

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 ..... 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM<sub>2.5</sub>区域来源解析 ..... 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 ..... 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM<sub>10</sub>中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 ..... 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM<sub>2.5</sub>中硫酸盐来源 ..... 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 ..... 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>2.5-10</sub>中水溶性无机离子特征 ..... 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 ..... 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 ..... 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 ..... 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 ..... 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 ..... 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 ..... 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 ..... 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 ..... 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 ..... 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 ..... 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 ..... 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 ..... 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 ..... 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 ..... 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 ..... 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 ..... 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 ..... 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 ..... 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 ..... 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 ..... 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 ..... 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面HNO<sub>3</sub>的光解 ..... 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 ..... 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 ..... 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 ..... 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 ..... 李静,李文英(1385)

Fe<sup>3+</sup>对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N<sub>2</sub>O释放的影响 ..... 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 ..... 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 ..... 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD<sub>5</sub>/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 ..... 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 ..... 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 ..... 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 ..... 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 ..... 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 ..... 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 ..... 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 ..... 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 ..... 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钨交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 ..... 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 ..... 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 ..... 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 ..... 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 ..... 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

# 湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析

张敏<sup>1</sup>, 王美娥<sup>2\*</sup>, 陈卫平<sup>2</sup>, 牛俊杰<sup>3</sup>

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 3. 太原师范学院汾河流域科学发展研究中心, 太原 030012)

**摘要:** 为了解湖南攸县水稻田土壤镉污染特征及污染途径, 选择煤矿区、煤矿工厂区和工厂区三类典型样地进行农田土壤、灌溉水渠底泥及典型含 Cd 工业产品和副产品如煤、煤矸石和水泥等介质中 Cd 含量的分析研究. 结果表明: ① 三类样地农田和表层自然土壤以及灌溉渠底泥中的平均 Cd 含量都超过了土壤环境质量标准  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 煤矿区和煤矿工厂区的煤矸石 Cd 含量以及工厂区的水泥 Cd 含量都与相应自然土壤中含量相似, 工厂区 Cd 的大气沉降通量较高; ② 三类样地土壤 Cd 剖面垂直分布差异明显, 煤矿区和煤矿工厂区 0~40 cm 剖面的农田土壤 Cd 较自然土壤高, 煤矿区农田和自然土壤中的 Cd 垂直向下迁移的潜力较高; ③ 煤矿工厂区和工厂区点源下风向农田表土 Cd 含量明显比上风向低; ④ 攸县煤矿区和煤矿工厂区农田土壤 Cd 的灌溉水输入途径较为重要, 而煤矿工厂区和工厂区农田土壤 Cd 的大气输入途径也较为明显.

**关键词:** 水稻土; 镉大米; 污染特征; 污染途径; 土壤剖面

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1425-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.040

## Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province

ZHANG Min<sup>1</sup>, WANG Mei-e<sup>2\*</sup>, CHEN Wei-ping<sup>2</sup>, NIU Jun-jie<sup>3</sup>

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. The Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030012, China)

**Abstract:** In order to explore input pathways and pollution characteristics of Cd contamination in paddy soil in Youxian, Hunan Province, Cd contents in paddy soils, sediments of irrigation canals, typical mineral and industrial products such as coal, gangue and cement were analyzed. It was suggested that the average contents of Cd both in surface paddy soil and the corresponding natural soil were higher than the soil quality standard  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Cd contents in gangue and cement were similar as those in the corresponding natural soils. The atmosphere deposition of Cd was the highest in factory area. The profiles of Cd in 0-100 cm paddy soil and 0-40 cm in natural soils varied significantly from the upper to the lower layer. Cd contents in 0-40 cm layer in paddy soil were much higher than those in corresponding natural soils in mineral and mineral-factory areas. The potentiality for downward movement of Cd in soils in mineral area was the highest among the three studied areas. It suggested Cd contents in surface paddy soil were higher in upwind areas than those in downwind areas in mineral-factory and factory areas. It could be concluded that the main input pathways of Cd in mineral and mineral-factory areas were from irrigation water, while contribution of atmosphere deposition in mineral-factory and factory areas was also very significant.

