

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

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

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOCs)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征

张刚^{1,2}, 王宁^{1,2*}, 王媛³, 刘特³, 艾建超¹

(1. 东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024; 2. 国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 长春 130024; 3. 吉林省环境科学研究院, 长春 130021)

摘要: 在松花江上游夹皮沟金矿开采区内, 混汞法提金工艺已使用 180 余年, 导致严重的环境介质汞污染问题. 为研究土壤和大气汞污染特征, 使用塞曼效应汞分析仪 (Zeeman RA915⁺) 测定了大气汞含量, 使用冷原子吸收分光光度法 (GB/T 17136-1997) 测定了土壤汞含量, 使用动态通量箱法测定了老金厂、二道沟、二道岔和夹皮沟镇小区四处土/气间汞交换通量; 对土壤汞含量和大气汞含量进行了线性回归分析; 并对土/气间汞交换通量与气象因子进行了相关性分析. 结果表明: ①区域大气汞含量均值为 $(71.08 \pm 38.22) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. ②区域土壤汞含量均值为 $(0.9131 \pm 0.0408) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤汞含量与大气汞含量显著正相关. ③各采样点土/气间汞交换通量为: 老金厂 $(129.13 \pm 496.07) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 二道沟 $(98.64 \pm 43.96) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 二道岔 $(23.17 \pm 171.23) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 夹皮沟镇小区 $(7.12 \pm 46.33) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. ④太阳辐射是老金厂、二道岔和夹皮沟镇小区土/气间汞交换通量主要影响因子, 太阳辐射、大气温度和土壤温度共同控制二道沟土/气汞交换通量过程; 地形条件的干扰, 形成三类迥异的土/气间汞交换通量日变化特征形态.

关键词: 大气总汞; 汞交换通量; 动态通量箱; 夹皮沟金矿; 松花江

中图分类号: X131 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)09-2953-07

Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area

ZHANG Gang^{1,2}, WANG Ning^{1,2*}, WANG Yuan³, LIU Te³, AI Jian-chao¹

(1. School of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. State Key Laboratory for Environmental Protection, Wetland Ecology and Vegetation Restoration, Changchun 130024, China; 3. Research Academy of Environmental Sciences of Jilin Province, Changchun 130021, China)

Abstract: In the studied area of Jia-pi-gou at the upstream area of Songhua River, amalgamation process has been applied as a dominant method to extract gold for more than one hundred and eighty years, resulting in severe mercury environmental pollution. The total mercury contents in the atmosphere and soil have been determined by mercury analyzer (Zeeman RA915⁺) and cold atomic absorption spectrophotometry (GB/T 17136-1997), respectively. To study the pollution characteristics of mercury in the soil and atmosphere, the mercury flux at the interface between the soil and the atmosphere of 4 sampling sites Lao-jin-chang, Er-dao-gou, Er-dao-cha and community of Jia-pi-gou have been determined with the method of dynamic flux chamber. Furthermore, linear regression analyses on the total mercury contents between soil and atmosphere have been carried out and the correlation coefficient of mercury exchange flux between soil and atmosphere and meteorological factors has been studied. The results are as follows: ①The mean value of mercury content in the atmosphere is $(71.08 \pm 38.22) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. ②The mean value of mercury content in the soil is $(0.9131 \pm 0.0408) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; it shows remarkably positive correlation between the mercury contents in soil and in the atmosphere. ③The mercury exchange flux between soil and atmosphere in different locations are Lao-jin-chang $[(129.13 \pm 496.07) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$, Er-dao-gou $[(98.64 \pm 43.96) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$, Er-dao-cha $[(23.17 \pm 171.23) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$, and community of Jia-pi-gou $[(7.12 \pm 46.33) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$. ④Solar radiation is the major influential factor in the mercury exchange flux between the soil and atmosphere in Lao-jin-chang, Er-dao-cha and community of Jia-pi-gou. Solar radiation, air temperature and soil temperature jointly influence the process of the mercury exchange flux between the soil and atmosphere in Er-dao-gou. Under the disturbance of terrain, three noticeably distinctive trend features of daily change of mercury exchange flux between the soil and atmosphere have been formed.

