

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O₃ 浓度变化 王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)

南京北郊黑碳气溶胶的来源解析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何镓祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)

电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)

广西玉林市大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析 黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)

青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征 张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)

大气环境分区管理: 以广东省为例 杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)

基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例 温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁潇蕾, 苗松 (57)

基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ¹⁵N 和 δ¹⁸O 模拟 王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)

程河流域非点源污染负荷估算及其控制对策 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)

陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)

天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价 张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)

西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响 王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)

以 HKUST-1 为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)

黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险 姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)

淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征 周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)

磷酸盐对铁锰复合氧化物膜去除地表水中氨氮的影响 卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)

K₂S₂O₈ 强化 g-C₃N₄ 薄膜光电催化降解 Cu(CN)₂ 并同步回收 Cu 党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)

以 HKUST-1 为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B 蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)

氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能 马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)

铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除 曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)

水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态 马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)

阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响 任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)

典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征 赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)

水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响 许雯佳, 戚小英 (202)

环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性 戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)

AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟 曹特特, 王林, 李咏梅 (219)

磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)

碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)

容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响 吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)

DNBF-O₃-GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物 钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)

交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)

纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响 周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)

高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用 韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)

浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析 刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)

去除城市生活污水中有机络合态金属强化其厌氧生物制气 卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)

污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价 王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)

初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH₄ 和 N₂O 通量日变化特征 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)

3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响 武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)

有机替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N₂O 排放的影响 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)

拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³C-CO₂ 脉冲标记 陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)

陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征 兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)

不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)

秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)

县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估 李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)

基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测 曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)

沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)

磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)

控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响 封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)

典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异 李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)

松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征 张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)

硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响 代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)

长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响 王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)

海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较 张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈焯, 付璐璐, 王勋功 (438)

鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系 袁丽娟, 廖且根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)

畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征 张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)

烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响 章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

《环境科学》征稿简则(17) 《环境科学》征订启事(26) 信息(160, 255, 338)

松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征

张曼胤^{1,2,4}, 李梦洁^{1,2,4}, 崔丽娟^{1,2,3*}, 王贺年^{1,2,4}, 郭子良^{1,2,4}, 徐卫刚^{1,2,4}, 魏圆云^{1,2,4}, 杨思^{1,2,4}, 肖红叶^{1,2,4}

(1. 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091; 2. 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091; 3. 北京汉石桥湿地生态系统国家定位观测研究站, 北京 101399; 4. 河北衡水湖湿地生态系统国家定位观测研究站, 衡水 053000)

摘要: 为研究金矿开采区周围芦苇 (*Phragmites australis*) 叶片汞含量的分布特征、影响因素及其与其它环境要素的相关性, 2016 年 6 月 (夏季) 和 9 月 (秋季) 在位于松花江上游的夹皮沟金矿开采区内采集芦苇叶片、土壤、水体样本测定汞含量, 同步测定大气汞浓度, 并通过单因子污染指数法确定芦苇叶片汞污染等级, 分析芦苇叶片汞含量与环境要素汞含量的相关关系. 结果表明, 在空间分布上, 芦苇叶片汞含量以及土壤、水体汞含量均随离夹皮沟金矿距离的加大而逐渐衰减, 大气汞浓度空间分布特征不明显; 在时间分布上, 芦苇叶片汞重污染地区夏季汞含量低于秋季, 芦苇叶片汞轻污染地区夏季汞含量略高于秋季, 而大气汞、土壤汞含量均为夏季高于秋季; 各环境要素对芦苇叶片汞含量的影响重要程度依次为: 土壤 > 大气 > 水体; 此外, 停止混汞法采金多年后, 夹皮沟金矿开采区汞源主要为土壤.

关键词: 松花江; 汞污染; 芦苇叶片; 环境要素; 特征

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0415-07 DOI: 10.13227/j.hjcx.201706252

Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream

ZHANG Man-yin^{1,2,4}, LI Meng-jie^{1,2,4}, CUI Li-juan^{1,2,3*}, WANG He-nian^{1,2,4}, GUO Zi-liang^{1,2,4}, XU Wei-gang^{1,2,4}, WEI Yuan-yun^{1,2,4}, YANG Si^{1,2,4}, XIAO Hong-ye^{1,2,4}

(1. Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Beijing 100091, China; 3. Hanshiqiao National Wetland Ecosystem Research Station, Beijing 101399, China; 4. Hebei Hengshuihu National Wetland Ecosystem Research Station, Hengshui 053000, China)