**Key words:** paddy soil; Cd rice; pollution characteristic; contamination pathway; soil profile

随着经济发展, 中国重金属污染问题日益严峻, 尤其是土壤重金属污染问题, 已引起了国内外越来越多学者的关注<sup>[1-5]</sup>. 作为国内重要粮食生产大省, 湖南省同时拥有着很多矿业资产, 过多的矿产开发和金属冶炼活动造成工矿区土壤环境严重重金属污染<sup>[6]</sup>. 镉(Cd)是生物毒性最强的重金属元素, 在环境中具有化学活性强、移动性大和毒性持久等特点, 容易通过食物链的富集作用危及人类健康, 对人体具有三致(致病、致癌、致突变)作用, 能诱发肾衰变、关节炎、癌症等病<sup>[7-10]</sup>. Cd 在植物组织中含

量达到  $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, 就对某些植物产生毒害, 最终导致植物生物产量下降甚至死亡的现象<sup>[11]</sup>, 水稻较其它作物更容易吸收和累积土壤中的 Cd 而产生“镉大米”, 有研究表明食用 Cd 污染的大米给人体造成的危害甚至超过饮用 Cd 污染的水<sup>[12]</sup>. 雷鸣等<sup>[13]</sup>对湖南省市场和 Cd 污染区稻米的调查研究

收稿日期: 2014-09-02; 修订日期: 2014-11-24

基金项目: 城市与区域生态国家重点实验室自主项目 (SKLURE2013-1-04)

作者简介: 张敏(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为恢复生态学, E-mail: 18835135732@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: mewang@rcees.ac.cn

结果发现,Cd 是湖南各地大米中危害人体健康的主要因子,而矿区稻米中 Cd 的含量显著比其它地方高。

2013 年 5 月攸县“镉大米事件”经过媒体报道后,受到了社会上广泛关注。受“镉大米事件”影响,2013 年攸县大米的销售量同比减少 50% 以上,可见土壤 Cd 污染直接影响了农业经济的发展。因此,湖南省水稻田土壤重金属污染研究已经成为当前国内土壤重金属污染研究和治理领域的关注重点。

目前,对工矿区农田重金属污染的研究主要集中在重金属土壤污染生态危害风险评价方面,即,采用综合污染指数、单项污染指数和潜在生态危害指数法对土壤重金属污染状况进行评价<sup>[14]</sup>,以及土壤重金属形态方面的研究<sup>[15~18]</sup>。然而在了解了农田土壤 Cd 污染的生态风险后,最主要的任务是如何治理和控制污染,这首先需要从农田土壤 Cd 污染的特征及污染途径进行分析<sup>[19~24]</sup>。工矿业“三废”排放输入农田土壤的途径主要包括灌溉水途径以及大气沉降途径,通常可以通过农田土壤中 Cd 浓度的空间分布和垂直分布特征来分析这两种输入途径的贡献<sup>[25,26]</sup>。譬如,徐友宁等<sup>[20~23]</sup>通过土壤重金属污染垂直变化,矿业污水灌溉是主要的输入途径,其次为尾矿渣淋溶型;刘剑锋等<sup>[24]</sup>提出了基于空间分布特性的土壤重金属污染途径分类方法,并系统总结了土壤重金属污染的空间分异及迁移规律。

本文以湖南省主要水稻生产区攸县为研究区域,通过调查分析攸县典型煤矿区和工厂区水稻田土壤 Cd 污染特征及污染途径,以期为该区域水稻田土壤 Cd 污染控制和治理提供依据,为煤矿区和工厂区农田 Cd 污染控制和治理提供方法和技术指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域描述

