ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

# 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

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第34卷 第7期
2013年7月15日

# 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,刘芃,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(*Vallisneria spiralis*)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,周锋(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-$H_2O_2$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$A^2O$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向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,张启秦,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,桑稳姣,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 *Lysinibacillus cresolivorans* 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 *Alcaligenes* 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,彭开铭,陆丽君,刘佳(2906)
$A^2O$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)

# 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
(广东省生态环境与土壤研究所,广州 510650)

**摘要**:选取了酸性矿山废水污灌区重金属污染水稻土,通过盆栽试验研究了不同水分管理条件(60%最大田间持水量,80%最大田间持水量,最大田间持水量,前期淹水+抽穗扬花期烤田,全生育期淹水)下水稻根际土壤及其不同器官(稻根、茎叶和籽粒)中硫、Fe 和 Cd 的含量变化. 结果表明,随着土壤水分含量的增加,在分蘖期根际土壤中 Cd 的含量略有升高,在成熟期对水稻根际土壤中 Fe 和 Cd 含量的影响不大;水稻不同器官对铁的吸收逐渐增加,对 Cd 的吸收则逐渐减少,两者呈明显的负相关关系;但抽穗扬花期烤田对水稻各器官对 Fe 的吸收影响不大,却明显增加了各器官中 Cd 的含量. 除旱作处理外,不同水分管理方式下,土壤中全硫和有效硫含量随着土壤水分含量增加逐渐减少,抽穗扬花期烤田能明显增加根际土壤中总硫和有效硫含量,水稻对 Cd 的吸收与根际硫含量增加存在协同关系. 上述结果证实,水稻对 Cd 的吸收不仅与 Fe 吸收有关,土壤中硫的充分供给能显著增加 Cd 在水稻中的积累.

**关键词**:酸性矿山废水;硫;镉;水稻;水分管理
**中图分类号**:X171.5 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2013)07-2837-10

# 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, WANG Rong-ping, CHEN Neng-chang, LU Pu-xiang
(Guangdong Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract**: The interactions between the concentrations of sulfur, iron and cadmium in the rhizosphere and their uptakes in rice (*Oryza sativa* L.) were studied using paddy soil which was contaminated by acid mine drainage under five water-management treatments of 60%, 80%, 100% field moisture capacity (FMC), flooded throughout the entire rice growth period and flooded followed by keeping 80% FMC after heading-flowering period. The water managements had no significant influence on the Fe and Cd concentrations in rhizosphere soil in maturity stage, although the concentration of Cd slightly increased with the increase of soil moisture in the tillering stage. However, the uptake of Fe and Cd in rice was obviously related to water managements. The increase of soil moisture enhanced the uptake of Fe, but decreased the uptake of Cd in different organs of rice (roots, stems and leaves, grains) except for Cd uptake of the root in the 60% FMC treatment. However, aerobic treatment after heading-flowering period enhanced Cd uptake in rice in all treatments, but did not influence the uptake of Fe in rice. On the other hand, the increase of soil moisture reduced the concentrations of total sulfur and available sulfur in the rhizosphere soil except for the 60% FMC treatment, which corresponded with the reduction of Cd uptake in rice. And the aerobic treatment promoted Cd uptake in rice, which was also positively related to the increase of total sulfur and available sulfur in rhizosphere soil. Therefore, it was concluded that the uptake and speciation of sulfur in rhizosphere soil other than the change of Fe concentration induced by water management could play an important role in Cd uptake of rice.

**Key words**: acid mine drainage; sulfur; cadmium; rice; water management

矿业开采对矿山的地球化学环境及其周围的生态系统带来巨大的影响,如废矿尾矿的排放堆积、酸性矿山废水的排放、河流与土壤重金属污染、地下水和大气污染及生态环境破坏等. 多金属硫化物矿山开采过程中金属硫化物的氧化,释放出大量的 As、Cd、Cu、Pb、Zn 等重金属离子和富含 $SO_4^{2-}$ 离子的酸性废水[1~3],流入河流等自然水体造成矿区下游的农田土壤的酸化和重金属累积[4~8],被农作物吸收导致农产品如水稻、玉米等籽粒中重金属含量超标[9~11]. 大量的 $SO_4^{2-}$ 离子也会在土壤中滞留,造成土壤酸化及硫含量的超标,甚至成为酸性硫酸盐土[3,9].

硫对植物的影响在过去一直是作为植物生长的营养元素来进行研究的,但近年来的研究表明,硫在植物对 Cd 等重金属的吸收积累过程中也起着十分重

**收稿日期**:2012-10-22;**修订日期**:2013-01-06
**基金项目**:国家自然科学基金项目(41101212, 41071300);广东省科学院野外科学实验站基金项目(sytz 2010 11);广东省环保专项资金项目
**作者简介**:张雪霞(1972~),女,博士后,副研究员,主要研究方向为土壤重金属污染机制与修复,E-mail:xxzhang@soil.gd.cn
* 通讯联系人,E-mail:ncchen@soil.gd.cn

要的作用,但研究的结果却一直存在着争议. 一些研究表明硫能够促进植物对 Cd 的吸收积累[12~15]. 另外一些研究则表明硫浓度的增加会降低植物对 Cd 的吸收积累,例如 $K_2SO_4$ 的施用能减少小麦根、茎、籽粒对 Cd 的吸收[16]; 同样,$SO_4^{2-}$ 能显著减少水稻对 Cd 的吸收[17, 18],也能够降低甜菜对 Cd 的吸收[19]. 而水分条件制约土壤的通气条件,直接参与硫形态转化的许多化学反应过程,因此,土壤水分含量的差异和变化对土壤中硫的形态转化具有显著的制约作用.

本研究中的土壤样品采自于广东省典型的大宝山多金属硫化物矿区水稻田,自 20 世纪 70 年代以来一直引用大宝山的酸性矿山废水进行污灌,已有 40 多年的污灌史,造成 As、Cd、Cu、Pb、Zn 等多种重金属的土壤污染[6, 9~11],土壤中的硫含量也高出广东省全硫平均含量的数倍至数百倍[9, 20]. 同时,大宝山酸矿水污灌导致农作物中 Cd 含量超标,对居民健康已经构成威胁[21]. 目前对于污染农田中 Cd 在土壤-植物系统中的迁移转化的研究已经很多,但关于污灌土壤中硫含量和形态变化对水稻 Cd 积累的影响研究相对较少. 因此,本研究采用盆栽试验,探索不同水分管理方式下,水稻根际土壤中硫,铁和 Cd 含量的变化趋势,及其分别在水稻植株中的积累情况,以期为多金属硫化物矿区污染农田中水稻积累 Cd 的理论提供科学内容和依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

水稻土采自位于粤北大宝山矿区下游的广东省翁源县上坝村,采集耕层 0 ~ 20 cm 土样,经风干后过 2 mm 筛, 充分混匀后用于盆栽试验. 并取少量土样磨碎过 100 目,测定土壤 pH 值和 As、Cd、Cu、Pb、Zn 等重金属含量,结果见表 1.