Abstract: At the Jiapigou gold mine of the Songhua River upstream, reed leaves (*Phragmites australis*), soil, and water samples were collected from June (summer) and September (autumn) 2016 for the determination of mercury. Moreover, the mercury concentrations in the air were determined synchronously. Furthermore, the level of mercury pollution in the reed leaves was determined by a single factor pollution index method, and the relationships among mercury concentrations in the reed leaves and environmental factors were analyzed to research the distribution characteristics, influencing factors, and correlations around the gold mining area. The results show that, in terms of spatial distribution, the mercury concentrations in reed leaves, soil, and water gradually decay with the distance from the gold mining area, and the spatial distribution of the mercury concentrations in the air was not obvious. Regarding a temporal distribution, the mercury concentrations in the reed leaves in summer were lower than those in autumn in the heavy pollution areas, while the distribution in the light pollution areas was the opposite, as the mercury concentrations of air and soil in summer were higher than those in autumn. The influence of environmental factors on the mercury concentrations in the reed leaves was soil > air > water. In addition, after stopping gold mining and processing using mercury, the mercury source in the area was the soil.

Key words: Songhua River; mercury pollution; reed leaves; environmental factors; characteristics

汞是一种有严重生物毒性的环境污染物, 具有持久性、易迁移性和高度生物富集性, 可通过被植物吸收利用而经食物链传递、累积, 直至危害人类健康. 混汞法提金是古老而普遍应用的选金方法^[1], 在黄金产业中具有重要地位, 直到 20 世纪 50 年代利用混汞法提取的金产量仍占世界总产量的 28% ~ 40%^[2]. 中国吉林、黑龙江两省的金矿, 多采用此种方法提金, 提金过程中大部分汞通过大气和废水进入环境中, 造成大气、河流水和沉积物的严重汞污染^[3], 使得松花江流域的汞污染曾受到环

境科学界的广泛关注^[4].

研究区域夹皮沟金矿开采区位于松花江上游, 自 1821 年开采黄金以来, 至今已有 190 余年的历史, 曾是我国采金量最大的矿区^[5,6]. 夹皮沟金矿长期使用混汞法提金, 对当地的环境带来了严重的汞

收稿日期: 2017-06-26; 修订日期: 2017-08-10

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFINT2014K05)

作者简介: 张曼胤 (1979 ~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为湿地生态学及湿地景观与规划设计, E-mail: cneco@126.com

* 通信作者, E-mail: lkyclj@126.com

污染问题,且有不少学者对此开展了研究^[3,6~9]. 目前,据官方报道推行氰化法提金工艺估算,该区域已停止混汞法提金技术 10 年以上,参与环境中物质循环的汞主要是历史开采以来积累在土壤、沉积物的汞. 因此,本研究分析了当地芦苇叶片、大气、土壤、水体汞含量的时间和空间分布特征,通过了解混汞法提金停止后区域内的汞污染时空分布特征,以及常年生长于汞污染严重土壤中的芦苇叶片汞含量的主导影响因子,以期探讨汞在植物体以及环境中的迁移与循环转化机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在松花江上游夹皮沟金矿开采区(127°16'~127°39' E,42°52'~42°56' N),位于吉林省桦甸市东南部. 地势为典型的低山丘陵区,东南高西北低,沟谷纵横;属于大陆性温带季风气候,四季分明,年平均气温 3.7℃,年平均降水量 728.1 mm;区域内森林资源、矿产资源丰富,具有三十余个大、中、小型金矿开采企业,其中位于夹皮沟镇老镇区的夹皮沟金矿(127°29' E,42°52' N)最为主要,且由于老镇区塌陷区广泛存在,镇政府已迁至老金厂办公^[5].

夹皮沟金矿自 1821 年开始使用土法采金^[5],1949 年国家成立夹皮沟黄金矿业总公司后(总部驻扎在夹皮沟镇老镇区)该地区每年的黄金产量均在 1 t 以上^[6]. 调查表明混汞法提取黄金的汞用量约 20 kg·a⁻¹,而夹皮沟金矿每年可开采矿石 2 000 t,其中 50%~60% 的汞通过点源或非点源途径进入水、土壤和大气环境中^[10,11]. 虽然夹皮沟金矿在 2006~2008 年已逐步以全泥氰化法替代了混汞法提金工艺^[9],但混汞法的长期应用也已对当地河流、土壤造成了严重污染.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 采样点布设

2016 年 6 月(夏季)、9 月(秋季),在夹皮沟金矿开采区沿松花江支流山麻河(也称夹皮沟河)向下游依次选择夹皮沟(JPG)、二道岔(EDC)、老金厂(LJC)、二道沟(EDG)、苇沙河(WSH)、岭前(LQ)设置 6 个样地,每个样地均沿河流 5 km 均匀布设 5 个采样点. 其中夹皮沟为正在开采的金矿;二道岔建有巨型金尾矿库;老金厂、二道沟是河流的汇合点,其中老金厂处汇入五道沟流入的水流,二道沟处汇入岭前流入的水流,这两处均是无汞污染地区. 每个区域沿河流流向随机布设采样点,采样

点分布如图 1 所示.

