

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010 年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究

曹霏霏¹, 杨丽原^{1*}, 庞绪贵², 王炳华³, 王云倩¹

(1. 济南大学资源与环境学院, 济南 250022; 2. 山东地质调查院, 济南 250002; 3. 山东省地矿工程集团有限公司, 济南 250200)

摘要: 通过测定南四湖及其入湖河流沉积物中总汞和形态含量, 研究南四湖沉积物中汞的污染现状及空间迁移特征. 南四湖表层沉积物中总汞含量为 $0.046 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显高于其环境背景值, 表明南四湖受到一定程度的汞污染; 沉积物中汞的形态主要以残渣态为主, 占总汞含量的 65.15%, 非残渣态占总汞比例相对较小, 依次为有机结合态 (30.61%)、可提取态 (2.93%)、铁锰氧化态 (1.31%), 其空间变化为独山湖区和昭阳湖区非残渣态汞含量较低, 南阳湖区和微山湖区相对较高, 具有一定的潜在生态危害; 从水平方向来看, 南四湖表层沉积物中汞含量具有明显差异, 各湖区污染程度不同, 汞在水平方向迁移较明显; 垂直方向来看, 从柱状沉积物底部到顶部汞的含量呈增加趋势, 这可能与不同时期社会经济状况有关.

关键词: 沉积物; 汞; 污染现状; 迁移变化; 南四湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1615-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.014

Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province

CAO Fei-fei¹, YANG Li-yuan^{1*}, PANG Xu-gui², WANG Bing-hua³, WANG Yun-qian¹

(1. School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250002, China; 3. Shandong Provincial Geo-mining Engineering Co., Ltd., Jinan 250200, China)

Abstract: The content of mercury and fractions were determined, in order to discuss the pollution situation and migration ability of mercury in inflow rivers and surface sediments of Nansi Lake. The average content of mercury in the sediments of the Nansi Lake was $0.046 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, significantly higher than the environmental background values, which showed that Nansi Lake suffered from mercury pollution. Mercury in sediments existed mainly in the residual fraction, accounting for 65.15%. The proportion of non-residual fractions was relatively small, in the order of organic bound fraction (30.61%), extractable fraction (2.93%), and Fe/Mn oxide (1.31%). The spatial change of non-residual fractions was that Weishan Lake and Nanyang Lake had higher non-residual mercury content than Zhaoyang Lake and Dushan Lake, and the non-residual mercury had a certain potential ecological harm on Weishan Lake and Nanyang Lake. From the horizontal view, the mercury content in the surface sediments of Nansi Lake had visible difference and the pollution degree was different among sub-lakes, so horizontal migration of mercury was obvious. Vertically, the mercury content showed a trend of increasing from the bottom to the top in core sediments, which might be associated with social and economic conditions in different periods.

Key words: sediments; mercury; pollution situation; migration variation; Nansi Lake

南四湖位于山东省的西南部, 是该省最大的淡水湖泊, 依次由南阳、独山、昭阳和微山这 4 个无明显分界的湖泊组成, 属淮域泗河水系, 湖泊流域面积 30453 km^2 , 平均水深仅为 1.46 m; 自 1960 年在湖腰建成二级坝湖闸以后, 将南四湖分为上级湖和下级湖, 湖闸北为上级湖, 注入河流 29 条, 集流面积 26934 km^2 , 占总集流面积的 88.4%^[1]. 南四湖流域是山东省重要经济区之一, 其环境、生态和经济价值一直为社会所关注^[2], 近年来做为南水北调东线工程的重要调蓄水库之一, 其水质状况受到广泛的关注.