Key words: total atmospheric mercury; mercury exchange flux; dynamic flux chamber; Jia-pi-gou gold mine; Songhua River

中国目前已成为全球最大的大气总汞排放国之一^[1]. 汞在大气中主要以 Hg^0 形态存在, 占大气总汞的 90% 以上^[2], 它在大气中的居留时间约为 1 a. 大气作为重要汞库的同时也是汞进行迁移的重要通道. 土壤也是最重要的自然释汞源之一^[3~5]. 研究土壤和大气环境中的汞以及土/气间汞交换通量等

汞污染特征, 是了解全球汞生物地球化学循环的重

收稿日期: 2011-11-26; 修订日期: 2012-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40673059); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (09QNJ024); 吉林省科技厅青年基金项目 (2009114)

作者简介: 张刚 (1978 ~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为汞的环境地球化学过程, E-mail: zhangg217@nenu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: nwang@nenu.edu.cn

要前提基础。

国外对于汞矿和金矿开采区周边汞污染的报道很多^[6,7],研究工作也比较深入。在国内,冯新斌等对贵州汞矿地区土/气汞交换通量进行了深入研究和系统报道^[8~13];张成等^[14]对重庆地区几种地表类型土/气界面交换通量特征及紫色土/气界面汞的迁移转化规律与机制进行了研究^[15];王起超等^[16]对吉林省长春市汞大气/土壤界面交换通量进行了研究;我国北方金矿开采地区土/气间汞交换通量以及大气和土壤介质环境汞污染方面的研究报道目前还很少。

中国松花江流域的汞污染曾是环境科学界广泛关注的问题,开展过大量研究并取得了一系列科研成果^[17]。研究区域夹皮沟位于松花江上游流域,是中国重要金矿带之一。自1821年开采黄金以来,至今已有190余年的历史^[18]。早在1870年和1974年前后,两次成为我国采金量最大的矿区。该地区长期使用混汞法提金,曾同时有万余人从业,提金过程中汞绝大部分通过大气和废水进入环境中^[19]。混汞法进入大气的汞占全部释放汞的65%~87%,通过干湿沉降进入陆生生态系统和水生生态系统,最终通过食物链危害人体^[20,21]。

前人对夹皮沟地区金矿开采带来的汞污染问题已有部分调查工作^[22,23],但对于汞在大气和土壤环境介质中的分布以及土/气间汞交换通量特征,还没有深入进行研究。本研究以期了解金矿开采对区域带来的汞污染特征及汞环境地球化学过程,为探讨汞

在环境中的迁移与循环转化机制提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于夹皮沟金矿开采区,127°15'~127°30'E,42°41'~43°0'N以内;地处中温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季湿润多雨,年均温1.9~4.4℃,年降雨量650~850 mm;区域内林地资源和矿产资源丰富,目前以夹皮沟镇为中心有夹皮沟金矿等大小30个金矿开采企业分布其中。

夹皮沟金矿自1821年正式土法采金;1845年开采岩金;同治(1861~1875年)、光绪(1875~1908年)年间,黄金日产量达500余两,鼎盛时期1 a可采黄金6万两;日本侵华时,曾进行掠夺性开采,生产黄金数吨;1949年后,国家建立了夹皮沟黄金矿业总公司,通过勘查先后发现大中型矿床7处,小型金矿5处,北西西向的夹皮沟-大石砬子构造带控制着矿田内各矿床的分布,该矿带长50 km,宽1~3 km,自此每年夹皮沟的黄金产量都在1 t以上,至今已为国家开采出了近100 t黄金。通过调查,仅夹皮沟金矿每年可开采矿石2 000 t,混汞法提取黄金的汞用量约20 kg·a⁻¹,其中50%~60%通过点源和非点源途径进入水、土壤和大气环境中^[22,23]。1996年混汞法提金被禁用后,氰化法提金逐渐成为替代工艺。据调查,目前矿区内仍有小规模的私人提金活动使用混汞法工艺。

