ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第8期
2014年8月15日

目 次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 …… 刘庆阳,刘艳菊,赵强,张婷婷,张美根,王存美(2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 …… 陈秋方,孙在,谢小芳(2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 …… 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪(2857)
龙凤山本底站大气 CO_2 数据筛分及浓度特征研究 …… 栾天,周凌晞,方双喜,姚波,王红阳,刘钊(2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 …… 苏彬彬,许楉洋,张若宇,纪贤鑫(2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 …… 张诗建,姬亚芹,张雷波,赵雪艳,朱振宇,杨文(2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 …… 梁俊宁,李文慧,葛毅,陈洁,宋丽娜,刘杰(2883)
KI改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 …… 沈伯雄,陈建宏,蔡记,何川,李卓(2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 …… 陈文和,邓明佳,罗辉,张婧赢,丁文杰,刘俊新,李琳(2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 …… 白利平,王业耀,郭永丽,周友亚,刘俐,颜增光,李发生(2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 …… 张柏发,陈丁江(2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 …… 蔡春晓,刘红玉,李玉凤,王聪,侯明行(2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 …… 李瑞利,柴民伟,邱国玉,石福臣,Sasa Kaichiro(2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 …… 蓝家程,孙玉川,师阳,徐昕,袁道先,胡宁(2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 …… 张陶,蒲俊兵,袁道先,章程,何师意,于奭,刘文,莫雪,周建超,杨会,唐伟(2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 …… 肖可,沈立成,王鹏(2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 …… 刘文,蒲俊兵,于奭,章程,区绎如,袁道先,杨会,唐伟(2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究 …… 陈莉薇,徐晓春,王军,陈芳(2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 …… 王巍,丛海兵,徐亚军,陈雯婧,徐思涛,吴军,蒋新跃(2974)
酸性条件下Ti(Ⅳ)催化 O_3/H_2O_2 降解邻苯二甲酸二甲酯 …… 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平(2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(Ⅱ)、Hg(Ⅱ)的影响 …… 施秋伶,周欣,张进忠,邱昕凯(2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 …… 方巧, 林建伟, 詹艳慧, 杨孟娟, 郑雯婧(2992)
不锈钢201、304和316L在模拟污水管道反应器中的腐蚀 …… 鲍国栋,左剑恶,王雅娇,干里里(3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 …… 王磊,王磊,黄丹曦,王旭东(3007)
不同类型LDHs对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 …… 张翔凌,郭露,陈俊杰,刘小婷,徐璐,陈巧珍,王晓晓(3012)
SPG膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 …… 刘春,龚鹏飞,肖太民,张明,年永嘉,杨景亮,张晶(3018)
SPG膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 …… 张磊,张明,刘春,张静,刘俊良(3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 …… 陈烜,汤兵,张姿,宾丽英,黄绍松,付丰连,邱兵(3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 …… 刘文如,阴方芳,王建芳,沈耀良(3038)
UASBB厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 …… 李亚峰,马晨曦,张驰(3044)
开封周边地区地表灰尘砷、汞背景值及其应用 …… 陈彦芳,马建华,董运武,刘德新,陈星(3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 …… 段恒轶,吴亚涛,王珏,刘兆荣(3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 …… 朱智成,陈社军,丁南,王璟,罗孝俊,麦碧娴(3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 …… 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,孙良杰,刘欣超,何亚婷,贾军强,曹丛丛(3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 …… 刘希玉,邹敬东,徐丽丽,张心昱,杨风亭,戴晓琴,王忠强,孙晓敏(3083)
低分子有机酸对土壤中Cu化学形态的影响 …… 黄国勇,付庆灵,朱俊,万田英,胡红青(3091)
EDTA与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究 …… 尹雪,陈家军,蔡文敏(3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N_2O 排放的关系 …… 陈玲,范会,蒋静艳(3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N_2O 产生的不同过程及贡献 …… 孙文广,孙志高,甘卓亭,孙万龙,王伟(3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜势的影响 …… 王聪,沈健林,郑亮,刘杰云,秦红灵,李勇,吴金水(3120)
我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 …… 袁相洋,张巍巍,孙敬松,胡恩柱,张玉龙,张红星,田媛,冯兆忠(3128)
丛枝菌根影响纳米ZnO对玉米的生物效应 …… 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴(3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 …… 李霞,彭霞薇,伍松林,李志茹,冯红梅,江泽平(3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 …… 雷鸣,曾敏,廖柏寒,胡立琼,周航,龙水波(3149)
重金属铬(Ⅵ)的生态毒性及其土壤环境基准 …… 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红(3155)
维生素 B_{12} 对脱氯功能蓝藻降解2,4,4′-三氯联苯的促进作用研究 …… 刘嘉裕,肖文丰,鲁莉萍,张杭君(3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 …… 徐冉芳,孙敏霞,刘娟,汪泓,李欣,朱雪竹,凌婉婷(3169)
多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 …… 王俊霞,王春艳,刘莉莉,周啸宇,刘洋成,林匡飞(3175)
稀有鮈鲫HMGR基因全长克隆及雄鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 …… 邓川,毛思予,熊力,张晓峥,李伟,高香,刘秋萍,陈韵,刘堰(3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒MS2存活的影响 …… 何强,吴庆庆,马红芳, 周真明,苑宝玲(3192)
多胺功能化介孔炭对Pb(Ⅱ)的吸附动力学与机制 …… 李坤权,王艳锦,杨美蓉,朱志强,郑正(3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 …… 崔延瑞,郭焱,吴青,马罗丹,孙剑辉,崔凤灵(3206)
经济结构调整的污染减排效应:以COD减排为例 …… 李名升,周磊,陈远航,李茜,张建辉(3212)
中国铅流改变原因分析 …… 马兰,毛建素(3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 …… 汪诗平,Andreas Wilkes,汪亚运,白玲(3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 …… 徐志伟,张心昱,于贵瑞,孙晓敏,温学发(3230)
《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882,2927,3059,3218)