攸县为株洲市辖县,位于湖南省东南部,介于东经 113°09'09"~113°51'30",北纬 26°46'34"~27°26'30"之间。攸县是全国 100 个重点产煤县之一,煤炭储量在 3 亿 t 以上。本研究选择攸县典型的三类 Cd 污染源进行调查分析,分别为典型煤矿区、煤矿工厂区和工厂区。典型煤矿区选择某个目前开采量最大的乡镇作为研究点,该研究点位于攸县东部多山地带;煤矿工厂区选择在攸县西部的某个乡镇,该乡镇具有 40 多年煤矿开采历史,也是一个以氧化锌为代表的化工业园区,本研究选择的研究点位于两

家氧化锌厂和两家煤矿附近,其中氧化锌厂和一家小型煤矿已经关闭;工厂区研究点选择在攸县中部平原区的一个乡镇,该研究点在一家具有 30 年历史的水泥厂附近。

### 1.2 采样点布置及样品采集

每个研究的采样点的布置原则为点源上下风向各布置 5 个农田采样点,并随机选择一个样点做剖面分析。此外在剖面采样点附近选择一个尽量没有人为干扰的,以自然植被覆盖的自然土壤样点作为对照。

表层 0~20 cm 土壤样品的采集采用 5 m×5 m 矩形 5 点混合采样法,选择离机耕路 20 m 以上的田块作为采样点,取样点尽量处于田块中央。0~100 cm 农田剖面土壤采用分层取样,选择田块中间位置,分别采集 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 剖面的土壤样品。自然土壤剖面深度为 0~40 cm,由于自然土壤采样点一般选择没有人为干扰的自然土壤,外源输入 Cd 的途径主要为大气沉降,表层 Cd 往下迁移的距离相对农田较短,因此,分三层采样,分别为 0~10、10~20 和 20~40 cm。

同时对农田土壤灌溉干渠进行灌溉水和底泥样品采集。并针对每个研究区域典型点源污染特征,采集煤、煤矸石和水泥样品。

### 1.3 样品分析

土壤、底泥、煤、煤矸石和水泥中 Cd 含量分析采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸四酸法消煮,石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141-1997)分析检测。选择 GSS-5 土壤标准物作为质量控制,GSS-5 实际检测值范围(0.473±0.054) mg·kg<sup>-1</sup>,与标准值(0.45±0.06) mg·kg<sup>-1</sup>差异不明显。

灌溉水分析采用微波消解(EPA 3015a),石墨炉原子吸收分光光度法检测,加标回收率为 90%~98%。

### 1.4 Cd 大气沉降通量计算

用重力沉降桶逐月收集大气沉降,每个月末将沉降桶带回实验室,用 5% 的硝酸溶液清洗沉降桶,80℃下蒸发多余水分,最后用微波消解法分析大气沉降中的 Cd 含量。大气沉降通量为 12 个月每公顷面积上的 Cd 沉降量[g·(hm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>]。

### 1.5 数据分析

采用 ArcGIS 9.3 对农田表层土壤 Cd 含量的空间分布分析,采用 SigmaPlot 12.0 进行土壤剖面 Cd 分布图制作,数据统计分析采用 SPSS 18.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 典型煤矿工厂区农田环境介质 Cd 含量分布特征

典型煤矿工厂区农田环境介质 Cd 含量平均值如表 1 所示. 攸县三类典型 Cd 污染区农田土壤与自然土壤 Cd 含量都超过了土壤环境质量标准  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[27]</sup>, 煤矿区农田和自然土壤为土壤环境质量标准的 3 倍. 3 个研究点灌溉渠底泥 Cd 含量都超过湖南省底泥背景值  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[28]</sup>, 最高值也为煤矿区底泥, 高达  $8.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 对煤矿区的煤和煤矸石的抽样调查发现, 煤的镉含量较低, 但是煤矸石的镉含量较高为  $0.849 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 接近该样点农田土壤和自然土壤的镉含量. 煤矿工厂区的煤和煤