**表 1 供试土壤的基本理化性质**

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

| 项目 | Cd /mg·kg$^{-1}$ | Cu /mg·kg$^{-1}$ | Zn /mg·kg$^{-1}$ | Fe /g·kg$^{-1}$ | Mn /mg·kg$^{-1}$ | Cr /mg·kg$^{-1}$ | Pb /mg·kg$^{-1}$ | As /mg·kg$^{-1}$ | 全 S /mg·kg$^{-1}$ | 有效 S /mg·kg$^{-1}$ | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 参数 | 0.297 | 358.81 | 345.24 | 45.76 | 112.09 | 42.28 | 227.43 | 114.80 | 753.93 | 474.78 | 4.21 |

从表 1 可以看出,所采集的土壤样品主要存在 As、Cd、Cu 和 Zn 的污染,分别超出我国土壤环境质量二级标准 3.83、1.485、7.18 和 1.73 倍[22],土壤 Pb 含量虽然没有超标,但已接近土壤环境质量的二级标准 250 mg·kg$^{-1}$.

### 1.2 盆栽试验设计

水稻品种为来自于日本的高镉积累品种长香谷(*Oryza sativa* L.),水稻种子经 0.5% 次氯酸钠表面消毒 20 min,去离子水冲洗数次后,浸泡 24 h,在室温下置于潮湿的纱布内培养发芽到 1 cm 左右,重新置于盛有石英砂的盆中用去离子水培养,到幼苗长了 3 ~4 片叶子时,选择长势均匀一致的秧苗移栽进行土培试验. 每盆植 2 株.

在移栽前两天装盆,采用直径 20 cm、高 20 cm 的塑料盆,每盆装土 4 kg,同时按每 kg 土施加尿素 0.21 g、$KH_2PO_4$ 0.19 g、KCl 0.055 g 作为基肥,用 2 L 水溶解后加入土壤中 0,为保证幼苗生长,移栽后加水至水面高出土壤界面 1 cm,等水分慢慢蒸发后开始控制水分. 置于网室内,每天早晚进行称重控水.

水稻盆栽的水分管理试验设置 5 个处理:80% 的最大田间持水量(A)、最大田间持水量(B)、前期淹水(水面高于土壤界面 2cm) + 抽穗扬花期烤田(维持 80% 的最大田间持水量,C)、全生育期淹水(D)和旱作(60% 的最大田间持水量,H); 每个处理 10 个重复.

### 1.3 水稻的种植与处理

水稻幼苗于 2011 年 4 月 21 日统一移栽,6 月 8 日采集水稻分蘖样品进行分析; 在抽穗扬花期的 7 月 18 日开始控水,控制全程淹水的其中 5 盆土培水稻水分含量为 80% 的最大田间持水量; 8 月 5 日水稻成熟,烤田 3 天后收割.

收割水稻时,沿水稻根部剪下,用清水洗净后,分成茎叶和籽粒两部分. 余下的水稻根系连同根部土壤一起取出,去除周围杂土,收集根系周围的土壤,室温风干,磨碎,过 100 目尼龙筛,供化学分析用. 水稻根系用自来水冲洗,洗净后再用蒸馏水冲洗. 水稻的根、茎叶和籽粒在 105℃ 杀青 20 min,60℃ 烘干,粉碎,供化学分析用.

### 1.4 样品分析

土壤样品 pH 值(水土比 2.5∶1)用 pH 计测定.

土壤样品全量的消解采用 HF-$HClO_4$-$HNO_3$ 混合酸消化,称取过 100 目的土壤样品 0.25 g 左右,置于聚四氟乙烯坩埚中,加入 10 mL 浓 $HNO_3$,冷消化过夜,次日 150℃ 消化 2 h,稍冷,再加入 10 mL HF,消化 1 h 后,开盖飞硅,蒸至 2 mL 左右,取下稍

冷,加入 4 mL $HClO_4$,加盖,升温至 200℃左右继续消化,至溶液呈无色,否则再加入 $HClO_4$ 继续消解,溶液颜色变为无色并赶净白烟后,再继续蒸发至坩埚内容物呈黏稠状,冷却,用 2% $HNO_3$ 定容至 25 mL 容量瓶,用于后续 Cd、Cu、Fe、Mn、Pb 和 Zn 的分析测定.

植物样品用浓硝酸-高氯酸(3∶1,体积比)混合酸消化,称取粉碎的植株样品 0.5 g 左右,置于 50 mL 三角瓶中,加入 12 mL 浓 $HNO_3$,冷消化过夜,再在三角瓶中加入 4 mL $HClO_4$,混匀,将烧杯置于电热板上,170℃砂浴消化,至溶液颜色变为无色并冒白烟,否则再加入混合酸继续消解,直至溶液颜色变为无色,再继续蒸发至剩余体积 1 mL 左右,冷却,定容至 25 mL 容量瓶,用于后续分析测定

Fe 的浓度用火焰原子吸收光谱法测定; Cd 用石墨炉原子吸收光谱测定.

土壤全硫的测定:称取 1.00 g 过 100 目土壤样品,$HNO_3$-$HClO_4$ 法消解土壤后,用水稀释至约 20 mL,过滤,加 5 mL,$H_3PO_3$ 1 mL,0.5% 阿拉伯胶 1 mL,定容至 50 mL. 转移至 150 mL 烧杯中,加入 $BaCl_2 \cdot 2H_2O$晶粒 1.0g,于磁力搅拌器上搅拌 1 min,在 30 min 内取一份装入 3cm 比色槽中,用分光光度计在 440 nm 处进行比浊.

土壤有效硫的测定采用硫酸钡比浊法测定[23].

### 1.5　数据分析

所有检测数据均用 Microsoft Excel 2003 进行平均值和标准差的运算,以 Mean ± SD 形式表示; 利用最小显著性差异测验(LSD 测验)在 $\alpha = 0.05$ 水平上进行测定,与数据相关性分析一同采用 SPSS v16 统计软件分析.

## 2　结果与分析

### 2.1　不同水分管理方式下水稻根际土壤 pH 值的变化

如图 1,在分蘖期和成熟期,水稻根际 pH 值都随着土壤中水分的增加而逐渐增加,旱作处理 pH 值最低,而全生育期淹水管理方式下 pH 值最高. 在分蘖期,除旱作处理 pH 值显著低于其它各组处理($P < 0.05$)外,其它 3 组 pH 值随着水分增加也有所增加,但不显著. 在成熟期,旱作和全生育期淹水管理方式下根际土壤 pH 值比分蘖期明显增大,而在 80% 和 100% 田间持水量情况下,根际土壤的 pH 值在分蘖期和成熟期没有发生明显的改变. 因此,全生育期淹水处理土壤 pH 值与前 3 组处理(H、A 和 B)差异显著($P < 0.05$),而这 3 组之间差异不明显. 对比处理组 C 和处理组 D,可以看出抽穗扬花期烤田使水稻根际的 pH 值显著下降($P < 0.05$),并接近 80% 田间持水量水分管理下的土壤 pH 值. 该结果表明水分管理是控制根际土壤 pH 值的关键因素.