含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响

雷鸣[1],曾敏[1*],廖柏寒[1], 胡立琼[1],周航[2],龙水波[1]

(1. 中南林业科技大学林学院,长沙 410004; 2. 湖南农业大学生物科学与技术学院,长沙 410128)

摘要: 向砷(As)污染土壤中施用磷酸氢二钠(DSP)和羟基磷灰石(HAP),通过水稻盆栽试验研究含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响. 结果表明,DSP 和 HAP 都显著增加了土壤 pH 值和土壤有效磷含量($P<0.05$),活化了土壤中的砷,且 DSP 提高砷在土壤迁移的能力要强于 HAP. DSP 和 HAP 均使水稻根中总砷、糙米总砷、糙米无机砷含量显著降低,但 HAP 显著增加了水稻茎叶总砷含量. DSP 和 HAP 降低糙米中无机砷的效果比总砷略好,DSP 降低糙米中总砷和无机砷的效果与 HAP 基本相当. 分析表明,水稻各器官中砷含量受磷砷拮抗作用和土壤中砷生物有效性增加这 2 个因素的影响,且在本试验条件下磷砷的拮抗作用在水稻根、糙米这两个部位中有明显体现. 较低添加量(小于等于 0.12 $g\cdot kg^{-1}$)的 DSP 和 HAP 使水稻总生物量和糙米产量有所增加,但随着添加量的继续增加,2 种含磷物质明显抑制了水稻生长,且 HAP 的抑制作用相对较轻.

关键词:含磷物质; 砷; 水稻; 污染土壤; 拮抗作用

中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)08-3149-06 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.08.044

Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice

LEI Ming[1], ZENG min[1], LIAO Bo-han[1], HU Li-qiong[1], ZHOU Hang[2], LONG Shui-bo[1]

(1. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. College of Bioscience and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The disodium hydrogen phosphate (DSP) and hydroxyapatite (HAP) were added into arsenic contaminated soil, then rice pot experiment was conducted to study the effects of phosphorus (P)-containing substances on arsenic (As) uptake by rice. The results showed that: DSP and HAP significantly increased soil pH and the contents of available P in soil ($P<0.05$), activating soil arsenic. And DSP was stronger than HAP in improving the migration ability of As in soil. DSP and HAP treatments both significantly reduced the contents of total As in root, as well as total As and inorganic As in brown rice. But HAP significantly increased total As contents in stem. DSP and HAP treatments had better reducing effects on inorganic As than on total As in brown rice. And DSP had the same reducing effects as HAP on total As and inorganic As in brown rice. Analysis results showed that the contents of As in rice were affected by the antagonism between P and As and the increase of As bio-availability in soil. The antagonism played the major role in this study and it was clearly exhibited in both root and rice. Lower dosage (≤ 0.12 $g\cdot kg^{-1}$) of DSP and HAP increased total biomass of rice and brown rice yield, but with the increase of P addition, the two kinds of P-containing substances obviously inhibited the growth of rice, and inhibition by HAP was relatively light.

Key words: phosphorus-containing substances; arsenic; rice; contaminated soil; antagonism

世界上 90% 的水稻产自亚洲,而亚洲的一些水稻主产区已经受到了严重的砷污染,污染区大米中砷的含量常常超出各国相应的食品安全标准[1,2]. 在部分地区,居民通过食用大米摄入的砷几乎占砷总摄入量的一半,食用大米成为当地最主要的砷暴露途径[3,4]. 大米砷含量超标的问题引起了越来越广泛的关注. 磷是作物必需的三大营养元素之一,含磷物质常常被作为肥料施用. 同时在重金属污染的农田中,磷酸盐、磷矿石等含磷物质也被当作修复材料大量施用,用量往往大大超过农作物对磷的正常需求量[5,6]. 磷和砷在周期表中为同族元素,具有相似的结构和化学性质,砷污染稻田中施磷对水稻吸收砷的具体影响是近年来土壤砷污染防治领域备受关注的一个焦点问题. 一些研究发现,向砷污染土壤中添加磷能促进土壤中活性砷的释放[7,8],增加作物对砷的吸收[9,10]. 也有报道表明,水稻对 As^{5+} 吸收是通过对吸收磷的转运通道进行的,因此增加磷的施用量能够抑制水稻吸收砷[11]. 还有学者认为,磷砷在土壤-水稻系统中的相互关系可能与土壤的性质、施磷量以及水稻的品种等因素有关[12~14]. 显然,关于施磷影响水稻吸收土壤砷的问题还没有明确的结论. 根据磷肥的易溶程度可将磷肥分为可溶性和难溶性磷肥两种. 本研究选用易溶性磷酸氢二钠(DSP)和难溶性羟基磷灰石(HAP),施用于砷污染土壤中,进行水稻盆栽试验,旨在探明

收稿日期: 2013-10-17; **修订日期**: 2014-04-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41201530); 环境保护公益性行业科研专项(201009047); 湖南省自然科学基金项目(12JJ5007); 湖南省重点学科建设项目

作者简介: 雷鸣(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为重金属土壤污染与防治,E-mail:794649117@qq.com

* 通讯联系人, E-mail:emailzm@163.com

这一问题,为砷污染稻田合理施磷提供一定的科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻土壤于 2012 年 4 月采自湘南某矿区周边水稻田(N26° 34′ 29.27″,E112° 35′ 53.40″),为耕作层土壤(0 ~ 20 cm). 土壤带回实验室后,去除石块、植物残渣,自然风干,混合均匀后用于水稻盆栽试验. 土壤基本理化性质如下:pH 为 5.42,有机质含量为 3.38%、有效磷为 12.64 $mg\cdot kg^{-1}$,总砷为 80.07 $mg\cdot kg^{-1}$,交换态砷含量 0.43 $mg\cdot kg^{-1}$. 两种含磷物质 DSP 和 HAP 均为分析纯试剂,供试水稻品种为隆平种业有限公司提供的杂交水稻丰优 210.

