

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,方继东,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)

积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征

张刚^{1,2}, 王宁^{1,2*}, 艾建超¹, 张蕾³, 杨净¹, 刘子琪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. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘要: 位于松花江上游流域的夹皮沟金矿曾是我国采金量最大的矿区, 广泛使用的混汞法提金工艺导致了严重的区域环境介质汞污染。为研究稳定性季节积雪及融雪控制过程土壤(雪)大气间汞交换通量特征, 选择区域内典型“山-谷”地形结构单元, 沿坡面等距进行布点, 使用动态通量箱法测定了各采样点土壤(雪)大气间汞交换通量, 使用塞曼效应汞分析仪(LUMEX Zeeman RA915⁺)测定了各采样点近地面(0~150 cm)垂直方向上大气汞浓度分布, 分析了同步气象因子、积融雪控制下地表性质和近地面大气汞的垂直分布各因素对土壤(雪)大气间汞交换通量特征的影响。结果表明, 冬季积雪和融雪期间, 大气中汞均有沿山坡向谷底汇集的趋势, 在积雪冷源性下垫面所致逆温层控制下, 汞交换通量表现为明显的由大气向土壤(雪)的沉降过程。融雪期间雪融后地表土壤大气间汞交换通量表现为释放与沉降过程交替, 仍然积雪地表大气间汞交换通量沉降水平明显弱于积雪期。分析土壤(雪)大气间汞交换通量与其影响因素间关系发现, 积雪期土壤(雪)大气间汞交换通量与大气汞浓度和大气温度间均具有显著的负线性相关关系; 融雪期土壤(雪)大气间汞交换通量与大气汞浓度间具有明显的负线性相关关系, 与大气温度间具有正线性相关关系; 雪融后裸露土壤大气间汞交换通量与地温间呈现一定的正线性相关关系。

关键词: 大气汞; 汞交换通量; 动态通量箱; 积雪融雪; 金矿

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0468-08

Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control

ZHANG Gang^{1,2}, WANG Ning^{1,2}, AI Jian-chao¹, ZHANG Lei³, YANG Jing¹, LIU Zi-qi¹

(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. School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Jiapigou gold mine, located in the upper Songhua River, was once the largest mine in China due to gold output, where gold extraction with amalgamation was widely applied to extract gold resulting in severe mercury pollution to ambient environmental medium. In order to study the characteristics of mercury exchange flux between soil (snow) and atmosphere under the snow retention and snow melting control, sampling sites were selected in equal distances along the slope which is situated in the typical hill-valley terrain unit. Mercury exchange flux between soil (snow) and atmosphere was determined with the method of dynamic flux chamber and in all sampling sites the atmosphere concentration from 0 to 150 cm near to the earth in the vertical direction was measured. Furthermore, the impact factors including synchronous meteorology, the surface characteristics under the snow retention and snow melting control and the mercury concentration in vertical direction were also investigated. The results are as follows: During the period of snow retention and melting the air mercury tends to gather towards valley bottom along the slope and an obvious deposit tendency process was found from air to the earth's surface under the control of thermal inversion due to the underlying surface of cold source (snow surface). However, during the period of snow melting, mercury exchange flux between the soil and atmosphere on the surface of the earth with the snow being melted demonstrates alternative deposit and release processes. As for the earth with snow covered, the deposit level of mercury exchange flux between soil and atmosphere is lower than that during the period of snow retention. The relationship between mercury exchange flux and impact factors shows that in snow retention there is a remarkable negative linear correlation between mercury exchange flux and air mercury concentration as well as between the former and the air temperature. In addition, in snow melting mercury exchange flux is remarkably negatively linearly correlated to air mercury concentration and positively linearly correlated to air temperature. Furthermore, there is a general positive linear correlation between mercury exchange flux and soil temperature on the surface of earth after snow melting.

Key words: air mercury; mercury exchange flux; dynamic flux chamber; snow retention and snow melting; gold mine

收稿日期: 2012-04-08; 修订日期: 2012-05-18

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(09QNJ024)

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

汞是全球性污染物^[1],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 0.5 ~ 2 a^[3]. 大气作为重要的汞库的同时也是汞进行迁移的重要通道^[4]. 土壤也是最重要的自然释汞源之一^[5,6]. 研究土壤和大气环境中的汞以及土壤大气间汞交换通量等汞污染特征,是了解全球汞地球化学循环的重要前提. 国外对于汞矿和金矿开采区周边汞污染的报道很多^[7,8],应用动态通量箱法测定土壤大气间汞交换通量也有应用报道^[9,10]. 在国内,冯新斌^[11]、王少峰^[12~14]、侯亚敏^[15]和付学吾^[16]等对贵州汞矿化带地区土/气汞交换通量进行了深入研究和系统报道;文献[17~19]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;王起超等^[20]对吉林省长春市汞大气/土壤界面交换通量进行了研究;但在我国北方金矿开采地区,冬季稳定季节积雪及融雪过程控制下土(雪)/气间汞交换通量及其影响因素方面的研究尚未见报道.

