ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第9期
2014年9月15日

目 次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 …… 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈烨鑫,王姝(3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 …… 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕(3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 …… 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章(3256)
上海城区$PM_{2.5}$中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 …… 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳(3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 …… 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟(3271)
无锡市冬季典型天气$PM_{2.5}$中碳组分的污染特征 …… 云龙龙,陆钒,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国(3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物$PM_{2.5}$排放特性分析 …… 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军(3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 …… 祁心, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜(3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 …… 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙(3302)
汽车排放超细微粒数浓度及粒径谱特征的实验研究 …… 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊(3309)
疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 …… 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲(3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 …… 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴(3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 …… 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶(3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 …… 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力(3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 …… 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋(3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 …… 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园(3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 …… 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤(3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 …… 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥(3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 …… 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅(3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 …… 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅(3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 …… 高洁, 江韬, 闫金龙, 魏世强, 王定勇, 卢松, 李璐璐(3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 …… 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮(3408)
Cu_2O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 …… 王冉,周雪峰,胡学香,胡春(3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 …… 李欢旋,万金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅(3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 …… 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴(3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 …… 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程(3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 …… 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌(3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 …… 李祥,张大林,黄勇,陈宗姮,袁怡(3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 …… 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜(3455)
"热水解-高温厌氧消化"工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 …… 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶(3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 …… 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良(3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析 …… 徐爱玲, 任杰, 宋志文, 吴等等, 夏岩(3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 …… 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑(3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 …… 李志华,张芹,白旭丽,刘毅(3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 …… 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博(3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 …… 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君(3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 …… 李艳利,李艳粉,徐宗学(3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 …… 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿(3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(Ⅲ)还原特性及电子传递机制研究 …… 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂(3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 …… 艾建超,王宁,杨净(3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 …… 杨涵, 熊黑钢, 陈学刚(3537)
不同施磷量(KH_2PO_4)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 …… 郭亮,李忠武,黄斌,王艳, 张艳(3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响 …… 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集(3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 …… 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青(3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 …… 龚雪,王继华,关健飞,杨雪辰,陈黛慈(3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征 …… 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平(3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片$\delta^{13}C$值的影响 …… 杜雪莲,王世杰,罗绪强(3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N_2、N_2O、NO、CO_2和CH_4排放的影响 …… 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl(3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附$PM_{2.5}$能力研究 …… 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂(3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 …… 刘敬勇, 卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹(3612)
京津冀区域生产和消费CO_2排放的时空特点分析 …… 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉(3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 …… 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁(3632)
《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

不同施磷量(KH_2PO_4)作用对 Cu、Zn 在红壤中的迁移转化

郭亮[1,2],李忠武[1,2*],黄斌[1,2],王艳[1,2],张艳[1,2]

(1. 湖南大学环境科学与工程学院,长沙 410082; 2. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学),长沙 410082)

摘要: 为了比较不同施磷量对土壤中重金属 Cu、Zn 迁移转化的影响,采用土壤柱进行室内淋溶实验,研究常见的磷肥磷酸二氢钾在少量 5 mg·kg^{-1},适量 15 mg·kg^{-1}以及过量 25 mg·kg^{-1}条件下对 Cu、Zn 在红壤中的淋溶效应. 结果表明土壤施用磷酸二氢钾降低了土壤渗滤液的 pH,不同施磷量对土壤渗滤液 pH 影响不大,在整个淋滤过程,渗滤液 pH 呈现上升的趋势. 磷酸盐作用下重金属 Cu 在土壤中的迁移主要集中表层土壤中,而 Zn 逐渐向深层土壤中迁移. 土壤深层渗滤液中 Cu、Zn 浓度均比较低,对浅层地下水的危害性不大. 淋滤结束后,重金属主要以残渣态存在土壤中,重金属 Cu 残渣态的比例为 60% 左右,重金属 Zn 残渣态比例为 40% 左右. 高浓度磷酸二氢钾作用下有利于重金属 Zn 从残渣态及有机结合态向交换态转化.

关键词:铜; 锌; 磷酸二氢钾; 淋溶; 迁移

中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)09-3546-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.09.042

Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH_2PO_4

GUO Liang[1,2], LI Zhong-wu[1,2], HUANG Bin[1,2], WANG Yan[1,2], ZHANG Yan[1,2]

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the effects of different phosphate addition amounts on migration and transformation of heavy metals (Cu, Zn) in soil, an indoor leaching experiment using soil columns was carry out to study the leaching behavior of Cu and Zn. The KH_2PO_4 was chosen as the fertilizer application at the doses of 5 mg·kg^{-1}, 15 mg·kg^{-1} and 25 mg·kg^{-1}. The results showed that KH_2PO_4 could reduce the leachate pH, but different phosphate amounts had little effect on leachate pH, pH in leachate kept rising in the whole leaching process. With the application of KH_2PO_4, Cu migration was mainly in the surface layer while Zn migrated into deeper soil. Concentrations of Cu, Zn in deep soil leachate were low indicating that it was harmless to the shallow groundwater. After leaching, heavy metals mainly existed in the residual form in soil, the proportion of residual form of Cu was around 60% and the proportion of residual form of Zn was around 40%. High concentration of KH_2PO_4 helps the transformation of Zn from residual organic combination state to exchange state.

