化的主要过程. 土壤中的 Mn_{res} 基本上与原生矿物或者次生矿物相结合,移动性及生物可利用性很低. 除非受到微生物生命过程的影响,否则结合在矿物晶格中的锰很难释放出来^[40].

三江平原的土地利用方式经历了湿地-旱田-水田的变化过程,具有湿地陆化和陆地湿化两方面的特征. 湿地的垦殖过程,导致土壤的环境发生明显变化,包括土壤 pH、Eh、有机质含量、DOC 含量、土壤含水率等各个方面. 小叶章湿地、旱田、水田这 3 种土壤中 Mn_{tot} 、 Mn_{ext} 、 Mn_{red} 和 Mn_{res} 之间均不存在显著性差异,但是土壤中 Mn_{oxi} 差异显著 ($F = 5.755, P = 0.010$). 3 种土地利用方式下,土壤中 Mn_{oxi} 表现出玉米地 > 小叶章湿地 > 水稻田的趋势,表明湿地垦殖过程对主要影响土壤中 Mn_{oxi} . 在湿地-旱田-水田的垦殖过程中,除了土壤中水分含量剧烈波动外,土壤中变化最明显的为土壤有机质含量与 pH^[41]. 如玉米地土壤中 pH 要比小叶章湿地及水稻田低的多. 在玉米地中,较低的 pH 条件有利于锰的活化, Mn^{2+} 离子较多,与土壤有机质通过络合作用或者螯合作用结合的机会较多,这导致旱田土壤中 Mn_{oxi} 较高. 虽然水稻田为淹水环境,有利于有机质的累积,但是土壤溶液中大量的还原性 S^{2-} 的存在,可能优先与土壤 Mn^{2+} 结合形成难溶性沉淀,导致土壤中 Mn_{oxi} 减少,此外,水稻田中地表积水,土壤溶液中 Mn^{2+} 容易通过扩散作用进入到地表积水中,这也减少了土壤中的 Mn_{oxi} 含量.

由于沼泽湿地土壤环境普遍为厌氧,土壤中氧化还原电位较低,低的 pH 条件和低的 Eh 条件有利于锰的活化^[17]. 而 S 与 DOC 则主要与土壤中微生物的生命活动有关. 在存在锰氧化物的条件下,土壤中的 S^0 在微生物的作用下容易下发生歧化反应^[42]. 三江平原土壤中 Mn_{tot} 及不同锰形态含量主

要受到土壤中 S、pH、DOC 这 3 种环境因子的影响. 不同土地利用方式下土壤 Mn_{tot} 及不同锰形态含量差异,可能主要与这 3 种环境因子有关.

3 结论

(1) 三江平原土壤中 Mn_{tot} 处于较低水平,除林地土壤中 Mn_{tot} 相对较高之外,自然湿地、旱田及水稻田中 Mn_{tot} 均低于全国平均水平.

(2) Mn_{res} 和 Mn_{ext} 是土壤中锰的主要赋存形态,而 Mn_{ext} 和 Mn_{oxi} 含量所占比例较低. 土壤中 Mn_{tot} 和不同形态锰含量受多种环境因子影响,主要受到土壤中 S、pH、DOC 这 3 种环境因子的影响.

(3) 自然湿地、旱田和水田土壤 4 种锰形态中,只有 Mn_{oxi} 存在显著性差异,湿地垦殖过程主要影响 Mn_{oxi} .

参考文献:

- [1] 刘铮. 土壤与植物中锰的研究进展[J]. 土壤学进展, 1991, 19(6): 1-10.
- [2] 高凡, 贾建业, 梅雪清, 等. 土壤中微量元素锰及其化合物的环境意义[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(4): 10-13.
- [3] 张玉秀, 李林峰, 柴团耀, 等. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展[J]. 植物学报, 2010, 45(4): 506-520.
- [4] Shenker M, Plessner O E, Tel-Or E. Manganese nutrition effects on tomato growth, chlorophyll concentration, and superoxide dismutase activity[J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(2): 197-202.
- [5] Pittman J K. Managing the manganese: molecular mechanisms of manganese transport and homeostasis [J]. New Phytologist, 2005, 167(3): 733-742.
- [6] Feng J P, Shi Q H, Wang X F. Effects of exogenous silicon on photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activities in chloroplast of cucumber seedlings under excess manganese[J]. Agricultural Sciences in China, 2009, 8(1): 40-50.
- [7] 张慧智, 刘云国, 黄宝荣, 等. 锰矿尾渣污染土壤上植物受重金属污染状况调查[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 111-113.
- [8] de al Mora M L, Rosas A, Ribera A, et al. Differential tolerance to Mn toxicity in perennial ryegrass genotypes: involvement of antioxidative enzymes and root exudation of carboxylates[J]. Plant and Soil, 2009, 320(1-2): 79-89.
- [9] Cappellen P V, Wang Y F. Cycling of iron and manganese in surface sediments: a general theory for the coupled transport and reaction of carbon, oxygen, nitrogen, sulfur, iron, and manganese[J]. American Journal of Science, 1996, 296(3): 197-243.
- [10] Tebo B M, Johnson H A, McGarthy J K, et al. Geomicrobiology of manganese (II) oxidation [J]. Trends in Microbiology, 2005, 13(9): 421-428.
- [11] 丁维新. 土壤中锰赋存形态的地域性差异研究[J]. 长江流