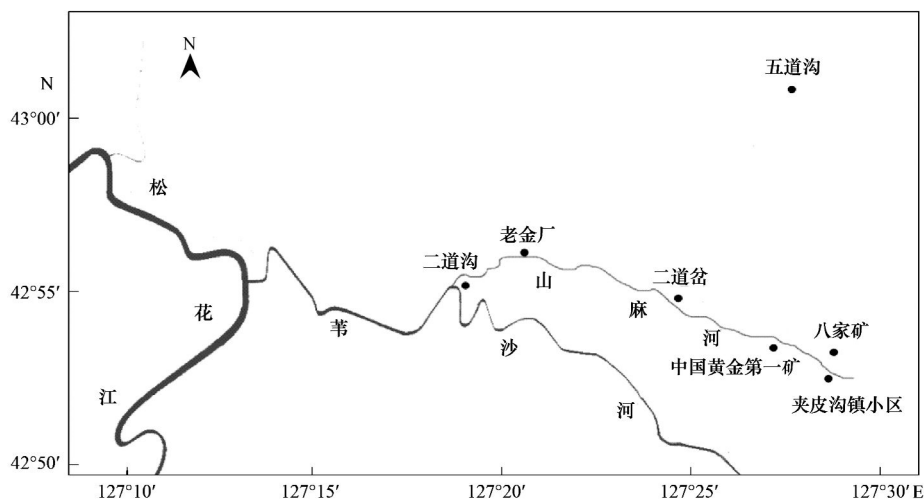


图1 研究区域地理位置示意

Fig. 1 Sampling Location in sketch map of study area

1.2 采样及测定方法

1.2.1 采样点布设

2009年4~5月,在夹皮沟金矿开采区内沿松

花江支流山麻河向下游(出河源为东南-西北流向,在二道沟处折向东北-西南,后汇入松花江支流苇沙河)依次选择夹皮沟镇小区、二道岔、老金厂、二道

沟这 4 处样地,同时选择金矿开采区边缘(五道沟)作为空白对照,金矿厂区(中国黄金第一矿,八家矿)作为污染对照(图 1),测定了上述 7 处样点大气总汞含量和土壤总汞含量;测定了夹皮沟镇小区、二道岔、老金厂、二道沟这 4 处样点土/气界面间汞交换通量。

1.2.2 样品采集与测定

大气总汞含量使用塞曼效应汞分析仪(Zeeman RA915⁺)直接测定。

土壤总汞含量按《冷原子吸收分光光度法(GB/T 17136-1997)》测定。各样点采集土壤样品 0.5~1 kg,密封标记后送至实验室,样品混匀后四分法缩至 100 g,风干,过 2 mm 尼龙筛,用玛瑙研钵研磨全部通过 100 目(0.149 mm)尼龙筛后备用,使用硫酸-硝酸-高锰酸钾消解法消解过筛后土壤样品,每样品 3 个平行,取均值作为各采样点土壤总汞含量。

土/气间汞交换通量采用动态通量箱法(通量箱与 Zeeman RA915⁺ 汞分析仪联用)进行测定。动态通量箱法是将聚四氟乙烯薄膜材质通量箱置于被测地表,用土壤将通量箱边缘密封,以避免漏气引起测量误差。用聚四氟乙烯导管分别连接通量箱的进气口、出气口和 Zeeman RA915⁺ 汞分析仪,设定汞分析仪每 30 s 采集 1 个样品。每隔 5 min 交替测定进入和流出通量箱的气态汞含量,用计算机记录数据。同时,用抽气泵对通量箱进行换气,使通量箱中空气的流速保持在 0.9 m³·h⁻¹,以避免因空气流速的变化带来的测定误差^[9~11,13]。

此外,使用轻便气象综合观测仪(DZM2-1 型)配合测量必要的大气温度、土壤温度、气压风速等气象数据。

1.3 土壤总汞释放通量计算

根据质量守恒定律,汞释放通量的计算公式为:

$$F = (c_0 - c_i) \times Q \div A$$

式中, F 为汞释放通量,ng·(m²·h)⁻¹; c_0 为流出通

量箱的气态汞含量,ng·m⁻³; c_i 为进入通量箱的气态汞含量,ng·m⁻³; Q 为通量箱内的空气流速,m³·h⁻¹; A 为通量箱的底面积,m²。取 2 个流出通量箱的气态汞含量的平均值与其前后 4 个进入通量箱的气态汞含量的平均值的差,用以计算汞释放通量,以降低偶然性因素可能造成的计算误差^[13~15]。

2 结果与讨论

2.1 大气总汞含量

研究区域内大气总汞含量最高值出现在污染对照点中国黄金第一矿,为 1 004.24 ng·m⁻³,最低值出现在采样点老金厂,为 5.20 ng·m⁻³;区域内大气总汞含量平均值为(71.08±38.22)ng·m⁻³,高于长白山地区大气总汞年平均值(3.22±1.78)ng·m⁻³^[24],远高于北半球大气总汞含量的背景水平(1.5~2.0 ng·m⁻³)^[25~27],分别是二者的 22.07 倍和 35.54 倍;表明该地区大气环境已经受到严重的汞污染。