沉积物作为重金属的载体, 具有较高的吸附能力. Chandrajith 等^[3]研究表明, 在水-沉积物体系中, 90% 以上的 Hg 被沉积物吸附. 在自然条件下重金属很难被生物降解, 一旦进入环境并积累到一定

程度, 就会对环境产生很大的危害^[4]. 特别是汞作为一种高毒性的微量重金属, 具有易挥发、生物积累和生物扩大等物理化学特性. 此外, 汞具有多种不同形态, 在沉积物中无论以何种形态存在都会直接或间接地对生态系统造成危害^[5]. 因此, 本研究通过对南四湖中汞及其形态的分析, 探讨了汞在沉积物中的空间变化规律; 并对比 2002 年的数据, 分析南四湖中汞的污染现状, 以期对南四湖流域环境治理提供参考指导.

收稿日期: 2014-11-05; 修订日期: 2014-12-23

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2012DL09); 国家自然科学基金项目 (40672076, 40702058); 山东省中南部地区农业生态地球化学调查项目 (鲁国土资字[2011]96 号)

作者简介: 曹霏霏 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水生态与水环境, E-mail: caoifeifei@163.com

* 通讯联系人

1 材料与方法

1.1 样品采集和处理

2012年6月,在南四湖区域用重力采样器采集18个入湖河流沉积物样品、205个表层沉积物(0~5 cm)样品、27个深层沉积物和4个柱状岩心样品,采样点分布如图1。

将柱状沉积物样品按20 cm每段现场分段,然后将采集的湖泊沉积物样品分别放入密封袋中带回实验室,在室温下风干,去除样品中的杂物,然后用研钵研磨样品并过100目的尼龙筛,重新保存在密封袋中并标号。重金属及营养元素的含量由国土资源部武汉岩矿综合测试中心测定;汞的形态由国土资源部合肥矿产资源监督检测中心进行测定。