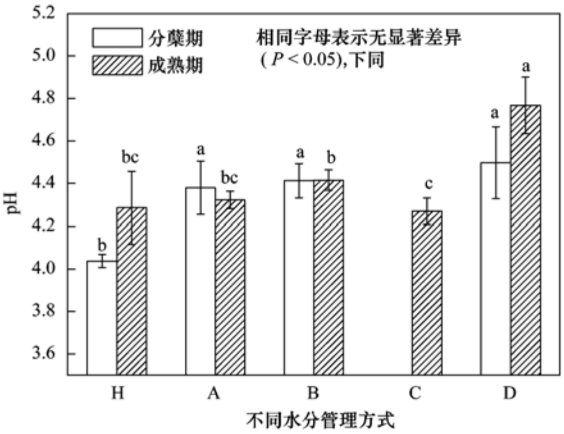


**图 1　不同水分管理方式下水稻根际土壤 pH 值变化**

Fig. 1　The pH values in rhizosphere soil of rice with different water managements

### 2.2　不同水分管理方式对水稻根际土壤中硫形态的影响

图 2 是不同水分管理方式下水稻根际土壤中全硫和有效硫含量的变化,对比表 1 的结果可以看出,在水稻生育期间,硫会在水稻根际土壤中富集,全硫的富集系数为 1.11 ~ 1.67,全生育期淹水方式下硫在根际土壤中富集系数最低. 在分蘖期,随着水分含量的增加,全硫在根际土壤中的含量也逐渐降低,全生育期淹水方式下全硫含量最低为 873.34 $mg \cdot kg^{-1}$,旱作方式下全硫含量最高为 1 098.80 $mg \cdot kg^{-1}$. 在成熟期,除旱作处理组外,分蘖期后各水分管理组中水稻根际的全硫含量继续增加,并且同分蘖期相同,全硫的含量随着水分含量的增加而显著减小,全生育期淹水方式下全硫含量最低为 957.17 $mg \cdot kg^{-1}$,80% 田间持水量处理组富集系数最高,全硫含量达到1 260.49 $mg \cdot kg^{-1}$. 图 2(a)还指出虽然和处理组 D 在抽穗扬花期前均为淹水处理,之后处理组 C 开始控水在 80% 的田间持水量,但其根际土壤中全硫的含量迅速增加,并接近 80% 田间持水量的处理组,由此可见,干旱处理能促使硫很快地从水稻的非根际向根际迁移富集.

除旱作管理方式(H)外,从图 2(b)可以看出,随着土壤中水分的增加,有效硫的含量逐步下降,占全硫含量的比例也逐步下降. 全生育期淹水管理方式下,分蘖期和成熟期水稻根际土壤中有效硫的含

量均低于水稻土的背景值,分别为水稻土背景值的 0.78 和 0.68 倍. 80% 田间持水量的管理方式下,有效硫的含量达到最高,在分蘖期和成熟期分别达到 606.73 mg·kg$^{-1}$和 706.05 mg·kg$^{-1}$,占全硫含量的 58% 和 56%. 因此,水分管理不仅能有效地控制全硫在水稻根际土壤的聚集,而且能有效地改变水稻根际有效硫的含量. 但是,对比处理组 C 和处理组 D 的数据,结果表明烤田使有效硫的总量和占总硫的比例大幅增加,接近 80% 田间持水量管理方式. 这说明水稻淹水种植方式虽然使有效硫含量大幅降低,在全硫中的含量从背景值的 62% 下降到 34%,但是这种降低是不稳定的,一旦开始排干水分,有效硫的含量和在总硫中的比例又会显著提高,这说明土壤中硫的形态非常不稳定.

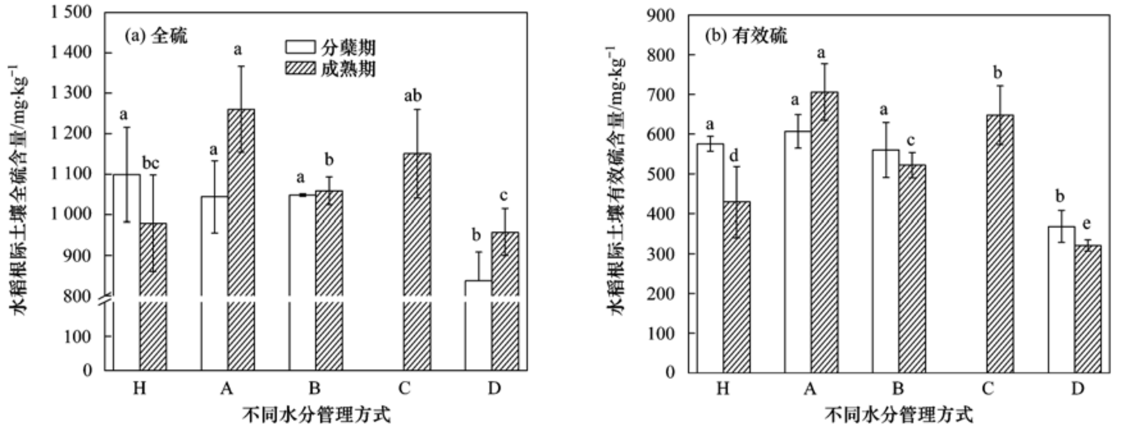


**图 2 不同水分管理方式下水稻根际土壤中全硫和有效硫的含量**

Fig. 2 Concentrations of total and available S in rice rhizosphere with different water managements

本实验中的土壤样品采自于酸性矿山废水污灌 40 余年的水稻田,酸性矿山废水中含有大量的硫酸根,随着污水灌溉进入土壤. 造成土壤总硫浓度的提高,平均含量高出广东省全硫平均含量 280 mg·kg$^{-1}$ 约 3 倍,有效硫的含量更是远远高于广东省土壤有效硫平均含量 21.5 mg·kg$^{-1}$[20],达到 474.78 mg·kg$^{-1}$,占总硫含量的 63%,远高于自然土壤均值 10% 的含量(见表 1),这表明该污染土壤中含有大量高活性的迁移性很强的硫酸根离子. 由于水稻根际相对的氧化和酸化状态,容易导致 $SO_4^{2-}$ 以质流为主向根际的迁移,当迁移量大于水稻植株对 S 的吸收量时导致 $SO_4^{2-}$ 在根际土壤中富集. Hu 等[26]就曾指出,在水稻根际土壤中 $SO_4^{2-}$ 含量比非根际土壤中 $SO_4^{2-}$ 含量高出 1.3 ~ 3.1 倍. 本实验中未考察非根际土壤中 $SO_4^{2-}$ 含量变化,但除全生育期淹水处理 D 的有效硫含量有所下降外,其它各组处理的根际土壤全硫和有效硫含量均有所增加,也表明了全硫和有效硫在水稻根际的富集. 此外,刘振乾等[24,25]的研究结果指出,潮湿环境有利于黄铁矿硫向水溶性硫和交换性硫的转化,过分干旱和淹水环境都不利于黄铁矿硫的氧化及水溶性硫和交换性硫的形成. 本实验结果支持了该结论,旱作处理 H 和全生育期淹水处理 D 组中根际土壤总硫和有效硫含量均低于处理组 A 和处理组 B 的主要原因可能就是因为过分干旱和淹水环境. 对比表 1,图 2 的结果还指出,非有效硫的硫含量在水稻根际土壤中也呈现不同程度地增加,这种增加是否表明非有效硫的硫也能从非根际土壤向根际迁移,需要更深入地研究.