矸石的 Cd 水平相仿, 都接近自然土壤的 Cd 水平. 工厂区农田土壤、自然土壤以及水泥样品中的 Cd 水平都相似, 平均约为  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  左右. 从大气沉降通量来看, 最高水平在煤矿工厂区为  $12.0 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ , 超过我国平均水平  $4 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$  约 3 倍左右, 其次为工厂区与我国平均水平相似<sup>[29]</sup>, 最低为煤矿区, 低于平均水平, 约  $0.745 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ . 此外, 从表 1 中可知, 煤矿区和工厂区农田土壤和自然土壤 Cd 平均水平相仿, 说明这两个样点通过农业活动途径输入农田土壤中的 Cd 较低, 而煤矿工厂区相反, 农田土壤平均 Cd 含量比自然土壤明显较高, 因此存在通过农业活动如灌溉水、施肥、大气沉降等输入 Cd 元素的原因.

表 1 研究区水稻土壤及环境介质平均 Cd 含量

Table 1 Average Cd contents of paddy soil and environmental media in the study areas

位置	农田土壤 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	自然土壤 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	灌溉渠底泥 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	灌溉水 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	煤 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	煤矸石 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	水泥 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	大气沉降通量 / $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$
煤矿区	1.03	1.07	8.07	1.42	0.010	0.849	/	0.745
煤矿工厂区	0.814	0.548	1.34	0.160	0.604	0.486	/	12.0
工厂区	0.548	0.535	0.606	0.158	/	/	0.553	4.20

### 2.2 典型煤矿工厂区农田土壤和自然土壤 Cd 含量的剖面分布

土壤重金属剖面分析是污染来源与途径分析最直接的方法之一. 典型煤矿工厂区  $0 \sim 100 \text{ cm}$  农田土壤和  $0 \sim 40 \text{ cm}$  自然土壤的 Cd 含量剖面特征见图 1. 如图 1(a) 所示, 首先, 煤矿区农田土壤和自然土壤 Cd 含量剖面变化趋势一致, 随着剖面深度的增加, Cd 含量先减小后上升, 农田土壤 Cd 含量最低值出现在  $40 \text{ cm}$  左右, 而自然土壤 Cd 含量最低值出现在  $20 \text{ cm}$  左右; 其次,  $0 \sim 100 \text{ cm}$  农田土壤剖面 Cd 含量在  $0.973 \sim 1.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 农田  $0 \sim 20 \text{ cm}$  表层 Cd 含量明显比  $20 \text{ cm}$  以下

高, 而自然土壤  $0 \sim 40 \text{ cm}$  Cd 含量差异较小, 范围在  $0.990 \sim 1.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间; 第三, 农田表层土壤 Cd 含量高于对照表层土壤, 因此存在农业措施途径的 Cd 输入.

煤矿工厂区农田和自然土壤 Cd 含量剖面分布特征如图 1(b) 所示. 首先,  $0 \sim 40 \text{ cm}$  的农田土壤和自然土壤 Cd 含量垂直下降都极其明显,  $40 \text{ cm}$  以下农田土壤和自然土壤都基本达到背景值水平. 尤其是自然土壤剖面表层 Cd 明显富集充分说明该地区存在大气沉降面源污染<sup>[26]</sup>; 其次与煤矿区土壤类似, 农田表层土壤 Cd 含量高于对照表层土壤, 因此存在灌溉水等农业措施的 Cd 输入.