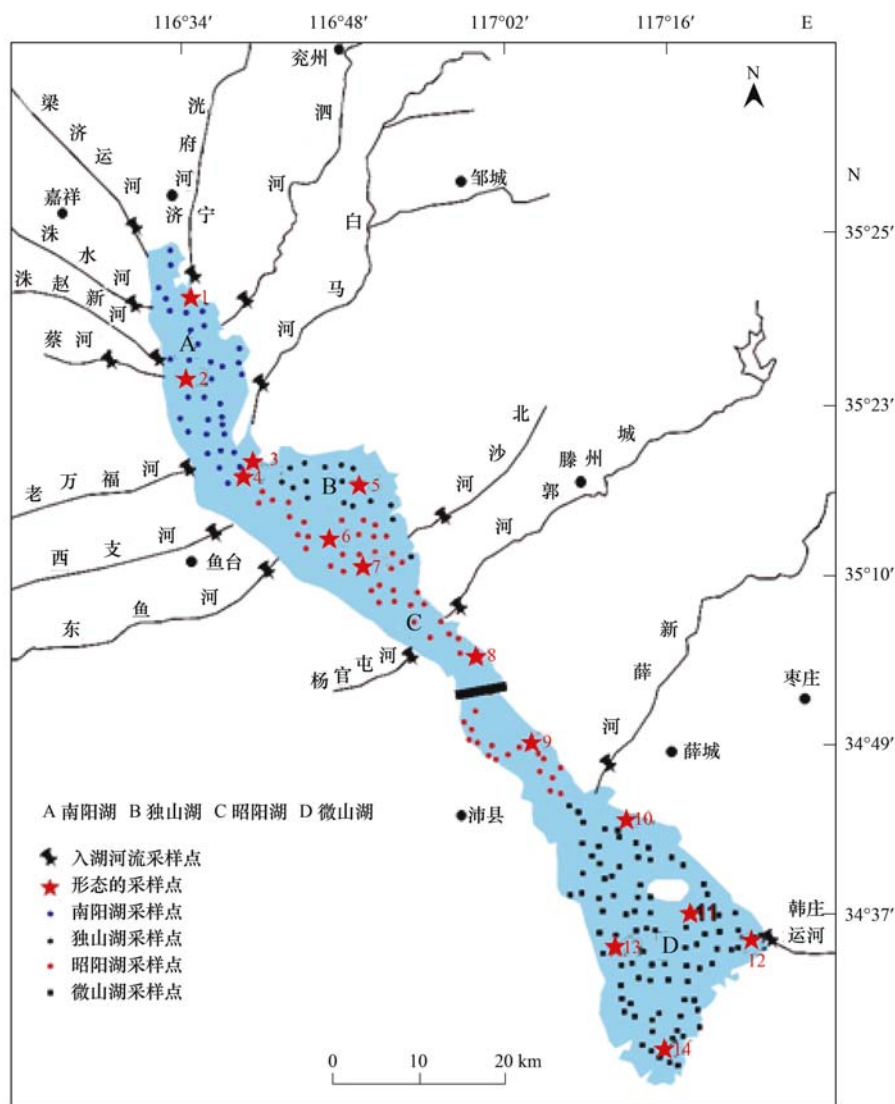


图1 南四湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Nansi Lake

1.2 样品的测定与数据处理

取处理好的样品适量,加入配好的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2\text{-HF}$ 消解液进行消解,消解完后进行赶酸然后装到容量瓶中定容,以便于测定;重金属(Hg、Pb、Cu、Cd、Zn)、营养元素(P、N、S、TOC)含量和pH值按照生态地球化学评价样品分析技术要求^[6](DD2005-01)测定。最后利用 Arcgis 9.3、SPSS

18.0 和 Excel 软件将测得的数据进行处理。

2 结果与讨论

2.1 南四湖沉积物中汞的分布特征及污染现状

2.1.1 沉积物中汞的总量分布

南四湖是由于黄河泛滥的泥沙淤塞而成,因此将黄河沉积物中汞的平均含量作为南四湖中汞的环

境背景值^[7]。如表 1 所示,南四湖表层沉积物中总汞含量为 0.017 ~ 0.097 mg·kg⁻¹,平均含量为 0.046 mg·kg⁻¹,超过其环境背景值的 3.1 倍;南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖中汞含量分别为 0.045、0.058、0.042 和 0.046 mg·kg⁻¹,超过环境背景值的 2.8 ~ 3.9 倍;如图 2(a)所示,南四湖沉积物中汞含量从上游到下游呈高-低-高的分布特征,独山湖区汞的富集较明显,昭阳湖区相对较轻;独山湖和微山湖区部分采样点 Hg 含量超过其背景值的 5 倍,这可能与南四湖流域人类活动和上游沉积物的迁移^[8]有关,流域内人类活动过程引起的汞污染,可以在湖泊沉积物中得到很好地反映。南四湖人湖河流中梁济运河、洸府河、东鱼河和新薛河的表层沉积物汞含量分别为 0.05、0.111、0.041 和 0.067 mg·kg⁻¹;经调查^[9],汞含量较高的废水不断汇入地表河流,含汞污染物向周围环境及下游地区

迁移,使汞污染范围不断扩大。

由于南水北调东线工程在南四湖的调水方向与天然流向相反,水力条件和水质条件复杂^[10],为使南四湖水质达到南水北调工程的功能区划要求,有关部门加强了对重金属污染的治理,并取得了一定成效;与 2002 年南四湖表层沉积物中汞含量相比,近 10 年来南四湖中汞含量明显降低(表 1)。湖区内水生生物直接和水体接触,对汞污染较敏感^[11],上覆水体中的汞会对其产生毒害作用,并可能通过食物链富集作用影响到人类的健康。史可江等^[12]报道南四湖中 7 种鱼体内总汞含量大小为乌鳢 > 鳊鱼 > 鲢鱼 > 黄颡鱼 > 鲫鱼 > 鳙鱼 > 鲤鱼,其平均含量为 174 ng·g⁻¹,远小于世界卫生组织的限量标准 500 ng·g⁻¹^[13];张秀云等^[14]指出鱼肉中重金属过量会对人体产生危害,但在允许范围内对人体健康的影响是有限的。