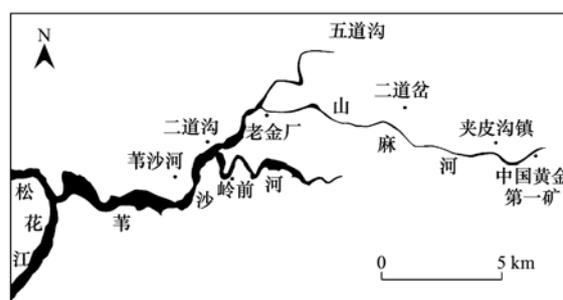


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points

1.2.2 样品采集与测定

选取河流沿岸芦苇长势较密集的区域,以 100 cm×100 cm 为一个单位,随机采集样方中芦苇叶片,装入聚氯乙烯自封袋中带回实验室,用自来水冲洗掉叶片表面泥土和杂物后,再用去离子水冲洗,最后自然风干并研磨,采用硝酸水浴消解-冷原子荧光光谱法测定^[12].

大气汞采样使用俄罗斯 Lumex 公司的塞曼效应汞分析仪(Zeeman RA-915+)现场测定. 每次采样前使用仪器自带校准系统校正仪器,并稳定 3 min,采样时每 10 s 记录 1 次大气汞浓度,读取 6 次数据取平均值;使用四分法采集芦苇样品周围土壤,装入聚氯乙烯自封袋带回实验室通风处阴干,干燥后研磨过 100 目筛,采用王水水浴消解-冷原子荧光法进行测定^[13];采集水体表层水样,使用干净的聚乙烯桶采集. 采集前先用采样点的表层水洗涤采样瓶 2~3 次,采样后立即加入 0.5% 的 12 mol·L⁻¹ 盐酸溶液调节 pH 值至 3.0 左右,放入冰箱中低温(<4℃)保存,采用 BrCl 氧化-SnCl₂ 还原-金捕汞管预富集-冷原子荧光光谱法测定^[14].

1.2.3 植物总汞污染评价

本文采用单因子污染指数法评价植物叶片重金属污染,计算公式:

$$P_i = C_i/S$$

式中, P_i 为污染物单因子指数, C_i 为实测含量(mg·kg⁻¹), S 为 0.02 mg·kg⁻¹ (GB 2762-2012 食品安全国家标准食品中污染物限量). 其中, $P_i < 1$ 为清洁, $1 \leq P_i < 2$ 为轻污染, $2 \leq P_i < 3$ 为中污染, $P_i \geq 3$ 为重污染.

2 结果与讨论

2.1 芦苇叶片中总汞含量的变化

对芦苇叶片总汞含量进行分析(表 1),可知夏

季二道岔芦苇叶片汞含量最高,为 $0.204 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 岭前最低,为 $0.017 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 秋季夹皮沟芦苇叶片汞含量最高,为 $0.420 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 苇沙河最低,为 $0.011 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 区域内芦苇叶片汞含量夏季平均值为 $(0.053 \pm 0.024) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 秋季平均值为 $(0.062 \pm 0.041) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均高于植物总汞限量

标准 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 采用单因子污染指数法对各采样点进行芦苇叶片中总汞污染评价,可发现夹皮沟、二道岔芦苇汞污染水平达到重污染,而老金厂、二道沟、苇沙河和岭前芦苇汞污染水平为轻污染; 区域内芦苇汞污染水平夏季为中污染,秋季为重污染.

