

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙骞, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	
《环境科学》征稿简则(4166)	
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	
专辑征稿通知(4172)	

再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响

赵忠明, 陈卫平*, 焦文涛, 王美娥

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 再生水利用是解决水资源危机的重要手段之一, 再生水灌溉对土壤的影响一直是受到关注的问题. 以北京市典型再生水灌溉区为研究对象, 对选定区域土壤进行剖面取样、样品分析以及灌溉用水中的重金属含量的分析来确定再生水灌溉对于土壤中重金属含量分布的影响, 同时分析了对土壤中总碳、总氮、有机质含量以及 pH 的影响. 结果表明, 凉水河灌区灌溉用水中重金属含量大于北野厂灌区灌溉用水, 是其 2.5 ~ 10.5 倍. 再生水灌溉导致土壤有机质、总碳、总氮含量增加及 pH 值降低. 灌溉再生水有利于提高土壤肥力, 但是也会提高土壤重金属累积的风险. 再生水灌溉作为土壤重金属来源之一会对土壤表层重金属累积和迁移有一定影响, 同时土壤重金属的迁移分布受到土壤有机质含量的影响, 凉水河灌区有更多的重金属被植物吸收或进入更深土层中.

关键词: 再生水; 灌溉; 土壤有机质; 总氮; 总碳; pH; 重金属

中图分类号: X131.3; X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)12-4094-06

Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal

ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, WANG Mei-e

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Utilization of reclaimed water is one of the important methods to alleviate water shortage. The effect of reclaimed water irrigation on soil is always a concern. To understand the effect of long time reclaimed water irrigation on soil, typical farmland irrigated with reused water was selected. Soil properties and heavy metal concentration of soil and water samples were analyzed to identify the effect of the irrigation on heavy metal vertical distribution and organic matter content, total carbon, total nitrogen and pH value in soil. The results show that heavy metal contents of irrigation water used in Liangshuihe farmland are 2.5 to 10.5 times higher than that of Beiyechang farmland, and reclaimed water irrigation could cause changes of soil properties that soil organic matter content, total carbon, total nitrogen were increased and pH values were reduced. Based on the field investigation results, the soil nutrient conditions benefit from irrigate reclaimed water, however, the accumulation of heavy metal in soil could raise the risk. As a source of soil heavy metal, reclaimed water irrigation could make differences on the accumulation and mobility of soil heavy metal. Also the distribution and mobility of soil heavy metal are influenced by soil organic matter content and there are more heavy metal were taken up by plants or transferred to the deeper area in Liangshuihe farmland.

Key words: reclaimed water; irrigation; soil organic matter; total nitrogen; total carbon; pH value; heavy metal

近年来,随着经济的不断发展,城市规模不断扩大,人们对环境破坏的影响逐渐暴露出来. 目前重金属污染在中国已成为迫在眉睫的问题. 土地作为人们日常生活朝夕相处的环境要素之一亟待人们的重视和保护. 与此同时,随着城市规模的发展,城市用水量不断加大,再生水逐渐成为城市生活及周边农业发展重要水源之一^[1]. 北京早在 20 世纪 60 年代就在部分农田实施污水灌溉,但是,污水灌溉对环境的负面影响一直是人们关注的问题^[2]. 之前国外研究已经有报道关于利用污水或再生水灌溉对土壤产生重金属累积的影响^[3~5]. 而国内的研究也发现处于我国北方缺水地区的主要重工业城市周围由于污灌导致土壤表层重金属累积,比较典型的城市有天津、沈阳等^[6~10]. 土壤重金属污染主要风险在于破

坏土壤,植物吸收进而危害人类^[11],以及污染地下水,曾有报道关于土壤重金属纵向迁移不明显,不会污染地下水^[12~14],但国内也有研究发现重金属污染导致地下水污染^[15,16]. 目前国内研究主要集中在重金属表层累积及生物有效性方面,但是对于纵向迁移累积有待于进一步的研究. 本研究主要探讨了农田再生水灌溉对土壤重金属纵向迁移累积和土壤性质的影响.