Key words: Cu; Zn; KH_2PO_4; leaching; transfer

土壤是生态环境的重要组成部分,是人类社会的生存基础. 由于生活污水排放、大气沉降、采矿冶炼、农药化肥的大量施用等原因,土壤污染尤其是重金属污染状况日趋严重[1]. 目前重金属污染呈现出由城区向农村转移,由地表向地下转移的趋势,逐步积累的污染导致污染事故的频繁发生[2],重金属通过淋滤或者地面径流等方式进入到深层地下水里面从而进一步加剧了地下水的污染. 统计资料表明我国目前受重金属污染的耕地面积近2 000 万 hm^2, 占耕地总面积的 1/5,合计经济损失至少 200 亿美元. 土壤重金属污染主要在于破坏土壤、植物从而对人类产生危害[3,4]. 重金属在土壤中即使浓度很低时也可能存在污染环境的危险[5]. 近年来,国内外对土壤中重金属污染治理的研究越来越多,研究者发现磷酸盐在稳定重金属方面有非常明显的效果,磷酸盐稳定重金属可以成为重金属污染土壤修复的一种廉价的、行之有效方法[6~9]. 然而磷酸盐施入土壤,如果施入量不当,则会大大增加磷在土壤里的淋失率,从而可能造成水体富营养化等. 目前有关磷酸盐最佳施用量的问题研究并不多并且存在一定的分歧. 大多数研究者根据生成重金属-磷酸盐沉淀或矿物反应认为 P/M = 3/5 较为合适(磷与重金属的摩尔比)[10~12],而另外一部分研究者则认为 P/M = 4.0 为合适比例,后者施加的磷量是前

收稿日期: 2014-01-21; **修订日期**: 2014-03-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(41271294, 51039001)
作者简介: 郭亮(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为重金属在土壤中迁移转化,E-mail:guoliang@hnu.edu.cn
* 通讯联系人,E-mail:lizw@hnu.edu.cn

者的 6 倍之多[13~15]. 施磷的变化值变化如此大,所以设计本实验就不同施磷量对土壤中重金属的化学变化行为的影响进行研究.

本研究以典型红壤及磷酸二氢钾为对象,通过添加外源重金属制成 Cu、Zn 污染的土壤. 采用室内土柱淋溶实验,对污染土壤中 Cu、Zn 在无磷,少磷,适量施磷以及过量施磷条件作用下进行室内土柱淋溶实验,探讨不同施磷量情况下重金属 Cu、Zn 在土壤中溶出以及迁移性,分析淋滤后土壤中重金属形态分布规律,以期为合理使用磷肥以及治理 Cu、Zn 污染土壤的治理提供一定的依据.

1　材料与方法

1.1　实验材料

供试土壤采自湖南省邵阳市水土保持研究所(27°03′N,113°22′E)一处果园内红壤剖面样. 去除土壤表面的枯枝落叶,草根等,分别采集 0 ~ 20 cm 的表层土壤, 20 ~ 40 cm 的次表层土壤以及 40 ~ 60 cm 的深层土壤,去除其中的杂质,将大块土壤轻轻捏碎. 采集后的土壤置于没有太阳直射通风的地方风干,磨细,过 2 mm 尼龙筛储存备用. 测定 pH、机械组成、CEC、总磷、容重、土壤中 Cu、Zn 等供试土壤基本理化性质. 土壤的理化特性分析结果见表 1.

1.2　试验设计

污染土壤的制备. Cu 和 Zn 以硝酸盐[$Cu(NO_3)_2$ 和 $Zn(NO_3)_2$]形式加入,参考国家二级土壤环境质量标准(GB 156-18-1995)加入量分别设置为 50 $mg\cdot kg^{-1}$ 和 200 $mg\cdot kg^{-1}$,将硝酸盐溶解于去离子水中,喷洒入土壤中,静置 2 个星期,使重金属充分进入土壤中并分散均匀.

表 1　研究土壤基本理化性质

Table 1　Basic Physico-chemical characters of investigating soil

项目	pH	沙粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%	CEC /cmol·kg^{-1}	总磷 /mg·kg^{-1}	容重 /g·cm^{-3}	Cu /mg·kg^{-1}	Zn /mg·kg^{-1}
表层	4.3	38.88	30.28	30.84	9.50	4.62	1.62	1.31	2.81
次表层	4.2	35.52	27.80	36.68	8.80	3.60	1.50	0.85	2.12
深层	4.1	38.24	30.40	31.36	8.30	3.33	1.47	0.57	1.80

淋溶的实验柱为有机玻璃制成,高 60 cm,直径 10 cm. 土壤柱身 10 cm、30 cm 以及 50 cm 处分别有直径为 1 cm 的取样孔收集淋滤液,在取样孔处安装直径为 1 cm 的塑胶管,通过铁夹控制塑胶管取样,收集淋滤液时将塑胶管插入小塑料瓶中,松开铁夹同时取样,收集的淋滤液量足够测定 pH 和重金属浓度. 淋溶柱顶端和低端均有多孔的内置面板,能使淋溶液能均匀的进入到土壤柱以及渗滤液能均匀的流出. 在土壤柱底部放置定量滤纸,防止土壤堵塞多孔面板同时兼具过滤作用. 土壤柱由上到下分别填充表层,次表层以及深层土壤,每 20 cm 填充一层,通过称重法保持土壤中含水量为田间持水量的 60%.