1.2 盆栽试验

将供试土壤装桶(桶底直径 × 桶口直径 × 桶高 = 17 cm × 22 cm × 24 cm),每桶 4 kg,分两组分别添加 DSP 和 HAP,均设置 6 个添加水平:0、0.03、0.06、0.12、0.24、0.48 $g\cdot kg^{-1}$(添加量以磷计),每个水平设置 3 次重复. 同时加入 0.22 $g\cdot kg^{-1}$ K_2CO_3(按 K_2O 计)、0.28 $g\cdot kg^{-1}$尿素(按纯 N 计)作为基肥,混合均匀后保持淹水状态熟化 20 d,然后移栽水稻秧苗,置于日光温室栽培. 水稻生长期间用自来水灌溉,孕穗期追加 0.11 $g\cdot kg^{-1}$ K_2CO_3(按 K_2O 计)、0.10 $g\cdot kg^{-1}$ KH_2PO_4(按 P_2O_5 计算)、0.14 $g\cdot kg^{-1}$尿素(按纯 N 计). 水稻分蘖期时在每个桶中采集土壤样品约 50 g,自然风干,研磨后分别过 100、10 目的尼龙筛,用于测定有效磷含量和各形态砷含量. 水稻收获时分根、茎叶、稻谷采集,用自来水冲洗和超纯水清净,在 105℃ 杀青 30 min 后 75℃ 烘干至恒重. 烘干后的稻谷经小型脱壳机处理,将糙米与谷壳分开,并用不锈钢粉碎机将水稻根、茎叶、壳和糙米粉碎后保存.

1.3 分析方法

土壤 pH 值用 pH 计(pHs-3C,上海精密科学仪器有限公司)测定,测定时的水土比为 2.5∶1[15]; 土壤有机质采用重铬酸钾水合氧化法测定(NY/T 1121.6-2006). 土壤有效磷用氟化铵-盐酸法提取(NY/T 1121.7-2006),植物全磷用浓硫酸和双氧水高温消解,提取液和消解液中磷用钼锑抗比色法测定. 土壤总砷采用(1 + 1)王水水浴消解法提取(GB/T 22105-2008),各形态砷采用五步连续提取法提取[16],提取液中的砷浓度用原子荧光光度计(AF7500,北京东西分析仪器公司)测定. 糙米中总砷和无机砷采用氢化物原子荧光光度法测定(GB/T 5009.11-2003). 为了保证植物和土壤样品中总砷含量的分析质量,测定过程中用国家标准物质进行质量控制(GBW(E)-070009、GBW-08502).

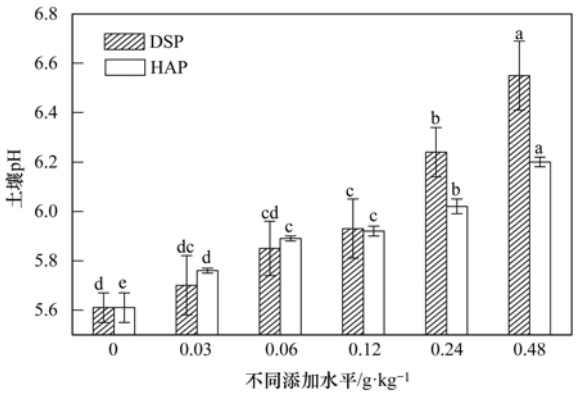
1.4 数据处理

采用 Excel 2010、SPSS 15.0 和 Origin 8.5 软件进行数据处理和绘图,数据多重比较均在 $P < 0.05$ 水平下进行.

2 结果与分析

2.1 DSP 和 HAP 对土壤 pH 值的影响

由图 1 可知,土壤 pH 值随 DSP 和 HAP 添加量的增加而升高,0.03 ~ 0.48 $g\cdot kg^{-1}$的 DSP 和 HAP 分别使土壤 pH 值增加了 0.09 ~ 0.94 和 0.15 ~ 0.59 个单位. 显然,DSP 提高土壤 pH 的作用比 HAP 略大. DSP 和 HAP 使土壤 pH 增加的原因是,DSP 水解产生 OH^-,而 HAP 溶解后能产生 OH^-和 PO_4^{3-}[17]. 土壤中的砷主要以阴离子形式存在,土壤 pH 的升高会促进土壤中砷的解吸,提高砷的迁移能力[18].



相同物质不同处理浓度处理下具有相同字母表示不显著、反之亦然,下同

图 1 DSP 和 HAP 对土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effects of DSP and HAP on soil pH

2.2 DSP 和 HAP 对土壤有效磷含量的影响

由图 2 可知,随着 DSP 和 HAP 添加量逐渐增加,土壤有效磷也逐渐增加. 与对照相比较,0.03 ~ 0.48 $g\cdot kg^{-1}$的 DSP 和 HAP 分别使土壤有效磷增加了 20.98% ~ 186.18% 和 33.67% ~ 71.76%. 显然,易溶性 DSP 处理下土壤有效磷含量明显高于难溶性 HAP 处理. 显著性分析表明,DSP 添加量到 0.06 $g\cdot kg^{-1}$ 时土壤有效磷含量即与对照存在显著差异,而 HAP 添加量要达到 0.48 $g\cdot kg^{-1}$时才与对照存在

显著差异.

