

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响 陶俊,柴发合,高健,曹军骥,刘随心,张仁健(409)

北京地区秋季雾霾天 PM_{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析 赵秀娟,蒲维维,孟伟,马志强,董璠,何迪(416)

上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 王倩,陈长虹,王红丽,周敏,楼晟荣,乔利平,黄成,李莉,苏雷燕,牟莹莹,陈宜然,陈明华(424)

杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征 谢小芳,孙在,付志民,杨文俊,林建忠(434)

保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别 李杏茹,杜熙强,王英锋,王跃思(441)

春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究 周变红,张承中,王格慧(448)

华东区域高山背景点 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 背景值及污染特征 苏彬彬,刘心东,陶俊(455)

基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估 田秀英,蔡强,刘锐,张永明(462)

积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征 张刚,王宁,艾建超,张蕾,杨净,刘子琪(468)

靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究 徐林波,高勤峰,董双林,刘佳,傅秀娟(476)

正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究 欧杰,王延华,杨浩,胡建芳,陈霞,邹军,谢云(484)

干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素 刘玉燕,刘浩峰,张兰(494)

降尘收集方法对降尘效率的影响 张正德,董治宝(499)

海河流域水生生态功能一级二级分区 孙然好,汲玉河,尚林源,张海萍,陈利顶(509)

长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究 时志强,张运林,王明珠,刘笑茵(517)

内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究 黄昌春,李云梅,徐良将,杨浩,吕恒,陈霞,王延华(525)

溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响 邱昭政,罗专溪,赵艳玲,颜昌宙(532)

自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究 张华兵,刘红玉,李玉凤,安静,薛星宇,侯明行(540)

淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制 周亮,徐建刚,孙东琪,倪天华(547)

高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征 崔玉洁,刘德富,宋林旭,陈玲,肖尚斌,向坤,张涛(555)

城市雨水径流水质演变过程监测与分析 董雯,李怀恩,李家科(561)

复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果 任峰,陆忆夏,刘琴,汤杨杨,王世和,高海鹰,乔杰,王为进(570)

给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究 郑琦,陈超,张晓健,陆品品,刘源源,陈雨乔(576)

1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用 李三华,张奇亚(583)

水生植物热解生物油对中肋骨条藻抗氧化酶活性的影响 姚远,李锋民,李媛媛,单时,李杰,王震宇(589)

TiO₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学 张轶,黄若男,王晓敏,王齐,丛燕青(596)

皮革废水有机污染物生物降解特性研究 王勇,李伟光,杨力,宿程远(604)

链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究 谢练武,方继生,郭亚平(611)

一种负载型生物载体的制备及性能研究 杨基先,曾红云,周义,邱珊,马放,王蕾,肖大伟(616)

基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*) 培养研究 嵇雯雯,夏会龙,方治国,刘惠君(622)

温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响 陈汉龙,严媛媛,何群彪,戴晓虎,周琪(629)

天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH₄ 的影响 姚敦璠,陈天虎,王进,周飞跃,岳正波(635)

蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征 青宪,韩静磊,温炎桑(642)

基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究 钟茂生,姜林,姚珏君,夏天翔,朱笑盈,韩丹,张丽娜(647)

区域地下水污染风险评价方法研究 杨彦,于云江,王宗庆,李定龙,孙宏伟(653)

地下水有机污染源识别技术体系研究与示范 王晓红,魏加华,成志能,刘培斌,纪轶群,张干(662)

祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究 朱凌宇,潘剑群,张威(668)

黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应 骆坤,胡荣桂,张文菊,周宝库,徐明岗,张敬业,夏平平(676)

根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响 张晶,于玲玲,辛木贞,苏德纯(685)

长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究 罗璐,周萍,童成立,石辉,吴金水,黄铁平(692)

外源Cr(III)在我国22种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究 郑顺安,郑向群,李晓辰,刘书田,姚秀荣(698)

某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征 潘峰,王利利,赵浩,尤奇中,刘林(705)

大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析 刘芳,王书肖,吴清茹,林海(712)

天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征 姚丹,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波,王艳萍,刘国卿(718)

沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定 吴唯,史江红,陈庆彩,张晖,刘晓薇(724)

