

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

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

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪靖, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险

纪小凤^{1,2}, 郑娜^{1*}, 王洋¹, 刘强¹, 张静静^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 有色冶金区土壤重金属污染, 尤其是汞污染一直受到广泛关注. 为了了解葫芦岛市稻池村玉米地汞在土壤-玉米农田系统中的迁移转化, 以葫芦岛市稻池村为研究对象, 对该区域玉米地土壤 Hg 含量、分布特征、污染现状及玉米植株各器官 Hg 含量进行分析. 玉米地土壤 Hg 含量范围为 0.25 ~ 3.49 mg·kg⁻¹, 平均值 1.78 mg·kg⁻¹, 是辽宁省土壤环境背景值的 48 倍. 在锌厂周围 2~3 km 范围内, 以锌厂为中心, 随着距离的增大土壤 Hg 含量逐渐增加. 地累积指数法评价结果表明, 研究区玉米地土壤 Hg 污染均在中等污染以上, 其中, 属于严重污染的土壤样品占总样品的 54.6%. 运用 Hakanson 潜在生态危害指数法对玉米地土壤 Hg 潜在生态风险进行评价. 潜在生态风险为极强的占 72.7%. 运用目标危险系数法 (THQ) 对暴露人体进行健康风险评价, 结果表明, 虽然土壤中富含汞, 但是由于汞较难在土壤-玉米系统中迁移, 因此籽粒中的汞富集并不高, 食用玉米对人群没有明显的健康风险, 但是儿童遭遇 Hg 健康风险要远高于成人, 危险指数达到 0.056.

关键词: 汞; 有色冶金区; 土壤-玉米系统; 生态风险评价; 健康风险评价

中图分类号: X171.1; X820.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2015)10-3845-07 **DOI:** 10.13227/j.hjkk.2015.10.038

Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment

Ji Xiao-feng^{1,2}, ZHENG Na^{1*}, WANG Yang¹, LIU Qiang¹, ZHANG Jing-jing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil heavy metal pollution, especially the mercury pollution, has been widespread concern in non-ferrous metallurgical area. This study focused on the content, distribution and pollution status of Hg in maize soil of Huludao city. Meanwhile, Hg contents in the various organs of maize were analyzed. Hg concentration in soil ranged from 0.25 to 3.49 mg·kg⁻¹ with the average content of 1.78 mg·kg⁻¹, which was 48 times as high as the background value of Liaoning soil. Around 2-3km range of zinc plant, the pattern of spatial distribution showed that the content of Hg was gradually increased with the increase of the distance to Huludao zinc plant. The result of geoaccumulation index reflected that Hg pollution is up to moderate pollution level on the whole. 54.6% of the total sample were belonged to the serious pollution level. The potential ecological risk index of Hakanson was applied to assess the ecological risk of Hg. The target hazard quotient method (THQ) was used to assess the health risk for human, the results revealed that there was no significant health risk by consumption corn. Mercury is very difficult to transport in soil-maize system, and there is no obvious health risks to adults. But the risk coefficient of children, which is up to 0.056, is much higher than adults.

Key words: mercury; nonferrous area; soil-maize system; ecological risk assessment; health risk assessment

汞在环境中具有极强的生物毒性, 它一旦进入生物体很难被排出, 当汞剂量达到临界水平时汞会对生物体产生致癌、致畸、致突变作用. 由于汞污染的复杂性及严重性远超过常规污染物, 汞已被联合国环境规划署及世界卫生组织等重要机构列为优先控制污染物^[1]. 联合国环境署 (UNEP) 正在组织就拟定一项具有全球法律约束力的汞公约进行谈判, 以减少汞对人体健康和环境的风险^[2]. 随着工业的迅猛发展, 含有重金属的各种污染物通过不同途径进入土壤, 从而导致土壤重金属污染, 尤其是农田土壤重金属污染日趋严重, 国内外学者都对农田重金属污染进行过相关研究^[3,4]. 植物根系从土壤、水介质中吸收汞等重金属, 然后通过食物链进

入人体, 并在生物系统中富集, 对人类的生命健康构成威胁^[5,6].