表 1 各采样点芦苇叶片汞含量统计结果¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Results of mercury concentration in reed leaves at each sampling point/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

采样点	季节	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	单因子污染指数	污染等级
JPG	夏季	0.042	0.189	0.091	0.059	0.649	4.540	重污染
	秋季	0.037	0.420	0.175	0.113	0.647	8.745	重污染
EDC	夏季	0.038	0.204	0.072	0.056	0.778	3.581	重污染
	秋季	0.039	0.220	0.078	0.053	0.671	3.923	重污染
LJC	夏季	0.031	0.051	0.040	0.008	0.191	1.986	轻污染
	秋季	0.021	0.100	0.040	0.024	0.606	1.977	轻污染
EDG	夏季	0.032	0.042	0.037	0.005	0.129	1.850	轻污染
	秋季	0.013	0.055	0.030	0.012	0.415	1.504	轻污染
WSH	夏季	0.025	0.034	0.030	0.006	0.216	1.475	轻污染
	秋季	0.011	0.036	0.024	0.008	0.348	1.200	轻污染
LQ	夏季	0.017	0.041	0.032	0.013	0.406	1.583	轻污染
	秋季	0.012	0.035	0.025	0.006	0.233	1.228	轻污染
统计值	夏季	0.042	0.034	0.050	0.026	0.513	2.500	中污染
	秋季	0.039	0.035	0.062	0.041	0.670	3.100	重污染

对各采样点夏秋两季芦苇叶片汞含量平均值及标准差进行进一步分析(图 2),发现距离夹皮沟金矿越远,芦苇叶片内的总汞含量越小;且夹皮沟、二道岔污染较重地区夏季芦苇叶片内汞含量低于秋季,老金厂、二道沟、苇沙河和岭前污染较轻地区夏季芦苇叶片内汞含量略高于秋季.分析认为,在汞污染较重的样点,夏季气温较高,植物叶片蒸腾作用旺盛,会不断地向大气释放汞^[15-17],而秋季气温下降,有利于大气汞沉降,叶片可通过气孔吸收大气中的汞,也会利用吸附在叶片表面的汞,因此芦苇叶片汞含量夏秋季差异明显;而污染较轻的样点,夏季芦苇生长发育旺盛,可通过根、叶吸收土壤、水体、大气中的重金属汞,秋季也不会过多地吸收大气汞,使得芦苇叶片汞含量夏秋季差异不明显.

2.2 环境要素中总汞含量的变化

对夏秋季大气、土壤、水体中的总汞含量进行分析(表 2),可知夏季该地区二道岔的大气汞质量浓度最高,夹皮沟最低;秋季同样是二道岔的大气汞质量浓度最高,但苇沙河下游最低;除夹皮沟外,其他采样点秋季大气汞质量浓度均低于夏季.结合采样点布置图及金矿生产情况可知,夹皮沟虽建设有中国黄金第一矿,但现已停止使用混汞法炼金 20

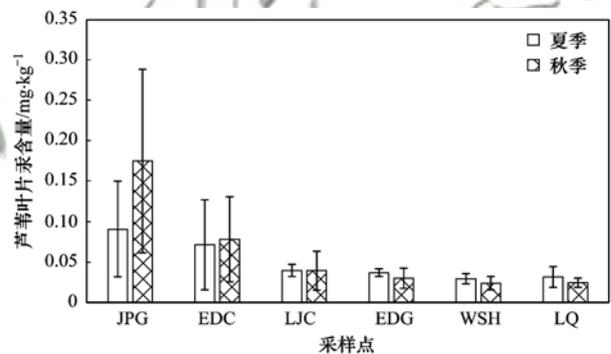


图 2 夏秋季芦苇叶片总汞含量

Fig. 2 Total mercury concentration in reed leaves in summer and autumn

年之久,且位于山顶,大气流动快,所以大气汞较低.而二道岔地区大气汞质量浓度较高,主要是因为该地有夹皮沟下游最大的尾矿,多年暴露在空气中生产所致.此外,还发现研究区域内大气总汞夏季平均值为 $(34.48 \pm 0.05) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 秋季平均值为 $(26.71 \pm 0.06) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于长白山地区大气总汞年平均值 $(3.22 \pm 1.78) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和北半球大气总汞的背景水平 $1.5 \sim 2.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[18-21], 分别是二者的 10.71 倍和 17.24 倍,但明显低于 2008 年该区域的大气汞 $64.55 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[7],表明该地区虽仍存在着大

气汞污染,但随着时间的推移,污染情况已逐渐改善.

土壤中汞的含量夏秋季均是夹皮沟最高,岭前最低,这说明夹皮沟金矿曾经的生产对当地土壤造成的危害仍存在,且随着距离的增加污染程度降低;在所有采样点中,秋季土壤汞含量均小于夏季. 分析认为,秋季采样时间前研究区有过持续降雨天气,采样时水流较为湍急,使得部分土壤中的汞会通过雨水冲刷或地表径流带离出土壤;而高含水量的土壤环境也会加速汞的还原,使土壤大气间汞交换通量过程明显活跃^[22~25],使得秋季土壤汞含量降低. 此外,研究区域内土壤总汞夏季平均值为(2.16 ±

14.27) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 秋季平均值为(1.37 ± 8.88) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远高于长白山地区土壤总汞平均值 0.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和吉林省土壤背景值 0.041 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[26], 但明显低于 2008 年该区域的土壤汞含量 4.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[7], 表明常年错误的矿产开发方式使得该地区土壤仍存在着严重的污染情况.