动物饲料中砷、铜和锌调查及分析 姚丽贤,黄连喜,蒋宗勇,何兆桓,周昌敏,李国良(732)

氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究 王点点,宋宁慧,吴文铸,由宗政,何健,石利利(740)

2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性 倪雪,刘娟,高彦征,朱雪竹,孙凯(746)

嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究 厉闾,钱坤,肖伟,王进军,邓新平(753)

固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响 唐阔,马安周,于清,邓雪梅,吕迪,庄国强(760)

16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性 刘卫国,梁存珍,杨金生,王桂萍,刘苗杰(767)

氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响 刘涛,李冬,曾辉平,畅晓燕,张杰(773)

筒青霉(*Penicillium simplicissimum*) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征 沈莹,胡天觉,曾光明,黄丹莲,尹璐,刘杨,吴娟娟,刘晖(781)

石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究 杨萌青,李立明,李川,李广贺(789)

土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响 王桂珍,李兆君,张树清,马晓彤,梁永超(795)

生活垃圾填埋过程含水率变化研究 李睿,刘建国,薛玉伟,张媛媛,岳东北,聂永丰(804)

动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化 吴昊,张盼月,郭建斌,吴永杰(810)

《环境科学》征订启事(447) 《环境科学》征稿简则(493) 信息(508,588,610,731) 专辑征稿通知(788)

大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析

刘芳¹, 王书肖^{2*}, 吴清茹², 林海¹

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 采集某大型炼锌厂周边的耕种土壤及蔬菜样品, 分析其汞含量, 并采用单项污染指数法及相关标准对土壤和蔬菜的汞污染状况进行了评价. 结果表明, 炼锌厂周边的耕种土壤和蔬菜都受到了不同程度的汞污染. 土壤样品汞的超标率为 78%, 其中污染最严重区域土壤中的汞浓度是背景点土壤汞浓度的 29 倍, 已达到重度污染程度. 所有蔬菜样品的汞含量超过无公害蔬菜重金属限量指标, 最大超标 64.5 倍, 平均超标 25.4 倍. 85% 的蔬菜样品叶片中汞含量明显高于根部汞含量, 说明叶片中的汞主要来自大气; 蔬菜根部汞含量与土壤汞含量明显线性相关, 说明根部的汞主要来自土壤. 炼锌厂汞排放对其周边土壤和蔬菜的汞污染均有显著的影响.

关键词: 锌冶炼; 大气汞; 土壤; 蔬菜; 汞含量

中图分类号: X53; X82 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0712-06

Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant

LIU Fang¹, WANG Shu-xiao², WU Qing-ru², LIN Hai¹

(1. Civil and Environment Engineering Institute, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control (SKLESPC), School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The farming soil and vegetable samples around a large-scale zinc smelter were collected for mercury content analyses, and the single pollution index method with relevant regulations was used to evaluate the pollution status of sampled soils and vegetables. The results indicated that the surface soil and vegetables were polluted with mercury to different extent. Of the soil samples, 78% exceeded the national standard. The mercury concentration in the most severely contaminated area was 29 times higher than the background concentration, reaching the severe pollution degree. The mercury concentration in all vegetable samples exceeded the standard of non-pollution vegetables. Mercury concentration, in the most severely polluted vegetables were 64.5 times of the standard, and averagely the mercury concentration in the vegetable samples was 25.4 times of the standard. For 85% of the vegetable samples, the mercury concentration, of leaves were significantly higher than that of roots, which implies that the mercury in leaves mainly came from the atmosphere. The mercury concentrations in vegetable roots were significantly correlated with that in soils, indicating the mercury in roots was mainly from soil. The mercury emissions from the zinc smelter have obvious impacts on the surrounding soils and vegetables.

Key words: zinc smelting; mercury pollution; soil; vegetable; mercury content

汞具有长距离传输性、持久性与生物蓄积性, 它的危害及其带来的一系列环境问题已引起国际社会的广泛关注, 成为全球重大环境焦点问题之一^[1]. 研究表明, 金属锌冶炼是大气汞主要的人为源之一, 随着锌产量的增加, 其向大气排放的汞也逐年增加^[2]. 大气中的汞通过干湿沉降污染土壤, 其对土壤中汞积累的贡献率在各种外源输入因子中排在首位^[1]; 而农作物既可以通过根系吸收土壤中的汞, 也可以通过叶片吸收大气中的汞^[3~5], 同时汞在农作物中的积累会通过食物链危及人类的健康^[6]. 大气中的汞也会通过呼吸、皮肤接触等途径进入人体, 导致汞在人体内的大量积蓄, 从而带来健康隐患^[7].