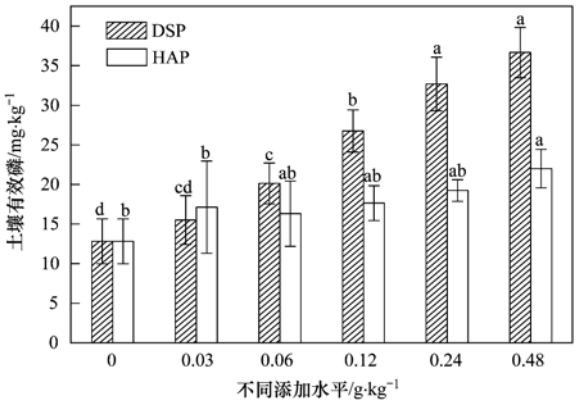


图 2　DSP 和 HAP 对土壤有效磷的影响

Fig. 2　Effects of DSP and HAP on available soil phosphorus

2.3　DSP 和 HAP 对土壤砷形态分布的影响

研究表明,砷在土壤中的迁移能力和生物有效性并不仅仅取决于砷的总量,还与其存在形态有较大的关系[19]. 大多研究者把土壤中砷的形态分为 5 种:交换态砷(A-As)、铝型砷(Al-As)、铁型砷(Fe-As)、钙型砷(Ca-As)和残渣态砷(R-As). A-As 是指交换吸附在土壤组分上的砷,其易迁移,生物有效性大,一般作为生物有效态或生物可利用态砷,而其它 4 种形态砷统称为难溶性砷[20].

表 1 显示了不同添加量的 DSP 和 HAP 对污染土壤中 5 种形态砷的影响. 各处理下砷的回收率在 91.10% ~106.76%范围内(回收率为 5 种形态砷之和与总砷之比). 同对照相比较,随着添加量的增加,DSP 显著增加了土壤中 A-As、Al-As、Fe-As 的含量,降低了 Ca-As 和 R-As 含量,HAP 亦显著增加了土壤中 A-As、Al-As、Fe-As 的含量,降低了 Ca-As 含量,但对 R-As 影响不显著. 0.03 ~0.48 g·kg^{-1}的 DSP 分别使 A-As、Al-As、Fe-As 增加了 34.52% ~73.98%、140.26% ~198.70%、25.63% ~82.63%,使 Ca-As、R-As 降低了 3.11% ~52.76%、23.53% ~39.21%,且 A-As 在 DSP 添加量大于等于 0.24 g·kg^{-1}时与对照存在显著差异,R-As 在 DSP 大于等于 0.03 g·kg^{-1}时与对照存在显著差异. 0.03 ~0.48 g·kg^{-1}的 HAP 分别使 A-As、Al-As、Fe-As 增加了 41.02% ~70.06%、37.66% ~236.36%、14.05% ~19.60%,使 Ca-As 降低了 9.97% ~28.22%,且 A-As 在 HAP 添加量大于等于 0.06 g·kg^{-1}时与对照存在显著差异. 耿志席等[8]研究表明,磷能够增加土壤中砷的解吸,陈静等[18]研究表明,土壤 pH 的升高也会促进土壤中砷的解吸. 本试验中,土壤 A-As 随 DSP 和 HAP 的添加而不断增加的现象符合这一规律. 在本试验条件下,2 种含磷物质增加土壤中 A-As 的作用基本相当. DSP 能够显著降低土壤中最难被作物利用的 R-As 含量,而 HAP 对 R-As 含量没有显著影响,这应当归因于 DSP 处理下的土壤 pH 和有效磷含量都比 HAP 高.

表 1　DSP 和 HAP 对污染土壤中砷形态分布的影响/mg·kg^{-1}

Table 1　Effects of DSP and HAP on the distribution of arsenic speciation in contaminated soil/mg·kg^{-1}

含磷物质	添加水平/g·kg^{-1}	A-As	Al-As	Fe-As	Ca-As	R-As
DSP	0	0.43 ±0.12b	0.77 ±0.76b	25.05 ±1.02c	14.14 ±0.61a	38.46 ±2.74a
	0.03	0.59 ±0.05b	1.85 ±0.42a	31.47 ±2.14b	12.69 ±1.95a	26.34 ±3.66b
	0.06	0.58 ±0.09ab	1.87 ±0.63a	39.92 ±6.47a	13.7 ±3.14b	29.41 ±4.38b
	0.12	0.62 ±0.19ab	1.97 ±0.41a	41.42 ±0.77a	12.23 ±1.67b	28.37 ±2.28b
	0.24	0.73 ±0.06a	2.3 ±0.62a	45.75 ±1.3a	6.68 ±0.35b	23.38 ±5.69b
	0.48	0.75 ±0.05a	2.28 ±0.28a	43.02 ±2.64a	6.8 ±0.49b	23.93 ±1.15b
HAP	0	0.43 ±0.12b	0.77 ±0.76b	25.05 ±1.02a	14.14 ±0.61a	38.46 ±2.74a
	0.03	0.61 ±0.1ab	1.06 ±0.22ab	28.57 ±2.91a	11.65 ±2.11b	37.29 ±1.79a
	0.06	0.67 ±0.12a	2.59 ±0.05a	29.49 ±3.2a	10.15 ±1.09b	37.81 ±3.29a
	0.12	0.69 ±0.09a	1.56 ±0.58ab	29.96 ±3.98a	11.49 ±1.9ab	34.81 ±2.83a
	0.24	0.72 ±0.08a	1.85 ±0.52ab	29.57 ±3.13a	12.73 ±1.42b	35.68 ±2.82a
	0.48	0.73 ±0.09a	1.9 ±0.65ab	29.32 ±3.56a	11.23 ±2.71b	38.63 ±3.19a