图 2 的结果还显示,不同水分管理方式下水稻的种植都使有效硫在总硫中的比例降低,如 80% 田间持水量的管理方式下有效硫在总硫的比例降低到 56%,其它几种水分管理方式下,有效硫在总硫中的比例降低得更多,这可能是由于水稻根系分泌物和根际微生物的同化作用将无机硫转化为有机硫的缘故. 刘振乾等[24,25]的研究指出有机硫对水分管理响应不大,而图 2 中抽穗扬花期烤田(处理组 C)和全生育期淹水(处理组 D)两组数据对比表明,排水烤田不仅会引起水稻根际土壤中全硫、有效硫含量的增加,同时也引起有效硫占全硫比例的增加,该结果表明,水分管理并没有有效地使高活性的有效硫转变为比较惰性的有机硫,可能是转化成了某种次生矿物,容易随氧化还原条件的改变而改变,如目前的研究已经证明在硫酸盐丰富的酸性矿山废水环境中,会形成亚稳态的次生高铁矿物施氏矿物等[27~29]. Li 等[30]的研究曾指出水稻的种植,尤其是在淹水条件下能够促进有机硫向无机硫的矿化,但本实验的结果表明在有效硫含量过高的情况下,

水稻的种植不会发生有机硫的矿化，而是相反．这种差异可能源于 Li 等[30]使用的 4 种不同类型土壤中有效硫含量过低，仅仅为 21.2 ~ 29.7 $mg \cdot kg^{-1}$，最大含量不足总硫的 7%，本实验中有效硫含量是它的 20 倍左右．

## 2.3 不同水分管理方式对水稻根际土壤中 Fe 和 Cd 浓度的影响

比较表 1 和表 2 的数据可以看出，无论是在分蘖期还是在成熟期，不同水分管理模式对根际土壤中铁的含量影响不大，80% 田间持水量（处理组 A）管理方式下，分蘖期根际土壤 Fe 含量有显著增加（$P < 0.05$），但成熟期则增加不显著；抽穗扬花期烤田（处理组 C）和全生育期淹水（处理组 D）的数据对比显示抽穗扬花期烤田会引起根际土壤 Fe 含量的略微增加，但增加也不显著．同样，不同水分管理方式下，根际土壤中 Cd 的含量变化只在分蘖期有较大差别，在成熟期变化不显著．总体而言，Cd 随着水分含量的增加只有轻微的升高，旱作（处理 H）条件下，根际土壤中 Cd 的含量较低，在全生育期淹水时达到最高．抽穗扬花期烤田（处理组 C）与全生育期淹水（处理组 D）两种水分管理方式对根际土壤中 Cd 含量影响不显著．

**表 2 不同水分管理方式下水稻根际土壤中铁和镉的含量**

Table 2 Concentrations of Fe and Cd in rice rhizosphere with different water managements

| 水分管理方式 | | H | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 分蘖期 | Fe/$g \cdot kg^{-1}$ | 44.69 ± 1.63b | 52.06 ± 1.47a | 47.84 ± 1.54ab | | 42.78 ± 5.19b |
| | Cd/$mg \cdot kg^{-1}$ | 0.29 ± 0.03c | 0.33 ± 0.02b | 0.37 ± 0.01a | | 0.39 ± 0.06a |
| 成熟期 | Fe/$g \cdot kg^{-1}$ | 42.41 ± 2.25a | 46.57 ± 0.98a | 45.76 ± 1.63a | 47.66 ± 2.18a | 44.25 ± 5.07a |
| | Cd/$mg \cdot kg^{-1}$ | 0.22 ± 0.04c | 0.28 ± 0.02b | 0.29 ± 0.02b | 0.33 ± 0.04a | 0.32 ± 0.06a |

这与 Lin 等[31]和 Hu 等[32]的研究结果不同，他们利用根际箱装置，采用连续提取法和不同品种水稻栽培实验指出，土壤中 Cd 的含量从非根际土壤向根际土壤呈现不同程度地降低趋势．这一结果可能是由于在根际箱中，水稻根系被尼龙格网禁锢在根系所在的一个很小的区域，根系作用只能影响到根际和相邻土层，本实验中根系不受限制，因此未发现显著的 Cd 的迁移行为．氧化铁在中性和酸性水稻土中起着重要作用，它们的含量和形态直接关系到重金属在土壤中的迁移转化．一般认为淹水条件下铁氧化物会被还原成 $Fe^{2+}$，向根际迁移，但本实验中也未观察到明显的铁的迁移，原因可能与 Cd 相似．

对照图 1 和图 2 可知，水稻根部土壤的 pH 值和硫的变化与重金属总量的变化相关性不大，Fe 在根际土壤中的富集变化趋势也与 pH 值和硫的变化不一致．

## 2.4 不同水分管理方式下水稻对 S 的吸收积累

水稻不同生育期对硫的吸收能力差距较大（见表 3）．对比图 2（b）可知，在水稻分蘖期前，水稻根际土壤中有效硫含量与稻根对硫的吸收存在很强的正相关性，这表明硫在根际土壤中的聚集会促进稻根对硫的吸收．在成熟期，稻根中硫的含量迅速降低，分蘖期稻根中的硫含量比成熟期高 2.19 ~ 3.31 倍；并且各水分管理方式下稻根中硫含量差距不大．水稻茎叶对硫的吸收能力有所变化，与稻根硫含量变化相似的是，在分蘖期除旱作处理 H 组外，其它各组也呈现出随着水分含量的增加，茎叶中硫含量逐步降低的趋势．在成熟期时，与稻根硫含量相似，茎叶中硫含量在不同水分管理组之间差别减小．在水分含量较低时，成熟期茎叶中的硫含量低于分蘖期，但在抽穗扬花期前淹水处理 C 组和 D 组中，成熟期茎叶中硫的含量比分蘖期略有增加．表 3 结果还显示水分管理方式对水稻籽粒中硫的含量影响轻微．目前关于硫在水稻植株中的最高含量未见文献报道，赵洪涛等[33]曾报道太湖地区施用不同硫肥对水稻吸收硫的影响，结果表明在施用硫磺的情况下，水稻茎叶中最高的硫含量为 4.35 $g \cdot kg^{-1}$；在施用硫包膜尿素的情况下，稻谷中的硫含量最高达到 2.35 $g \cdot kg^{-1}$．与本实验结果比较可知，稻谷中硫含量差别不大，这应该是水稻自身的调节机制决定的，但本实验中土壤过高的硫含量明显增加了茎叶中硫的浓度，比赵洪涛等[33]的报道高 1.55 ~ 1.84 倍．

## 2.5 不同水分管理方式对水稻积累 Fe 的影响

由图 3 可知，随着土壤中水分的增加，无论是在分蘖期还是成熟期，水稻不同器官对 Fe 的吸收都逐步增加．在分蘖期，稻根 Fe 含量逐渐随水分含量的增加分别从 10.48 $g \cdot kg^{-1}$ 增加到 88.22 $g \cdot kg^{-1}$；在成熟期，稻根和茎叶中的 Fe 含量继续增加，如图 3（a），稻根中 Fe 含量随着土壤水分含量的增加，增加的幅度逐步减小，在全生育期淹水管理方式下，分