已有研究表明, 有色金属冶炼厂可能会对周边的

土壤造成严重的重金属污染^[8]. 本研究对某炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染状况进行分析, 以为该区域的污染防治提供理论依据, 对提高当地居民的健康水平具有重要的现实意义. 炼锌厂排放烟气对周边环境造成的其他重金属污染还有待进一步研究.

1 研究方法

1.1 布点与采样

测试炼锌厂所在地常年主导风向为西北风,

收稿日期: 2012-04-09; 修订日期: 2012-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(20937002); 环境保护公益性行业科研专项(201209015)

作者简介: 刘芳(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染与控制, E-mail: liufang20100277@163.com

* 通讯联系人, E-mail: shxwang@tsinghua.edu.cn

夏季多为东南风; 四季分明, 雨量充沛、光热充足, 无霜期在 286 d 以上, 年平均气温 16 ~ 18℃, 适宜多种农作物生长. 在该炼锌厂周边选取 6 块蔬菜地进行采样; 在距离炼锌厂 30 km, 且在炼

锌厂的非主导风向上, 选取 1 个采样点作为背景点. 于 2012 年 1 月对 7 个采样点的表层土壤和蔬菜进行采样. 7 个采样点的具体位置如图 1 所示.



图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites

土壤样品均采自耕作层, 采样深度为 0 ~ 20 cm. 每块区域采集 5 ~ 10 个子样品 (均为耕种土样), 根据采样区域范围大小及其环境状况而确定, 子采样点选用梅花形布点法, 每个样品约重 0.5 kg, 共采集土壤样品 46 个; 采集土壤的同时, 对采样区域种植的蔬菜也进行了采集, 分别为芹菜、白菜、莴笋、卷心菜, 样品总数为 53 个.

1.2 分析测试方法

土壤样品取回后放置在阴凉通风处自然风干, 用玛瑙碾磨后过 80 目尼龙网筛待测. 蔬菜样品带回实验室先用自来水洗净, 再用蒸馏水冲洗, 自然风干后将茎叶、根分开, 用研磨机磨碎后待测. 预处理后的土壤及蔬菜样品均用 DMA-80 (检测限为 0.005 ng) 对总汞进行测定, 该仪器采用的方法标准为 EPA7473 (热分解齐化原子吸收光度法测定固体及液体中的汞). 在测定过程中, 为了保证数据的准确性和可靠性, 抽取 50% 的样品进行平行双样测定, 平行样误差范围控制在 10% 左右, 同时插入一定量的标准样品, 回收率为 64% ~ 89%. 另外, 用酸度计对土壤的 pH 值进行了测定.

2 评价方法与标准

2.1 蔬菜土壤汞污染评价方法与标准

蔬菜土壤汞污染评价标准采用国家制定的《无公害蔬菜产地土壤环境质量 (GB/T 18407. 1-

2001)》作为评价标准, 具体如表 1.

表 1 无公害蔬菜产地土壤环境质量标准¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 1 Environmental quality standard for soils at the origin of non-pollution vegetables/mg·kg⁻¹

项目	指标		
	pH < 6.5	pH 6.5 ~ 7.5	pH > 7.5
总汞	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0

1) GB/T 18407. 1-2001

由于本研究只对土壤中的汞进行了监测, 所以土壤汞污染评价方法采用《农田土壤环境质量监测技术规范 (NY/T 395-2000)》中的单项污染指数法及分级标准 (表 2). 单项污染指数法公式如下:

$$P_i = C_i / C_0$$

式中, P_i 表示污染物的污染指数; C_i 表示污染物 i 的实测值; C_0 表示污染物的评价标准, 该标准值根据土壤的 pH 值从表 1 中选取.