葫芦岛市位于辽宁西部沿渤海湾地区, 有色金属冶炼过程所产生的“三废”中的重金属通过不同途径对该地区造成不同程度污染. 本研究主要针对稻池村玉米地的汞污染, 调研玉米土壤中汞的生态风险, 以期当地未来发展、政策制定和环境管理

收稿日期: 2015-04-14; **修订日期:** 2015-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171392); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-TZ-16-04-02); 吉林省科技发展计划项目 (20120402)

作者简介: 纪小凤 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属在环境中的迁移转化及健康风险, E-mail: jixiaofeng0623@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: zhengnalzz@iga.ac.cn

提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区地处辽宁省西南部(40° 56′ N, 120° 38′ E), 南临渤海辽东湾, 因受大气环流影响, 该区夏季盛行西南风, 冬季盛行东北风. 地势自西北向东南逐渐降低, 主要以丘陵、低山及平原为主. 该区域属暖温带大陆性季风气候, 四季分明, 种植作物主要为高粱、大豆及玉米. 葫芦岛市是典型的重工业城市, 以船舶制造, 石油炼制, 有色金属冶炼为主. 亚洲最大锌冶炼厂——葫芦岛锌厂是我国特大型国有企业, 位于葫芦岛市东南部, 集有色金属冶炼及化工产品生产于一体, 综合回收其他有价值的金属. 稻池村位于葫芦岛市龙港区北港街道, 距离葫芦岛锌厂约 2~4 km, 辖区内共有大型煤厂多个, 包括龙洞湾煤厂、大树林煤厂等. 稻池村目

前大概有3 000多人口, 近些年来, 部分村民罹患肺癌、食道癌、乳腺癌等各种癌症去世, 2010~2012 年先后有 23 人死于癌症, 因此稻池村成了远近闻名的癌症村.

1.2 样品采集

供试土壤及玉米植株样品均采自葫芦岛市稻池村玉米地(图 1), 采用网格法标注采样点, 利用 GPS 定位, 同时对采样点周边及样品做详细记录. 共设置 22 个采样点, 每个采样点采集 3~5 个土壤样品及 3~5 棵完整玉米植株样品. 另外, 在葫芦岛北偏西 0~45° 及西偏北 0~45° 范围内各设置 1 个典型剖面采样点(图 1). 剖面均按每 5 cm 等距采样, 剖面 1 采至 30 cm, 剖面 2 采至 25 cm. 所采集到的土壤样品混合均匀装入密封袋. 植株样品于采样当天清洗干净, 去除表面泥土, 按根、茎、叶、穗等 6 个器官进行分割, 分别装入密封袋内.

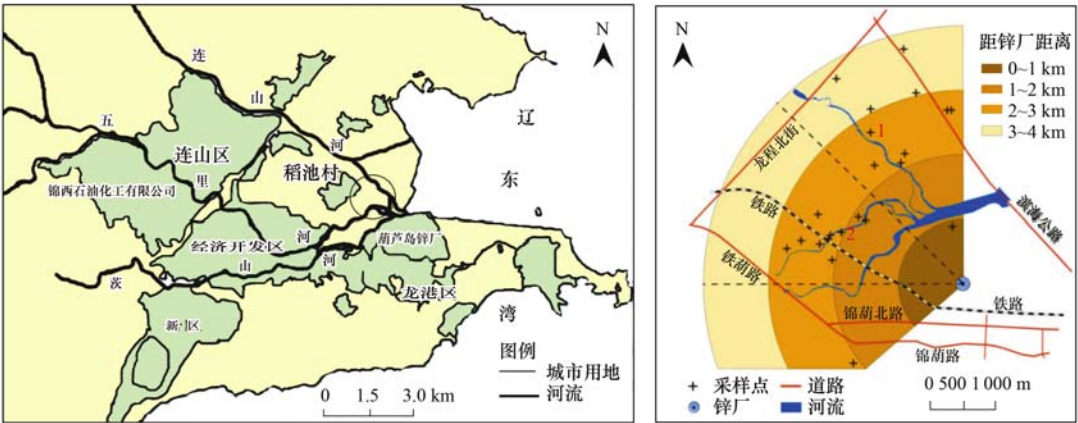


图 1 研究区位置及采样点空间分布示意

Fig. 1 Studied area and sampling location map

1.3 样品前处理及分析

土壤样品带回实验室后, 捡去石头、枯枝落叶、植物根系等杂物, 自然风干, 在室温下进行研磨, 过 100 目筛, 装入密封袋待测. 风干玉米植株各器官, 用不锈钢粉碎机粉碎, 过 1.0 mm 塑料筛, 待测. 稻池村土壤基本理化性质见表 1.