实验中选用优级纯级别的磷酸二氢钾为施用的磷肥,磷酸二氢钾易溶于水,施用后能很快被农作物吸收利用,速效性好. 磷酸二氢钾溶于去离子水以溶液形式加入土壤中,按照少量(5 $mg\cdot kg^{-1}$)、适量(15 $mg\cdot kg^{-1}$)、过量(25 $mg\cdot kg^{-1}$)这 3 种施磷水平添加,同时将不添加磷酸盐土壤柱作为对照组. 根据湖南省年降雨量,模拟十年降水,设计淋容量为(1.125×10^5)mL. 去离子水通过蠕动泵输送到土壤柱中,速度为 3 $mL\cdot min^{-1}$. 每 24 h 收集一次渗滤液,持续 10 d,渗滤液用塑料瓶收集. 渗滤液中 pH 现场测定,测定重金属 Cu、Zn 渗滤液储存 4℃冰箱. 淋溶完成后,按照土壤层次,分别对每层土壤取样,烘干磨碎过 2 mm 尼龙筛,测定土壤中重金属形态.

1.3　测定项目与方法

Cu、Zn 浓度测定:采用火焰原子分光光度法测定(A700,美国 PerkinElmer 仪器公司); pH 测定:渗滤液用定量滤纸过滤后,采用 pH 计直接测定 pH(HI 3221,美国哈纳仪器公司); 采用 Tessier 等[16]的连续分级提取方法测定土壤中重金属形态分布:1 $mol\cdot L^{-1}$ $MgCl_2$ 溶液(pH = 7)测定交换态、1 $mol\cdot L^{-1}$ CH_3COONa 测定碳酸盐态、0.04 $mol\cdot L^{-1}$ $NH_2OH\cdot HCl$ 溶液测定铁锰氧化物结合态、3.2 $mol\cdot L^{-1}$ NH_4COOH 溶液有机结合态、残渣态按 HNO_3-HF-$HClO_4$ 消解法测定.

2　结果与分析

2.1　土壤淋滤液 pH 值动态变化

pH 值对土壤中重金属形态的变化、重金属的生物可利用性以及吸附过程有着重要的影响[17]. 一般情况下,pH 较低的酸性条件有利于阴离子的吸附,阳离子的解吸,从而使土壤中重金属离子具有较

高的活性. pH 越低,土壤对重金属吸附平衡常数就越低[18]. 图 1 表示不同浓度的磷酸二氢钾施入土壤后,随着淋滤时间的变化,不同土层深度(10、30、50 和 60 cm)处的 pH 随着淋溶时间变化情况.