表 1 南四湖表层沉积物 Hg 含量的统计/mg·kg⁻¹

Table 1 Mercury contents in Nansi Lake surface sediments/mg·kg ⁻¹						
位置	采样点数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
南阳湖	37	0.097	0.019	0.045	0.019	42
独山湖	20	0.072	0.031	0.058	0.013	22
昭阳湖	58	0.077	0.017	0.042	0.016	38
微山湖	90	0.071	0.023	0.046	0.011	24
南四湖(2012 年)	205	0.097	0.017	0.046	0.015	33
南四湖(2002 年)	20	0.123	0.043	0.092	—	—
梁济运河	—	—	—	0.05	—	—
南四湖人湖河流	洸府河	—	—	0.111	—	—
	东鱼河	—	—	0.041	—	—
	新薛河	—	—	0.067	—	—
	南四湖环境背景值	—	—	0.015	—	—

2.1.2 表层沉积物中汞的形态分布

总汞含量仅反映区域的污染程度,其生物有效性主要取决于汞的赋存形态^[15]。如表 2 所示,南四湖沉积物中不同形态汞的含量由大到小顺序为残渣态 > 腐殖酸态 > 强有机态 > 碳酸盐态 > 铁锰氧化态 > 离子交换态 > 水溶态。随着提取步骤的进行,重金属的生物有效性不断下降^[16];残渣态重金属生物有效性较低,对水环境和生物基本不会造成危害;可提取态重金属(水溶态、离子交换态、碳酸盐态)性质比较活泼,很容易从沉积物中释放出来造成二次污染;腐殖酸态、铁锰氧化态及强有机态具有一定的潜在危害,在 pH、氧化还原电位、流速、生物扰动等理化条件改变时^[17],这 3 种形态易发生迁移,造成水环境污染,因此也称为非残渣态。

非残渣态汞具有较大的潜在危害性,因此可以用非残渣态汞含量反映湖泊沉积物的汞污染程度。

如图 2(b)所示,其空间分布呈南北高、中间低的特征,南阳湖和微山湖非残渣态汞的含量较高,这可能由于南阳湖位于城乡密集处,周边受污染水体通过众多入湖河流直接排入湖区,从而造成南阳湖沉积物中汞污染较严重;而微山湖位于下级湖区,湖面面积大,水流流速慢,挟沙能力弱,从上游到下游沉积物的粒径逐渐变小^[18],对重金属的吸附逐渐变强。

南四湖沉积物中汞主要以残渣态为主,占总汞含量的 65.15%;其次是有机结合态(腐殖酸态、强有机结合态),其平均含量为 14.44 ng·g⁻¹;汞属于亲硫元素,倾向于与有机硫或还原态硫(如 S²⁻)结合,沉积物中含有大量含硫的腐殖酸类有机物^[19],汞与这些物质相互结合以后不容易再迁移。铁锰氧化态汞占总汞比例较小,该形态与 pH 关系密切,pH 较小时很容易从沉积物中释放^[20];但是南四湖的