五道沟地处区域外缘,位于夹皮沟金矿开采区正北向,为金矿开采区主导风向(西南风)平行方位,距金矿开采区约 10 km,间有数道沟岭阻隔,无金矿开采活动,大气总汞含量可作为区域空白对照。数据表明,五道沟大气总汞含量平均值为(22.27±3.98)ng·m⁻³,明显低于区域内其他样点,但也远高于北半球大气总汞背景(11.14 倍)和长白山地区大气总汞年均值(6.91 倍),考虑到该处无人汞源,推测大气总汞源于金矿开采区,通过大气运动迁移而至。此外,区域内其他样点大气总汞含量超长白山地区大气总汞年均值倍数依次为:老金厂 10.02 倍,二道沟 12.19 倍,二道岔 22.59 倍,夹皮沟镇小区 23.98 倍;污染对照点中国黄金第一矿(37.98 倍),八家矿(43.02 倍)。作为污染对照的八家矿,其大气总汞瞬时值最低为 81.48 ng·m⁻³,中国黄金第一矿其瞬时值最高已达 1 004.24 ng·m⁻³(表 1)。研究所选择的三类地区,即区域边缘、区域内随机选

表 1 夹皮沟金矿开采区大气总汞含量统计/ng·m⁻³
Table 1 Statistical summary of total mercury concentration in atmosphere of Jia-pi-gou gold mine area/ng·m⁻³

分组	采样点	气态总汞含量				
		样品数	最小值	最大值	平均值	标准偏差
边缘对照	五道沟	47	13.83	29.82	22.27	3.98
	老金厂	114	5.20	83.00	32.27	20.29
采样点	二道沟	57	5.33	137.30	39.25	25.77
	二道岔	39	19.24	160.19	72.73	41.69
	夹皮沟镇小区	27	29.99	138.17	77.21	31.16
	中国黄金第一矿	110	28.39	1 004.24	122.30	110.41
污染对照	八家矿	21	81.48	191.21	138.54	34.22
	统计值	415	5.20	1 004.24	71.08	38.22

择的样地、以及作为污染对照重点监测的金矿区,大气总汞含量均远超过我国东北地区地理高点长白山地区大气总汞年均值,且有大气总汞含量分布存在“污染对照区>区域内样地>区域边缘”的由中心向四周递减的环状分布特征. 总体上分析,区域大气总汞含量水平较高,已成为区域汞输出源.

此外,比较区域内各样点大气总汞含量分布(图2),五道沟处大气总汞含量较为恒定,地理位置与夹皮沟金矿集中区相隔较远,且处于区域主导风向西南风平行方向,大气总汞含量可视为区域空白对照;老金厂距最近金尾矿库仅4 km(老牛沟),这可能是老金厂样点大气总汞重要来源;二道沟为夹皮沟金矿区低洼处,区域两山夹一沟的地形与呈东北-西南递减的地势,叠加大气总汞密度较高有向海拔低处汇集的趋势特点,导致二道沟虽然远离夹皮沟金矿开采区,大气总汞含量仍较高;二道岔紧邻夹皮沟金矿开采区,夹皮沟镇小区处于金矿开采区内,两处大气总汞含量较高,且在研究期间大气总汞含量变化幅度较大;第一矿和八家矿样点现为金矿厂,大气总汞含量明显高于其他样点,且变化幅度大,似有明显的汞污染源贡献所致.

分析区域大气总汞含量分布特点,首先,考虑到开采区内曾经长期使用混汞法进行提金,1996年后混汞法被禁止,但也不排除仍有小型金矿采用该工艺而对大气总汞含量有所贡献. 第二,夹皮沟金矿区有记录混汞法提金已有180余年历史,历史开采活动使汞在环境介质中长期累积(如土壤介质),在今后较长时间内历史开采造成的汞汇将成为汞源. 第三,金矿区内目前广泛开展金矿残采,即重新挖掘历史废旧矿坑,再利用回填尾矿和残矿,残采将导致历史上混汞法提金后回填矿坑中的尾矿残留汞的二次污染释放问题. 第四,开采区内众多金矿尾矿库一直是大气总汞的重要源.

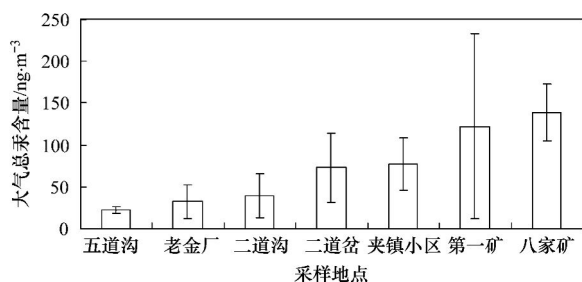


图2 夹皮沟金矿开采区内大气总汞含量分布

Fig. 2 Distribution of total atmospheric mercury concentration in Jia-pi-gou gold mine area