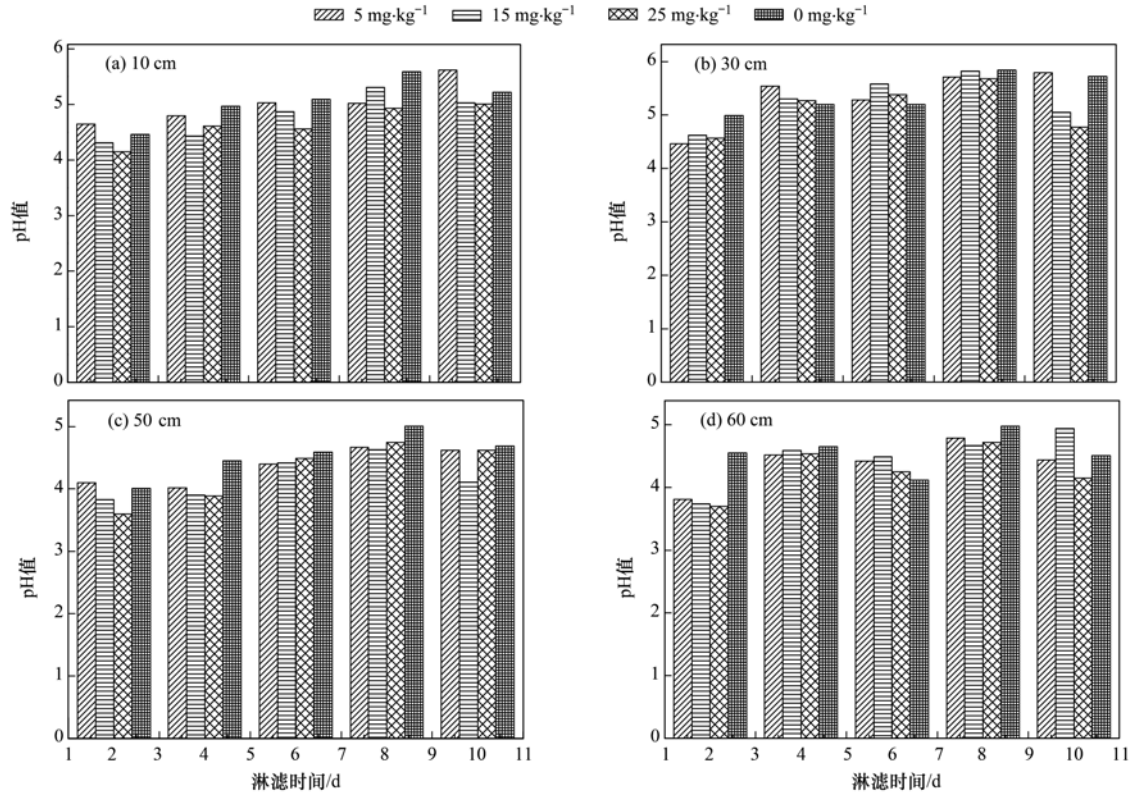

图 1 不同土层深度渗滤液 pH 随时间变化

Fig. 1 Changes of pH value in leachate from different layers at different times

淋溶过程中,不同土层深度土壤渗滤液的 pH 随着淋滤时间的增加而升高最后趋于稳定,这是因为随着淋滤进行,土壤柱中形成水淹的区域,氧化还原电位降低消耗掉大量 H^+,导致 pH 升高. 在淋滤过程中,表层土壤 pH 到深层土壤呈现一个降低的趋势. 采用不同浓度的磷酸盐对土壤 pH 改变并没有显著的差异. 而对照组的不同土层深度 pH 都低于实验组,这是因为磷酸二氢钾为酸性肥料,施入土壤后能释放 H^+ 使土壤 pH 降低, pH 值越低,有利于其他形态的重金属转化为水溶态的重金属从而增强其淋溶性,使重金属释放到土壤中从而随水份向下层迁移而淋失[19],所以 pH 越低,渗滤液中淋滤出的重金属浓度越高. 实验中渗滤液中重金属浓度在最初比较大,随着淋滤实验进行,浓度逐渐降低,这与 pH 变化是一致的.

2.2 渗滤液中重金属 Cu 变化情况

淋滤过程中渗滤液中重金属铜的浓度比较低,由于土壤对 Cu 的固持能力比较强[16,20],大部分 Cu 被土壤吸附. 淋滤过程中,主要是表层渗滤液 Cu 浓度变化比较大,而土壤次表层以及深层渗滤液中 Cu 浓度变化不明显. 此外土壤表层渗滤液中 Cu 的浓度远大于次表层及深层,并且随着土柱深度的增加,渗滤液中重金属 Cu 浓度也相应降低. 淋滤液中重金属浓度说明土壤中重金属 Cu 在土壤中迁移的距离主要集中在 0 ~ 20 cm 表层土壤,大部分的 Cu 在表层累积明显.

从图 2 可以看出在淋滤的前期,随着施入土壤中磷酸盐浓度的增加,渗滤液中 Cu 的浓度呈逐渐增大趋势,淋滤过程中重金属 Cu 释放包括淋滤初期的快速释放以及淋滤后期慢速释放. 淋滤初期,渗滤液中 Cu 浓度都超过 0.5 $mg·L^{-1}$,而到淋滤后期,渗滤液中 Cu 浓度不足 0.15 $mg·L^{-1}$,这说明在淋滤开始阶段,由于离子交换,pH 降低等,重金属 Cu 在土壤中释放比较迅速,渗滤液中 Cu 浓度较高,而随着淋滤时间的延长,土壤中可交换态的 Cu 释放完全,并且土壤中 pH 逐渐升高,转变成交换态的 Cu 逐渐减少,重金属释放相对较慢,此时渗滤液中 Cu 浓度远低于淋滤初期. 除此之外土壤中含有不同的电解质,不同的带电粒子之间可以发生相互作用,也影响着土壤表面的特性及对重金属离子的吸附[17].