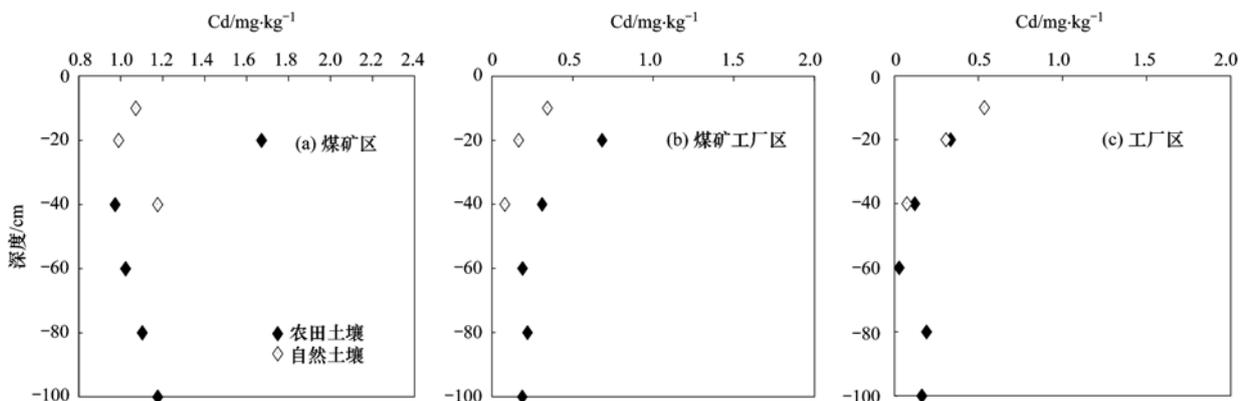


图 1 典型煤矿工厂区农田土壤和自然土壤 Cd 含量剖面特征

Fig. 1 Profile characteristics of Cd contents of paddy and reference soils in the typical industrial and mining areas

工厂区农田和自然土壤的 Cd 含量剖面分布特征如图 1(c) 所示. 首先, 与煤矿工厂区类似, 0~40 cm 剖面的农田土壤, 尤其是自然土壤 Cd 含量下降都非常明显, 40 cm 以下都基本达到背景水平, 自然土壤表层 Cd 含量的明显积累说明具有大气沉降输入; 然而, 与前两类样点不同的是, 农田表层土壤和对照表层土壤 Cd 含量相似, 因此可以认为通过灌溉水等农业措施途径输入的 Cd 较少.

由于 Cd 的向下迁移与土壤 pH 值以及黏粒含量相关<sup>[30]</sup>. 有研究表明, Cd 在水稻土中的吸附性在 pH 值为 5 时达到最大, 之后随着 pH 值的升高, 吸附增强不明显<sup>[31,32]</sup>. 从表 2 中可以看出, 3 个样点农田土壤 0~100 cm 剖面的 pH 值都达到了 5 以上,

因此可以认为外界输入农田土壤的 Cd 向下迁移的能力都比较弱. 而自然土壤 pH 值整体比农田土壤小(表 2 和表 3), 煤矿区 0~40 cm 剖面 and 煤矿工厂区 0~20 cm 剖面土壤的 pH 值都小于等于 5, 处于 Cd 移动性较强的范围. 此外, 较低的黏粒含量和较高砂粒含量也是导致 Cd 迁移性增强的原因之一, 从表 2 和表 3 中可以看出, 煤矿区和煤矿工厂区农田土壤和自然土壤 0~40 cm 的黏粒含量相对于工厂区低, 而砂粒含量相对于工厂区高, 以上数据分析结果表明, 煤矿区和煤矿工厂区农田和自然土壤中的 Cd 相对于其它两个研究点向下迁移的潜力较高. 然而, 土壤 Cd 的垂直迁移量也同时受到其它因素如 Cd 元素的来源、土壤水分特征等的影响.

表 2 农田剖面土壤 pH 值和黏粒含量/%

Table 2 Profile distributions of pH and clay contents in paddy soil/%

位置/cm	煤矿区			煤矿工厂区			工厂区		
	pH 值	黏粒	砂粒	pH 值	黏粒	砂粒	pH 值	黏粒	砂粒
0~20	6.33	66.6	3.10	6.51	62.8	3.89	5.95	74.1	1.32
20~40	6.16	75.2	1.62	6.77	67.3	3.09	6.75	87.4	1.48
40~60	6.09	84.1	2.92	7.17	81.7	1.12	7.35	85.6	0.000
60~80	5.97	86.7	3.10	6.93	90.9	0.086	7.16	85.0	0.587
80~100	6.01	84.3	2.56	6.79	79.8	4.11	6.48	88.0	2.06