土壤样品用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$ 消化法 (GB/T 17136-1997) 进行消解处理, 植物样品采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$ 消化法 (GB/T 5009.17-2003) 消解, 采用 F732-V 智能型冷原子吸收测汞仪 (上海华光) 测定总汞. 分析过程中所用试剂均为优级纯, 所用水均为超纯水.

表 1 土壤基本理化性质及 Hg 含量描述性统计

Table 1 Physical and chemical properties of soil and descriptive statistics of Hg content in maize soil of Huludao City

项目	最大值	最小值	平均值	标准差	偏度	辽宁土壤背景值 ¹⁾	变异系数/%
pH	7.86	5.74	7.00	0.59	-0.78	—	8.35
有机质/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	52.20	18.80	31.3	9.36	0.87	—	30.15
Hg/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.49	0.25	1.78	1.30	-0.085	0.037	74.99

1) 中国环境监测总站, 1990

1.4 玉米地土壤 Hg 污染评价

地累积污染指数 (geoaccumulation index, I_{geo}) 又被称为 Muller 指数^[7], 于 20 世纪 60 年代晚期在欧洲发展起来, 其为广泛用于研究沉积物及其他物质中重金属污染程度的定量性指标^[8]. 表达式如下^[9]:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / 1.5 B_n]$$

式中, I_{geo} 表示地累积污染指数; C_n 表示所测样品浓度, 本研究中 C_n 为葫芦岛市玉米地土壤 Hg 浓度; B_n 表示研究区域土壤背景值; 1.5 为修正系数, 主要考虑到各地岩石岩性不同所引起土壤背景值之间存在差异. 地质累积污染指数具体分级详见文献^[10].

1.5 Hg 生态风险评价方法

1.5.1 玉米地土壤 Hg 潜在生态风险评价

本研究将采用 Hakanson 潜在生态危害指数法评价葫芦岛市玉米地土壤中 Hg 的潜在生态危险. 其公式如下.

(1) 单项污染系数

$$C_i = C_{\text{表层}}^i / C_n^i$$

(2) 单因子潜在生态风险:

$$E_f^i = C_i \times T_f^i$$

式中, $C_{\text{表层}}^i$ 为土壤重金属实测浓度; C_n^i 为研究区域重金属自然土壤背景值; T_f^i 为单个污染物的毒性响应系数, Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数中 Hg 为 40^[11]. 重金属的潜在生态风险指数与分级关系参考文献^[12].

1.5.2 玉米 Hg 健康风险评价

本研究采用目标危险系数法 (target hazard quotient, THQ) 评价稻池村居民通过食用玉米而造成的健康风险. 通过食用玉米而摄入的 Hg 含量可用 US EPA MMSOILS 模型中食物摄入暴露评价方程计算:

$$\text{CDI} = \frac{C \times I \times \text{ED} \times \text{EF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-3}$$

式中, CDI 为通过进食玉米 Hg 平均日摄取量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], C 为玉米中 Hg 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), I 为接触率, EF 为暴露频率 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), ED 为暴露时间 (a), BW 为受体体重 (kg), AT 表示平均接触时间 (a), I 为接触率. $\text{ED}_{\text{adult}} = 70 \text{ a}$ ^[13]; $\text{EF} = 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[14]; $\text{AT} = \text{ED} \times 365$; $\text{BW}_{\text{adult}} = 70 \text{ kg}$, $\text{BW}_{\text{child}} = 16 \text{ kg}$ ^[15].

$$\text{THQ} = \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}}$$

式中, THQ 表示健康风险指数, RfD 为重金属暴露参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], 本研究 RfD 取 $2 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[16]. 若 THQ 值小于 1, 则说明暴露人群没有明显的健康风险, 若 $\text{THQ} > 1$, 表明 Hg 可引起人体的健康风险, THQ 值越大表明 Hg 对人体健康风险越大.