收稿日期: 2012-02-17; 修订日期: 2012-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173123); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2008-1-4)

作者简介: 赵忠明(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市生态风险评价, E-mail: zhaozhongming@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究区域主要位于北京市大兴、通州区的北野厂灌区和凉水河灌区(图 1)。该地区为冲积扇平原,土层深厚,土壤类型为潮土,土壤肥沃,适合农作物的生长,农作物以玉米小麦为主。属大陆性季风气候,受季风影响,春季干旱多风,年降水量约 620 mm,地表水缺乏,不能满足农作物的生长需要。

凉水河灌区主要分布于凉水河两侧,凉水河主要接纳高碑店污水处理厂出水作为再生水源之一。凉水河灌区从 20 世纪 60 年代开始引凉水河水进行灌溉,导致重金属污染累积。北野厂灌区位于大兴区,2003 年开始作为再生水灌溉示范工程区进行农田灌溉,主要灌渠凉风灌渠主要接纳小红门污水处理厂出水,之前有 30 a 污灌历史,在一定程度上受到重金属污染。同时选定青云店镇附近地下水灌区作为对照。

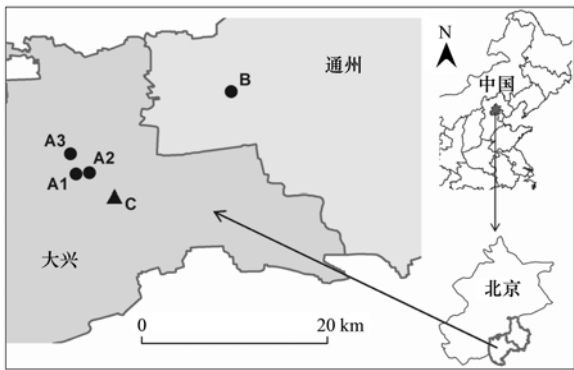


图 1 样品采集分布示意
Fig. 1 Description of soil sampling sites

1.2 采样信息

为调查不同再生水灌溉区重金属累积风险以及垂直迁移规律,本研究在不同的区域采集了土壤剖面样品。其中,凉水河灌区(B 区域)选定了 3 个样点;北野厂灌区作为国家再生水灌溉示范工程,选取了 3 个典型区域(A1、A2、A3 区域),每个区域选定了 3 个样点;对照区(C 区域)选定了 3 个样点。

每个样点垂直采集了深度为 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100、100 ~ 120 cm 的 8 层土壤样品。同时,采集了不同灌区的灌溉水样。

1.3 样品分析及测定

土壤样品经实验室风干后,磨碎混合过 100 目筛子。测定了土壤基本理化性质(有机质含量、pH、TC、TN)。

重金属测定:称取土样 0.6 g,采用王水消煮法消煮土样,定容过滤,用 ICP-OES 测定 Cu、Zn、Cr、Ni,用原子荧光光谱法测定 As。称取 0.5 g 土样,用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消煮,用 ICP-MS 测定 Pb、Cd。

水样加入 HNO₃ 采用微波消煮法进行消煮测定 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As。

分析过程所用试剂均为优级纯或 MOS 级纯,所用水为超纯水。样品分析过程中加入国家标准土壤样品(GSS-8,GSS-13)进行分析质量控制,根据实验结果,标样中重金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

2 结果与讨论

2.1 再生水灌区与对照区灌溉水中重金属含量比较

表 1 总结了再生水灌区与对照区灌溉水中重金属含量及相关标准。与农田灌溉水质标准比较,北野厂灌区用水水质基本没有超标,只有 Cr 的浓度与标准基本持平;与地下水质量标准比较,北野厂灌区用水除 Cr 超标外,其他均在标准范围之内。但与对照区相比,北野厂灌区水质各项指标均略大于对照区。凉水河灌区的用水重金属含量高于其他灌区用水,与农田灌溉水质标准相比只有 Cr 超标,与地下水质量标准相比只有 Zn 没有超标,其他几种重金属均超标。在同等灌溉条件下,北野厂灌区土壤因灌溉带入的重金属要稍高于对照区,凉水河灌区土壤因灌溉带入的重金属要明显高于其他两区,但除 Cr 其他均在农田灌溉标准范围以内。

2.2 再生水灌溉对土壤性质的影响

再生水灌溉对土壤 pH 的影响如图 2 所示,再

表 1 不同灌区用水重金属含量及相关标准 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentration of heavy metal in irrigation water and criterions/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
北野厂灌区	101.5	29.8	35.8	34.3	7.8	0.26	2.6
凉水河灌区	304.8	92.7	375.6	86.2	61.3	1.32	16.9
对照区	94.6	8.6	21.4	14.4	6.3	0.24	1.1
农田灌溉水质标准	100	—	1 000	2 000	100	10	200
地下水质量标准	10	50	50	500	10	1	10