2.4　DSP 和 HAP 对水稻各器官砷含量的影响

图 3 显示了不同添加量的 DSP 和 HAP 对水稻各器官中砷含量的影响. 从中可知,DSP 使水稻根、糙米中总砷和糙米无机砷含量降低. 与对照相比较,0.03 ~0.48 g·kg^{-1}的 DSP 使根总砷、糙米总砷和糙米无机砷含量分别降低了 24.00% ~29.61%、12.09% ~21.98%和 34.15% ~41.46%,根总砷、糙米总砷和糙米无机砷含量分别在 DSP 添加量达到 0.03、0.12、0.03 g·kg^{-1}时与对照存在显著差异. DSP 对茎叶和壳中总砷含量都没有显著影响. HAP 亦使水稻根、糙米中总砷和糙米无机砷含量降低. 与对照相比较,0.03 ~0.48 g·kg^{-1} HAP 分别使

根总砷、糙米总砷和糙米无机砷含量降低了16.22% ~36.94%、8.79% ~21.98%和21.95% ~40.24%,且在添加量分别达到0.03、0.12和0.06 g·kg^{-1}时使根总砷、糙米总砷和糙米无机砷与对照存在显著差异. HAP使水稻茎叶总砷含量有所增加,且各处理都与对照存在显著性差异,在最大添加量(0.48 g·kg^{-1})时其使茎叶总砷增加了39.89%,但HAP对壳总砷含量没有显著影响.

本试验条件下,砷在水稻中含量由下到上呈逐渐递减趋势,各器官中砷含量分布为根 >> 茎叶 > 谷壳 > 糙米,这与前人的研究结果相同[13]. 此外,DSP和HAP降低糙米中无机砷的效果比总砷略好,DSP降低糙米中总砷和无机砷的效果与HAP基本相当. 尽管2种含磷物质都降低了糙米无机砷含量,但仍未使其低于国家食品安全标准(GB 2762-2012)限值(0.2 mg·kg^{-1}).

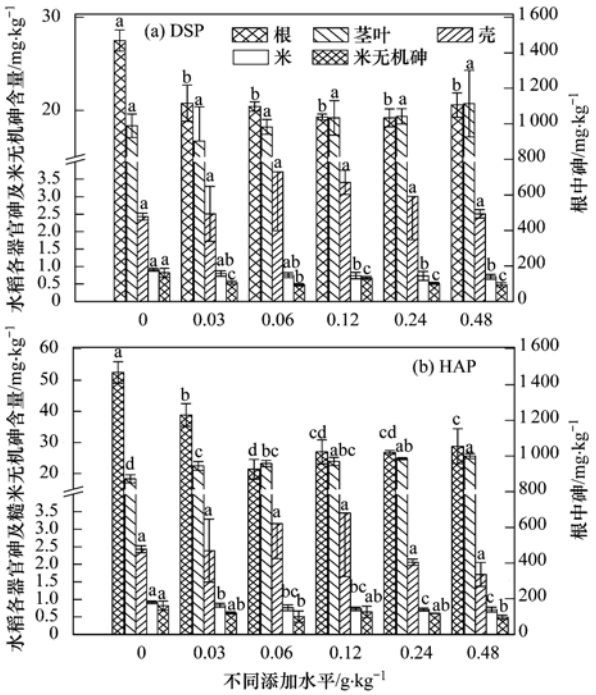


图3 DSP和HAP对水稻各根、茎叶、壳、米中砷和米中无机砷含量的影响

Fig. 3 Effects of DSP and HAP on contents of As in root, stem, husk, brown rice and inorganic As in brown rice

2.5 DSP和HAP对水稻各器官磷含量的影响

由图4可知,DSP和HAP处理都使水稻根、茎叶、米中磷含量增加,使壳中磷含量降低. 0.03 ~ 0.48 g·kg^{-1}的DSP使水稻根、茎叶、糙米中磷含量分别增加2.87% ~103.83%、32.79% ~231.15%、28.76% ~47.64%,且与对照存在显著差异,使壳中磷含量降低了1.03% ~11.28%,但与对照相比无显著差异. 0.03 ~0.48 g·kg^{-1}的HAP分别使水稻根、茎叶、糙米中磷的含量增加61% ~115%、6.56% ~88.52%、8.80% ~35.84%,且在添加量范围内与对照存在显著性差异,使壳中磷降低4.10% ~20.51%,但未呈现规律性变化. 水稻各器官磷的分布规律为糙米 > 根 > 茎叶 > 壳. 为研究水稻各器官中磷、砷的竞争关系,将水稻磷、砷的含量做相关性分析可知(表2),磷、砷在水稻根、壳、糙米中表现为负相关关系,茎叶中表现为正相关关系. 显然,磷、砷在水稻不同器官中表现出不同的作用关系.