夹皮沟金矿是中国重要金矿带之一,早在 1870 年和 1974 年前后,两次成为我国采金量最大的矿区^[21]. 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^[22]. 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研究工作^[23,24],研究区域内

地表状况季节性差异明显,尤其冬季地表处于积雪和融雪控制下,土壤大气间汞交换通量过程明显区别于其他季节,通过本研究了解我国北方混汞法提金矿区冬季积雪融雪过程控制下土壤大气汞交换通量特征,以期探讨汞在特定生态系统内的环境地球化学循环过程提供科学依据.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于我国北方夹皮沟金矿开采区(图 1), $127^{\circ}15' \sim 127^{\circ}30'E$, $42^{\circ}41' \sim 43^{\circ}00'N$ 以内;矿区处于辉发河深断裂带东南侧,系长白山的西北部,地势东南部高,西北部低,为典型的低山丘陵区,由东南逐渐向西北倾斜,地势起伏,沟谷纵横. 区域内林地资源和矿产资源丰富;耕地面积 2 260 hm^2 ,多为坡耕地;林地面积 106 215 hm^2 ,多为人工与自然混交林,森林覆盖率达 90%. 研究区域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 $^{\circ}C$,年降雨量 650 ~ 850 mm ;山区无霜期 110 d 左右,最大冻土深度 197 cm ;区域多低温、冷冻、冰雹和霜冻等气象灾害;冬季具有稳定的季节性积雪期(4 ~ 5 个月);年平均风速 2.2 $m \cdot s^{-1}$,主导风向为西南,频率为 41.3%,其次是西,频率为 21.7%.

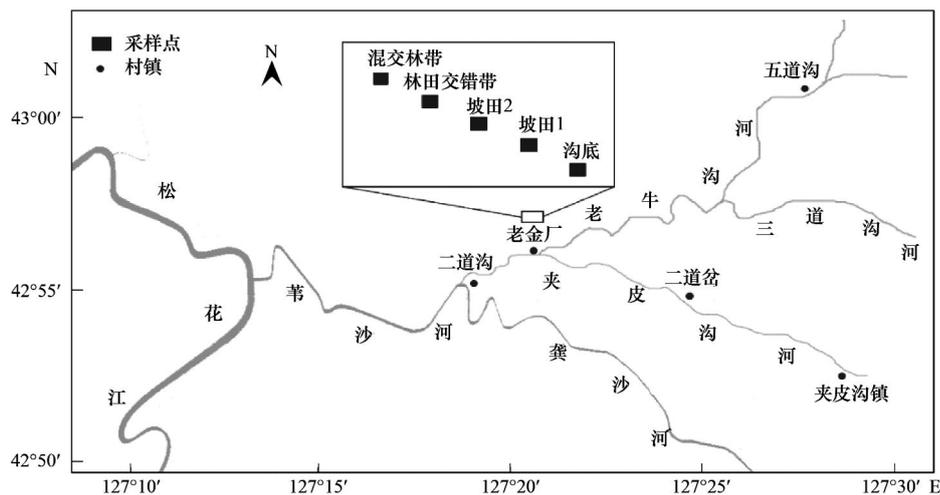


图 1 研究区域地理位置及采样点分布

Fig. 1 Sampling sites and location in sketch map of study area

夹皮沟金矿 1821 年起正式土法采金;区域内北西西向的夹皮沟-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 ;1949 年以来已为国家开采出了约 80 t 黄金. 1940 ~ 2008 年矿区盛行混汞法提金工艺,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 $kg \cdot a^{-1}$,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^[23,24];先前的研究发现^[23,25],金矿区内环境介质及植物体内汞含量水平依次达到:土壤(1 ~ 10 $mg \cdot kg^{-1}$)、大气($10^2 \sim$

$10^3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)、水体 ($1 \sim 10^2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)、沉积物 ($1 \sim 10^3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、植物根 ($10^{-1} \sim 10^2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、植物茎 ($10^{-1} \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)，矿区环境汞污染问题严重。我国 1996 年开始禁用混汞-浮选法提金以后，夹皮沟金矿也逐步进行了技术改造，2006 ~ 2008 年全泥氰化法成为替代工艺。目前区域内除夹皮沟金矿 (5 个分矿) 外，有大线沟金矿及个体或合作开采的小金矿十几处。