生水灌溉区与对照区的土壤 pH 都呈现出表层低向下逐渐增加的趋势,其中凉水河灌区与对照区的增加趋势相对北野厂灌区要明显。凉水河的土壤剖面 pH 分布除 0~10 cm 和 30~40 cm 层与对照区有明显差别外,其他没有明显差别。除 0~10 cm 之外,对照区的 pH 值均大于再生水灌溉区,其中北野厂灌区有明显差异,30~100 cm 深度 pH 值平均比对照区低 0.18。土壤 pH 变化主要受土壤阳离子置换或者加入弱酸性物质影响^[17],并且阳离子过量淋溶也会导致土壤 pH 值下降^[18]。有其他相关研究得出与本研究类似的结论^[19,20],也有其他相关研究发现用呈碱性的再生水进行灌溉导致 pH 升高的结论^[21,22]。

再生水灌溉对土壤有机质含量的影响如图 2 所

示,再生水灌溉区与对照区的土壤有机质含量都呈现出表层高向下逐渐递减的趋势,并且再生水灌溉区表现出明显的表层累积(0~20 cm)。其中,在 0~10 cm 北野厂灌区与凉水河灌区分别比对照区高 23% 和 11%,在 10~20 cm 北野厂灌区与凉水河灌区分别比对照区高 72% 和 77%。在 30 cm 以下再生水灌区与对照区有机质含量没有明显差别。通过以上研究可以确定再生水对土壤表层有机质增加有明显作用,但对底层没有明显的影响。土壤有机质的增加有利于提高土壤肥力增加粮食产量。同时土壤有机质可以提供土壤营养和减弱土壤盐碱化作用^[23]起到改良土壤结构的作用。有研究表明土壤有机质能够固定土壤重金属,降低重金属迁移淋溶能力^[18],对土壤重金属污染有一定保护作用。

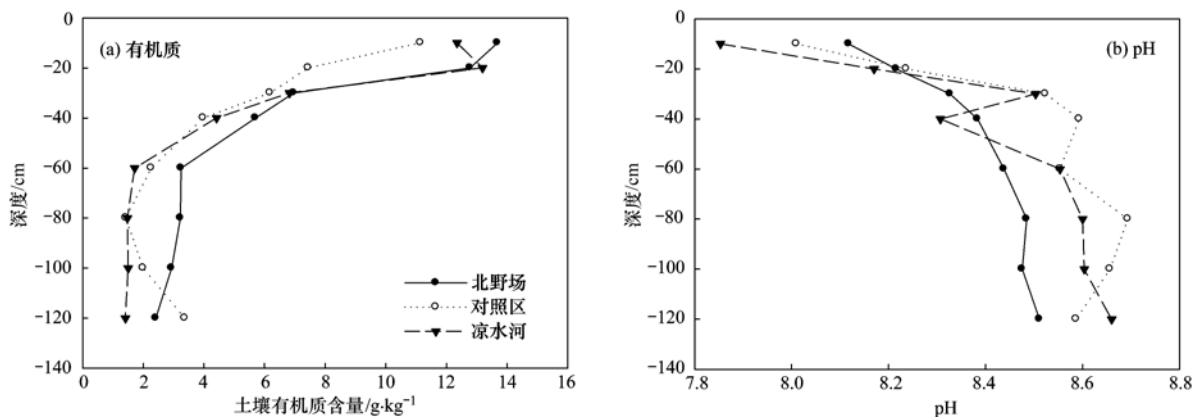


图 2 不同灌区土壤 PH 和有机质剖面垂直分布

Fig. 2 pH values and organic matter contents in soil profiles from different plots

再生水灌溉对土壤总氮、总碳的影响如图 3 所示,可以看出总碳总氮垂直分布具有相似的分趋势,但是总碳的差异更大一些。具体而言,对照区土壤的总碳总氮含量在表层 0~10 cm 处高于再生水

灌溉区土壤的含量,而在表层以下 10~40 cm 的范围内即耕作层和心土层上部再生水灌溉区土壤的总碳总氮含量高于对照区土壤的含量,40 cm 以下区域再生水灌溉区土壤中总碳总氮含量变化不大,对