对水体数据分析可知,沿河流向下水体汞质量浓度逐渐降低,尤其是汇集了由五道沟流入的干净水体后,水体汞明显降低. 而二道岔地区由于尾矿的污水随雨水冲刷至水体中,使得水体汞突增. 但可以发现,如今的水体汞比 2008 年所调查的结果 13.55 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 明显降低^[7].

表 2 研究区域夏秋两季大气、土壤、水体中的总汞含量¹⁾

Table 2 Total mercury concentration in air, soil and water in summer and autumn

采样点	季节	大气汞/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	土壤汞/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	水体汞/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
JPG	夏季	13.27 ± 11.65	4.51 ± 1.07	—
	秋季	28.85 ± 10.72	3.65 ± 2.40	0.20 ± 0.09
EDC	夏季	42.54 ± 7.51	2.79 ± 1.50	—
	秋季	32.15 ± 8.64	2.46 ± 0.65	0.48 ± 0.30
LJC	夏季	38.64 ± 16.98	1.66 ± 1.11	—
	秋季	29.33 ± 1.77	0.98 ± 0.46	0.19 ± 0.24
EDG	夏季	39.04 ± 2.91	1.93 ± 0.58	—
	秋季	23.13 ± 6.40	0.63 ± 0.30	0.01 ± 0.01
WSH	夏季	33.83 ± 7.81	0.93 ± 0.39	—
	秋季	20.87 ± 10.41	0.20 ± 0.15	0.01 ± 0.01
LQ	夏季	33.22 ± 7.29	0.09 ± 0.02	—
	秋季	24.34 ± 6.66	0.07 ± 0.03	0.00 ± 0.00
统计值	夏季	34.48 ± 0.05	2.16 ± 14.27	—
	秋季	26.71 ± 0.06	1.37 ± 8.88	0.15 ± 0.22

1) “—”表示没有相关数据

2.3 相关性分析

2.3.1 夹皮沟金矿开采区重金属汞的循环模式

为说明夹皮沟金矿开采区重金属汞的循环模式,将芦苇叶片汞含量以及大气、土壤、水体等环境要素中的汞含量进行相关性分析(表 3). 可以看出,夏秋季芦苇叶片汞与土壤汞均呈极显著的正相关关系,说明在众多环境要素对叶片汞的影响中,土壤汞对其的影响较为显著,且随着土壤汞含量的增加,芦苇叶片汞含量也会不断增加. 此外,夏季大气汞与叶片、土壤汞呈现负相关性,而秋季大气汞则与叶片、土壤、水体汞呈正相关性,尤其是与水体汞呈现显著正相关性. 由于大气汞的来源复杂多样,且地表大气间存在的汞交换还会受到各类环境因素的干扰^[25],因此认为发生此现象的主要原因是,夏季的高温有利于土壤、叶片中汞的释放,使得

大气汞质量浓度会随着土壤、叶片汞含量的降低而增加;而秋季的低温则有利于大气汞的沉降,使得大气汞质量浓度越高,土壤、叶片汞含量也就越高,这也间接地说明了为什么芦苇叶片、大气、土壤、水体中的汞含量均为秋季小于夏季. 此外,由于秋季采样期间有降雨发生,雨水不仅带走部分土壤中的汞,也使得随雨水进入水体的气态汞增加,造成水体汞与大气汞相关性显著.

根据前文得出,夹皮沟金矿开采区重金属汞的循环模式(图 3),认为夹皮沟金矿开采区在停止混汞法采金多年后,土壤为该区域内的主要汞源. 这是因为混汞法提金过程中会有 65% ~ 87% 的汞挥发至大气中,13% ~ 35% 的汞随尾矿和废液流失进入土壤和大气,而挥发至大气中的汞除随大气流通进行扩散外,还会通过干湿沉降进入土壤和水体^[27]. 但目前该

区域已停止混汞法采金多年,无大规模气态汞排放的
人为活动,曾进入土壤和水体中的汞部分通过释放
进入大气,部分通过径流随河流进入下游水体. 因
此,最终仅有大量汞沉积在土壤中.