2.2 蔬菜汞污染评价标准

表 2 土壤重金属污染分级标准

Table 2 Grading standard for the heavy metal pollution of soils

等级	污染指数	污染程度	污染水平
1	$P \leq 0.7$	清洁	清洁
2	$0.7 < P \leq 1.0$	达警戒线, 尚清洁	尚清洁
3	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染	土壤轻度污染, 作物开始污染
4	$2.0 < P \leq 3.0$	中等污染	土壤、作物均受到中度污染
5	$P > 3.0$	重污染	土壤、作物均收到重度污染

蔬菜汞污染评价标准采用国家制定的《食品中污染物限量(GB 2762-2005)》作为评价标准,蔬菜中总汞的限量浓度为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3 结果与讨论

3.1 土壤汞污染状况

表3 采样点土壤汞污染状况

Table 3 Mercury pollution condition of soils from different sampling sites

采样点编号 (土壤样品个数)	与炼锌厂 的距离/km	汞浓度范围 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值 \pm 标准偏差 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	超标率 $/\%$	污染指数
1 ($n=10$)	0.25	1.95 ~ 3.33	2.63 ± 0.42	6.59 ~ 7.22	100	5.3
2 ($n=5$)	1.1	1.16 ~ 2.42	1.64 ± 0.47	5.66 ~ 7.20	100	3.3
3 ($n=5$)	1.4	2.60 ~ 4.16	3.12 ± 0.75	4.92 ~ 6.63	100	10.4
4 ($n=8$)	1.9	0.10 ~ 0.29	0.19 ± 0.06	4.65 ~ 6.71	0.0	0.6
5 ($n=7$)	2.1	0.50 ~ 0.72	0.57 ± 0.08	6.00 ~ 6.56	100	1.9
6 ($n=6$)	2.8	0.29 ~ 0.43	0.40 ± 0.11	4.90 ~ 6.01	83.3	1.3
背景点 ($n=5$)	30	0.06 ~ 0.18	0.11 ± 0.05	4.43 ~ 5.37	0.0	0.4

背景点属于清洁区域,能够较好地反映未受汞污染的土壤质量.在炼锌厂周边的采样点中,只有4号点属于清洁区域,5号点和6号点受到轻度污染,1号、2号和3号点均受到重度污染.这些采样点中,随着它们与炼锌厂距离的增加,污染有所减轻.对采样点的平均数与背景点的平均数进行显著性检验,发现6个采样点差分95%的置信区间分别为(2.22, 2.82)、(0.95, 2.12)、(2.25, 4.12)、(0.03, 0.13)、(0.39, 0.54)、(0.18, 0.41),所以各采样点的平均数与背景点的平均数存在显著性差异,说明炼锌厂周边的土壤均受到不同程度的汞污染,如图2.

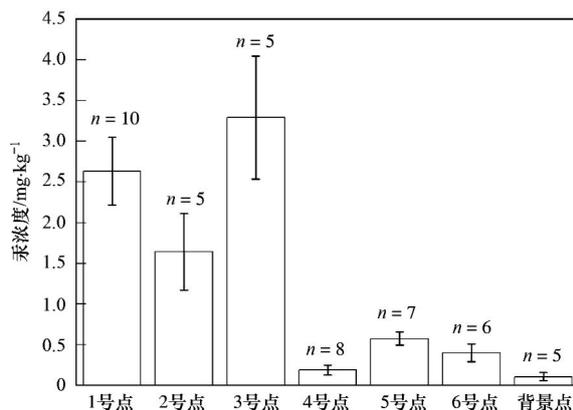


图2 采样点土壤汞污染状况

Fig. 2 Mercury pollution condition of soils from different sampling sites

3.2 蔬菜汞污染状况

植物可吸收大气汞,也可吸收土壤汞.当植物汞源于大气汞时,其地上部汞含量高于根部;源于

大气汞可以通过干湿沉降进入土壤,因土壤中的黏土矿物和有机物的吸附作用,绝大部分迅速被土壤吸持或固定,富集于土壤表层,造成土壤汞浓度的升高^[9~11].通过对46个土壤样品的分析,发现某炼锌厂排放烟气中汞的沉降对周边环境的土壤造成了不同程度的污染,结果如表3.