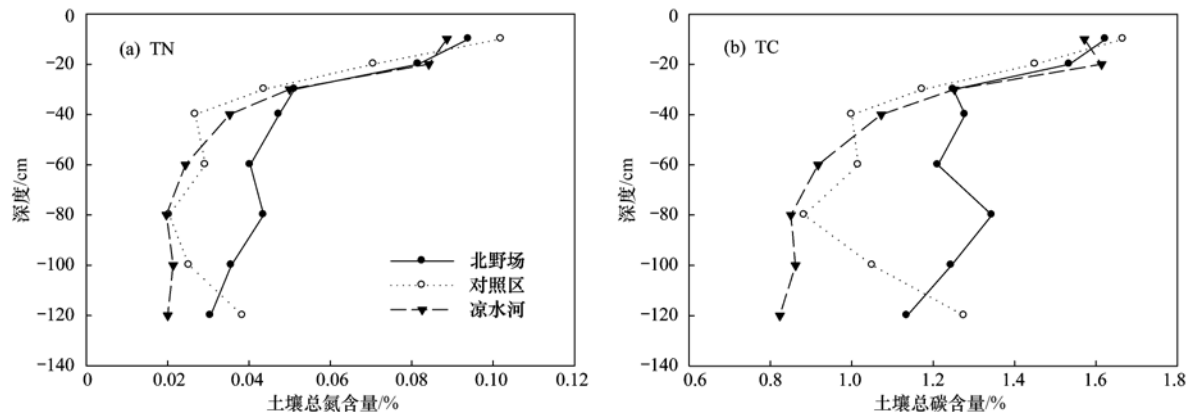


图 3 不同灌区土壤总碳总氮含量剖面分布

Fig. 3 Total nitrogen and carbon in soil profiles from different plots

照区的含量有随深度增加先降低后增加的特点. 在 40 cm 深度以下区域,即心土层下部和底土层,北野厂灌溉区和凉水河灌溉区的总碳总氮含量差异很大;而在 40 cm 以上的范围,两个再生水灌溉区土壤中总碳总氮含量基本一致. 再生水可以作为土壤营养源为土壤提供微量元素和有机物质等营养成分,在受农业活动影响较大的表土层再生水灌溉会造成土壤总

碳总氮含量的增加,但是不排除其他农业活动导致对照区 0 ~ 10 cm 土层总碳总氮含量更高.

2.3 再生水灌溉对土壤重金属累积的影响

土壤中金属剖面分布可以很好地描述土壤重金属污染的特征及程度. 重金属在土壤剖面上的分布模式与土壤性质、重金属元素的种类及来源密切相关^[4]. 研究区不同层面重金属含量分布如图 4 所