**表 3 不同水分管理方式下水稻对硫的吸收积累/g·kg⁻¹**

Table 3 Accumulation of sulfur in different organs of rice with different water managements/g·kg⁻¹

| 水分管理方式 | | H | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 分蘖期 | 稻根 | 9.22 ±0.61b | 12.60 ±0.86a | 9.69 ±0.13b | | 8.73 ±0.20b |
| | 茎叶 | 9.26 ±0.28a | 8.54 ±0.92ab | 7.12 ±0.52b | | 6.80 ±0.47c |
| 成熟期 | 稻根 | 4.21 ±0.51a | 3.81 ±0.52abc | 4.01 ±0.16ab | 3.43 ±0.14c | 3.72 ±0.38bc |
| | 茎叶 | 7.98 ±0.54ab | 8.20 ±0.35a | 6.75 ±0.43c | 7.94 ±0.23ab | 7.56 ±0.72b |
| | 籽粒 | | 2.01 ±0.13b | 2.04 ±0.25b | 2.07 ±0.21ab | 2.29 ±0.23a |

蘖期和成熟期 Fe 含量差别可忽略不计，由于实验中分蘖期采样是在分蘖中期，因此可以推断在采样后随着稻根的生长，Fe 依然不停地被稻根吸附吸收，但抽穗扬花期烤田后，并未见到稻根中 Fe 含量的明显减少，该结果表明稻根对于 Fe 的吸收主要是在抽穗扬花期前完成的. 此外，对比图 1 和图 3 可知，不同水分管理方式虽然导致根际土壤中 pH 值的变化，但 pH 值并不是主要影响水稻对 Fe 吸收的因素.

图 3(b) 结果表明，在分蘖期前水稻茎叶对 Fe 的吸收随着土壤水分的增加而慢慢增加，茎叶中 Fe 含量从 0.20 g·kg⁻¹逐渐增加到 0.45 g·kg⁻¹；在成熟期，各处理组依然呈现随着水分增加茎叶 Fe 增加的趋势，但明显地，生育期淹水方式能更大程度地提高茎叶对 Fe 的吸收，茎叶中的 Fe 含量高达 1.60 g·kg⁻¹，显著高于其它处理组中水稻茎叶的 Fe 含量. 与稻根相似，烤田处理对茎叶 Fe 含量的改变不明显，说明茎叶对 Fe 的吸收也主要集中在抽穗扬花期之前，之后的影响并不显著.

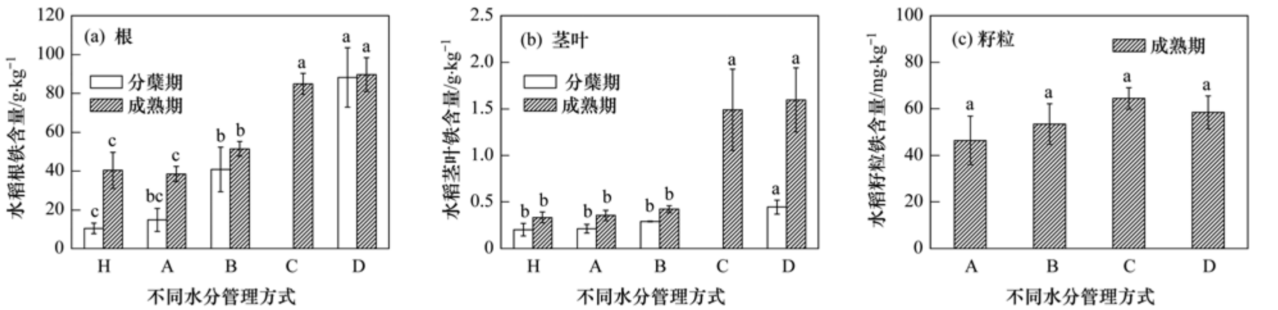


**图 3 不同水分管理方式下水稻对 Fe 的吸收积累**

Fig. 3 Accumulation of iron in different organs of rice with water management

从图 3(c) 可以看出，水稻籽粒在各水分管理方式下的变化不明显，基本也符合随水分增加 Fe 含量增加的趋势，但烤田处理比全生育期淹水处理方式下籽粒 Fe 含量更高. 据魏海燕等[34]的报道正常情况下稻米中 Fe 的平均含量均在 10 mg·kg⁻¹以下；蔡建成等[35]调查了我国 12 个省的 113 份水稻品种，包括广东省的水稻品种，结果表明糙米中铁含量的变异范围为 8.1 ~ 19.9 mg·kg⁻¹，平均值为 11.5 mg·kg⁻¹. 因此本实验中无论何种水分管理方式下，籽粒中 Fe 的含量已经远远超过这一数值，这与 40 余年的酸性矿山废水污灌造成土壤中含有大量的活性铁有关. 土壤水分含量的增加，土壤的厌氧程度逐渐加大，也形成越来越多的亚铁离子，或者增加氧化铁的活化度，而亚铁含量或活性铁的增加可以提高水稻对铁的吸收和根表铁膜数量[36, 37].

### 2.6 不同水分管理方式对水稻积累 Cd 的影响

图 4 是不同水分管理方式下分蘖期和成熟期水稻不同器官中的 Cd 含量变化，可以看出，不同水分管理方式下水稻根系、茎叶和籽粒中 Cd 含量大小的顺序为：80% 的最大田间持水量 > 最大田间持水量 > 前期淹水 + 抽穗扬花期烤田 > 全生育期淹水. 旱作处理 H 由于过度干旱(60% 的田间持水量)，至试验结束时未结籽粒，该组除成熟期稻根中的 Cd 含量比 80% 最大田间持水量处理组中稍低外，其它各时期各器官中 Cd 含量都比其它处理组高. 该结果表明，不同水分管理方式对 Cd 在水稻体内的积累有着重要的影响，水稻各器官中的 Cd 含量随土壤中水分的减少逐渐增加，全生育期淹水方式下水稻籽粒、茎叶和根系各器官 Cd 含量均最低，在成熟期，80% 最大田间持水量管理方式下，糙米、茎叶和根系中 Cd 含量比全生育期淹水方式增加了 1.63、5.50 和 4.03 倍. 对比成熟期时处理组 C 和处理组 D 可知，抽穗扬花期烤田会相应增加 Cd 在水稻各器官中的吸收积累，但增加的幅度不高. 烤田后籽粒