土壤汞时,则根部汞含量高于地上部汞含量^[12];植物根部吸收的汞很难迁移到植物的其他部位^[13],这主要是由于根部与其他组织间有很强的阻碍汞迁移的机制^[14~16].通过对53个蔬菜样品的测定,发现有85%的蔬菜样品中叶片汞浓度大于根部汞浓度,说明这些蔬菜主要通过叶片吸收大气中的汞.炼锌厂周边的蔬菜和背景点的蔬菜汞含量均超标($0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但相对来说,背景点蔬菜污染较轻,最大超标12倍,最小超标0.5倍;而炼锌厂周边的蔬菜汞污染严重,最高含量为国家标准值的309倍,最小含量为标准值的4倍.炼锌厂周边蔬菜样品中的汞含量均大于背景点蔬菜中的汞含量,说明这些蔬菜无论是吸收土壤中的汞,还是吸收大气中的汞,均受到了严重的汞污染,结果见表4.

3.2.1 不同采样点蔬菜的污染状况

蔬菜的污染状况与蔬菜种类、生长周期、生长期间的主导风向、采样点与某炼锌厂的距离都有密切的关系.通过对比不同采样点的同一种蔬菜的汞浓度,就可以看出某炼锌厂对不同采样点的污染程度,如图3.

已有研究表明,蔬菜根系从土壤中吸收的汞有部分向地上部传输,但总的说来,土壤添加汞后,主要引起根部汞浓度升高;叶片吸收的部分汞也可以向根部转移,但主要分布在蔬菜的地上部(茎和叶)^[3].由图3可以看出,3号采样点的蔬菜污染最严重,主要是由于它在炼锌厂的下风向,距离炼锌厂较近,该区域蔬菜叶片中的汞浓度均大于根部的汞浓度,说明大气汞对蔬菜汞富集的影响是主要的,而土壤汞次之.3

号、5号 and 6号点的蔬菜污染程度随着距离的增加呈下降趋势,但均是叶片中的汞浓度大于根部汞浓度,这3个采样点蔬菜的污染程度与土壤污染程度有着相似的规律.1号和2号点蔬菜的叶片和根部汞浓度几乎相等,个别根部汞浓度大于叶片汞浓度,可能是

该区域土壤受夏季主导风的影响而富集汞,冬季种植蔬菜的根系吸收了土壤中的汞,所以会出现根部汞浓度大于叶片汞浓度的现象.4号点蔬菜根部汞浓度较低,这与其土壤汞浓度低有关,但是其蔬菜叶片还是受到了大气汞沉降的影响.

表4 采样点蔬菜中的汞含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Content of Hg in vegetables from different sampling sites/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			1号点	2号点	3号点	4号点	5号点	6号点	背景点
白菜	根	浓度范围	0.07~0.38	0.04~0.20	0.80~0.93	0.02~0.08	0.13~0.23	0.04~0.07	0.01~0.03
		平均值±标准偏差	0.18±0.18	0.09±0.10	0.87±0.07	0.05±0.03	0.17±0.04	0.05±0.02	0.02±0.01
	叶	浓度范围	0.07~0.14	0.06~0.09	1.52~3.83	0.08~0.17	0.27~0.61	0.13~0.14	0.05~0.09
		平均值±标准偏差	0.09±0.04	0.07±0.02	2.42±1.24	0.11±0.04	0.37±0.14	0.14	0.06±0.02
芹菜	根	浓度范围	0.13~0.25	—	0.48~0.57	0.07	0.17~0.36	0.07~0.10	—
		平均值±标准偏差	0.19±0.08	—	0.53±0.07	—	0.27±0.13	0.09±0.02	—
	叶	浓度范围	0.14~0.25	—	0.62~0.73	0.08	0.31	0.13~0.14	—
		平均值±标准偏差	0.19±0.08	—	0.67±0.08	—	—	0.14	—
莴笋	根	浓度范围	0.07~0.18	0.06~0.26	0.16~0.21	0.03~0.05	0.14~0.16	0.04~0.05	0.01~0.02
		平均值±标准偏差	0.11±0.06	0.16±0.14	0.19±0.04	0.04±0.01	0.15±0.01	0.05±0.01	0.02
	叶	浓度范围	0.09~0.12	0.05~0.10	0.39~0.42	0.11~0.17	0.31	0.15~0.17	0.04~0.06
		平均值±标准偏差	0.11±0.08	0.07±0.03	0.41±0.02	0.14±0.05	—	0.16±0.01	0.05±0.01
卷心菜	根	浓度	0.11	—	0.40	—	—	—	0.07
	叶	浓度	0.13	—	1.86	—	—	—	0.12