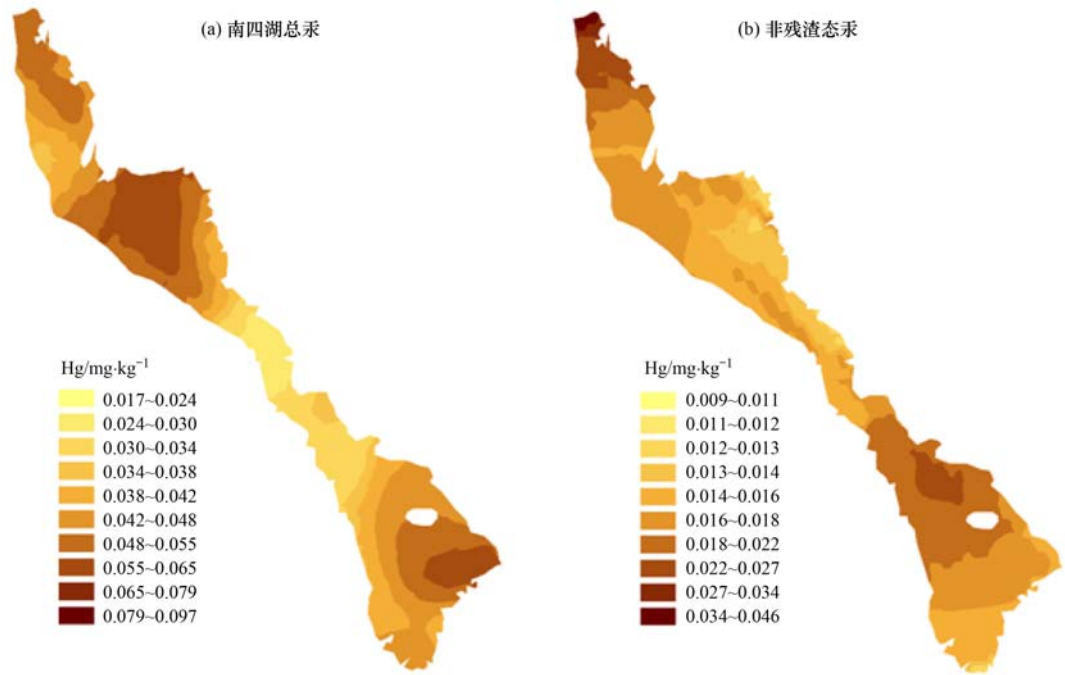


图 2 南四湖总汞和非残渣态汞含量分布

Fig. 2 Spatial distribution of total mercury concentration and non-residual mercury concentration

表 2 南四湖沉积物中不同形态汞的含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Contents of different mercury forms in surface sediments of Nansi Lake/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	水溶态	离子交换态	碳酸盐态	腐殖酸态	铁锰氧化态	强有机态	残渣态
南阳湖	0.12	0.42	0.53	14.82	0.80	8.91	41.21
独山湖	0.09	0.25	0.25	7.79	0.29	4.51	33.53
昭阳湖	0.08	0.19	0.76	9.66	0.55	2.81	25.76
微山湖	0.09	0.75	1.69	12.42	0.66	2.02	40.55
最小值	0.03	0.11	0.15	6.48	0.24	1.32	10.45
最大值	0.24	2.76	4.00	20.97	1.37	21.49	84.69
平均值	0.09	0.45	0.97	11.49	0.61	4.08	35.46
百分比/%	0.20	0.89	1.84	23.40	1.31	7.21	65.15

表层沉积物呈弱碱性,不利于该形态汞的释放,因此铁锰氧化态汞对环境危害较小.可提取态汞所占比例为 2.93%,其中水溶态、离子交换态、碳酸盐态分别占总汞的 0.20%、0.89%、1.84%,虽然可提取态汞含量较低,但是由于南四湖沉积物中总汞含量较高,仍具有一定的环境风险.4 个湖区沉积物中可提取态含量大小顺序为微山湖>南阳湖>昭阳湖>独山湖,这与汞的非残渣态分布相吻合.

2.2 南四湖沉积物中汞的迁移行为

汞在沉积物中的行为一直受到广泛关注,其迁移变化与污染源分布及水动力条件密切相关.从水平方向来看,南四湖入湖河流沉积物和湖泊表层沉积物中汞含量基本相同(图 3),巢湖入湖河流沉积物中 Hg 的含量为 $0.197\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,湖泊表层沉积物中的 Hg 含量为 $0.044\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[21],说明汞随入湖河

流汇入湖泊,并通过重力沉降、悬浮物吸附等方式不断沉积到底泥中;由于巢湖入湖河流的采样点大多位于城市或乡镇,受人类活动影响明显,因此造成巢湖入湖河流沉积物中的 Hg 含量明显高于湖泊表层沉积物.南四湖水体流动缓慢,颗粒物的沉积直接影响湖区中汞的分布、迁移转化等环境地球化学