表 3 自然剖面土壤 pH 值和黏粒、砂粒含量/%

Table 3 Profile distribution of pH and clay contents in reference soils/%

位置/cm	煤矿区			煤矿工厂区			工厂区		
	pH 值	黏粒	砂粒	pH 值	黏粒	砂粒	pH 值	黏粒	砂粒
0~10	4.84	81.4	0.877	4.60	86.1	0.201	5.74	89.4	0.009
10~20	4.81	81.5	2.45	5.06	86.8	0.550	5.55	89.1	0.000
20~40	5.01	87.5	1.51	5.17	93.8	0.000	5.65	87.9	0.000

### 2.3 典型煤矿工厂区农田土壤 Cd 含量的空间分布特征

煤矿工厂区农田 0~20 cm 表层土壤 Cd 含量的空间分布特征如图 2 所示. 随着与煤矿的距离增加, 上下风向农田表层土壤中的 Cd 含量并没有出现明显下降趋势, 两处煤矿附近的农田表层土壤 Cd 含量相似. 因此, 该煤煤矿区的农田土壤 Cd 污染主要由于异常的地质原因, 而点源污染的大气扩散较不明显图 2(a). 煤矿工厂区和工厂区农田表土的 Cd 含量空间分布具有明显的上下风向分布特征[图 2(b) 和 2(c)]. 如图 2(b) 所示, 距离工厂和煤矿越近, 农田表土的 Cd 含量越高, 点源北边上风向的农田土壤 Cd 含量明显比点源南边的下风向低. 工厂区的空间分布更具有点源影响特征图 2(c), 首先水泥厂的南边农田土壤 Cd 明显比东北边土壤 Cd 含量高, 结合当地主导风向为西北向, 整体上点源南边

土壤的 Cd 含量比东偏北方向的样点明显较高. 因此, 可以认为水泥厂烟尘排放对农田土壤 Cd 的累积具有一定贡献.

以上结果表明, 煤矿工厂区和工厂区点源对农田土壤 Cd 累积有重要贡献, 并且由于本次调查中每个研究点上下风向的样点灌溉水来源一致, 因此, 表层土壤 Cd 含量的空间分布特征能够很好地解释点源污染的大气扩散途径.

### 3 结论

(1) 三类典型研究点农田土壤和自然土壤 Cd 含量都超过了土壤环境质量标准  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其中煤矿区农田土壤和自然土壤 Cd 含量都超过了  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 煤矿区和煤矿工厂区以及工厂区的煤矸石和水泥等工矿产品与土壤 Cd 含量相似; 工厂区 Cd 的大气沉降通量较煤矿区和煤矿工厂区高.