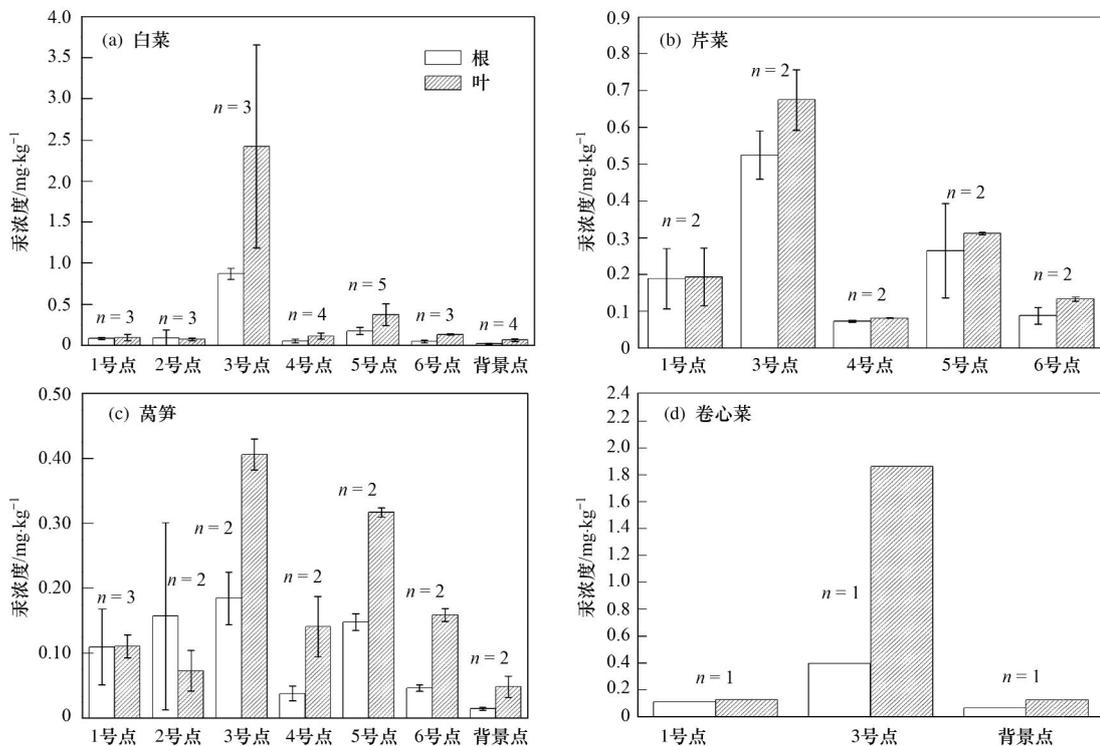


图3 不同采样点的蔬菜中汞含量

Fig. 3 Content of Hg in vegetables from different sampling sites

3.2.2 同一采样点不同种类蔬菜的污染状况

在同样的环境下,不同种类蔬菜以及同种蔬菜的不同器官对重金属的吸收都存在差异^[17~20].由于

3号点污染最严重,所以本研究着重分析该点不同种类蔬菜及相同种类蔬菜的不同器官汞的污染状况,如图4所示.