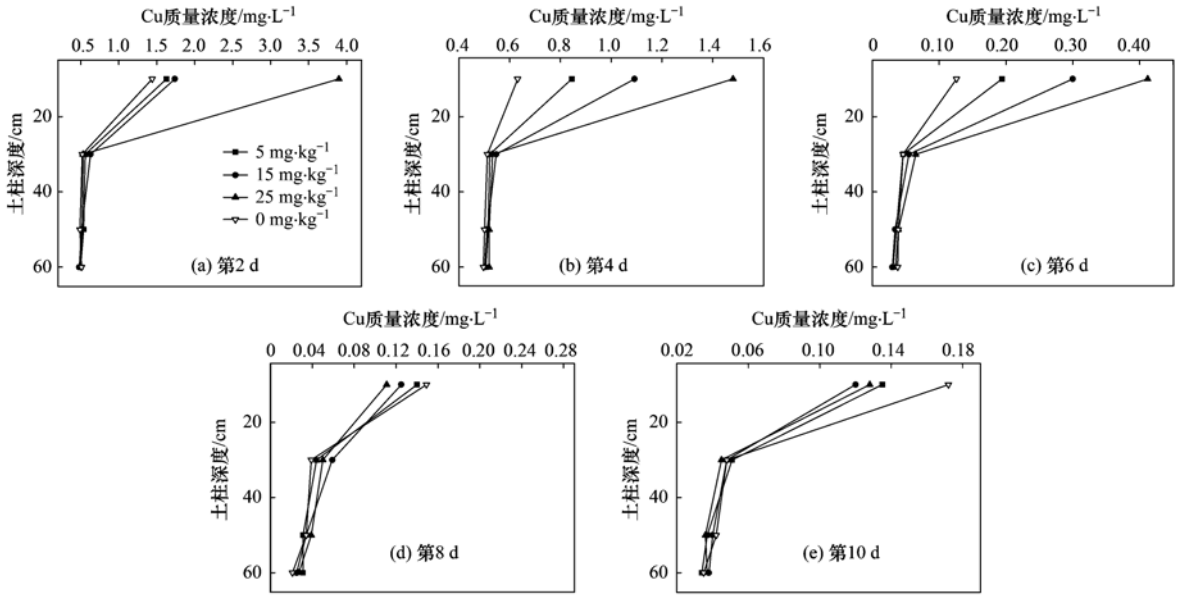

图 2　不同土层渗滤液中 Cu 浓度随时间变化

Fig. 2　Changes of Zn concentration in leachate from different layers at different times

2.3　渗滤液中重金属 Zn 迁移情况

施磷作用下,土壤中重金属 Zn 迁移与 Cu 不同. 渗滤液中 Zn 的浓度远大于 Cu,说明 Zn 在土壤中迁移的能力远大于铜,且淋滤结束后,大部分 Zn 已经迁移到 60 cm 土层深度,而 Cu 只迁移到 20 cm 土层深度,进一步证明施磷条件下,Zn 在红壤中迁移能力强于 Cu. 李香真[21]的研究中也表明土壤中离子态重金属 Zn^{2+} 的运动能力强于 Cu^{2+},所以 Zn^{2+} 在土壤中能迁移较远的距离.

从图 3 可以看出淋滤过程中,表层土壤中 Zn 的变化与 Cu 相似,淋滤初期随着磷酸盐浓度增加,渗滤液中 Zn 的浓度增加. 由于 Zn 在土壤中迁移速度大于 Cu,在淋滤初期,次表层渗滤液中 Zn 浓度远高于表层,说明此时 Zn 已经迁移到次表层,随着淋滤时间延长,Zn 逐渐向深层土壤迁移. 同时施磷土壤渗滤液中 Zn 的浓度远高于对照组,这可能是施入土壤的磷酸盐释放的磷酸根 $H_2PO_4^-$ 水解产生的磷酸抑制土壤对重金属的吸附作用,从而使重金属离子处于自由状态,容易从土壤中淋溶出来,所以渗滤液中 Zn 浓度比较高. 经过 2 d 的降雨量淋滤,在 25

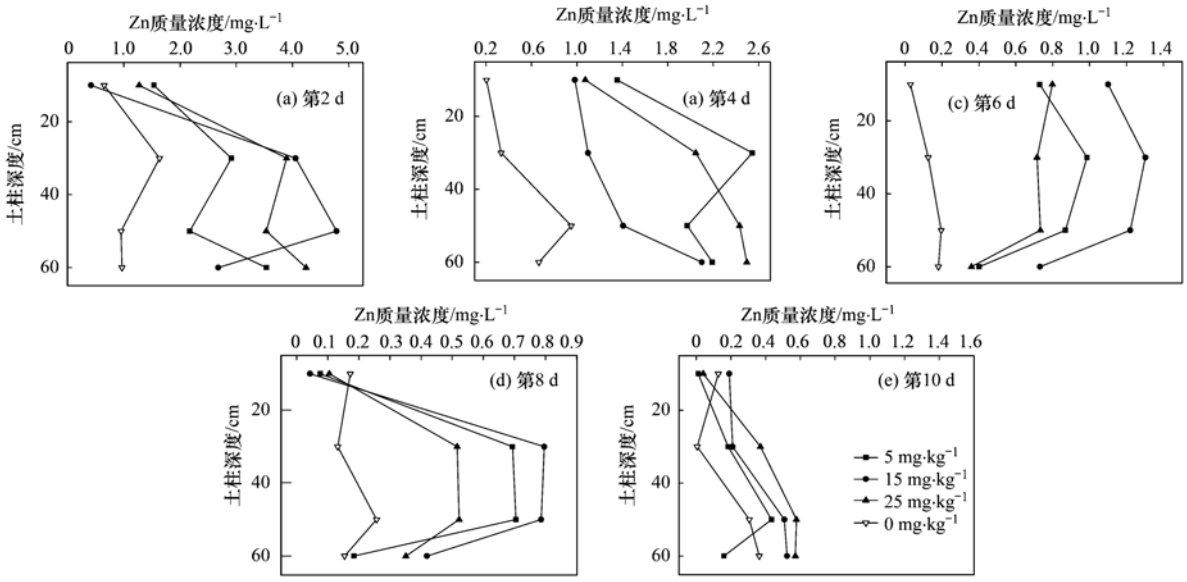

图 3　不同土层渗滤液中 Zn 浓度随时间变化

Fig. 3　Changes of Cu concentration in leachate from different layers at different times