1.2 采样及测定方法

1.2.1 采样点布设

研究区域内山谷间相对高差多集中在 80 ~ 100 m 左右，典型地形单元一般为“M”型两山夹沟结构；土地利用格局由谷底向山顶一般为沟底土路，山腰坡耕田 (玉米)，山顶混交林。本研究选择夹皮沟金矿开采区老金厂 (现为镇政府所在地) 正北向 1.5 km 处典型山谷地形单元，由沟底 ($127^\circ 21' 206'' \text{ E}$, $42^\circ 54' 933'' \text{ N}$, 355.4 m) 沿斜坡向山顶，按 20 m 垂向等距依次设置 5 个采样点：沟底、坡田 1、坡田 2、林田交错带和混交林带，见图 1。分别于 2011 年 12 月 (积雪期) 和 2012 年 3 月 (融雪期) 每天按顺序间断性连续测定了各采样点土壤 (雪面) 与大气间汞交换通量。此外，为了研究地形条件及大气汞垂向浓度梯度对界面间汞交换通量的影响，测定了各采样点近地面垂直方向上 0、50、100 和 150 cm 这 4 个层次的大气汞含量，并同步测定了土壤水分、土壤温度，以及太阳辐射强度、大气温度和平均风速等环境要素。

1.2.2 样品采集与测定

使用塞曼效应汞分析仪 (LUMEX Zeeman RA915⁺)，水平和垂向上均按照由低向高顺序连续测定了各采样点大气汞含量，垂向上每个层次连续测定 5 min，上下午各循环重复 2 次，取均值作为各点各层次大气汞浓度。土壤 (雪面) 与大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，方法同文献 [11 ~ 13, 15]。使用轻便气象综合观测仪 (DZM2-1 型) 同步按 1 min 时间分辨率测定太阳辐射、大气温度、风速等气象因子；地温表法测定土壤温度。

1.3 土壤大气汞交换通量计算

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， $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ； c_0 为流出通量箱的气态汞含量， $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ； c_i 为进入通量箱的气态汞含量， $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ； Q 为通量箱内的空气流速， $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ； A 为通量箱的底面积， m^2 。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^[15-17]；详细计算过程同文献 [12 ~ 17]。

2 结果与讨论

2.1 积雪控制下土壤 (雪) 大气间汞交换通量

2.1.1 积雪条件下土壤 (雪) 大气间汞交换通量

研究区域 11 月初雪后，地表逐渐为积雪所覆盖，积雪期间雪层厚度平均可达 40 cm，除植被等地物外，地表处于相对均质的雪覆状态。积雪期间各采样点土壤 (雪面) 大气间汞交换通量测定结果见表 1，研究期间各采样点土壤大气汞交换通量表现为明显的由大气向土壤 (雪面) 的沉降过程控制，林田交错带、坡田 2 和沟底 3 处采样点土壤大气间汞交换通量依次为 (-3.82 ± 8.92)、(-21.32 ± 15.83) 和 (-23.82 ± 18.04) $\text{ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。

积雪具有良好的保温作用，研究期间雪层下土壤温度低于 0°C 但高于气温，植被和土壤等自然释汞过程微弱，推测向地表沉降的大气汞一部分来自附近城镇村庄等人类聚居区生活过程化石燃料或生物质燃烧释放^[26]，此外还有来自随大气环流远距离输送的异地汞沉降^[27]。

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

采样点	采样时间	平均值	最大值	最小值	方差	释放/平衡/沉降
林田交错带	2011-12-15 T07:00 ~ 17:00	-3.82	15	-22.5	8.92	31/13/12
坡田 2	2011-12-16 T07:00 ~ 17:00	-21.32	0	-67.5	15.83	0/1/55
沟底	2011-12-17 T07:00 ~ 17:00	-23.82	0	-97.5	18.04	0/2/54

图 2(a) 中，林田交错带土壤大气间汞交换通量上午以沉降为主，下午逐步变为释放，存在较为明显的沉降和释放交替的过程。图 2(b) 和图 2(c) 中，坡田 2 和沟底土壤大气间汞交换通量始终表现为由大

气指向土壤的沉降过程，沉降峰值均出现在中午前。在积雪和逆温共同控制下，地势较高处大气具有较高的太阳辐射能量收支水平，研究发现地表与大气间汞交换通量水平与大气能量收支呈现一定的一致