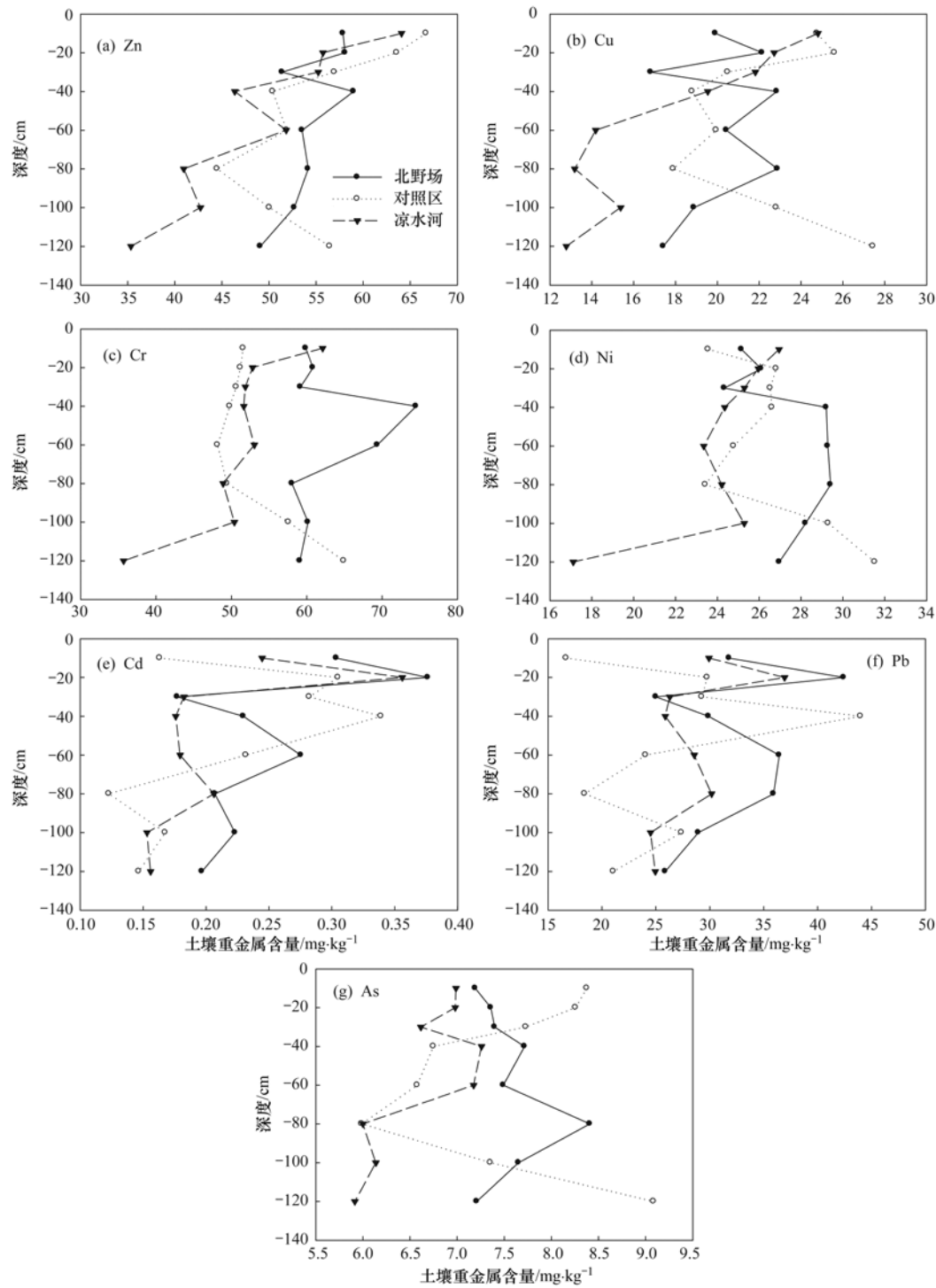


图 4 不同灌区土壤重金属含量剖面变化

Fig. 4 Total heavy metal concentrations in soil profiles from different plots

示. 在表层 0~20 cm 范围内: Cu、Zn、As 元素在对照区土壤中浓度大于再生水灌溉区土壤中的浓度, 而 Cr、Cd、Pb 元素的土壤浓度是再生水灌区大于对照区, Ni 的土壤浓度在再生水灌区和对照区的差异不是很明显, 这在一定程度上说明不同的土壤重金属有不同的主要来源. 在 30 cm 以下的垂直范围内: 北野厂灌溉区土壤中 7 种重金属浓度全部大于凉水河灌溉区, 这一结果与灌溉区灌溉用水中重金属浓度的分析结果不相符合, 可能的原因是北野厂灌区土壤的有机质含量较高, 对重金属的吸附较强, 并且高有机质含量导致土壤重金属的有机形态比例较高, 不容易被植物根系吸收.

通过垂直分布比较可以看出: 凉水河灌区土壤重金属分布呈现出明显的由上至下的递减规律, 这一点在 Cu、Zn、Cr、Ni 上表现得最明显, As 除了 40~60 cm 之外也符合这样的递减规律; 北野厂灌区的土壤重金属在 40~80 cm 处出现累积情况, 除 Cd、Pb 之外其他元素均在此范围达到最大浓度. 通过以上结果, 结合有机质含量分布不难看出: 在重金属离子随水的流动向下运移的过程中受到有机质的吸附固定而被截留在有机质丰富区, 比如在 40 cm 以下区域北野厂灌区土壤有机质开始高于凉水河灌区导致北野厂灌区土壤重金属在 40~80 cm 累积.

对比不同灌区灌溉水源中重金属的含量差异可以发现: 北野厂灌区灌溉用水中重金属浓度与对照区差别不大; 而凉水河灌区灌溉用水中重金属含量远大于北野厂灌区灌溉用水, 前者是后者的 2.5~10.5 倍不等. 相比凉水河灌区的情况, 北野厂灌区和对照区土层中有一定程度的重金属累积, 根据质量守恒定律可得出, 凉水河灌区有更多的重金属通过植物吸收离开土壤和向下淋溶进入更深土层甚至地下水中.