$mg \cdot kg^{-1}$浓度磷酸盐作用下,土壤深度 50 cm 处渗滤液中 Zn 的浓度达到最大值,说明此时 Zn 已经迁移到 50 cm 土层深度,而 5 $mg \cdot kg^{-1}$、15 $mg \cdot kg^{-1}$浓度磷酸盐作用下,渗滤液中 Zn 浓度最大值出现在 30 cm 土层处,说明施磷浓度增加可以加快 Zn 在土壤中迁移的速度. 当降雨的淋容量达到 8 a 的降水量时,渗滤液中 Zn 的浓度全都降低到 1 $mg \cdot kg^{-1}$以下,到淋滤末期,渗滤液中 Zn 浓度几乎接近 0 $mg \cdot kg^{-1}$,表明此时土壤中交换态的重金属 Zn 已释放完全.

2.4 土壤中 Cu、Zn 的形态

重金属在土壤中存在的形态直接影响重金属的迁移以及生物有效性,以交换态存在的重金属活性最高,迁移能力最大,易被植物吸收[22]. 通过对淋滤后表层、次表层以及深层土壤中重金属进行形态分析,有利于了解磷酸盐作用下重金属在红壤中迁移的一些化学行为.

Cu 和 Zn 在土壤中分布的规律大致是残渣态 > 有机结合态 > 铁锰氧化物态 > 碳酸盐态 > 交换态(图 4),并且主要以残渣态存在于土壤中,残渣态 Cu 的比例略高于残渣态 Zn. 不同浓度磷酸盐作用下,碳酸盐态以及交换态的 Cu 略高于对照组,其他各形态的 Cu 比例的差异并不显著,可见在磷酸盐对土壤中 Cu 的形态影响不大. 交换态和碳酸盐态是重金属中比较较活跃的两种形态,易于在土壤中迁移及淋出. 由于土壤中交换态的 Cu 含量比较低,这也导致 Cu 在土壤层中迁移主要集中在表层土壤中. 对于 Zn 而言,施磷作用下,土壤中交换态 Zn、碳酸盐态 Zn 所占比例明显高于不施磷的对照组,并且随着施磷量的增大,交换态 Zn 以及碳酸盐态 Zn 所占比例增加,这有利于 Zn 向深层次土壤中迁移. 这说明磷酸盐作用能够影响重金属 Zn 在土壤中存在的形态,其作用有利于土壤中残渣态 Zn 以及结合态的 Zn 向易于被植物吸收的交换态 Zn 及碳酸盐态 Zn 转化. 于素华等[23]的研究也证明了水分淋洗条件下,施磷能够促进难溶的残渣态以及有机结合态 Zn 转化为可被作物利用的有效态,从而为有效养分的潜在供应源提供更多的锌.

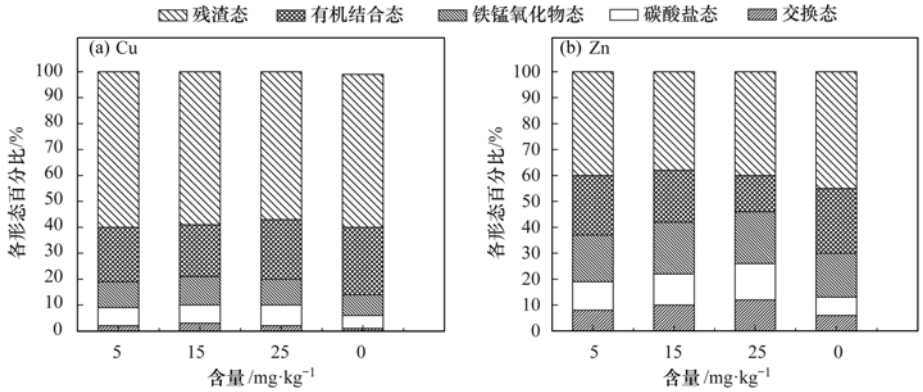

图 4 淋滤后土壤中 Cu、Zn 各形态组成百分数

Fig. 4 Species of Cu, Zn distributed in soil after simulated rainfall

3 讨论

重金属在土壤中迁移是一个复杂的过程,重金属的种类、含量、土壤施肥的方式、土壤 pH、离子强度、DOM、有机质等都能够影响重金属在土壤中的形态从而影响重金属在土壤中的迁移. 重金属在土壤中迁移主要是通过交换态的重金属实现的,通过对土柱淋溶后土壤中重金属形态分析表明磷酸二氢钾能够促进土壤中残渣态以及有机结合态的重金属向交换态转化,这可能与磷酸二氢钾陪伴阳离子作用有关. Shuman 等[24]和 Kaushik 等[25]的研究均证明了这一点. 土壤中交换态的重金属增加有利于植物的吸收,通过植物吸收重金属达到对重金属污染土壤修复作用. 但是以交换态存在的重金属有利于重金属在土壤中迁移,迁移到深层土壤的重金属可能导致浅层地下水受到重金属的污染. 土壤中如果施磷过多,会增加磷的淋失率,从而造成潜在的水体富营养化. 所以在实际施磷过程中,掌握好适当施磷量既有利于污染土壤的修复同时地下水也不会受到污染.