1.6 实验数据处理

每批样品分析过程中均采用北京市环境监测中心的土壤环境标准参考样品 [GBW 07405 (GSS-5)] 以及植物环境标准参考样品 [GBW 07604 (GSV-3)] 进行检验, 同时采用平行样和空白样进行质量控制. 实验过程中测得的标准物质中 Hg 含量在标准值 10% ~ 15% 范围之内.

采用 Excel 2010 进行数据管理, 图形采用 Origin 8.0 绘制, 利用 SPSS 16 进行相关性分析, 运用 ArcGIS 9.0 完成采样点分布分析和克里格插值.

2 结果与讨论

2.1 研究区域玉米地土壤 Hg 含量概况

对葫芦岛市玉米地 22 个土壤点位样品重金属 Hg 进行测定分析. 葫芦岛市玉米地土壤 Hg 平均含量为 $1.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为辽宁省土壤环境背景值的 48 倍, 并高于我国土壤环境质量三级标准. 重金属 Hg 的频度分布偏度较小, 从变异系数来看, Hg 变异系数为 74.99%, 小于 1, 属于中等强度变异, 表明葫芦岛市玉米地 Hg 分布不均匀, 具有明显的离散性. 稻池村玉米地土壤 Hg 地累积污染指数均大于 2, 说明玉米地土壤中均存在 Hg 污染累积情况. 地累积污染指数介于 2 ~ 3 之间 (3 级) 的达到 36.4%, 偏重度污染 (4 级) 及重度污染 (5 级) 各占 4.6%, 属于严重污染 (6 级) 的土壤样品占总样品的 54.6%, 即葫芦岛市半数以上玉米地存在严重 Hg 污染情况, 地累积指数最大值可达到 5.976. 这表明稻池村土壤 Hg 富集受人类活动影响明显.

葫芦岛市稻池村玉米地土壤 Hg 含量与其他地区比较结果见表 2. 葫芦岛市玉米地土壤重金属 Hg 含量明显要高于葫芦岛市冶金区复合污染下自然土壤, 葫芦岛市玉米地土壤 Hg 含量要明显高于其他城市或区域土壤. 虽然大冶市也是我国重要的工业城市, 但是它主要是以铜矿为主, Hg 污染并不明显. 无锡市和上海市是南方经济较发达的城市, 主要是以第三产业为支撑产业, 土壤 Hg 污染并不突出. Gebeng 是墨西哥有名的工业城市, 当地土壤重金属污染较为明显, 但是葫芦岛是以重工业为主,

相比之下葫芦岛污染更为严重. West Bengal 土壤中 Hg 含量低于其他城市(除了大冶市). 锌厂冶炼-氯碱工业每年都向大气、水体、土壤中输入大量污染物, 污染物通过不同途径进入水体, 且河流入海口

处易发生潮汐现象, 稻池村玉米地主要分布在茨山河、连山河及五里河等水体周边, 葫芦岛市河流在不同程度上污染加重, 导致稻池村玉米地土壤 Hg 含量高于葫芦岛市自然土壤中 Hg 的含量.

表 2 其他地区土壤 Hg 含量
Table 2 Hg content of the soil in other areas

研究区域	土壤类型	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献
葫芦岛市玉米地	农田土壤	1.78	本研究
葫芦岛市	冶金区自然土壤	1.435	[17]
大冶市	矿区农田土壤	0.09	[18]
无锡市	自然土壤	0.38	[19]
上海	农田土壤	0.128	[20]
Gebeng, Mexico	工业城市土壤	1.16	[21]
West Bengal, India	燃煤发电厂附近土壤	0.2	[22]