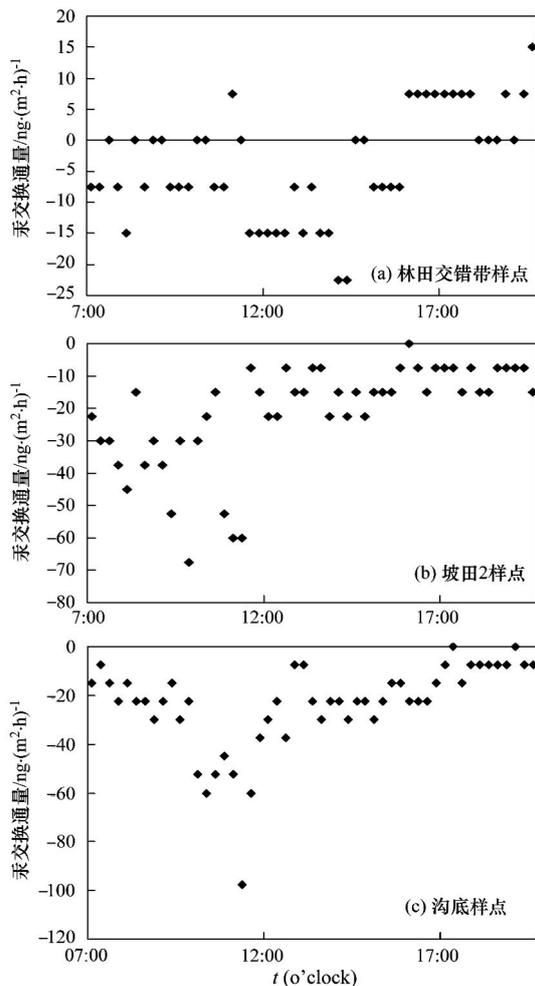


图2 积雪条件下各采样点土壤大气间汞交换通量

Fig. 2 Mercury exchange flux between soil and air of all sampling sites in snow retention

性. 日出后, 夜间形成的辐射逆温层逐渐消退, 大气逐渐增温, 但由于积雪冷源下垫面的影响, 随着太阳辐射强度增强, 开始出现积雪型逆温层结, 在逆温层控制下, 近地面累积的大气汞发生了比较强烈的由大气向雪面的沉降过程, 直至各采样点均出现汞交换通量的沉降峰区; 待大气继续增温, 近地面大气

混合趋于平衡, 逆温层逐渐变薄, 气流相对运动减弱, 各采样点地表大气汞交换通量沉降趋缓, 在林田交换带地势较高处, 汞交换通量已由沉降转为释放, 坡田和沟底地势较低处, 却仍受沉降过程控制, 直至日落. Wang 等^[28]于 2003 ~ 2004 年 12 月(冬季)对我国贵州省务川汞矿区土壤大气间汞交换通量的研究发现, 较高的大气汞浓度水平明显抑制土壤向大气的释汞过程, 土壤大气间释汞通量具有明显的负线性相关关系. 本研究区域大气汞浓度水平明显低于务川汞矿区, 但在冬季也有相同的土壤大气间汞交换通量特征, 该过程由山区特殊山谷地形所致积雪型逆温层结所控制. 此外, 1995 年 Schroeder 等^[29]首先在加拿大 Alert 地区发现了大气汞亏损现象 (atmospheric mercury depletion events, AMDEs), 2000 年 Ebinghaus 等^[27]在南极地区也发现同样现象. AMDEs 是指极地春季太阳升起时大气中气态单质汞浓度急剧下降而活性气态汞浓度急剧上升的现象^[29-31], 这一过程显著加速了大气汞的沉降通量, 而地表积雪中总汞浓度在亏损过程中表现为先上升后迅速下降, 表明积雪场只是大气汞亏损后汞的临时储存库. 本研究也同样发现了类似现象, 表明在季节性积雪场控制下, 也存在 AMDEs 过程, 但其机制和详细过程尚需进一步进行实验予以分析和验证.

2.1.2 积雪条件下近地面大气汞浓度及气象要素

研究期间各采样点近地面大气汞浓度见表 2, 分析沟底处垂直方向 0 ~ 150 cm 各层次大气汞浓度均值, 依次为 4、5.41、7.26 和 7.41 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 呈现随高度增加而增加趋势, 明显高于坡田 2 和林田交错带两处对应层次大气汞浓度. 坡田 2 样点垂向各层次大气汞浓度分布与沟底类似, 仅 150 cm 层次稍低于 100 cm 层次. 林田交错带各层次大气汞浓度随垂向高度增加而下降, 其中 0 cm 层次高于下方坡田 2 对应层次, 其余各层次均为最低.

表 2 积雪条件下各采样点近地面 0 ~ 150 cm 各层次大气汞浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Atmospheric mercury concentration in every layer from 0 cm to 150 cm of all the sampling points in the conditions of snow retention/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

监测点	0 cm			50 cm			100 cm			150 cm		
	范围	均值	标准差	范围	均值	标准差	范围	均值	标准差	范围	均值	标准差
林田交错带	2 ~ 6	2.96	1.16	0 ~ 4	1.89	0.80	1 ~ 5	2.16	1.08	1 ~ 4	2.07	0.62
坡田 2	0 ~ 4	2.30	1.23	0 ~ 6	2.63	1.98	0 ~ 6	2.81	1.90	0 ~ 5	2.78	2.14
沟底	1 ~ 9	4	2.72	2 ~ 12	5.41	4.01	2 ~ 17	7.26	6.88	2 ~ 19	7.41	7.73