2.2 土壤总汞含量

研究区域内土壤总汞含量均值为 $(0.9131 \pm 0.0408) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表2),高于长白山地区土壤总汞含量均值 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[28],也显著高于吉林省土壤背景值 $0.041 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 位于开采区边缘的五道沟样点土壤总汞含量平均值为 $0.1895 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于长白山地区土壤总汞含量均值,其余样点超过长白山地区土壤总汞含量的倍数为:老金厂2.03倍,二道沟2.75倍,二道岔2.90倍,夹皮沟镇小区3.78倍,中国黄金第一矿5.90倍,八家矿7.45倍.

表2 夹皮沟金矿开采区土壤总汞含量统计/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Statistical summary of total mercury concentration in soil of Jia-pi-gou gold mine area/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

分组	采样点	土壤总汞含量平均值	标准差
边缘对照	五道沟	0.189 5	0.046 2
	老金厂	0.506 6	0.006 6
采样点	二道沟	0.687 4	0.021 6
	二道岔	0.726 0	0.049 9
	夹皮沟镇小区	0.945 3	0.031 6
污染对照	中国黄金第一矿	1.473 8	0.097 8
	八家矿	1.863 3	0.031 8
	平均值	0.913 1	0.040 8

夹皮沟金矿开采区长期使用混汞法提金,汞随大气和废水进入环境中,在环境介质中逐渐累积,研究区域土壤总汞含量也呈现出由区域中心向外环形逐步递减的趋势(图3),区域土壤中汞平均值明显高于临近的长白山地区,尤其在金矿区,即第一矿和八家矿,土壤总汞含量较高,汞污染严重.

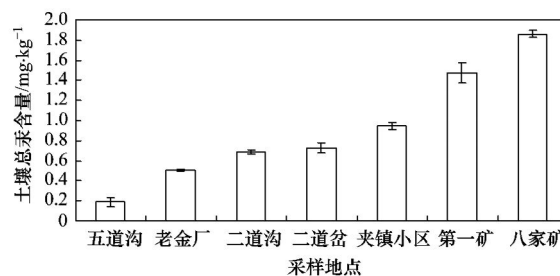


图3 夹皮沟金矿开采区内土壤总汞含量分布

Fig. 3 Distribution of total mercury concentration of soil in Jia-pi-gou gold mine area

2.3 相关性分析

对各采样点土壤中总汞含量和大气中总汞含量进行一元线性回归分析,其回归方程为 $y = 75.755x + 2.907$,二者显著正相关($R^2 = 0.9446$, $P = 0.000$),见图4,初步断定,土壤汞是大气汞的主要

贡献源。

夹皮沟金矿混汞法提金工艺盛行近百年,汞通过大气和废水进入环境,通过干湿沉降作用,大气汞不断进入陆生生态系统中,区域内土壤介质成为汞汇;当混汞法提金工艺被禁止后,土壤汞在环境因子(太阳辐射等)和生态因子(植被、土壤微生物等)作用下,由历史汞汇变为现今汞源,已成为区域大气汞的主要来源。

2.4 土/气间汞释放通量

统计各采样点的土/气界面间汞释放通量结果(表3),老金厂(129.13 ± 496.07) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,二道沟(98.64 ± 43.96) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,二道岔(23.17

± 171.23) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,夹皮沟镇小区(7.12 ± 46.33) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。

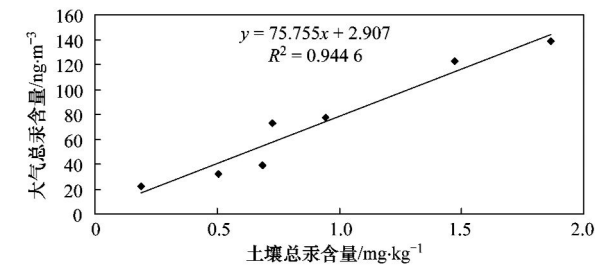


图4 土壤总汞含量与大气总汞含量相关性分析
Fig. 4 Correlation analysis on the mercury contents in soil and in the atmosphere

表3 各样点土/气间汞交换通量统计结果/ $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

Table 3 Statistical summary of the mercury exchange flux between soil and atmosphere of the sample plots/ $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$						
采样点	采样时间	平均值	最大值	最小值	方差	释放/沉降
老金厂	2009-04-10 T07:00 ~ 19:00	129.13	1 400.03	-1 419.98	496.07	31/29
二道沟	2009-04-11 T07:00 ~ 19:00	98.64	173.2	19.5	43.96	61/0
二道岔	2009-04-09 T07:00 ~ 19:00	23.17	585.00	-442.50	171.23	30/30
夹皮沟镇小区	2009-04-08 T07:00 ~ 19:00	7.12	127.50	-138.75	46.22	33/24