2.2 土壤 Hg 空间分布特征

采用 ArcGIS 9.2 中的 Kriging 插值法对葫芦岛市稻池村玉米地 Hg($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的空间分布进行分析, 见图 2. 葫芦岛市玉米地 Hg 空间分布形成了以葫芦岛锌厂周围为中心, 向西北向延伸的辐射状, 在一定的范围内, 距离锌厂越远 Hg 含量越高, 这与汞的理化性质有关. 在锌冶炼过程中 Hg 会随着粉尘一起排入大气, 经过漂浮, 在大气沉降作用下 Hg 进入土壤, 导致靠近污染源的小范围区域的汞含量较低, 在距离污染源 2 ~ 3 km 地区达到最大值. 另外氯碱生产在稻池村的西北方, 经由五里河进入土壤并遗留的汞可能是稻池村玉米土壤汞的另一个来源. 稻池村玉米地土壤 Hg 呈现出的空间分布格局可能是在锌冶炼及氯碱生产复合污染下造成的结果. Hg 的这种空间分布现象曾有过报道^[23]. 笔者人为地将采样区域分为两个部分, 锌厂正北至

正西北 45°范围及正西北至正西 45°范围. 通过计算发现, 锌厂正西偏 45°(西偏北 0 ~ 45°) 这片区域内 Hg 浓度要高于锌厂正北偏西 45 度(北偏西 0 ~ 45°). 西偏北区域 Hg 平均值为 $2.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而北偏西区域内 Hg 平均值为 $1.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 这种空间分布格局也佐证了稻池村玉米地可能受到锌冶炼及氯碱生产复合污染这一可能. 五里河穿过西偏北 0 ~ 45°这片区域, 五里河曾受到严重汞污染, 上游氯碱厂(原锦西化工总厂)曾向河里排放大量汞, 虽然随着氯碱工艺的改进汞的排放量减少, 但是以前向河里排出大量的 Hg 仍然存在河流沉积物中, 污染水体及周边土壤.

2.3 土壤剖面汞污染

两个不同地点的 Hg 含量土壤剖面见图 3. 表层土壤汞含量最高, 自表层向下土壤汞含量减少, 在 10 cm 以下土壤汞含量锐减, 表层土壤汞含量接近 30 cm 处汞含量的 10 倍. 这主要是由于来自大气沉降的汞大部分积累在土壤表层, 在自然条件

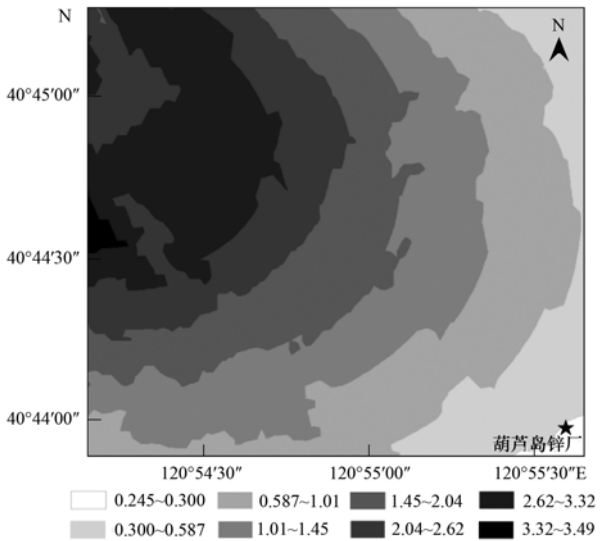


图 2 土壤 Hg 空间分布
Fig. 2 Distribution of Hg in soil

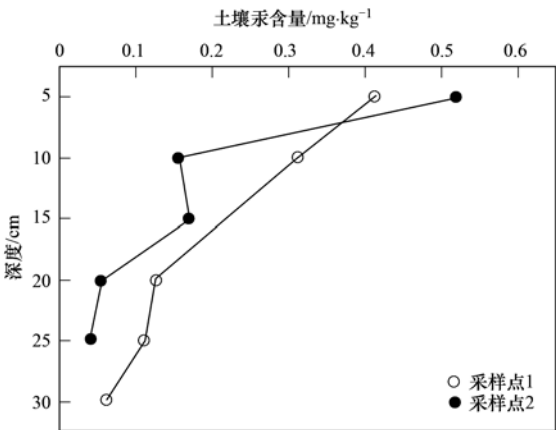


图 3 土壤剖面 Hg 含量分布
Fig. 3 Distribution of Hg in soil profile

下,可溶性汞含量很低,不易向土壤底层迁移.虽然汞能与有机质络合或与碳酸盐结合向下迁移,但这种移动相对较小,因此表层土壤汞含量远高于深处土壤汞含量.另外,玉米地耕作土壤由于人类活动的影响,土壤可能被翻动过,土壤不能保持原生状态,因此汞在垂直剖面中分布并非一定是表层土壤高于下层,而有时是出现下层高于表层的现象^[17].