大气中气态汞 (Hg^0) 密度明显高于大气密度, 密度特征导致大气汞具有向低处汇集趋势. 表 2 表明, 沿斜坡“林田交错带-坡田-沟底”随采样点相对高度下降, 大气汞浓度分布整体符合汇向低洼处趋势; 但在各采样点垂向上, 仅林田交错带具有上述

分布特征; 沟底和坡田 2 两处具有相反分布趋势. 积雪期间, 各采样点地表为积雪所覆盖(雪层平均厚度约 400 mm), 形成性质较为均质的冷源型下垫面, 受下垫面积雪的影响, 近地面大气呈现一定程度的逆温层结(见表 3), 在近地面 0 ~ 150 cm 范围

表 3 积雪条件下各采样点近地面 0~150 cm 各层次气象要素

Table 3 Meteorology factors in every layer from 0 cm to 150 cm of all the sampling points in the conditions of snow retention

监测点	0 cm			50 cm			100 cm			150 cm		
	照度 /Lm·m ⁻²	风速 /m·s ⁻¹	T/°C									
林田交错带	21 600	—	-11.1	23 000	0~2	-11.0	26 700	0~2	-10.9	31 800	0~2	-10.7
坡田 2	99 600	—	-9.87	86 600	2~3	-10.4	84 400	4~5	-10.2	83 600	6~7	-10.2
沟底	68 400	—	-11.3	65 700	3~4	-11.5	63 800	4~6	-10.8	58 800	6~9	-10.6

内表现明显,且沿“沟底-坡田-林田交错带”由山脚到山顶整体垂向上也处于较为明显逆温层控制下,迫使近地面大气汞发生累积,各采样点间大气汞浓度表现为随地势降低升高趋势.在各采样点内部,累积的大气汞表现为由大气向地表(雪面)的较为强烈的沉降作用,进而导致大气汞随高度层次降低浓度降低现象,但在逆温层控制下,垂直方向上温度和浓度的驱动,导致大气汞向下层空气传递,使地表和大气间汞同样沉降过程更为显著,这样的循环过程在沟底和坡田地势较低处表现突出.各采样点间表现出的大气温度层结(正态与逆态气温分布)源于太阳辐射能的收支差异,在积雪冷源性下垫面的干扰下,坡面地形导致各采样点热力差异明显,从而沿山坡形成了较为规律的气温层结和局地气流运动,这是积雪期间土壤(雪)大气间汞交换通量的主要驱动因素.

2.2 融雪条件下近地面大气汞浓度与土壤大气汞交换通量

2.2.1 融雪条件下土壤大气界面汞交换通量

冬季积雪期末,大气温度回升至 0°C 附近,地表积雪由山顶和谷底两端逐渐向山腰处消融,积雪融水沿坡面凹沟汇向沟底低处,终入谷底低处河流.融雪期间,沿坡面所选 5 个采样点地表在同

一时刻具有不同的地表覆盖特征,混交林下为疏松落叶层(5~10 cm),林田交错带为裸土,坡田 2 地表积水,坡田 1 地表积雪,沟底为积雪、冰面和积水所镶嵌.融雪期间各采样点土壤大气间汞交换通量与积雪期也表现出明显不同的特征,见表 4,林田交错带、坡田 2、坡田 1 和沟底四处采样点土壤大气间汞交换通量依次为(0.97 ± 5.65)、(-10.41 ± 18.68)、(-0.97 ± 6.36)和(-0.69 ± 10.43) ng·(m²·h)⁻¹.

融雪过程中,积雪融水由林田交错带向沟底部汇集,沿坡随高度降低,土壤湿润程度逐渐增加;林田交错带地表较为干燥,土壤大气间汞交换通量存在明显的释放与沉降交替过程;坡田 2 地表较为湿润有积水,仍表现为沉降,但通量交换水平已减弱至积雪期的一半水平;坡田 1 仍有积雪,但积雪结构和性质已明显不同于积雪期,汞交换通量表现为微弱的沉降趋势;在沟底部地表与冰雪水共存的状态,汞交换通量与积雪期(-23.82 ± 18.04) ng·(m²·h)⁻¹的水平相比降低一个数量级,但仍为沉降趋势.在积融雪交替控制状况下,汞在地面/雪面/冰面与大气、土壤与大气之间进行着活跃的迁移,特征明显不同于积雪期,也是季节性积雪地区特有的界面汞地球化学循环过程.