表 3 芦苇叶片、大气、土壤及水体汞含量相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of total mercury concentration in reed leaves, air, soil, and water

季节	汞来源	叶片汞含量	大气汞含量	土壤汞含量	水体汞含量
夏季	叶片汞含量	1	-0.574	0.955**	—
	大气汞含量	-0.574	1	-0.566	—
	土壤汞含量	0.955**	-0.566	1	—
秋季	叶片汞含量	1	0.578	0.967**	0.492
	大气汞含量	0.578	1	0.725	0.910*
	土壤汞含量	0.967**	0.725	1	0.687
	水体汞含量	0.492	0.910*	0.687	1

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; “—” 表示文章没有相关数据

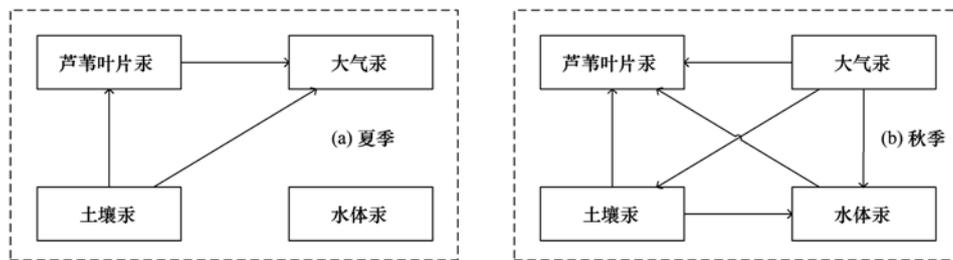


图 3 夹皮沟金矿开采区重金属汞的循环模式

Fig. 3 Circulation model of heavy metal mercury at the Jiapigou gold mine

2.3.2 芦苇叶片汞的来源

为说明芦苇叶片中汞的来源与其他环境要素的关系,提取各种环境要素中的汞含量与芦苇叶片汞含量进行相关性分析,结果如图 4. 可以看出,夏秋季芦苇叶片汞与土壤汞、水体汞均呈现正相关,而芦苇叶片汞夏季与大气汞负相关,秋季与大气汞正相关. 这是因为,在芦苇的整个生长周期中,芦苇主要从土壤、水体中吸收营养物质加以利用,而与大气汞则存在一个动态的交换过程. 当大气汞质量浓度高于补偿点时植物吸收汞,低于补偿点时植物释

放汞^[28,29];但植物对于大气汞的释放还与其蒸腾作用、气孔开合等生理生态活动以及温度、湿度等环境条件相关^[18]. 所以,芦苇叶片夏天可能向大气中释放汞,而秋天吸收大气汞,从而导致芦苇叶片汞与大气汞夏季负相关、秋季正相关.

与此同时,本研究发现芦苇叶片汞含量与环境要素汞含量相关性大小为:土壤 > 大气 > 水体. 由于夹皮沟金矿区已停止混汞法提金多年,且随着大气、水体的流通性,大气和水体中的汞含量则明显降低,使得芦苇叶片汞与大气汞、水体汞相关性不

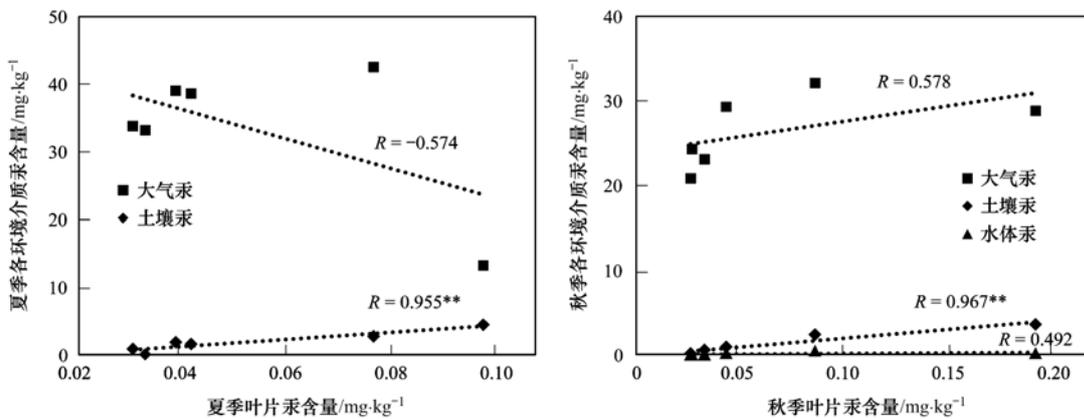


图 4 夏秋季叶片汞含量与大气、土壤、水体汞含量相关性

Fig. 4 Correlation between total mercury concentration in reed leaves and total mercury concentration in air, soil and water in summer and autumn