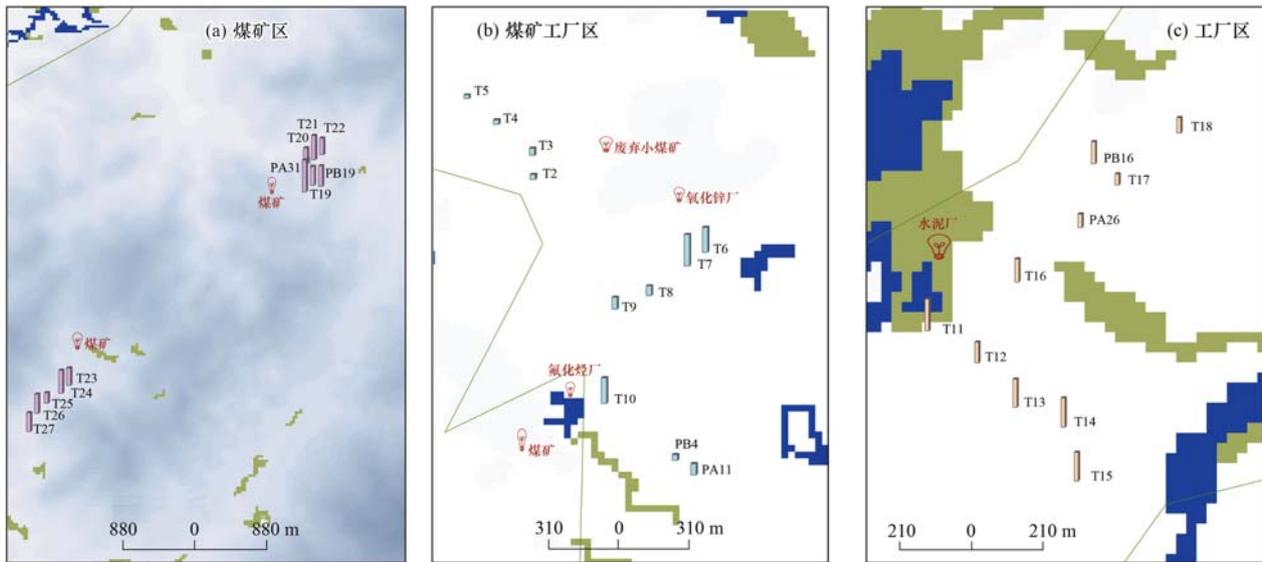


图 2 典型工矿区农田表层土壤 Cd 含量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of Cd contents in surface paddy soil in the typical industrial and mining areas

(2) 三类研究点农田土壤和自然土壤 Cd 含量从上到下剖面垂直分布差异明显, 表层土壤 Cd 累积明显; 煤矿区和煤矿工厂区 0 ~ 40 cm 农田土壤 Cd 含量较自然土壤高, 而工厂区农田土壤和自然土壤 Cd 含量差异不明显。

(3) 煤矿工厂区和工厂区农田表土的 Cd 含量空间分布具有明显的上下风向分布特征, 上风向农田土壤表层 Cd 含量明显比下风向低。

(4) 分析表明, 煤矿区和煤矿工厂区农田土壤 Cd 的灌溉水输入途径较为关键, 而煤矿工厂区和工厂区农田土壤 Cd 的大气输入途径也较为明显。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Cao H C, Luan Z Q, Wang J D, *et al.* Potential ecological risk of cadmium, lead and arsenic in agricultural black soil in Jilin Province, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2009, **23**(1): 57-64.
- [ 2 ] Tang J C, Bai X R, Zhang W J. Cadmium pollution and its transfer in agricultural systems in the suburbs of Tianjin, China [J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2011, **20**(6): 722-732.
- [ 3 ] Wang G, Su M Y, Chen Y H, *et al.* Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(1): 127-135.
- [ 4 ] Zhang Z S, Lu X G, Wang Q C, *et al.* Mercury, cadmium and lead biogeochemistry in the soil-plant-insect system in Huludao City [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **83**(2): 255-259.
- [ 5 ] 李静, 俞天明, 周洁, 等. 铅、锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2327-2330.
- [ 6 ] 陈艳. 湖南省土壤污染现状与修复[J]. *湖南农业科学*, 2002, (6): 31-33.
- [ 7 ] Moreno C J, Moral R, Perrez E A, *et al.* Cadmium accumulation and distribution in cucumber plant [J]. *Plant Nutrition*, 2000, **23**(2): 243-250.
- [ 8 ] Moriarty F. *Ecotoxicology: The study of pollutants in ecosystems* [M]. London: Academic Press, 1999. 29-35.
- [ 9 ] 冉烈, 李会合. 土壤镉污染现状及危害研究进展[J]. *重庆文理学院学报(自然科学版)*, 2011, **30**(4): 69-73.
- [ 10 ] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(8): 1343-1353.
- [ 11 ] 康浩, 石贵玉, 潘文平, 等. 镉对植物毒害的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2008, **36**(26): 11200-11201, 11204.
- [ 12 ] Patra M, Bhowmik N, Bandopadhyay B, *et al.* Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, **52**(3): 199-223.
- [ 13 ] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(11): 2314-2320.
- [ 14 ] 孟忠常, 吴迪, 邓琴, 等. 贵州典型铅锌矿区土壤重金属污染特征与生态危害风险评价[J]. *贵州农业科学*, 2012, **40**(8): 218-221.
- [ 15 ] 曹会聪, 王金达, 张学林, 等. BCR 法在污染农田黑土重金属形态分布研究中的应用[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(6): 163-166.
- [ 16 ] Tolcalioğlu Ş, Kartal Ş, Elçi L. Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic adsorption spectrometry after a four-stage sequential extraction procedure [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, **413**(1-2): 33-40.