表 4 融雪期各样点土壤大气间汞交换通量统计结果/ng·(m²·h)⁻¹

采样点	采样时间	平均值	最大值	最小值	方差	释放/平衡/沉降
林田交错带	2012-03-15 T07:00~17:00	0.97	15	-7.5	5.65	14/29/10
坡田 2	2012-03-15 T07:00~17:00	-10.41	30	-52.5	18.68	13/8/32
坡田 1	2012-03-16 T07:00~17:00	-0.97	15	-15	6.36	10/24/19
沟底	2012-03-16 T07:00~17:00	-0.69	22.5	-22.5	10.43	18/11/24

图 3(a)中,林田交错带土壤大气间汞交换通量表现为较为明显的“释放-平衡-沉降”交替过程,推测汞交换通量受到近地面较为活跃的气流运动和底层大气汞浓度梯度差异交替影响所致.图 3(b)和图 3(d)中,坡田 2 和沟底样点在午后时段有较为明显的土壤向大气汞释放通量的峰值区,其间坡田 1 样点具有相似的峰值区,见图 3(c),但时间后移 2 h.

张成等^[17]通过室内模拟实验研究土壤湿度和浇水对紫色土/气界面汞交换通量的影响,发现随着土壤含水量的增加,土/气界面汞交换通量有增加的趋势,在土壤湿度接近土壤饱和含水量的 60% 时达到最大,但随着土壤湿度继续增加,汞通量急剧下降.本研究中,坡田 2 以下采样点融雪期间土壤含水量白天处于过饱和状态,推测各采样点地表覆水、雪

和冰交错的复杂下垫面性质及所处坡面位置获得太阳辐射差异共同控制着各处土壤大气间汞交换通量

过程,此外,积雪场控制下 AMDEs 现象亦有所贡献^[33],但过程与机制尚需实验验证。

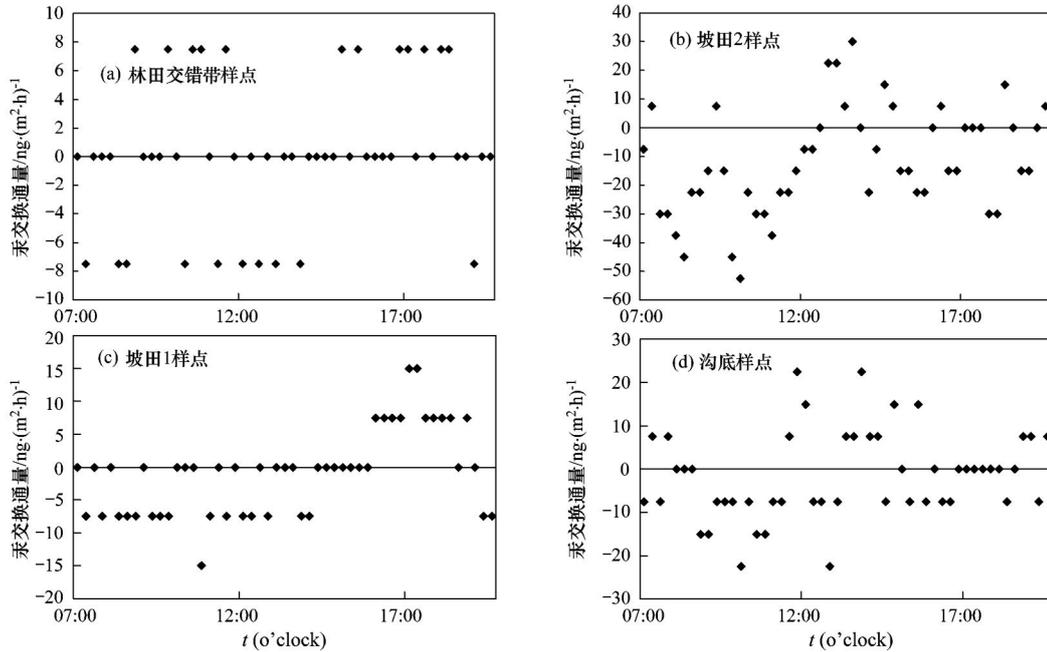


图3 融雪条件下各采样点土壤大气间汞交换通量

Fig. 3 Mercury exchange flux between soil and air of all sampling sites in snow melting

2.2.2 融雪条件下近地面大气汞浓度及气象要素

各采样点近地面垂直方向上 0 ~ 150 cm 各层次大气汞浓度监测结果见表 5。在最低点沟底处,垂直方向 0 ~ 150 cm 各层次大气汞浓度均值依次为 5.06、10.22、10.89 和 14.61 ng·m⁻³,同积雪期间具有一致的空间分布特征;坡田 2 在垂向上具有不规律的梯度分布,0 cm 层次低于 50 cm 层次,但均明显高于 100 cm 和 150 cm 层次;混交林下和坡田