高;而土壤中的汞除部分通过释放进入大气、径流进入水体外,大多数都会留在土壤中被生物利用,参与物质循环。芦苇叶片虽为一年生,但芦苇根部多年生长在汞超标的土壤中,且对汞具有较高的富集与转运能力^[30,31],同时生长时间越长富集量越大^[32],因此芦苇叶片汞含量与土壤汞含量相关性较高。这也说明,停止混汞法提金后,对植物、环境产生影响的主导因素可能为土壤中的汞。

3 结论

(1)以夹皮沟金矿为中心,芦苇叶片汞含量随距离的加大而逐渐衰减;重污染地区夏季芦苇叶片汞含量低于秋季,轻污染地区夏季芦苇叶片汞含量略高于秋季。

(2)以夹皮沟金矿为中心,土壤汞、水体汞含量均随距离的加大而呈现逐渐减小的趋势,但大气汞质量浓度空间分布特征不明显;大气汞、土壤汞含量均为夏季高于秋季。

(3)停止混汞法采金多年后,夹皮沟金矿开采区的汞源主要为土壤。

(4)除芦苇叶片汞含量与夏季大气汞呈负相关外,芦苇叶片与其他季节环境要素汞含量均呈正相关;芦苇叶片汞含量与环境要素汞含量相关性大小为:土壤 > 大气 > 水体。

参考文献:

- [1] Malm O. Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon[J]. *Environmental Research*, 1998, **77**(2): 73-78.
- [2] 吉林省冶金研究所. 金的选矿[M]. 北京:冶金工业出版社, 1978. 88-111.
- [3] 王宁,朱颜明,朴明玉,等. 松花江上游地区汞污染的化学生态效应[J]. *地理科学*, 2005, **25**(6): 737-741.
Wang N, Zhu Y M, Piao M Y, *et al.* Chemical ecology effect of mercury pollution on upper Songhua River areas[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(6): 737-741.
- [4] 覃东立,姜海峰,黄晓丽,等. 松花江沉积物汞的新变化:分布、演化与现状及潜在生态风险评估[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(6): 1910-1916.
Qin D L, Jiang H F, Huang X L, *et al.* Changes of total mercury in sediments from Songhua River: distribution, evolution and potential ecological risk [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(6): 1910-1916.
- [5] 杨净,王宁,蔡青香. 夹皮沟金矿区土壤汞的赋存形态及污染特征[J]. *生态毒理学报*, 2014, **9**(5): 924-932.
Yang J, Wang N, Cai Q X. Chemical speciation and pollution characteristics of Hg in soils from Jiapigou gold mining area[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, **9**(5): 924-932.
- [6] 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, **33**(9): 2953-2959.
Zhang G, Wang N, Wang Y, *et al.* Characteristics of mercury pollution in soil and atmosphere in Songhua River upstream Jiapigou gold mining area[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 2953-2959.
- [7] 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.
Zou T T, Wang N, Zhang G, *et al.* Environment spatial distribution of mercury pollution in Songhua River upstream gold mining areas[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(9): 2228-2233.
- [8] 杨净,王宁. 夹皮沟金矿开采区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(3): 595-600.
Yang J, Wang N. Assessment of potential ecological risk of heavy metals in soils from Jia-pi-gou mine area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(3): 595-600.
- [9] 李雅芬,王景,王宁. 松花江上游金矿开采区河流水体和沉积物中汞的污染特征及风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(3): 622-628.
Li Y F, Wang J, Wang N. Distribution characteristics and risk assessment of mercury pollution in the river water and sediment of the Songhua River upstream gold mining area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(3): 622-628.
- [10] 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.
Wang N, Zhu Y M. The survey on non-point source pollution of heavy metals in Songhua River [J]. *China Environmental Science*, 2000, **20**(5): 419-421.
- [11] 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.
Wang N, Zhu Y M, Sheng L X, *et al.* Mercury pollution in *Rana Chensinensis* in Weisha River reach, in the upstream region of Songhua river[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(19): 2166-2170.
- [12] 郑伟,冯新斌,李广辉,等. 硝酸水浴消解-冷原子荧光光谱法测定植物中的总汞[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2006, **25**(3): 285-287.
Zheng W, Feng X B, Li G H, *et al.* Determination of total mercury in plants by HNO₃ digestion in the water bath coupled with cold vapor atomic fluorescence spectrometry[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, **25**(3): 285-287.
- [13] 何天容,冯新斌,戴前进,等. 萃取-乙基化结合 GC-CVAFS法测定沉积物及土壤中的甲基汞[J]. *地球与环境*, 2004, **32**(2): 83-86.
He T R, Feng X B, Dai Q J, *et al.* Determination of methyl mercury in sediments and soils by GC-CVAFS after aqueous phase ethylation [J]. *Earth and Environment*, 2004, **32**(2): 83-86.
- [14] 阎海鱼,冯新斌,商立海,等. 天然水体中痕量汞的形态分析方法研究[J]. *分析测试学报*, 2003, **22**(5): 10-13.
Yan H Y, Feng X B, Shang L H, *et al.* Speciation analysis of Ultra trace levels of mercury in natural waters [J]. *Journal of Instrumental analysis*, 2003, **22**(5): 10-13.
- [15] Leonard T L, Taylor Jr G E, Gustin M S, *et al.* Mercury and plants in contaminated soils: 1. Uptake, partitioning, and emission to the atmosphere [J]. *Environmental Toxicology and*