2.4 玉米植株各器官 Hg 含量及富集程度

玉米植株各器官 Hg 含量分布见图 4. 从中可知,根汞含量最高,平均值可达 $1.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,玉米果粒中汞含量最低,为 $0.034 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,稍高于文献^[24]某地区玉米粒中 Hg 含量,但远高于广西珊瑚钨锡矿耕作区^[25]、黑龙江典型黑土区^[26]. 器官汞含量从高到低依次为根>茎>叶>苞叶>芯>果粒. 玉米籽粒中 Hg 含量最低可能与被苞叶包裹有关,其他来源 Hg 很少进入果粒中,苞叶 Hg 含量高于果粒. 玉米 Hg 富集系数是玉米各器官中 Hg 浓度与土壤中 Hg 浓度的比值. 通过计算表明,汞在玉米不同器官中的富集程度不同,根的富集系数最大,为 60.9%,其次为茎,富集系数为 9.57%,富集系数从大到小依次为根>茎>叶>苞叶>芯>穗,说明汞较易在玉米根部富集,少量汞向玉米果粒迁移,这与王宁^[27]对黑河中游绿洲农田土壤-玉米系统中重金属研究得到的结果一致,玉米根中重

金属富集系数要远高于玉米籽中对对应重金属的富集系数. Fu 等^[28]及 Carbonell 等^[29]研究结果也表明,土壤和玉米茎、叶、根等器官中 Hg 含量要高于玉米籽粒. 尽管外界土壤环境中汞的污染严重,但是由于一方面汞不易从根部迁移到果实,另一方面由于苞叶的缘故也阻挡了大气中汞进入果实.

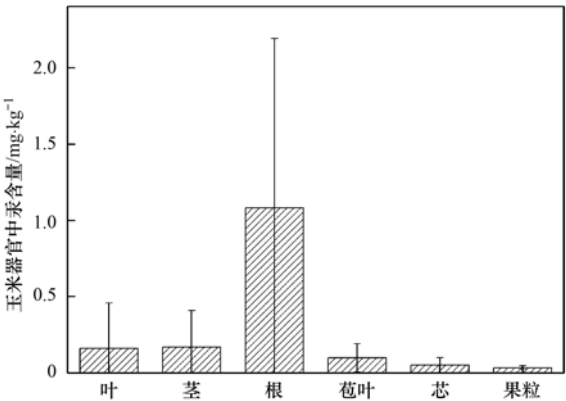


图 4 玉米植株各器官 Hg 含量分布

Fig. 4 Distribution of Hg in different organs of maize plant

2.5 玉米各器官及土壤中汞相关性分析

从玉米各器官及土壤中汞含量之间相关系数可看出(表 3),在 0.01 置信水平上,叶、茎、根、苞叶两两之间具有显著相关性,另外,根和芯之间相关水平也较好,但是要低于前者,在 0.05 置信水平上,茎和芯也具有显著性,茎叶等器官中的汞来源于根从土壤的吸收.

表 3 玉米植株各器官及土壤汞含量之间 Pearson 相关系数矩阵¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficient matrix of mercury in soil and maize plant organs

	土壤	叶	茎	根	苞叶	芯	果粒
土壤	1						
叶	-0.107	1					
茎	-0.173	0.779 **	1				
根	0.168	0.625 **	0.763 **	1			
苞叶	-0.072	0.666 **	0.865 **	0.709 **	1		
芯	0.160	0.227	0.427 *	0.593 **	0.407	1	
果粒	0.031	0.195	-0.045	-0.024	-0.144	-0.118	1

1) * * 相关系数在 0.01 水平上显著, * 相关系数在 0.05 水平上显著

2.6 葫芦岛市土壤-玉米系统 Hg 风险评价

2.6.1 土壤潜在生态风险评价

利用 Hakanson 潜在生态危害指数法对葫芦岛市稻池村玉米地重金属 Hg 进行分析计算发现, Hg 单项污染系数达到 48, 潜在生态风险程度很高. 生态风险程度为很强的样品占 27.3%, 潜在生态风险系数值低于 320, 72.7% 的样品 Hg 潜在生态风险系数高于 320, 其中最大值可达到 3 776, 生态风险强度为极强. 这表明葫芦岛市玉米地重金属 Hg 生

态风险水平非常高, 土壤 Hg 污染非常严重.