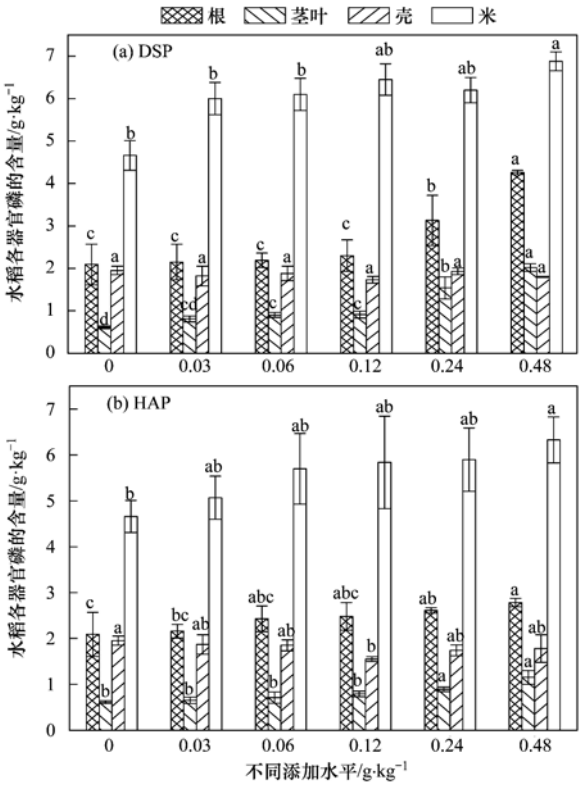


图4 DSP和HAP对水稻各根、茎叶、壳、糙米磷含量的影响

Fig. 4 Effects of DSP and HAP on the contents of phosphorus in rice root, stem, husk and brown rice

2.6 DSP和HAP对水稻产量的影响

由表3可知,DSP和HAP都使水稻总生物量(水稻总生物量等于水稻各器官总重量之和)和糙米产量呈先增加后降低趋势. 在添加量达到0.12 g·kg^{-1}时,DSP和HAP都使水稻总生物量和糙米产量达到最大,二者使总生物量增加了7.02%和18.61%,但仅HAP处理与对照有显著差异. 同时,二者分别使糙米产量增加了22.54%和30.62%,且均与对照有显著差异. 但是当DSP和HAP添加量达到0.48 g·kg^{-1}时对水稻生长产生了严重的负面影响,分别使总生物量降低了77.20%和41.40%,

使糙米产量减少了 72.67% 和 41.80%. DSP 在高浓度处理时严重抑制水稻生长可能主要是水稻生长受到了高磷胁迫和 DSP 中钠离子的毒害,使水稻植株表现出分蘖数减少、植株矮小、生长缓慢等症状. 而 HAP 对水稻的影响可能主要是土壤中过高的磷抑制了水稻的生长.

表 2　土壤有效磷和水稻各器官磷砷间的皮尔逊相关系数[1)]

Table 2　Pearson analysis between As in all kinds of rice organs and soil available phosphorus

类型	根砷		茎叶砷		壳砷		米砷		米无机砷	
	DSP	HAP	DSP	HAP	DSP	HAP	DSP	HAP	DSP	HAP
有效磷	−0.635	−0.637	0.859*	0.973**	0.294	−0.162	−0.838*	−0.856*	−0.544	−0.786
根磷	−0.317	−0.747	0.824*	0.896*	−0.107	−0.055	−0.602	−0.927**	−0.501	−0.733
茎叶磷			0.799	0.792	0.044	−0.336	−0.718	−0.764	−0.617	−0.633
壳磷					−0.36	−0.554	0.516	0.719	0.205	0.271
米磷							−0.963**	−0.967**	−0.778	−0.810

1) * 为 $P<0.05$, * * 为 $P<0.01$

表 3　DSP 和 HAP 对水稻总生物量和糙米产量的影响

Table 3　Effects of DSP and HAP on the total biomass of rice and brown rice production

添加水平 /g·kg^{-1}	总生物量/g·株$^{-1}$		糙米产量/g·株$^{-1}$	
	DSP	HAP	DSP	HAP
0.00	65.57 ± 9.07a	65.57 ± 9.07b	20.67 ± 1.19b	20.67 ± 1.19c
0.03	68.73 ± 10.06a	72.73 ± 10.76a	21.57 ± 1.27b	23.8 ± 0.7b
0.06	66.9 ± 10.77a	76.17 ± 11.25a	22.93 ± 1.51b	26.37 ± 0.72ab
0.12	70.17 ± 10.79a	77.77 ± 11.6a	25.33 ± 1.33a	27 ± 0.82a
0.24	27.03 ± 3.9b	66.43 ± 9.69b	10.43 ± 1.2c	25.47 ± 3.04ab
0.48	15.05 ± 2.34b	38.43 ± 5.44c	5.65 ± 0.07d	12.03 ± 1.72d