- Chemistry, 1998, **17**(10): 2063-2071.
- [16] Zhang H, Lindberg S E. Sunlight and iron (III)-induced photochemical production of dissolved gaseous mercury in freshwater[J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(5): 928-935.
- [17] 李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 等. 三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2721-2727.
- Li C X, Sun R G, Wang D Y, *et al.* Release of mercury from soil and plant in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges reservoir area and its accumulation in Zebrafish [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2721-2727.
- [18] Steffen A, Schroeder W, Bottenheim J, *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**(15-16): 2653-2661.
- [19] 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.
- [20] Lamborg C H, Fitzgerald W F, O'Donnell J, *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.
- [21] 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): 296-299.
- Wan Q, Feng X B, Zheng W, *et al.* Seasonal variation of total gaseous mercury in Changbai Mountain area[J]. Environmental Science, 2008, **29**(2): 296-299.
- [22] Eckley C S, Gustin M, Miller M B, *et al.* Scaling non-Point-source mercury emissions from two active industrial gold mines: influential variables and annual emission estimates [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(2): 392-399.
- [23] Lindberg S E, Zhang H, Gustin M, *et al.* Increases in mercury emissions from desert soils in response to rainfall and irrigation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, **104**(D17): 21879-21888.
- [24] 张刚, 王宁, 艾建超, 等. 持续性降水气象条件下土壤/大气间汞通量特征[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(3): 409-415.
- Zhang G, Wang N, Ai J C, *et al.* Characteristics of mercury flux between soil and air under the meteorological condition of durative precipitation[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(3): 409-415.
- [25] 高锦玉, 王昊, 蔡武, 等. 土壤释汞通量影响因素研究进展[J]. 地球与环境, 2016, **44**(2): 261-269.
- Gao J Y, Wang H, Cai W, *et al.* Research progress in factor study on soil mercury evaporation fluxes [J]. Earth and Environment, 2016, **44**(2): 261-269.
- [26] 邢登华, 梁成华, 王少锋, 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.
- Xing D H, Liang C H, Wang S F, *et al.* Concentration and speciation distribution of mercury in forest soils on northern slope of Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(1): 106-111.
- [27] 戴前进, 冯新斌. 混汞法采金地区的汞污染研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, **5**(7): 13-17.
- Dai Q J, Feng X B. Study on progress of mercury contamination to the environment associated with gold extraction by amalgamation[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004, **5**(7): 13-17.
- [28] Hanson P J, Lindberg S E, Tabberer T A, *et al.* Foliar exchange of mercury vapor: evidence for a compensation point[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, **80**(1-4): 373-382.
- [29] Erickson J A, Gustin M S, Schorran D E, *et al.* Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(12): 1613-1622.
- [30] 张丽娟, 张冬有, 张思冲, 等. 大庆城市湿地水生生态系统重金属转移模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, **29**(S2): 277-282.
- Zhang L J, Zhang D Y, Zhang S C, *et al.* Transferring models for heavy metals in city wetland aquicolous ecosystem of Daqing, Heilongjiang Province[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, **29**(S2): 277-282.
- [31] 严莉, 李龙山, 倪细炉, 等. 5种湿地植物对土壤重金属的富集转运特征[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(10): 2078-2085.
- Yan L, Li L S, Ni X L, *et al.* Accumulation of soil heavy metals in five species of wetland plants [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, **36**(10): 2078-2085.
- [32] 韩志萍, 胡晓斌, 胡正海. 芦竹修复镉汞污染湿地的研究[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(5): 945-950.
- Han Z P, Hu X B, Hu Z H. Phytoremediation of mercury and cadmium polluted wetland by *Arundo donax*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(5): 945-950.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNBf-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)