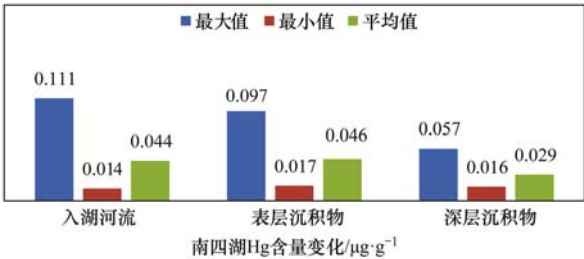


图 3 南四湖流域沉积物中 Hg 的含量

Fig. 3 Change of mercury contents in sediments of Nansi Lake

行为^[22]。如表 1 所示,南四湖 4 个湖区表层沉积物中汞的变异系数分别是 42%、22%、38%、24%,说明 4 个湖区 Hg 的空间分布存在明显差异,这与图 2 (a)所呈现的汞的空间分布一致,含汞污染物随着水流不断地迁移^[23]导致 4 个湖泊均受到不同程度的汞污染;说明汞在水平方向存在明显的迁移行为。

从垂直方向来看,南四湖上覆水体和表层沉积物中汞的含量分别是 $0.28 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.045 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水体中的汞基本都向下迁移到表层沉积物中。

如图 4 南四湖岩芯中汞的垂向变化可知,汞含量从沉积物下层到上层呈增加的趋势,并在沉积物上层富集,而且 4 个湖泊的变化规律基本一致,这种富集趋势可能与汞的重新分布有关^[24]; Young 等^[25]认为表层沉积物中汞的富集主要是由于近年

来汞污染较严重引起的,沉积物中的腐殖质对汞的吸附很强,导致汞在沉积物中富集严重。据研究^[26],山东南四湖沉积物的沉积速率为 $3.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,柱状沉积物反映了南四湖成湖以来汞含量逐渐增加,这可能由于人为原因和自然原因共同作用;工业废水、生活污水和农业灌溉直接造成沉积物中汞含量增高,而且南四湖湖东兖州地区含有丰富的煤炭资源,燃煤导致的汞释放也是流域汞污染的主要来源,王起超等^[27]研究结果显示,煤中汞在燃烧过程中有约 75% 释放到大气中,燃煤排放的汞主要通过烟气、飞灰、灰渣以及冲灰水这 4 种方式进入环境,最终通过干湿沉降富集到沉积物中^[28];随着经济的发展,虽然汞污染得到了治理,但有研究表明^[29],土壤、水体、森林火灾等自然排汞源向大气排放的汞含量远大于人类活动直接向大气的排汞量。