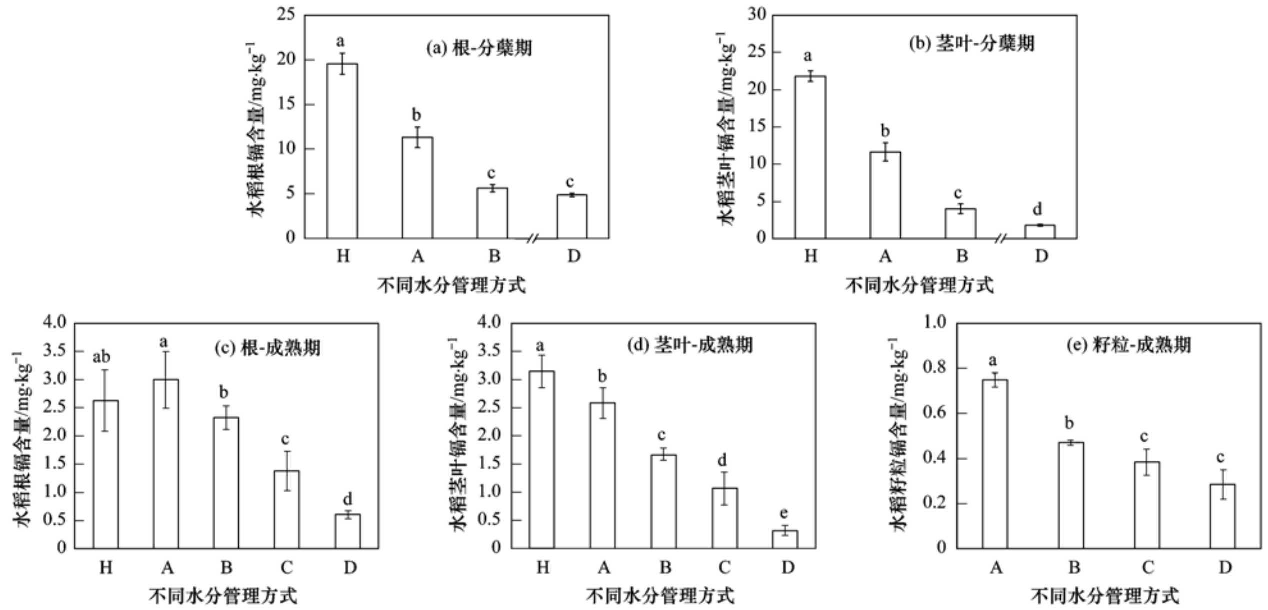


**图 4　不同水分管理方式下水稻对 Cd 的吸收积累**

Fig. 4　Accumulation of cadmium in different organs of rice with different water managements

中 Cd 含量略高于张丽娜等[38]提高 Cd 籽粒中镉含量 115.98% 的研究结果. 因此,该结果表明淹水种植水稻可以有效降低水稻对 Cd 的吸收,使水稻生产更安全.

从分蘖期和成熟期[图 4(c) 和 4(d)]的稻根和茎叶 Cd 含量进行对比,可以看出稻根和茎叶中的 Cd 含量存在相似的倾向,分蘖期时 Cd 含量高,成熟期时 Cd 含量低. 旱作处理组 H 管理方式下分蘖期稻根中 Cd 含量是成熟期的 7.43 倍,其它各组分蘖期 Cd 含量是成熟期的 2.42 ~ 3.76 倍; 旱作处理下分蘖期茎叶 Cd 含量是成熟期的 6.92 倍,其它各组处理下分蘖期茎叶 Cd 含量是成熟期的 1.97 ~ 4.49 倍. 该结果表明水稻生育早期对 Cd 具有更强的吸收积累能力,而在中后期吸收能力相对较低.

水分管理方式对水稻积累 Cd 的影响有多种说法,郑绍建等[36]的研究认为水稻土淹水后交换态 Cd 含量下降的幅度与土壤氧化铁活化度呈显著负相关,淹水后晶型氧化铁也表现出对 Cd 的专性吸附,并促进了土壤有机质对 Cd 的固定作用,使交换态 Cd 向有机结合态 Cd 转化,从而降低了 Cd 的生物有效性. 此外,水稻的淹水种植使得土壤中的硫被还原为 $S^{2-}$,与 Cd 形成 CdS 沉淀,也会降低 Cd 的活性,而在干旱或排水烤田过程中,CdS 又慢慢氧化为硫酸盐,Cd 再次被活化释放出来,增加了它的生物有效性[39].

### 2.7　水稻根际土壤 S 浓度与水稻吸收 Cd 和 Fe 的相关性

分析图 2 和图 4,可以看到随着土壤水分含量的增加,根际土壤中全硫和有效硫的含量逐步减少,与 Cd 在水稻各器官中减少的趋势一致,抽穗扬花期排水处理促使全硫和有效硫含量又在根际土壤迅速聚集,相对应地,抽穗扬花期后排干也使水稻对 Cd 的吸收增大. 对除处理组 C 外,在成熟期对土壤全硫含量和水稻各器官 Cd 含量做相关性分析,如表 4 所示,结果表明水稻根际土壤中全硫和有效硫含量与水稻各器官对 Cd 的积累呈正相关关系,尤其是与稻米中 Cd 的含量显著正相关($P < 0.05$),说明根际土壤中全硫和有效硫含量的增加有效地促进了稻米籽粒对 Cd 的积累. 对比全硫和有效硫两者与水稻中 Cd 含量的相关性,可以看出有效硫与稻根和水稻茎叶中的 Cd 含量相关性更强,相关系数均在 0.5 以上,说明根际土壤硫含量对水稻 Cd 积累的影响主要在于土壤中有效硫的贡献. 原因可能是由于 $SO_4^{2-}$ 竞争 Cd 离子在土壤表面的吸附位点,因此,$SO_4^{2-}$ 浓度的增加促进了 Cd 向土壤溶液中的释放[19],间接地促进了水稻对 Cd 的积累. 但目前的研究表明,硫对植物吸收重金属的影响并没有一致的结论[12~19]. 梁程等[40]的研究表明,随着硫浓度增大,Cd 对水稻幼苗毒性作用减轻; 但高浓度的 S 处理反而对 Cd 与 Se 交互实验中的 Cd 毒性产生协同作用. 本实验中土壤样品采自多金属硫化物矿区,不仅总硫和有效硫含量较高,同时存在着多种重

金属的污染,其它的重金属元素可能会在硫促进水稻积累方面产生协同作用.

同时,实验还考察了根际土壤硫含量与水稻各器官对 Fe 积累的相关性(如表4),它们之间呈负相关关系,且与稻米中 Fe 含量显著负相关($P < 0.05$),说明随着根际土壤中全硫和有效硫含量的增加水稻各器官中 Fe 的的含量降低. 同样,分别对比有效硫和全硫与水稻中 Fe 积累的相关系数,可知有效硫含量与水稻各器官中 Fe 含量的相关系数的绝对值均在 0.7 以上,全硫对水稻 Fe 积累的影响主要在于有效硫对水稻 Fe 积累的影响. 硫和铁都是土壤中的主要组成元素,也是主要的变价元素,如上所述,土壤水分含量的增加会促使更多的 $SO_4^{2-}$ 还原为 $S^{2-}$,有效性降低,但会使更多的Fe(Ⅲ)被还原为Fe(Ⅱ),增加其生物有效性,因此,两者呈现负相关关系.