3　讨论

DSP 和 HAP 提高土壤 A-As 含量,表明二者均提高了土壤砷的迁移能力和生物可利用性. 其原因主要是 DSP 和 HAP 都显著提高了土壤 pH 和土壤有效磷含量(图 1、2). OH^- 能够配位取代土壤吸附的砷,所以土壤 pH 升高会增强砷的解吸[21],而磷和砷在元素周期表中为同族元素,具有相似结构和性质,磷能够竞争土壤中带正电荷胶体吸附砷的位点,使土壤中砷被释放出来[22]. 此外,DSP 显著降低了土壤中最难被作物利用的 R-As 含量,而 HAP 对 R-As 没有显著影响. 土壤 A-As 含量的增加和 R-As 含量的降低应当都是土壤砷被活化在土壤砷形态分布上的反映. 显然,DSP 提高砷在土壤中迁移能力的作用要强于 HAP. 这个规律与 DSP 提高土壤 pH 和有效磷含量的作用大于 HAP 应当有直接关系. 研究表明,磷与砷不仅在土壤中存在竞争吸附关系,而且在植物体内也存在竞争关系[23]. 薛培英等[24]研究证明了高浓度的外源磷会抑制砷的转运,植物中 PO_4^{3-} 和 AsO_4^{3-} 在竞争植物膜转运蛋白方面表现为拮抗作用[25],且水稻各器官对磷、砷的转运能力也大不相同[13]. 一系列的研究表明,磷砷的相互关系在不同植物、不同磷砷比以及不同类型土壤中具有明显的差异[10,26~28]. 本研究中,DSP 和 HAP 处理下水稻根、壳、糙米中磷砷含量存在负相关关系,且糙米中磷砷含量呈极显著相关关系($R_{DSP}=-0.963^{**}$、$R_{HAP}=-0.967^{**}$)(表 2),糙米中磷的含量也明显高于其他器官,而茎叶中磷砷存在正相关关系. 显然,水稻各器官中砷含量受到 2 种相反作用影响:第一、水稻体内磷砷拮抗作用抑制砷在水稻中的迁移转运; 第二、含磷物质增加 A-As,降低 R-As,促使土壤砷的迁移能力和生物可利用性增强. 从水稻根、糙米砷含量降低的现象以及根、糙米中磷和砷的相关关系来分析,在上述 2 种相反的作用中,磷、砷拮抗作用是占主导地位的. 水稻根砷由根表铁膜吸附砷和根系内的砷 2 部分组成,根表铁膜砷往往占多数[29]. 根砷含量的降低可能主要是因为根表铁膜吸附的砷减少了,根系内部吸收富集的砷不一定降低. 而水稻茎叶中砷含量增加的现象,以及茎叶中磷、砷含量之间的正相关关系则说明在水稻茎叶中磷、砷之间可能并不存在拮抗关系.

4　结论

(1)DSP 和 HAP 处理都使土壤 pH 和土壤有效磷显著增加,并导致了土壤 A-As 含量的增加,DSP

还导致 R-As 含量显著降低,DSP 提高砷在土壤中迁移能力的作用要强于 HAP.

(2)DSP 和 HAP 均显著降低了水稻根总砷、糙米总砷、糙米无机砷含量,但 HAP 显著增加了水稻茎叶总砷含量. DSP 和 HAP 降低糙米中无机砷的效果比总砷略好,DSP 降低糙米中总砷和无机砷的效果与 HAP 基本相当. 分析表明,水稻各器官中砷含量受到 2 种相反作用影响:第一、水稻体内磷砷拮抗作用抑制砷在水稻中的迁移转运; 第二、含磷物质增加 A-As,降低 R-As,促使土壤砷的迁移能力和生物可利用性增强. 在本试验条件下,磷砷的拮抗作用在水稻根、糙米这两个器官中有明显的体现.

(3)较低添加量(小于等于 0.12 $g \cdot kg^{-1}$)的 DSP 和 HAP 使水稻总生物量和糙米产量有所增加,但随着添加量的继续增加,2 种含磷物质明显抑制了水稻生长,急剧降低了水稻总生物量和糙米产量,HAP 的抑制作用相对较轻.

参考文献:

[1] Ng J C, Wang J, Shraim A. A global health problem caused by arsenic from natural sources[J]. Chemosphere, 2003, **52**(9): 1353-1359.

[2] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题[J]. 地理研究, 2008, **27**(1): 201-212.

[3] Ohno K, Yanase T, Matsuo Y, *et al*. Arsenic intake via water and food by a population living in an arsenic-affected area of Bangladesh[J]. Science of the Total Environment, 2007, **381**(1-3): 68-76.

[4] Mondal D, Polya D A. Rice is a major exposure route for arsenic in Chakdaha block, Nadia district, West Bengal, India: A probabilistic risk assessment[J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(11): 2987-2998.

[5] 郭观林, 周启星, 李秀颖. 重金属污染土壤原位化学固定修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(10): 1990-1996.

[6] 邓九胜, 张炜, 朱荣松, 等. 基于土壤有效磷水稻磷肥施用推荐体系的探讨[J]. 西北农业学报, 2011, **20**(2): 81-84.

[7] Zeng M, Liao B, Lei M, *et al*. Arsenic removal from contaminated soil using phosphoric acid and phosphate[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(1): 75-79.

[8] 耿志席, 刘小虎, 李莲芳, 等. 磷肥施用对土壤中砷生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(11): 2338-2342.

[9] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 不同磷肥对砷超富集植物蜈蚣草修复砷污染土壤的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2906-2911.

[10] 张秀, 郭再华, 杜爽爽, 等. 砷胁迫下水磷耦合对不同磷效率水稻农艺性状及精米砷含量的影响[J]. 作物学报, 2013, **39**(10): 1909-1915.

[11] Abedin M J, Feldmann J, Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants[J]. Plant Physiology, 2002, **128**(3): 1120-1128.

[12] Jiang W, Hou Q Y, Yang Z F, *et al*. Evaluation of potential effects of soil available phosphorus on soil arsenic availability and paddy rice inorganic arsenic content[J]. Environmental Pollution, 2014, **188**: 159-165.

[13] 杨玲, 连娟, 郭再华, 等. 砷胁迫下磷用量对不同磷效率水稻产量, 生物量以及 P、As 含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(8): 1627-1635.

[14] Smith E, Naidu R, Alston A M. Chemistry of inorganic arsenic in soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, **31**(2): 557-563.

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版, 2000.