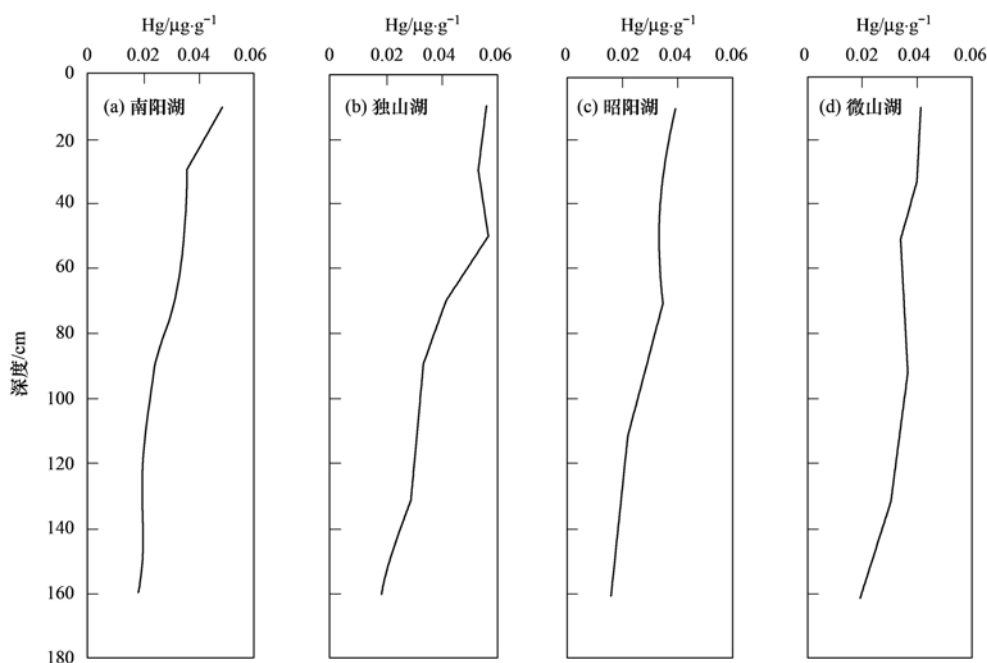


图 4 南四湖岩芯中汞的垂直含量变化

Fig. 4 Vertical change of mercury content in the core sediment of Nansi Lake

2.3 沉积物中汞与其他指标的相关性分析

为了更深地了解汞的来源和迁移行为,利用 SPSS 软件对汞和其他元素做了相关统计分析。

如表 3 所示,南四湖表层沉积物中 Hg 含量与 P、S、N 显著相关,深层沉积物中汞和 P、N 关系显著,而入湖河流沉积物中 Hg 仅与营养元素 N 呈正相关关系。研究表明^[30],随着 N、P 等营养元素不断输入,湖泊富营养化程度加重,大量的浮游植物对汞具有高吸附作用。这说明营养元素可能加重

沉积物中的汞污染,并在一定程度上影响着汞的迁移过程。TOC 含量是影响重金属形态和分布的重要控制因子^[31],有机质的降解可能会导致汞的重新分布,南四湖表层沉积物和深层沉积物中的 Hg 均与 TOC 呈显著正相关关系;底泥中的有机碳对汞及汞的化合物有很强的吸附作用,附着在有机碳表面的汞会不断在沉积物中沉积。

此外,重金属之间的相关关系利于分析重金属的同源性及其基本的化学特性。南四湖表层沉积物

和深层沉积物中汞与 Pb、Cu、Cd、Zn 都呈显著地正相关(表 3),说明这几种重金属可能存在协同关系;重金属毒性一般具有加和性,特别是具有协同效应的重金属,其种数越多,危害性越大^[32],说明沉积物中的 Pb、Cu、Cd、Zn 可能会与汞污染叠加在一起,加重污染. 入湖河流沉积物中汞含量仅与 Pb 和 Zn 具有相关性,表明入湖河流这些重金属具有相同的来源;南四湖流域的东部地区和微山湖的南部地区分布着许多水泥厂、造纸厂、煤矿及钢铁厂,这些工厂企业的消耗和生产导致未处理的废水、废气直接排入河流,造成湖泊沉积物的汞污染.

除了有机质和重金属之外,沉积物 pH 值对沉积物中汞的可溶性和汞的氧化还原、沉淀溶解和吸附等反应有着很重要的影响^[33]. 如表 3 所示,南四湖表层沉积物中 pH 与汞呈负相关关系,在表层沉积物 pH 值为 7.94 的弱碱条件下,沉积物对 Hg^{2+} 的吸附量减少^[34], $\text{Hg}(\text{OH})\text{Cl}$ 比 $\text{Hg}(\text{OH})_2$ 更容易被吸附,随着 pH 值的增大沉积物中 OH^- 浓度增加,汞主要以氢氧化物存在,不利于汞在沉积物中富集;入湖河流沉积物和湖泊深层沉积物中的汞和 pH 没有相关关系,进一步说明了沉积物中汞的含量受多种因素的综合影响.