**表 4 土壤硫含量与水稻各器官 Cd 和铁含量的相关系数1)**

Table 4 Pearson's correlation coefficient table of sulfur concentration in rhizosphere soil and Cd concentration in rice

| | 稻根 Cd | 茎叶 Cd | 稻米 Cd | 稻根 Fe | 茎叶 Fe | 稻米 Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 土壤全 S | 0.661 | 0.389 | 0.997* | -0.575 | -0.514 | -0.995* |
| 土壤有效 S | 0.812 | 0.549 | 0.990* | -0.742 | -0.706 | -0.993* |

1) * 表示相关性水平 0.05

铁(氢)氧化物是土壤中重要的组成成分,它的成分变化和结晶态的不同都会影响重金属的迁移转化能力[37,41],水稻土的干湿变化也会影响铁的形态及其对 Cd 的吸附[36]. 对比图 3 和图 4 可知,虽然根际土壤环境中 Fe 的总量没有发生很大变化,但随着土壤水分含量的增加,水稻根、茎叶和籽粒中 Fe 含量逐步增加,对应 Cd 的含量却逐步降低,两者呈负相关关系. 在成熟期对水稻各器官 Fe 和 Cd 含量做相关性分析,如表 5 所示,结果表明两者之间存在明显的相关性,相关系数的绝对值均在 0.8 以上,稻根中 Fe 和 Cd 含量在 0.01 水平上显著相关; 水稻籽粒的 Fe 和 Cd 含量的相关系数在 0.05 水平上达到了 1.000,该结果指出水稻对 Fe 和 Cd 的吸收存在拮抗作用. Fe 虽然是土壤中的大量元素,但在中性、碱性和氧化性的环境中多以三价的形态存在,难溶,不易被植物利用,在厌氧的酸性土壤中,二价 Fe 比较稳定,更容易被植物吸收. 本实验中土壤水分含量增加加大了水稻根际土壤的厌氧状态,会促进更多亚铁离子的形成,因此水稻植株中铁的含量会随着水分含量的增加而增加. 目前的研究也表明较高等的植物对铁的吸收是以亚铁离子的形式利用的[42],转运亚铁离子的机制也能转运 Cd 离子[43~45]. Shao 等[46]通过水培实验指出高浓度的铁可以有效促进水稻茎叶和稻根中 Fe 含量,但抑制其中的 Cd 含量,与本实验的结果一致.

**表 5 水稻各器官中 Cd 含量和铁含量的相关系数1)**

Table 5 Pearson's correlation coefficient table of Cd and Fe concentrations in rice

| | 稻根 Cd | 茎叶 Cd | 稻米 Cd |
|---|---|---|---|
| 稻根 Fe | -0.994** | -0.948 | -0.924 |
| 茎叶 Fe | -0.974* | -0.898 | -0.831 |
| 稻米 Fe | -0.943 | -0.979 | -1.000* |

1) * 表示相关性水平 0.05; ** 表示相关性水平 0.01

## 3 结论

(1)不同水分管理方式下根际土壤 pH 值随着水分增加而逐渐增大,烤田能迅速降低土壤 pH 值,但总体而言,土壤根际 pH 值变化不大. 在分蘖期 Cd 和 Fe 会在水稻根际土壤中富集,Cd 的含量还会随着土壤水分含量的增加而增加; 但在成熟期,不同水分管理方式对水稻根际土壤中 Cd 和 Fe 含量的影响不显著.

(2)不同的水分管理方式下水稻不同器官对 Fe 和 Cd 的吸收呈负相关关系. 在分蘖期和成熟期,水稻稻根、茎叶和籽粒中 Fe 的含量随土壤水分含量的增加而增加,但抽穗扬花期烤田并不会明显地改变各器官对 Fe 的吸收,表明水稻对 Fe 的吸收主要发生在水稻生育的抽穗扬花期之前. 除稻根中旱作处理方式外,水稻稻根、茎叶和籽粒中 Cd 的含量都随着土壤水分含量的增加而减少,抽穗扬花期烤田明显增加水稻各器官对 Cd 的吸收,表明在抽穗扬花期后水稻对 Cd 的吸收能力依然很强. 该结果表明除 Fe 外,水稻对 Cd 的吸收还受到其它因素的影响.

(3)不同的水分管理方式对硫在水稻根际土壤中的富集程度和形态变化均有显著影响. 在任何一种管理方式下硫都会在水稻根际土壤富集. 但除了旱作处理外,全硫和有效硫含量都随着土壤水分的增加而逐渐减少,这一结果与水稻各器官中 Cd 的含量呈现正相关关系. 抽穗扬花期烤田会造成全硫和有效硫在水稻根际土壤中的增加,同时,水稻各器

官对 Cd 的吸收也明显增加. 因此,不同水分管理方式造成水稻根际土壤中硫的含量和形态的变化可能影响水稻对 Cd 吸收积累.

**参考文献:**


[1] Johnson D B. Chemical and microbiological characteristics of mineral spoils and drainage waters at abandoned coal and metal mines[J]. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 2003, **3**(1): 47-66.

[2] Akci A, Koldas S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, **14**(12-13): 1139-1145.

[3] Chen A, Lin C, Lu W, *et al*. Interaction between an acidic mine water and an agricultural soil material[J]. Geoderma, 2008, **148**(2): 213-219.

[4] 周建民, 党志, 蔡美芳, 等. 大宝山矿区污染水体中重金属的形态分布及迁移转化[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(3): 5-10.

[5] 付善明, 周永章, 高全洲, 等. 金属硫化物矿山环境地球化学研究述评[J]. 地球与环境, 2006, **34**(3): 23-29.

[6] Zhou J M, Dang Z, Cai M F, *et al*. Soil heavy metal pollution around the Dabaoshan mine, Guangdong Province, China[J]. Pedosphere, 2007, **17**(5): 588-594.

[7] Williams P, Lei M, Sun G X, *et al*. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(3): 637-642.

[8] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, *et al*. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(5): 1551-1561.

[9] 李永涛, 张池, 刘科学, 等. 粤北大宝山高含硫多金属矿污染的水稻土壤污染元素的多元分析[J]. 华南农业大学学报, 2005, **26**(2): 22-25.

[10] 郑佳佳, 姜晓, 张晓军. 广东大宝山矿区周围土壤重金属污染状况评价[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(11): 137-139.

[11] 许超, 夏北成, 秦建桥, 等. 广东大宝山矿山下游地区稻田土壤的重金属污染状况的分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(S1): 549-553.

[12] Nocito F F, Pirovano L, Cocucci M, *et al*. Cadmium-induced sulfate uptake in maize roots[J]. Plant Physiology, 2002, **129**(4): 1872-1879.

[13] 安志装, 王校常, 严蔚东, 等. 镉硫交互处理对水稻吸收累积镉及其蛋白巯基含量的影响[J]. 土壤学报, 2004, **41**(5): 728-734.

[14] Feng Q, Tai P D, Li P J, *et al*. Role of sulfur in cadmium accumulation of *Tagetes erecta* L. [J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, **32**(6): 919-928.

[15] 李会合, 杨肖娥. 硫对超积累东南景天镉累积、亚细胞分布和化学形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15**(2): 395-402.

[16] Chen S, Sun L, Sun T H, *et al*. Interaction between cadmium, lead and potassium fertilizer ($K_2SO_4$) in a soil-plant system[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, **29**(5): 435-446.

[17] 衣纯真, 傅桂平, 张福锁. 不同钾肥对水稻镉吸收和运移的影响[J]. 中国农业大学学报, 1996, **1**(3): 66-70.

[18] Fan J L, Hu Z Y, Ziadi N, *et al*. Excessive sulfur supply reduces cadmium accumulation in brown rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(2): 409-415.