1 大气汞浓度随高度增加呈现下降趋势;林田交错带大气汞浓度随高度增加也略呈下降趋势,其中 150 cm 处稍高于 100 cm,但浓度水平相近。

融雪期间积雪消退,地表能够直接获得太阳辐射能,地表覆物差异导致坡面各采样点太阳辐射收支状况不均,这与积雪期均质的雪面不同,其也导致近地面气流发生更为复杂和频繁的相对运动(见表 6)。坡面仅坡田1和沟底处仍存在局部的冷源性下

表 5 融雪条件下各采样点近地面 0 ~ 150 cm 各层次大气汞浓度/ng·m⁻³

Table 5 Atmospheric mercury concentration in every layer from 0 cm to 150 cm of all the sampling points in the conditions of snow melting/ng·m⁻³

监测点	0 cm			50 cm			100 cm			150 cm		
	范围	均值	标准差	范围	均值	标准差	范围	均值	标准差	范围	均值	标准差
混交林下	1~7	3.89	1.75	1~5	2.78	1.11	1~3	2	0.69	0~3	1.56	0.86
林田交错带	3~7	4.89	0.96	2~8	4.33	1.64	2~6	3.5	1.34	2~6	3.67	0.91
坡田 2	2~4	3.06	0.54	2~4	3.11	0.58	1~5	1.78	1.17	1~2	1.22	0.43
坡田 1	2~5	3.44	0.78	2~4	2.83	0.71	0~4	2.44	1.20	1~2	1.78	0.43
沟底	3~6	5.06	0.99	8~13	10.22	1.26	9~12	10.89	0.96	12~17	14.61	1.42

表 6 融雪条件下各采样点近地面 0 ~ 150 cm 各层次气象要素

Table 6 Meteorology factors in every layer from 0 cm to 150 cm of all the sampling points in the conditions of snow melting

监测点	0 cm			50 cm			100 cm			150 cm		
	光照度 /lx	风速 /m·s ⁻¹	T/°C	光照度 /lx	风速 /m·s ⁻¹	T/°C	光照度 /lx	风速 /m·s ⁻¹	T/°C	光照度 /lx	风速 /m·s ⁻¹	T/°C
混交林下	3 370	—	4.8	3 650	0	4.6	3 770	0~1	4.6	3 980	2~3	4.6
林田交错	6 560	—	5	6 280	0~1	4.8	6 890	0~1	4.2	6 860	1~2	4.2
坡田 2	10 830	—	4.4	11 660	0~1	4.6	11 830	0~1	4	13 000	1~2	4.4
坡田 1	7 320	—	2.8	7 440	1~3	2.9	8 140	4	3	8 780	3~4	3.2
沟底	10 090	—	3.4	10 700	2~4	4.4	11 630	4~5	5	11 770	6~9	5.4

垫面,近地面大气仍存在明显的逆温层结;坡田 2 为水过饱和状态的土壤,近地面大气具有不稳定的温度层结,而林田交错带和混交林带两处样点,大气温度具有正常的垂向温度梯度分布特征。

沿坡面以坡田 2 处为分界,由此向上,受垂向和坡向上温差驱动,气流运动较为活跃,但积雪融尽后较为活跃的裸土释汞补偿了近地面大气汞,使垂向上大气汞呈现距离地面越近,浓度越大的趋势,这与积雪期具有明显的不同.由坡田 2 向下,受积雪所致逆温层结影响,大气相对稳定,在地势较低的沟底处气流交汇,仍发生大气汞的累积,其浓度水平高于积雪期是由于融雪期间地表裸露程度增加,土壤释汞过程增强所致,先前研究发现老金厂春季(2009 年 4 月)大气汞浓度水平为 $(32.27 \pm 20.29) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[34],即积雪融化后的春季,地表多处于裸露,土壤等释汞过程成为大气汞的主要来源,也导致了区域大气汞

水平的提高。

2.3 土壤大气间汞交换通量及其影响因素间相关关系

积雪期和融雪期间土壤和大气间汞交换通量与大气汞浓度(取通量箱入口处大气汞浓度)、大气温度(0 cm 层次)及太阳辐射强度(0 cm 层次)间的皮尔逊相关系数及差异性显著度 P 值见表 7,分析表明,积雪期间各采样点土壤(雪)大气间汞交换通量与大气汞浓度和大气温度具有显著负线性相关关系,与太阳辐射强度没有明显相关关系;融雪期间各采样点土壤(雪)大气间汞交换通量与大气汞浓度也具有显著负线性相关关系,坡田 2 以下与大气温度具有正相关关系,裸露地表地温与土壤释汞通量间呈现一定的正相关性.研究区域冬季积雪期间和融雪过程中,近地面大气汞浓度和大气温度层结明显地影响着土壤(雪)与大气间汞的交换过程。

表 7 积雪融雪控制下土壤大气间汞交换通量与影响因素间 Pearson 相关系数与 P 值

Table 7 Pearson's correlation coefficient and P -value between mercury exchange flux at the interface of soil and atmosphere and the impact factors under the snow retention and snow melting