- [17] 刘恩峰, 沈吉, 刘兴起, 等. 太湖 MS 岩芯重金属元素地球化学形态研究[J]. 地球化学, 2004, **33**(6): 602-609.
- [18] 李恋卿, 郑金伟, 潘根兴, 等. 太湖地区不同土地利用影响下水稻土重金属有效性库变化[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 101-104.
- [19] 陈华勇, 欧阳建平, 马振东. 大冶有色冶炼厂附近农田镉污染的现状与治理对策[J]. 土壤, 2003, (1): 76-79.
- [20] 徐友宁, 张江华, 赵阿宁, 等. 小秦岭某金矿区农田土壤重金属污染的潜在生态危害评价[J]. 地质通报, 2008, **27**(8): 1272-1278.
- [21] 徐友宁, 张江华, 陈社斌, 等. 小秦岭金矿区不同污染方式土壤剖面上重金属含量分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 200-206.
- [22] 徐友宁, 张江华, 刘瑞平, 等. 金矿区农田土壤重金属污染的环境效应分析[J]. 中国地质, 2007, **34**(4): 716-722.
- [23] 徐友宁, 柯海岭, 赵阿宁, 等. 小秦岭某金矿区农田土壤重金属污染评价[J]. 土壤通报, 2007, **38**(4): 732-736.
- [24] 刘剑锋, 谷宁张, 张可慧. 土壤重金属空间分异及迁移研究进展与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2012, **28**(2): 99-103.
- [25] 李山泉, 杨金玲, 阮心玲, 等. 南京市大气沉降中重金属特征及对土壤环境的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(1): 22-29.
- [26] 阮心玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 基于高密度采样的土壤重金属分布特征及迁移速率[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 1020-1025.
- [27] 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.
- [28] 潘佑民, 杨国治. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [29] 熊愈辉. 镉污染土壤植物修复研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(22): 6876-6878.
- [30] 余涛, 杨忠芳, 钟坚, 等. 土壤中重金属元素 Pb、Cd 地球化学行为影响因素研究[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 67-73.
- [31] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(2): 510-515.
- [32] 胡宁静, 骆永明, 宋静. 长江三角洲地区典型土壤对镉的吸附及其与有机质、pH 和温度的关系[J]. 土壤学报, 2007, **44**(3): 437-443.

## CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America .....	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Beijing in January 2013 .....	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai .....	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM <sub>10</sub> -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen .....	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes .....	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014 .....	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>2.5-10</sub> in Mountain Background Region of East China in Spring .....	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves .....	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province .....	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen .....	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes .....	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards .....	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen .....	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport .....	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary .....	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season .....	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event .....	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources .....	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period .....	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary .....	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake .....	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond .....	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer .....	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study .....	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using $\gamma$ Irradiation .....	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony .....	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation .....	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol .....	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO <sub>3</sub> on the $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Films Under 308 nm UV Light .....	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode .....	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis .....	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i> .....	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water .....	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process .....	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System .....	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i> .....	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD <sub>5</sub> /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor .....	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing .....	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province .....	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain .....	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil .....	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions .....	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County .....	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure .....	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead .....	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling .....	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content .....	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area .....	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase .....	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs .....	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

# 《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行