[19] McLaughlin M J, Lambrechts R M, Smolders E, *et al*. Effects of sulfate on cadmium uptake by Swiss chard: Ⅱ. Effects due to sulfate addition to soil[J]. Plant and Soil, 1998, **202**(2): 217-222.

[20] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 502-504.

[21] 邹晓锦, 仇荣亮, 周小勇, 等. 大宝山矿区重金属污染对人体健康风险的研究[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(7): 1406-1412.

[22] GB 15618-1995, 中华人民共和国国家标准, 土壤环境质量标准[S].

[23] NY/T 1121.14-2006 中华人民共和国农业行业标准 土壤检测 第14部分: 土壤有效硫的测定[S]. 2006.

[24] 刘振乾, 王建武, 骆世明, 等. 酸性硫酸盐土中硫形态转化过程的水分制约作用[J]. 生态科学, 2002, **21**(1): 68-71.

[25] 刘振乾, 段舜山, 李爱芬, 等. 不同土壤水分条件下酸性硫酸盐土硫形态转化特征[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(9): 1570-1574.

[26] Hu Z Y, Haneklaus S, Wang S P, *et al*. Comparison of mineralization and distribution of soil sulfur fractions in the rhizosphere of oilseed rape and rice[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, **34**(15-16): 2243-2257.

[27] Burton E D, Bush R T, Sullivan L A, *et al*. Reductive transformation of iron and sulfur in schwertmannite-rich accumulations associated with acidified coastal lowlands[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, **71**(18): 4456-4473.

[28] 廖岳华, 周立祥. 极端酸性环境下形成的施威特曼石(*Schwertmannite*)及其环境学意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, **26**(2): 177-183.

[29] 周立祥. 酸性矿山废水中生物成因次生高铁矿物的形成及环境工程意义[J]. 地学前缘, 2008, **15**(6): 74-82.

[30] Li S T, Lin B, Zhou W. Soil organic sulfur mineralization in the presence of growing plants under aerobic or waterlogged conditions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, **33**(6): 721-727.

[31] Lin Q, Chen Y X, Chen H M, *et al*. Chemical behavior of Cd in rice rhizosphere[J]. Chemosphere, 2003, **50**(6): 755-761.

[32] Hu L F, McBride M B, Cheng H, *et al*. Root-induced changes to cadmium speciation in the rhizosphere of two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes[J]. Environmental Research, 2011, **111**(3): 356-361.

[33] 赵洪涛, 周健民, 范晓晖, 等. 太湖地区主要类型水稻土上施用不同硫肥对水稻氮、硫吸收的影响[J]. 土壤学报,

2006, **43**(5): 864-867.

[34] 魏海燕, 张洪程, 戴其根, 等. 施氮处理对水稻精米中铁含量的影响及基因型差异[J]. 中国水稻科学, 2010, **24**(1): 55-61.

[35] 蔡建成, 曹桂兰, 束爱萍, 等. 水稻地方品种铁含量的差异评价[J]. 植物遗传资源学报, 2009, **10**(1): 55-59.

[36] 郑绍建, 胡霭堂. 淹水对污染土壤镉形态转化的影响[J]. 环境科学学报, 1995, **15**(2): 142-147.

[37] 傅友强, 梁建平, 于智卫, 等. 不同铁形态对水稻根表铁膜及铁吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(5): 1050-1057.

[38] 张丽娜, 宗良纲, 付世景, 等. 水分管理方式对水稻在 Cd 污染土壤上生长及其吸收 Cd 的影响[J]. 安全与环境学报, 2006, **6**(5): 49-52.

[39] 陈怀满. 土壤圈物质循环系列专著: 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 71-125.

[40] 梁程, 林匡飞, 张雯, 等. 不同浓度硫处理下硒镉交互胁迫对水稻幼苗的生理特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(5): 857-866.

[41] Atkinson C A, Jolley D F, Simpson S L. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen, salinity and sediment disturbances on metal release and sequestration from metal contaminated marine sediments[J]. Chemosphere, 2007, **69**(9): 1428-1437.

[42] Schmidt W. Iron solutions: acquisition strategies and signaling pathways in plants[J]. Trends in Plant Science, 2002, **8**(4): 188-193.

[43] Rogers E E, Eide D J, Guerinot M L. Altered selectivity in an *Arabidopsis* metal transporter[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000, **97**(22): 12356-12360.

[44] Thomine S, Wang R C, Ward M J, *et al.* Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in *Arabidopsis* with homology to *Nramp* genes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000, **97**(9): 4991-4996.

[45] Lombi E, Tearall K L, Howarth J R, *et al.* Influence of iron status on cadmium and zinc uptake by different ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. Plant Physiology, 2002, **128**(4): 1359-1367.

[46] Shao G S, Chen M X, Wang W X, *et al.* Iron nutrition affects cadmium accumulation and toxicity in rice plants[J]. Plant Growth Regulation, 2007, **53**(1): 33-42.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 34 No. 7

Jul. 15, 2013


## CONTENTS


Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China ······ GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors ······ HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, *et al.* (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles ··· ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, *et al.* (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, *et al.* (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery ······ ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, *et al.* (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, *et al.* (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao ······ DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, *et al.* (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River ······ CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland ······ LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of *Nelumbo nucifera* Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus quadricanda* ······ HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, *et al.* (2637)
Influence of *Vallisneria spiralis* on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River ······ XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, *et al.* (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, *et al.* (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water ······ ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, *et al.* (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-$H_2O_2$ System ······ LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, *et al.* (2670)
Adsorption of $Cd^{2+}$ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles ······ ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, *et al.* (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, *et al.* (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its $Ni^{2+}$ Adsorption Characteristics ······ ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, *et al.* (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark ······ WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, *et al.* (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media ······ ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, *et al.* (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, *et al.* (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 $A^2O$ Process ······ LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China ······ QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, *et al.* (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain ······ XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, *et al.* (2775)
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 (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, *et al.* (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain: A Case Study in Wugong County, Shannxi 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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory ······ PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, *et al.* (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, *et al.* (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments ······ LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, *et al.* (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the *Shewanella decolorationis* S12 ······ ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, *et al.* (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrificaition 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 *in situ* Hybridization Technology ······ LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, *et al.* (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes ······ ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, *et al.* (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium ······ CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, *et al.* (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, *et al.* (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and *m*-Cresol Biodegradation by Immobilized *Lysinibacillus cresolivorans* ······ LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 ······ HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, *et al.* (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from $A^2O$ Wastewater Treatment Process ······ GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, *et al.* (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting ······ LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, *et al.* (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
主　　办　中国科学院生态环境研究中心
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
主　　编　欧阳自远
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
出　　版　科学出版社
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
印刷装订　北京北林印刷厂
发　　行　科学出版社
电话：010-64017032
E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处　全国各地邮电局
国外总发行　中国国际图书贸易总公司
（北京 399 信箱）

**Superintended** by Chinese Academy of Sciences
**Sponsored** by Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
**Co-Sponsored** by Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection
School of Environment, Tsinghua University
**Editor-in -Chief** OUYANG Zi-yuan
**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
**Published** by Science Press
16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing　100717, China
**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House
**Distributed** by Science Press
Tel: 010-64017032
E-mail: journal@ mail. sciencep. com
**Domestic** All Local Post Offices in China
**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