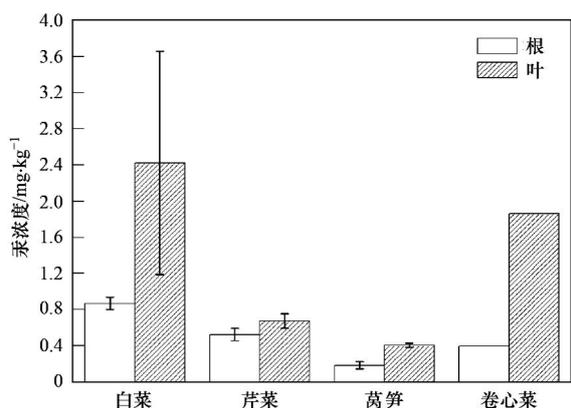


图4 3号采样点不同蔬菜中的汞浓度

Fig. 4 Content of Hg in different vegetables from sampling site 3

由图4可以看出,在相同的土壤和大气环境下,白菜和卷心菜的叶片对汞的富集能力最强,而它们的可食部位主要就是叶片,所以会对人类的身体健

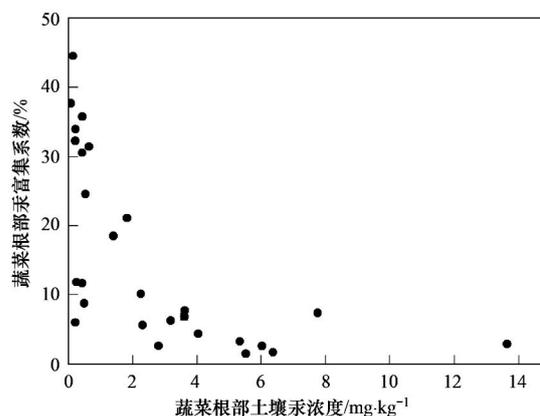
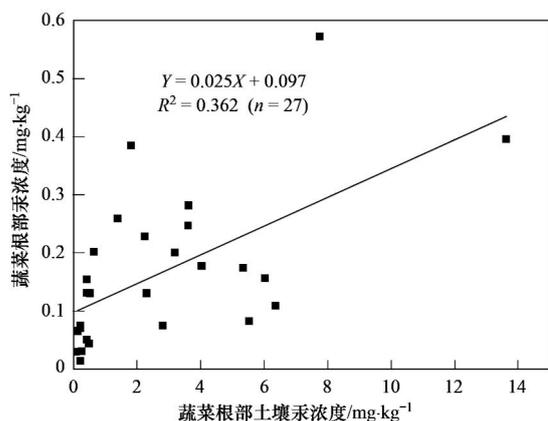


图5 蔬菜根部汞含量与土壤中汞含量的关系

Fig. 5 Correlation between the content of Hg in vegetable roots and that in soils

对蔬菜根部汞含量与土壤中汞含量进行相关性分析,根据数据统计处理结果,其回归方程式为: $Y_{根} = 0.097 + 0.025X_{土壤}$ ($n = 27, r = 0.602$). 相关系数显著性检验: $r_{0.05,25} = 0.381, r_{0.01,25} = 0.487$,而 $r > r_{\alpha, n-2}$,表明 $Y_{根}$ 与 $X_{土壤}$ 有十分显著的线性关系,说明蔬菜根部中的汞主要来源于土壤,蔬菜根部汞含量会随着土壤中汞含量的增加而增加.随着土壤中汞含量的增加,蔬菜根部对土壤中汞的富集系数反而会减小,说明蔬菜根部并不能无限制的吸收土壤中的汞,由于植物根部生物量较小,根部吸收也可能达到饱和,所以限制了汞的吸收^[26].

4 结论

某炼锌厂排放烟气中的汞会对周边的土壤及蔬菜造成不同程度的污染,其污染程度会随着与炼锌厂距离的增加而减轻.炼锌厂周边的6个采样点所

康产生危害.相比之下,芹菜和莴笋的污染程度较轻.这可能是由于白菜、卷心菜的叶片较大,也可能是由于几种蔬菜的生长时间不同,汞在蔬菜的整个生长过程中呈现怎样的增长趋势,还有待进一步研究.

3.3 蔬菜根部对土壤中汞的富集状况

蔬菜根部的重金属含量与相应的土壤重金属含量之比为富集系数,反映蔬菜根部从土壤中吸收重金属的能力^[21, 22].已有研究表明,植物根部的汞主要来自土壤^[23],根部汞含量是随着土壤中汞含量的增加而增加,有一定的相关性^[24, 25].本次采集的蔬菜样品中,有27个样品采集了相应根部的土壤,通过对这些蔬菜样品的根部及对应土壤的分析测定,发现蔬菜根部的汞含量和根部对汞的富集系数与土壤中的汞含量有一定的关系,如图5.