- 域资源与环境, 1995, **4**(1): 38-43.
- [12] 董德明, 杨彬, 刘森. 化学连续浸提法对土壤中 Zn 和 Mn 化学形态的研究[J]. 吉林大学自然科学学报, 1998, **1**(1): 62-66.
- [13] Larner B L, Seen A J, Townsend A T. Comparative study of optimised BCR sequential extraction scheme and acid leaching of elements in the certified reference material NIST 2711 [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, **556**(2): 444-449.
- [14] 张杨珠, 吴名宇, 李顺义, 等. 湖南省主要母质发育的旱土和水稻土的全锰及有效锰的化学形态研究[J]. 湖南农业科学, 2008, (1): 51-54.
- [15] 刘鑫, 雷宏军, 朱端卫. 变动氧化还原状况下酸性土壤中活性锰的变化[J]. 土壤学报, 2008, **45**(4): 734-739.
- [16] Gao S, Tanji K K, Scardaci S C, *et al.* Comparison of redox indicators in a paddy soil during rice-growing season[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(3): 805-817.
- [17] 刘鑫, 朱端卫, 雷宏军, 等. 酸性土壤活性锰与 pH、Eh 关系及其生物反应[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, **9**(3): 317-323.
- [18] 刘志光, 徐仁扣. 几种有机化合物对土壤中铁与锰的氧化物还原和溶解作用[J]. 环境化学, 1991, **10**(5): 43-50.
- [19] 陈冬峰, 丁维新. 耕作改制对砂姜黑土中锰的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14**(1): 149-151.
- [20] Heal K V. Manganese and land-use in upland catchments in Scotland[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **265**(1-3): 169-179.
- [21] Patra B N, Mohanty S K. Effect of nutrients and liming on changes in pH, redox potential, and uptake of iron and manganese by wetland rice in iron-toxic soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, **17**(4): 285-288.
- [22] Van Cappellen P, Viollier E, Roychoudhury A R. Biogeochemical cycles of manganese and iron at the oxic-anoxic transition of a Stratified Marine Basin (Orca Basin, Gulf of Mexico) [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(19): 2931-2939.
- [23] 刘学军, 吕世华, 张福锁, 等. 水肥状况对土壤剖面中锰的移动和水稻吸锰的影响[J]. 土壤学报, 1999, **36**(3): 369-376.
- [24] Olivie-Lauquet G, Gruau G, Dia A, *et al.* Release of trace elements in wetlands: role of seasonal variability [J]. *Water Research*, 2001, **35**(4): 943-952.
- [25] Franzluebbers A J, Hons F M. Soil-profile distribution of primary and secondary plant-available nutrients under conventional and no tillage[J]. *Soil & Tillage Research*, 1996, **39**(3-4): 229-239.
- [26] Martin-Rueda I, Muñoz-Guerra L M, Yunta F, *et al.* Tillage and crop rotation effects on barley yield and soil nutrients on a *Calciortidic Haploxeralf* [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, **92**(1-2): 1-9.
- [27] Santiago A, Quintero J M, Delgado A. Long-term effects of tillage on the availability of iron, copper, manganese, and zinc in a Spanish Vertisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, **98**(2): 200-207.
- [28] Paschke M W, Valdecantos A, Redente E F. Manganese toxicity thresholds for restoration grass species [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **135**(2): 313-322.
- [29] Xue S G, Chen Y X, Reeves R D, *et al.* Manganese uptake and accumulation by the hyperaccumulator plant *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae) [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **131**: 393-399.
- [30] Kuperman R G, Checkai R T, Simini M, *et al.* Manganese toxicity in soil for *Eisenia fetida*, *Enchytraeus crypticus* (Oligochaeta), and *Folsomia candida* (Collembola) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, **57**(1): 48-53.
- [31] Lesley B, Daniel H, Paul Y. Iron and manganese removal in wetland treatment systems: rates, processes and implications for management[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **394**(1): 1-8.
- [32] Xu J C, Chen G, Huang X F, *et al.* Iron and manganese removal by using manganese ore constructed wetlands in the reclamation of steel wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 309-317.
- [33] Song K S, Liu D W, Wang Z M, *et al.* Land use change in Sanjiang Plain and its driving forces analysis since 1954 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(1): 93-104.
- [34] Shi G T, Chen Z L, Xu S Y, *et al.* Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(2): 251-260.
- [35] Xi M, Lu X G, Li Y, *et al.* Distribution characteristics of dissolved organic carbon in annular wetland soil-water solutions through soil profiles in the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(9): 1074-1078.
- [36] Liu J S, Li X H. Sulfur cycle in the typical meadow *Calamagrostis angustifolia* wetland ecosystem in the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(4): 470-475.
- [37] 刘兆辉, 王遵亲. 我国酸性硫酸盐土壤中铁锰形态转化及迁移[J]. 土壤学报, 1994, **31**(4): 376-384.
- [38] Ehrlich H L. Manganese oxide reduction as a form of anaerobic respiration[J]. *Geomicrobiology Journal*, 1987, **5**(3-4): 423-431.
- [39] Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **209**(1): 27-39.
- [40] Barber B D A, Lee R B. The effect of micro-organisms on the absorption of manganese by plants[J]. *New Phytologist*, 1974, **73**(1): 97-106.
- [41] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Tillage effects on soil carbon fractions in the Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, **93**(1): 102-108.
- [42] Thamdrup B, Finster K, Hansen J W, *et al.* Bacterial disproportionation of elemental sulfur coupled to chemical reduction of iron or manganese[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(1): 101-108.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 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