2.6.2 玉米 Hg 健康风险评价

参照美国环境保护署暴露因子手册以及杨刚等^[30]的研究, $I_{\text{adult}} = 0.15 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$, $I_{\text{child}} = 0.1 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$. 通过运用目标危险系数法对暴露人群食物摄入这一暴露途径引起的 Hg 健康风险进行评价. 在食物摄入这一途径下儿童平均日摄入量要高于成人, 成人和儿童 Hg 平均日摄入量(CDI)较参考剂量(RfD)低一个数量级. 无论是成人还是儿童 THQ

值都小于1,结果表明,食用当地玉米对暴露人群没有明显的健康风险.就儿童来说,风险指数为0.056,高于成人风险指数(0.019),表明Hg通过本地玉米摄入对儿童造成的健康风险要高于成人.这可能与儿童自身的身体素质及成人与儿童每天摄入量不同有关.通过研究发现,葫芦岛市稻池村玉米地汞含量超出辽宁省土壤背景值48倍,玉米地土壤Hg污染普遍较严重,但是通过食用玉米却对暴露人群没有构成健康风险威胁.汞可在土壤-植物系统中进行迁移转化,但是汞的生物毒性及累积能力并不是由其总量决定,形态分布及生物有效性才是其决定因素^[31].本研究在重金属生物有效性方面存在诸多不足,日后将以其为方向,认真并深入地开展相关研究.尽管单一重金属Hg对人群没有构成明显的健康风险,但在自然环境中通常是多种重金属复合污染,故只评价单一重金属Hg对人群健康产生的风险具有一定的局限性,并不能全面地反映在多种重金属复合污染情况下暴露人群所受的健康风险.另外,在本文中接触率 I 参考的是杨刚等^[30]的研究,他们的研究区域是西南地区,本文研究区域为东北地区,非同片区域人群饮食结构不同,故研究具有一定的偏差.稻池村人群食用玉米所面临的重金属对人体健康产生的风险需要受到重视.

3 结论

(1) 葫芦岛市玉米地土壤Hg的含量范围为0.25~3.49 mg·kg⁻¹,均值为1.78 mg·kg⁻¹,远高于辽宁省土壤环境背景值,玉米地土壤均受到不同程度Hg污染,稻池村玉米地土壤受邻近锌厂冶炼活动影响,土壤汞含量显著升高.

(2) 在距锌厂2~3 km范围内,距离锌厂越远葫芦岛市玉米地土壤Hg含量越高.Hg向东北向及西南向延伸,这是由汞理化性质及当地盛行风共同决定的.在纵向分布上,表层土壤汞含量最高,自表层向下土壤汞含量减少.

(3) 运用地累积指数法对玉米地土壤Hg污染情况进行分析.结果表明,地累积指数均大于2,玉米地土壤中均存在Hg污染累积,54.6%的玉米地属于严重污染区域.玉米植株根对Hg富集程度最高,玉米籽粒中含量最低.

(4) 稻池村居民通过摄食玉米汞进入人体,但对人体没有产生明显的健康风险,值得注意的是,Hg对儿童产生的健康风险要明显高于成人.