重金属在土壤中迁移与土壤对重金属的吸附作用有很大的关系. 重金属在土壤中迁移的距离一定程度上反映了土壤对重金属的吸附能力. 淋滤过程中,Cu 迁移主要集中在表层土壤中(0 ~ 20 cm),而

Zn 则迁移到了深层土壤中(40 ~ 60 cm),这可能与 Cu^{2+}、Zn^{2+}在土壤中迁移时存在着竞争吸附的作用,由于土壤的总吸附位点一定,一种离子的存在会对共存的其他离子的吸附产生抑制作用. 土壤对 Cu^{2+}的吸附为专性吸附,Cu^{2+}对土壤吸附的竞争能力比较强,在 Cu^{2+}、Zn^{2+}共同存在时,能将竞争性弱的 Zn^{2+}从已经占据的吸附位点上交换出来,从而抑制土壤对 Zn^{2+}的吸附. 由于施加的磷酸二氢钾盐释放大量 K^+,离子强度的增加使土壤对 Zn^{2+}的吸附能力降低,同时 K^+能够与重金属竞争土壤吸附位点,所以土壤对 Zn^{2+}的吸附能力减小,Zn^{2+}在土壤中可以迁移到深层土壤中[26,27].

随着雨水的淋溶作用,土壤中重金属可能会迁移进入深层土壤中,重金属在深层土壤中富集,可能会对浅层地下水造成污染. 土壤 60 cm 处渗滤液中 Cu 的浓度小于(1 $mg\cdot L^{-1}$),达到国家地下水水质Ⅲ类标准,说明不同施磷量下重金属 Cu 不会对地下水造成污染. 而 60 cm 处渗滤液 Zn 的浓度,在淋滤初期浓度接近于地下水Ⅳ类水质标准上限(5 $mg\cdot L^{-1}$),如果土壤中重金属 Zn 残留在土壤中并且富集,Zn 在土壤中迁移可能会对地下水造成污染,应该及时修复污染的土壤.

4　结论

通过淋滤实验,研究了不同施磷量作用对红壤中 Cu、Zn 迁移转化的影响,结果表明,磷酸盐加入土壤中能降低土壤 pH,渗滤液中 pH 呈现先降低后升高的趋势. 施磷淋滤过程中 Cu 迁移距离主要集中在表层土壤中,而 Zn 则迁移到深层土壤中,渗滤液中 Cu 的浓度远小于 Zn 的浓度. 施磷作用下,重金属对浅层地下水污染的危害不大. 淋滤结束后,土壤中重金属主要以残渣态存在,施磷有利于土壤中重金属 Zn 残渣态、有机结合态向交换态转化,随着施磷量的增加,转化为交换态重金属增加.

参考文献:

[1] 和莉莉, 李冬梅, 吴钢. 我国城市土壤重金属污染研究现状和展望[J]. 土壤通报, 2008, **39**(5): 1210-1216.

[2] 杨苏才, 南忠仁, 曾静静. 土壤重金属污染现状与治理途径研究进展[J]. 安徽农业科学, 2006, **34**(3): 549-552.

[3] 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 等. 再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4094-4099.

[4] 周小勇, 雷梅, 杨军, 等. 某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3675-3678.

[5] Momodu M A, Anyakora C A. Heavy metal contamination of ground water: The surulere case study[J]. Research Journal Environmental and Earth Sciences, 2010, **2**(1): 39-43.

[6] 周世伟, 徐明岗. 磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 生态学报, 2007, **27**(7): 3043-3050.

[7] 汤民, 张进忠, 张丹, 等. 土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb, Cd[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3569-3576.

[8] 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 等. 无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3722-3726.

[9] Farrell M, Perkins W T, Hobbs P J, *et al*. Migration of heavy metals in soil as influenced by compost amendments[J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(1): 55-64.

[10] Basta N T, McGowen S L. Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil[J]. Environmental Pollution, 2004, **127**(1): 73-82.

[11] Hettiarachchi G M, Pierzynski G M, Ransom M D. In situ stabilization of soil lead using phosphorus[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**(4): 1214-1221.

[12] Yang J, Mosby D E, Casteel S W, *et al*. Lead immobilization using phosphoric acid in a smelter-contaminated urban soil[J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(17): 3553-3559.

[13] Cao X D, Ma L Q, Chen M, *et al*. Impacts of phosphate amendments on lead biogeochemistry at a contaminated site[J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(24): 5296-5304.

[14] Cao R X, Ma L Q, Chen M, *et al*. Phosphate-induced metal immobilization in a contaminated site[J]. Environmental Pollution, 2003, **122**(1): 19-28.

[15] Wang Y M, Chen T C, Yeh K J, *et al*. Stabilization of an elevated heavy metal contaminated site[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, **88**(1): 63-74.

[16] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.

[17] 黄游, 陈玲, 李宇庆, 等. 模拟酸雨对污泥堆肥中重金属形态转化及其环境行为的影响[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(11): 1352-1357.

[18] Gao S D, Walker W J, Dahlgren R A, *et al*. Simultaneous sorption of Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, and Cr on soils treated with sewage sludge supernatant[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1997, **93**(1-4): 331-345.