采集的土壤样品的超标率为78%,其中,有3个采样点的土壤属于重度污染区域,2个属于轻度污染区域,只有1个是清洁区域;所采集蔬菜样品中的汞含量100%超标,并且在炼锌厂的下风向,蔬菜叶片中的汞浓度均明显大于根部汞浓度,说明大气汞是主要污染源;蔬菜根部汞的含量与根部土壤中汞的含量有明显的相关性,说明蔬菜根部吸收的汞主要来自于土壤.

参考文献:

- [1] 朱雪梅,王一哲.有色冶炼的重金属污染[J].中国有色金属,2009,(19):62-63.
- [2] Wu Y, Wang S X, Streets D G, et al. Trends in anthropogenic mercury emissions in China from 1995 to 2003[J]. Environment Science and Technology, 2006, 40(17): 5312-5318.
- [3] 刘德绍,郭莉萍,青长乐.蔬菜对大气汞和土壤吸收的研究[J].重庆环境科学,2002,24(6):23-25.
- [4] 张斌.重金属对蔬菜的污染及治理措施[J].吉林蔬菜,

- 2010, (5): 99-101.
- [5] 刘翀. 我国蔬菜重金属污染现状及对策[J]. 安徽农学通报, 2009, **15**(12): 73-75.
- [6] 孙华, 孙波, 张桃林. 江西省贵溪冶炼厂周围蔬菜地重金属污染状况评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(1): 70-72.
- [7] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 436-457.
- [8] Li Z G, Feng X B, Li G H, *et al.* Mercury and other metal and metalloid soil contamination near a Pb/Zn smelter in east Hunan province, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(2): 160-166.
- [9] 方风满, 王起超. 土壤汞污染研究进展[J]. 土壤与环境, 2000, **9**(4): 326-329.
- [10] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(1): 79-84.
- [11] 王梅, 黄标, 孙维侠, 等. 强烈人为作用下城镇周围汞的空间变异及其积累迁移规律[J]. 土壤学报, 2011, **48**(3): 506-515.
- [12] 王定勇, 牟树森, 青长乐. 大气汞对土壤-植物系统汞累积的影响研究[J]. 环境科学学报, 1998, **18**(2): 194-198.
- [13] 林治庆, 黄会一. 植物对土壤中汞的吸收积累及耐性[J]. 农业环境保护, 1989, **8**(5): 33-35.
- [14] 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.
- [15] 付学吾, 冯新斌, 王少锋, 等. 植物中汞的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, **24**(3): 232-238.
- [16] Sierra M J, Millán R, Esteban E. Mercury uptake and distribution in *Lavandula stoechas* plants grown in soil from Almadén mining district (Spain) [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2009, **47**(11): 2761-2767.
- [17] 薛艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理[J]. 土壤, 2005, **37**(1): 32-36.
- [18] 赵宏伟, 钟秀萍, 刘阳生, 等. 深圳市清水河垃圾焚烧厂周围地区优势植物的汞污染研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2786-2791.
- [19] 李海华, 刘建武, 李树人, 等. 土壤-植物系统中重金属污染及作物富集研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2000, **34**(1): 30-34.
- [20] 许中坚, 史红文, 邱喜阳. 铅锌冶炼厂周边蔬菜对重金属的吸收与富集研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2008, **23**(4): 107-110.
- [21] 汪雅各, 章国强. 蔬菜区土壤镉污染及蔬菜种类选择[J]. 农业环境科学学报, 1985, **4**(4): 7-10.
- [22] 李海华, 申灿杰, 李跃伟, 等. 郑州市郊区蔬菜对有害元素汞(汞)的富集规律研究[J]. 河南科学, 2003, **21**(3): 361-363.
- [23] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围农作物和蔬菜的汞污染及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(2): 688-693.
- [24] 张利香. 土壤中汞的形态及化学调控研究[D]. 广西: 桂林工学院, 2007. 28-29.
- [25] 何江华, 魏秀国, 王少毅, 等. 广州市蔬菜地土壤—蔬菜中重金属 Hg 的含量及变化趋势[J]. 土壤与环境, 2001, **10**(4): 267-269.
- [26] Patra M, Sharma A. Mercury toxicity in plants [J]. *The Botanical Review*, 2000, **66**(3): 379-422.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-chen, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yue-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-bin, <i>et al.</i> (810)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发刊