研究区域内多低山丘陵,沟谷纵横,冬春季节昼间日照时间较短,午后太阳辐射逐渐达到最强时,大气增温迅速,老金厂、二道沟、二道岔和夹皮沟镇小区午后瞬时气温分别达到全天最高的 28.3、24.7、35 和 28.9℃,土壤释汞量也分别达到最高的 1 400.03、173.2、585.00 和 127.50 $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。

比较各采样点土/气间汞通量日变化特征(图5),存在3种形态:第一,老金厂和二道岔,存在一

个较为明显时间拐点,拐点前土壤总汞释放和大气总汞沉降窄幅波动,之后通量水平迅速放大,转变为宽幅波动状态。第二,二道沟,具明显的单峰形态,汞由土壤向大气强烈释放,峰值出现在 14:00 左右,峰值后现明显的由强转弱的拐点。第三,夹皮沟镇小区,土/气间汞交换通量始终处于稳定的宽幅波动状态,两过程通量交换大致平衡相抵。

表4显示,各采样点土/气间汞交换通量均与太

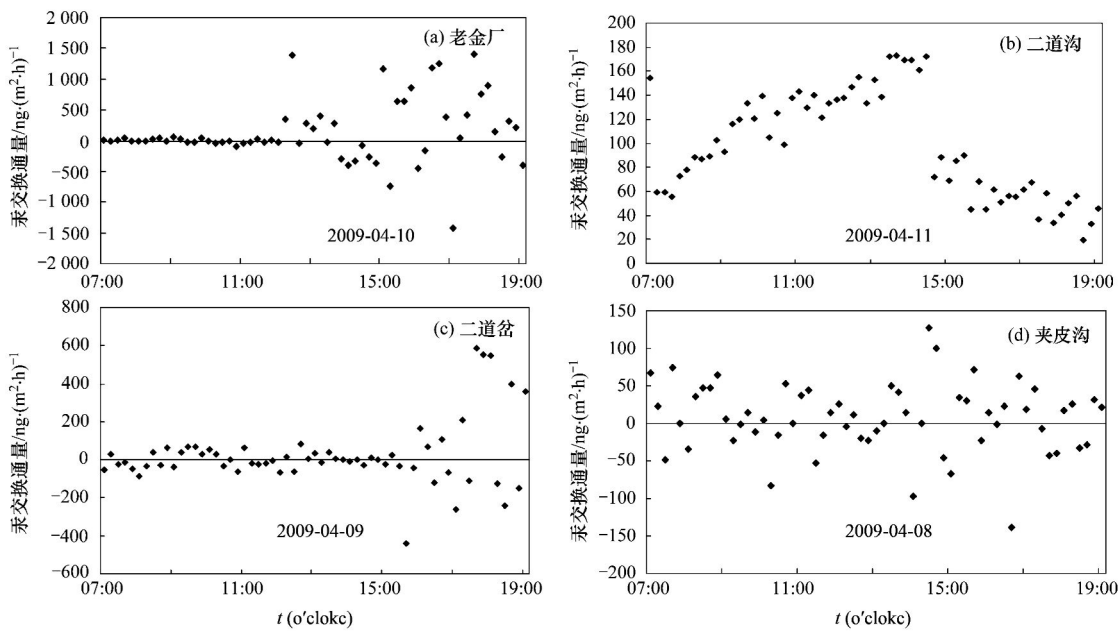


图5 夹皮沟金矿开采区土/气间汞交换通量

Fig. 5 Mercury exchange flux between soil and air in Jia-pi-gou gold mine area

阳辐射显著正相关,二道沟样点土/气间汞交换通量还表现为与大气温度和土壤温度显著正相关,老金厂、二道岔和夹皮沟镇小区土/气间汞交换通量与大气温度和土壤温度无相关关系. 比较各采样点土/气间汞交换通量与气象因子太阳辐射、大气温度和土壤温度间差异性,与太阳辐射显著差异,除二道沟与大气温度和土壤温度显著差异外,老金厂、二道岔和夹皮沟镇小区与大气温度和土壤没有显著差异(表5).