	采样点	大气汞浓度	大气温度	太阳辐射强度	地表温度
积雪期	林田交错带	-0.83, $P < 0.001$	-0.52	0.31	—
	坡田 2	-0.88, $P < 0.001$	-0.67	0.24	—
	沟底	-0.66, $P < 0.001$	-0.62	0.38	—
融雪期	林田交错带	-0.72, $P < 0.001$	0.44	0.32	0.61
	坡田 2	-0.73, $P < 0.001$	0.77	0.40	0.58
	坡田 1	-0.70, $P < 0.001$	0.76	0.22	—
	沟底	-0.63, $P < 0.001$	0.69	0.29	—

3 结论

在积雪融雪控制下,研究区域近地面大气汞浓度分布和土壤(雪)大气间汞交换通量过程具有明显的冬季季节特征.冬季积雪融雪期,大气汞均有沿山坡向谷底汇集的趋势,在积雪冷源性下垫面所致逆温层结影响下,汞交换通量表现为明显的由大气向土壤(雪)的沉降过程;进入融雪期后,融雪后的地表表现为释放与沉降交替的汞通量交换过程,仍有积雪覆盖的地表土壤与大气间汞交换通量沉降过程明显弱于积雪期间.分析土壤(雪)大气间汞交换通量及其影响因素间关系发现,积雪期土壤(雪)大气间汞交换通量与大气汞浓度和大气温度间均具有显著的负线性相关关系;融雪期土壤(雪)大气间汞交换通量与大气汞浓度间具有明显的负线性相关关系,与大气温度间具有正线性相关关系;雪融后裸露的地表土壤大气间汞交换通量与地表温度呈现一定的正线性相关关系。

致谢:感谢国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室(东北师范大学)对本研究的支持.东北师范大学人文学院英语学院崔丹副教授对中英文部分提供了帮助,特此致谢!

参考文献:

- [1] Lindqvist O, Johansson K, Bringmark L, *et al.* Mercury in the Swedish environment-recent research on causes, consequences and corrective methods [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1991, **55**(1-2): 1-261.
- [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] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury-an overview [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(5): 809-822.
- [4] Streets D G, Hao J M, Wu Y, *et al.* Anthropogenic mercury emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(40): 7789-7806.
- [5] Kim K H, 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.

- [6] Gustin M S, 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.
- [7] Žižek S, Horvat M, Gibičar 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.
- [8] 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.
- [9] Wallschläger D, Turner R R, London J, *et al.* Factors affecting the measurement of mercury emissions from soils with flux chambers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(D17): 21859-21871.
- [10] Xiao Z F, Munthe J, Schroeder W H, *et al.* Vertical fluxes of volatile mercury over forest soil and lake surfaces in Sweden[J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 1991, **43B**(3): 267-279.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王少峰, 冯新斌, 仇广乐, 等. 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): 19-23.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 刘潇, 张成, 朱金山, 等. 土壤湿度和浇水对紫色土土/气界面汞释放通量的影响[J]. *环境化学*, 2011, **30**(8): 1509-1513.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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*, 2004, **27**(4): 298-305.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 邹婷婷, 王宁, 张刚, 等. 松花江上游金矿开采区环境中汞污染的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2228-2233.
- [26] Wan Q, Feng X B, Lu J L, *et al.* Atmospheric mercury in Changbai Mountain area, northeastern China I. The seasonal distribution pattern of total gaseous mercury and its potential sources[J]. *Environmental Research*, 2009, **109**(3): 201-206.
- [27] Ebinghaus R, Kock H H, Temme C, *et al.* Antarctic springtime depletion of atmospheric mercury[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1238-1244.
- [28] Wang S F, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Mercury concentrations and air/soil fluxes in Wuchuan mercury mining district, Guizhou province, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(28): 5984-5993.
- [29] Schroeder W H, Anlauf K G, Barrie L A, *et al.* Arctic springtime depletion of mercury [J]. *Nature*, 1998, **394**(6691): 331-332.
- [30] Xie Z Q, Sander R, Pöschl U, *et al.* Simulation of atmospheric mercury depletion events (AMDEs) during polar springtime using the MECCA box model[J]. *Atmosphere Chemistry and Physics*, 2008, **8**(23): 7165-7180.
- [31] 谢周清, 孙立广, 王新明, 等. 北极大气中汞亏损与海冰演变[J]. *极地研究*, 2004, **16**(3): 221-228.
- [32] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. *大气环境化学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [33] 朱伟, 冯新斌, 仇广乐, 等. 极地大气汞亏损研究进展[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 857-864.
- [34] 张刚, 王宁, 王媛, 等. 松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征[J]. *环境科学*, 2012, **32**(9): 2953-2959.

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 δ ¹³ 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