[16] 武斌, 廖晓勇, 陈同斌, 等. 石灰性土壤中砷形态分级方法的比较及其最佳方案[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(9): 1467-1473.

[17] 黄远, 李彦秋, 何芳, 等. 羟基磷灰石溶解机理的研究[J]. 临床口腔医学杂志, 2012, **28**(6): 328-332.

[18] 陈静, 王学军, 朱立军. pH 对砷在贵州红壤中的吸附的影响[J]. 土壤, 2004, **36**(2): 211-214.

[19] Pongratz R. Arsenic speciation in environmental samples of contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 1998, **224**(1): 133-141.

[20] 赵慧敏. 铁盐-生石灰对砷污染土壤固定/稳定化处理技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.

[21] Alam M G M, Tokunaga S, Maekawa T. Extraction of arsenic in a synthetic arsenic-contaminated soil using phosphate[J]. Chemosphere, 2001, **43**(8): 1035-1041.

[22] 曾敏, 廖柏寒, 张永, 等. 碱溶液对 As 污染土壤的化学萃取修复[J]. 安全与环境学报, 2010, **10**(3): 39-41.

[23] Meharg A A, Jardine L. Arsenite transport into paddy rice (*Oryza sativa*) roots[J]. New Phytologist, 2003, **157**(1): 39-44.

[24] 薛培英, 刘文菊, 段桂兰, 等. 外源磷对苗期小麦和水稻根际砷形态及其生物有效性的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(4): 2027-2034.

[25] Sharples J M, Meharg A A, Chambers S M, *et al*. Arsenate sensitivity in ericoid and ectomycorrhizal fungi[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(8): 1848-1855.

[26] 廖晓勇, 肖细元, 陈同斌. 砂培条件下施加钙、砷对蜈蚣草吸收砷、磷和钙的影响[J]. 生态学报, 2003, **23**(10): 2057-2065.

[27] 董飞, 卢瑛, 王兴祥, 等. 华南地区不同品系水稻积累砷特征及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(2): 214-219.

[28] 连娟, 郭再华, 贺立源. 砷胁迫下磷用量对不同磷效率水稻苗生长、磷和砷吸收的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, **27**(3): 273-279.

[29] 刘文菊. 根表铁膜对水稻吸收和转运砷的影响机制研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2005.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 8

Aug. 15, 2014

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM_{10}) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China ····· LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, *et al.* (2843)

Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou ····· CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)

Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou ····· DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, *et al.* (2857)

Atmospheric CO_2 Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China ····· LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, *et al.* (2864)

Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China ····· SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, *et al.* (2871)

Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin ····· ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, *et al.* (2878)

Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter ····· LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, *et al.* (2883)

Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency ····· SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, *et al.* (2890)

Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process ····· CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, *et al.* (2897)

Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management ····· BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, *et al.* (2903)

Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period ····· ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)

Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing ····· CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, *et al.* (2920)

Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain ····· LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, *et al.* (2928)

Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin ····· LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, *et al.* (2937)

Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China ····· ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, *et al.* (2944)

Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet ····· XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)

Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China ····· LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, *et al.* (2959)

Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China ····· CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, *et al.* (2967)

Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures ····· WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, *et al.* (2974)

Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(Ⅳ)-catalyzed O_3/H_2O_2 Under Acidic Conditions ····· GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, *et al.* (2980)

Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(Ⅱ) and Hg(Ⅱ) in Water by Zero-Valent Iron ····· SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, *et al.* (2985)

Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution ····· FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (2992)

Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor ····· BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, *et al.* (3002)

Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration ····· WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, *et al.* (3007)

Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies ····· ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, *et al.* (3012)

Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor ····· LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, *et al.* (3018)

Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane ····· ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, *et al.* (3024)

Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling ····· CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, *et al.* (3031)

Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular ····· LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, *et al.* (3038)

Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB ····· LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)

Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application ····· CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, *et al.* (3052)

Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing ····· DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, *et al.* (3060)

Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China: Sources and Human Exposure and Health Risks ····· ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, *et al.* (3066)

Reponses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China ····· QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, *et al.* (3073)

Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil ····· LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, *et al.* (3083)

Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil ····· HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, *et al.* (3091)

Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil ····· YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)

Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N_2O Emission ····· CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)

Contribution of Different Processes in Wetland Soil N_2O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China ····· SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, *et al.* (3110)

Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH_4 and N_2O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping ····· WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, *et al.* (3120)

Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China ····· YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, *et al.* (3128)

Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize ····· WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, *et al.* (3135)

Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of *Zenia insignis* Chun Seedlings ····· LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, *et al.* (3142)

Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice ····· LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, *et al.* (3149)

Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(Ⅵ) ····· WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, *et al.* (3155)

Promotion Effects of Vitamin B_{12} on the Degradation of 2,4,4′-Trichlorobiphenyl by *Nostoc* PD-2 ····· LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, *et al.* (3162)

Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain *Serratia* sp. ····· XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, *et al.* (3169)

Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake ····· WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, *et al.* (3175)

Cloning of Full-length cDNA of HMGR from *Gobiocypris rarus* and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol ····· DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, *et al.* (3183)

Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2 ····· HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, *et al.* (3192)

Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(Ⅱ) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon ····· LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, *et al.* (3198)

Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment ····· CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, *et al.* (3206)

Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD ····· LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, *et al.* (3212)

Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China ····· MA Lan, MAO Jian-su (3219)

Discussion on Reduction Potential of CH_4 Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak ····· WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, *et al.* (3225)

Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China ····· XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, *et al.* (3230)

《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）

2014 年 8 月 15 日　第 35 卷　第 8 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 8　Aug. 15, 2014

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