表4 土/气间汞交换通量与气象因子间皮尔逊相关系数¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficient of mercury exchange flux between soil and atmosphere and meteorological factors

项目	老金厂	二道沟	二道岔	夹皮沟镇小区
太阳辐射	0.881 **	0.723 **	0.802 **	0.799 **
大气温度	-0.162	0.854 **	-0.162	-0.062
土壤温度	0.063	0.539 **	-0.133	-0.032

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

表5 各采样点土/气间汞交换通量与气象因子差异显著度 P 值¹⁾

Table 5 The P value of significant difference between mercury exchange flux of four sampling sites and meteorological factors

项目	老金厂	二道沟	二道岔	夹皮沟镇小区
太阳辐射	0.002	0.000	0.001	0.003
大气温度	0.081	0.000	0.890	0.064
土壤温度	0.073	0.000	0.608	0.061

1) $P < 0.05$, 表示差异显著; $P < 0.01$, 表示差异极显著

研究区域内4~5月初为冬末春初,地表大部裸露,昼夜温差极大,昼间温度瞬时值可超过30℃,日落夜间气温则可骤减至0℃以下,太阳辐射能为区域地-气系统主要能量来源. 老金厂和二道岔位于狭长山沟底部,受周围植被与地形因子影响,午前土/气间汞交换通量过程较弱,但午后强烈的太阳辐射以及土壤微生物作用下,土/气间汞交换通量强度不断放大,汞交换通量存在明显的由窄幅到宽幅震荡的拐点特征. 老金厂目前已形成数千人的聚居点,地势走向与区域多年主导西南风向一致;二道岔更为狭长,仅有少数农户,近地面狭管效应显著,两处常现有利污染气象条件,故易于大气汞扩散.

区域两山夹沟地形沿老金厂向西南延伸,在二道沟处由东北-西南折向西北-东南走向,山麻河也在此转向并汇入松花江支流苇沙河,二道沟样点日出后一直强烈暴露在太阳辐射下,因此表现为强烈的土壤向大气释汞,这与已有的研究报道相一致^[8-11,23]. 夹皮沟镇小区处于夹皮沟金矿区中心位置,位于盆型谷底,周围被低山包围,地下金矿井交

错,基本已被挖空,采样点土壤总汞含量与大气总汞含量显著正相关,土/气间汞交换通量表现为较为平稳的宽幅波状,采样点封闭的地形条件,不利于大气汞扩散,导致出现土壤汞释放和大气汞沉降的通量交换过程趋于平衡态势.

此外,各采样点周围居民与农户三餐与采暖一般使用秸秆和林木枯枝,累积在生物质燃料中的汞随燃烧释放后,对大气汞含量有明显的贡献,其规律有待进一步研究揭示.

3 结论

(1)研究区域内大气汞含量平均值为 $(71.08 \pm 38.22) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 各采样点是长白山地区大气汞含量均值:五道沟(6.91倍),老金厂(10.02倍),二道沟(12.19倍),二道岔(22.59倍),夹皮沟镇小区(23.98倍),中国黄金第一矿(37.98倍),八家矿(43.02倍). 研究区域内大气汞含量布呈现“污染对照区>区域内样地>区域边缘”的由中心向四周递减的环状递减分布特征.

(2)研究区域内土壤汞含量平均值为 $(0.9131 \pm 0.0408) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 远高于吉林省土壤汞背景值,是长白山地区土壤汞含量均值:老金厂(2.67倍),二道沟(3.63倍),二道岔(3.83倍),夹皮沟镇小区(4.99倍),中国黄金第一矿(7.78倍),八家矿(9.83倍). 土壤汞含量与大气汞含量区域分布特征一致,二者间一元线性回归方程为 $y = 75.755x + 2.907$,显著正相关($R^2 = 0.9446$, $P = 0.000$),初步断定土壤汞是大气汞主要来源.

(3)各样点土/气间汞交换通量特征为:老金厂 $(129.13 \pm 496.07) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,二道沟 $(98.64 \pm 43.96) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,二道岔 $(23.17 \pm 171.23) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,夹皮沟镇小区 $(7.12 \pm 46.33) \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

(4)太阳辐射是老金厂、二道岔和夹皮沟镇小区土/气间汞交换通量主要影响因子,太阳辐射、大气温度和土壤温度共同控制二道沟土/气间汞交换通量过程;地形条件的干扰,形成三类迥异的土/气汞交换通量日变化特征形态.

参考文献:

- [1] Streets D G, Hao J M, Wu Y, et al. Anthropogenic mercury emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(40): 7789-7806.
- [2] Li P, Feng X B, Qiu G L, et al. Mercury pollution in Asia: A review of the contaminated sites[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2-3): 591-601.