[19] 袁丽, 刘阳生. 铅锌尾矿中重金属在模拟酸雨淋溶下的浸出规律[J]. 环境工程, 2012, **30**(S2): 586-590, 292.

[20] Huang B, Li Z, Huang J, *et al*. Adsorption characteristics of Cu and Zn onto various size fractions of aggregates from red paddy soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **264**(15): 176-183.

[21] 李香真. 污泥中几种重金属元素在砂土中的运移[J]. 中国农业大学学报, 1997, **2**(3): 113-118.

[22] 陈桂秋, 陈云, 曾光明, 等. 含铜堆肥施用对红壤及地下水

的污染机理研究[J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2009, **36**(8): 69-75.

[23] 于素华, 杨守祥, 刘春生, 等. 水分淋洗下菜园土壤各形态锌的迁移转化特征[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(4): 31-34, 39.

[24] Shuman L M. Effect of ionic strength and anions on zinc adsorption by two soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, **50**(6): 1438-1442.

[25] Kaushik R D, Gupta V K, Singh J P. Distribution of zinc, cadmium, and copper forms in soils as influenced by phosphorus application[J]. Arid Land Research and Management, 1993, **7**(2): 163-171.

[26] Shuman L M. Effect of organic matter on the distribution of manganese, copper, iron, and zinc in soil fractions[J]. Soil Science, 1988, **146**(3): 192-198.

[27] 徐明岗, 刘平, 宋正国, 等. 施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(Z1): 328-333.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明.

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为. 自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊.

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊.

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动.

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任. 我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合.

《环境科学》编辑部
《中国环境科学》编辑部
《环境科学学报》编辑部
《Journal of Environmental Sciences》编辑部

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 9

Sep. 15, 2014

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region ····· LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, *et al.* (3239)

Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years ····· LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, *et al.* (3247)

Temporal Variation of Background Atmospheric CO_2 and CH_4 at Mount Waliguan, China ····· LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, *et al.* (3256)

Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in $PM_{2.5}$ in Shanghai Urban Area ····· ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, *et al.* (3263)

Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China ····· WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, *et al.* (3271)

Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in $PM_{2.5}$ During Typical Winter Days in Wuxi City ····· YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, *et al.* (3280)

Emission Characteristics of $PM_{2.5}$ from Blast Furnace Iron Making ····· FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, *et al.* (3287)

Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing ····· QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, *et al.* (3293)

Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis ····· BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, *et al.* (3302)

Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles ····· LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, *et al.* (3309)

Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls ····· ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, *et al.* (3315)

Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir ····· CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, *et al.* (3325)

Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China ··· ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, *et al.* (3336)

Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments ····· BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, *et al.* (3346)

Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park ····· LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, *et al.* (3352)

Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River ····· LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, *et al.* (3358)

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China ····· LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, *et al.* (3365)

Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation ····· LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, *et al.* (3373)

Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland ····· SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, *et al.* (3381)

Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation ····· LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, *et al.* (3389)

Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation: A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River ····· GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, *et al.* (3397)

Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas ····· LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, *et al.* (3408)

Synthesis of Cu_2O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol ····· WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, *et al.* (3417)

Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7 ····· LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, *et al.* (3422)

Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation ····· ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, *et al.* (3430)

Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland ····· SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, *et al.* (3436)

Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process ····· JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, *et al.* (3443)

Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor ····· LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, *et al.* (3449)

Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes ····· LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, *et al.* (3455)

Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content ····· WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, *et al.* (3461)

Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community ····· WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, *et al.* (3466)

Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant ····· XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, *et al.* (3473)

Pilot-Scale Cultivation of *Spirulina plantensis* with Digested Piggery Wastewater ····· GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, *et al.* (3480)

Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration ····· LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, *et al.* (3487)

Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map ····· LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, *et al.* (3492)

Influence of *S*-Metolachlor and Cd^{2+} on Photosynthesis of *Scenedesmus obliquus* ····· CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, *et al.* (3498)

Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales ····· LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)

Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai ····· MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, *et al.* (3513)

Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of *Fontibacter* sp. SgZ-2 ····· MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, *et al.* (3522)

Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model ····· AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)

Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City ····· YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)

Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH_2PO_4 ····· GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, *et al.* (3546)

Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (*Oryza. sativa* L.) and Its Speciation in Soil ····· YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, *et al.* (3553)

Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape ····· LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, *et al.* (3564)

Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms ····· GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, *et al.* (3572)

Influence of Different Slope Position and Profile in *Disporopsis pernyi* Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China ····· QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, *et al.* (3580)

Effects of Different Soil Types on the Foliar $\delta^{13}C$ Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province ····· DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)

Effect of Carbon Substrate Concentration on N_2, N_2O, NO, CO_2 and CH_4 Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition ····· CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, *et al.* (3595)

Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest $PM_{2.5}$ ····· LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, *et al.* (3605)

Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process ····· LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, *et al.* (3612)

Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO_2 Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis ····· WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, *et al.* (3619)

Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry ····· REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, *et al.* (3632)

《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 9 月 15 日　第 35 卷　第 9 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 9　Sep. 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