3 结论

北京市再生水灌溉农田区灌溉用水中重金属含量检测显示北野厂和凉水河灌区灌溉用水重金属含量均在农田灌溉用水标准范围之内, 但凉水河灌区用水重金属含量明显高于地下水质量标准. 再生水灌区土壤的 pH 值较对照区土壤有降低的趋势. 同时再生水灌溉有利于提高表层土壤有机质以及总碳总氮的含量, 对增强土壤肥力有一定的效果. 3 个灌区土壤重金属含量垂直分布表明土壤有机质含量对土壤重金属的垂直分布的影响很大. 与对照相比, 再生水灌溉导致了一些重金属元素如 Cr、Cd、

Pb 在土壤表层有一定的累积, 不同元素垂直分布规律有一定差异. 凉水河灌区有更多的重金属被植物吸收或进入更深的土层或地下水中.

参考文献:

- [1] 叶雯, 刘美南. 我国城市污水再生利用的现状与对策[J]. 中国给水排水, 2002, **18**(12): 31-33.
- [2] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [3] Cameron K C, Di H J, McLaren R G. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? [J]. Australian Journal of Soil Research, 1997, **35**(5): 995-1035.
- [4] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, *et al.* Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy [J]. Science of the Total Environment, 2002, **300**(1-3): 229-243.
- [5] Moller A, Muller H W, Abdullah A, *et al.* Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta [J]. Geoderma, 2005, **124**(1-2): 63-71.
- [6] 曹军 龚钟明, 朱学梅, 等. 天津市郊灌区农田土壤中的有机氯农药残留[J]. 农业环境保护, 2002, **21**(5): 459-461.
- [7] 邢承玉 张乃明, 贾润山, 等. 太原灌区土壤重金属污染研究[J]. 农业环境保护, 1996, **15**(1): 21-24.
- [8] 张勇. 沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价[J]. 土壤通报, 2001, **32**(4): 182-186.
- [9] 刘树庆, 谢建治, 刘玉柱, 等. 保定市郊土壤重金属污染对蔬菜营养品质的影响[J]. 农业环境保护, 2002, **21**(4): 325-327.
- [10] 刘长仲 王国利, 卢子扬, 等. 白银市污水灌溉对农田土壤质量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, **41**(1): 79-82.
- [11] Zhao Q L, Zhang J N, You S J, *et al.* Effect of irrigation with reclaimed water on crops and health risk assesment [J]. Leading-Edge Strategies and Technologies for Sustainable Urban Water Management, 2006, **6**(6): 99-109.
- [12] Barry G A, Chudek P J, Best E K, *et al.* Estimating sludge application rates to land-based on heavy-metal and phosphorus sorption characteristics of soil [J]. Water Research, 1995, **29**(9): 2031-2034.
- [13] 李森照 夏增禄, 穆从如, 等. 北京地区重金属在土壤中的纵向分布和迁移[J]. 环境科学学报, 1985, **5**(1): 105-112.
- [14] Al Kuisi M, Aljazzar T, Rude T, *et al.* Impact of the use of reclaimed water on the quality of groundwater resources in the Jordan Valley, Jordan [J]. Clean-Soil Air Water, 2008, **36**(12): 1001-1014.
- [15] 王俊有. 太原市地下水水质现状及污染防治措施[J]. 环境科学动态, 2002, (4): 19-22.
- [16] 周海红, 张志杰. 关中灌区农田生态系统污染现状研究[J]. 环境污染与防治, 2001, **23**(6): 309-328.
- [17] Morillo E, Rosabal A, Undabeytia T, *et al.* Long-term impacts of wastewater irrigation on Cuban soils [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, **71**(4): 1292-1298.

- [18] Gwenzi W, Munondo R. Long-term impacts of pasture irrigation with treated sewage effluent on nutrient status of a sandy soil in Zimbabwe[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, **82**(2): 197-207.
- [19] Wang Q, Liu Y J, Zhou D Q, *et al.* Effect on greenland soil physical and chemical properties irrigated by reclaimed water for short-term and long-term [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(5): 74-80.
- [20] Zhang Z H, Chen W F, Shi Y F. Effects of sewage irrigation on alfalfa soil partial physical and chemical properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(2): 148-152.
- [21] Smith C J, Hopmans P, Cook F J. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia [J]. *Environmental Pollution*, 1996, **94**(3): 317-323.
- [22] Bouwer H, Idelovitch E. Quality requirements for irrigation with sewage water [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1987, **113**(4): 516-535.
- [23] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, *et al.* Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater-a case study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **109**(3-4): 310-322.

欢迎订阅 2013 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2013 年为大 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musks in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行