- [3] Kim K, Lindberg S E, Meyers T P. Micrometeorological measurements of mercury vapor fluxes over background forest soils in eastern Tennessee[J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29** (2): 267-282.
- [4] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury-An overview [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(5): 809-822.
- [5] Gustin M, Lindberg S E, Austin K, *et al.* Assessing the contribution of natural sources to regional atmospheric mercury budgets[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **259** (1-3): 61-71.
- [6] Žižek S, Horvat M, Gibicar D, *et al.* Bioaccumulation of mercury in benthic communities of a river ecosystem affected by mercury mining[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **377**(2-3): 407-415.
- [7] Ikingura J R, Akagib H, Mujumba J. Environmental assessment of mercury dispersion, transformation and bioavailability in the Lake Victoria Goldfields, Tanzania[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, **81**(2): 167-173.
- [8] 冯新斌, 陈业材, 朱卫国. 土壤挥发性汞释放通量的研究[J]. *环境科学*, 1996, **17**(2): 20-25.
- [9] 王少峰, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州红枫湖地区冷暖两季土壤/大气界面间汞交换通量的对比[J]. *环境科学*, 2004, **25** (1): 123-127.
- [10] 王少峰, 冯新斌, 仇广乐. 夏季红枫湖地区农田土壤-大气界面汞交换通量的初步研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, **23**(1): 9-13.
- [11] 王少峰, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州滥木厂汞矿区土壤与大气间气态汞交换通量及影响因素研究[J]. *地球化学*, 2004, **33**(4): 405-413.
- [12] 侯亚敏, 冯新斌, 王少峰, 等. 贵阳市及其郊区土壤大气界面间汞交换通量的初步研究[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(1): 52-58.
- [13] 付学吾, 冯新斌, 王少峰, 等. 贵阳市 2 种不同类型草地的汞释放通量[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(6): 33-37.
- [14] 张成, 何磊, 王定勇, 等. 重庆几种地表类型土-气界面汞交换通量[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(8): 1085-1090.
- [15] 林陶, 张成, 石孝均, 等. 不同类型紫色土土/气界面汞释放通量及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 1955-1960.
- [16] 王起超, 方凤满, 李志博. 长春市汞界面交换通量的研究[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(4): 475-479.
- [17] 刘永懋, 王稔华, 翟平阳. 中国松花江甲基汞污染防治与标准研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [18] 陆卫平. 夹皮沟金矿地质与采金技术简史[J]. *鞍山科技大学学报*, 2007, **24**(4): 298-305.
- [19] 赵凤英, 孙长春, 王福德, 等. 夹皮沟金矿冶炼工艺车间改造及其效果[J]. *黄金*, 1997, **18**(2): 36-38.
- [20] Silva G S, Jardim W F, Fadini P S. Elemental gaseous mercury flux at the water/air interface over the Negro River basin, Amazon, Brazil[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **368**(1): 189-198.
- [21] Miriam B O M, Wanderley R C, Fernando J P B, *et al.* An assessment of Hg pollution in different goldmining areas, Amazon Brazil[J]. *Science of the Total Environment*, 1995, **175**(2): 127-140.
- [22] 王宁, 朱颜明, 盛连喜, 等. 松花江上游苇沙河河段中国林蛙的汞污染[J]. *科学通报*, 2005, **50**(15): 1589-1593.
- [23] 王宁, 朱颜明. 松花湖水源地重金属非点源污染调查[J]. *中国环境科学*, 2000, **20**(5): 419-421.
- [24] 万奇, 冯新斌, 郑伟, 等. 长白山地区大气气态总汞含量的季节性特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 296-298.
- [25] Alexandra S, William S, Jan B, *et al.* Atmospheric mercury concentrations; measurements and profiles near snow and ice surfaces in the Canadian Arctic during Alert 2000 [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(15): 2653-2661.
- [26] Ebinghaus R, Kock H H, Coggins A M, *et al.* Long term measurements of atmospheric mercury at Mace Head, Irish west coast, between 1995 and 2001 [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(34): 5267-5276.
- [27] Lamborg C H, Fitzgerald W F, Donnell J O, *et al.* A non-steady state compartmental model of global-scale mercury biogeochemistry with interhemispheric atmospheric gradients[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, **66** (7): 1105-1118.
- [28] 邢登华, 梁成华, 王少峰, 等. 长白山北坡森林土壤汞的含量和形态分布[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(1): 106-111.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 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

国内外公开发刊