参考文献:

- [1] 冯新斌,陈玖斌,付学吾,等.汞的环境地球化学研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2013,32(5):503-530.
- [2] UNEP. Overarching framework UNEP global mercury partnership [M]. New York: UNEP, 2009.
- [3] Nwaichi E O, Wegwu M O, Nwosu U L. Distribution of selected carcinogenic hydrocarbon and heavy metals in an oil-polluted agriculture zone [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(12): 8697-8706.
- [4] 郭朝晖,肖细元,陈同斌,等.湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J].地理学报,2008,63(1):3-11.
- [5] Intawongse M, Dean J R. Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract [J]. Food Additives & Contaminants, 2006, 23(1): 36-48.
- [6] Rai S, Gupta S, Mittal P C. Dietary intakes and health risk of toxic and essential heavy metals through the food chain in agricultural, industrial, and coal mining areas of northern India [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2015, 21(4): 913-933.
- [7] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. GeoJournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [8] Förstner U, Müller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact [J]. GeoJournal, 1981, 5(5): 417-432.
- [9] Müller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971 [J]. Umschau Verlag, 1979, 79(24): 778-783.
- [10] Bian B, Wu H S, Zhou L J. Contamination and risk assessment of heavy metals in soils irrigated with biogas slurry: a case study of Taihu basin [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187: 155.
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [12] Wu B B, Wang G Q, Wu J, et al. Sources of heavy metals in surface sediments and an ecological risk assessment from two adjacent plateau reservoirs [J]. PLoS One, 2014, 9(7): e102101.
- [13] Bennett D H, Kastenber W E, McKonec T E. A multimedia, multiple pathway risk assessment of atrazine: the impact of age differentiated exposure including joint uncertainty and variability [J]. Reliability Engineering & Systems Safety, 1999, 63(2): 185-198.
- [14] US EPA. Superfund public health evaluation manual [R]. EPA/540/1-86/060. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1986. 1-52.
- [15] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual(part A) [R]. EPA/540/1-89/002. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1989. 35-52.

- [16] The tri-service environmental risk assessment workgroup DOD vapor intrusion handbook [S]. Washington, DC, USA: US EPA, 2009.
- [17] 郑冬梅, 王起超, 郑娜, 等. 锌冶炼-氯碱生产复合污染区土壤汞的空间分布[J]. 土壤通报, 2007, **38**(2): 361-364.
- [18] Du P, Xie Y F, Wang S J, *et al.* Potential sources of and ecological risks from heavy metals in agricultural soils, Daye City, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(5): 3498-3507.
- [19] 李建国, 濮励杰, 廖启林, 等. 无锡市土壤重金属富集的梯度效应与来源差异[J]. 地理科学, 2014, **34**(4): 496-504.
- [20] Hossain M A, Ali N M, Islam M J, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soils of Gebeng industrial city, Malaysia [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(1): 115-126.
- [21] 孙超, 陈振楼, 毕春娟, 等. 上海市崇明岛农田土壤重金属的环境质量评价[J]. 地理学报, 2009, **64**(5): 619-628.
- [22] George J, Mastro R E, Ram L C, *et al.* Human exposure risks for metals in soil near a coal-fired power-generating plant [J]. Archives of Environment Contamination and Toxicology, 2015, **68**(3): 451-461.
- [23] 郑娜, 王起超, 刘景双, 等. 葫芦岛市土壤、蔬菜重金属污染空间变化规律[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 2071-2076.
- [24] Hernández-Silva G, García-Martínez R, Solís-Valdez S, *et al.* Presencia del Hg total en una relación suelo-planta-atmósfera al sur de la sierra gorda de querétaro, México [J]. Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 2012, **15**(1): 5-15.
- [25] 唐专武, 钱建平, 莫福金, 等. 广西珊瑚钨锡矿耕作区土壤和玉米汞含量及污染评价[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(2): 73-76.
- [26] 张继, 栾志慧, 张弘强, 等. 典型黑土区农田土壤与玉米中重金属含量研究[J]. 安徽农业科学, 2013, **41**(27): 10980-10983.
- [27] 王宁. 黑河中游绿洲农田土壤-玉米系统重金属的空间分布及其行为特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [28] Fu Z J, Li W H, Zhang Q B, *et al.* Quantitative trait loci for mercury accumulation in maize (*Zea mays* L.) identified using a RIL population [J]. PLoS One, 2014, **9**(9): e107243.
- [29] Carbonell G, de Imperial R M, Torrijos M, *et al.* Effects of municipal solid waste compost and mineral fertilizer amendments on soil properties and heavy metals distribution in maize plants (*Zea mays* L.) [J]. Chemosphere, 2011, **85**(10): 1614-1623.
- [30] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 2014-2021.
- [31] 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 等. 典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1067-1075.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 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