表 3 南四湖中 Hg 与其他元素的相关性¹⁾

Table 3 Correlation between mercury and other elements in Nansi Lake

项目	入湖河流沉积物	湖泊表层沉积物	湖泊深层沉积物
P	0.467	0.546 **	0.489 **
N	0.508 *	0.764 **	0.598 **
S	0.251	0.702 **	0.140
TOC	0.437	0.736 **	0.549 **
Pb	0.69 **	0.290 **	0.441 *
Cu	0.35	0.254 **	0.553 **
Cd	0.401	0.607 **	0.404 *
Zn	0.518 *	0.316 **	0.455 *
pH	-0.109	-0.671 **	-0.305

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

3 结论

(1) 南四湖表层沉积物中总汞含量为 $0.046 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于其环境背景值,空间呈高-低-高的分布特征,4 个湖泊受污染程度为独山湖 > 微山湖 > 南阳湖 > 昭阳湖.

(2) 表层沉积物中非残渣态汞的分布特征为南北高、中间低;汞主要以残渣态的形式存在,占总汞含量的 65.15%;腐殖酸态和强有机态占总汞含量的 30.61%,而铁锰氧化态仅占 1.31%;具有二

次污染风险的可提取态仅占总汞的 2.93%,由于总汞含量较高,可提取态汞仍存在较大的潜在危害. 目前来看,南四湖表层沉积物中的汞污染已经得到治理,还未对人类健康造成威胁.

(3) 从水平方向来看,汞的空间差异较大,迁移较明显;从垂直方向来看,汞含量从柱状沉积物底部到顶部呈增加的趋势,并在上层沉积物中富集;此外,汞在沉积物中的迁移受重金属、营养元素和 pH 值等多种因素的综合影响.

参考文献:

- [1] 杨丽原,沈吉,刘恩峰,等. 南四湖现代沉积物中营养元素分布特征[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 390-396.
- [2] 杨丽原,李艳红,刘恩峰,等. 近 50 年来自然与人类活动影响下南四湖水位变化研究[J]. 中国农村水利水电, 2009, (7): 25-27.
- [3] Chandrajith R L R, 裴效松. 人类活动对日本神西湖汞污染的影响[J]. 地质科学译丛, 1996, **13**(2): 37-40.
- [4] 邴海健,吴艳宏,刘恩峰,等. 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 675-683.
- [5] 丁振华,王文华,刘彩娥,等. 黄浦江江水和沉积物中汞的分布和形态特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(5): 62-66.
- [6] DD 2005-03, 区域生态地球化学评价技术要求(试行)[S].
- [7] 杨丽原,沈吉,张祖陆,等. 南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价[J]. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 252-256.
- [8] 孙晓静,王起超,邵志国. 第二松花江中下游沉积物汞的时空变化规律[J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 1062-1066.
- [9] 冯新斌,仇广乐,付学吾,等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, **21**(2/3): 436-457.
- [10] 赵世新,张晨,高学平,等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 923-931.
- [11] 王沛芳,王文娜,王蓉,等. 汞对水生生物的毒性效应研究进展[J]. 安全与环境学报, 2014, **14**(2): 282-288.
- [12] 史可江,刘钧,马龙江. 山东省南四湖水产品中铅、镉、砷、汞污染状况的调查与分析[J]. 食品与药品, 2006, **8**(7): 59-61.
- [13] WHO (World Health Organization). Environmental Health Criteria. Methylmercury [R]. Geneva, Switzerland: WHO/IPCS, 1990.
- [14] 张秀云,孙成渤. 养鱼池水质与鱼肉中重金属污染的关系[J]. 城市环境与城市生态, 1998, **11**(1): 42-44.
- [15] 严明书,李武斌,杨乐超,等. 重庆渝北地区土壤重金属形态特征及其有效性评价[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(1): 64-70.
- [16] Yu X J, Li H X, Pan K, et al. Mercury distribution, speciation and bioavailability in sediments from the Pearl River Estuary, Southern China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, **64**(8): 1699-1704.
- [17] 鲁成秀,成杰民. 中国三个不同富营养化湖泊沉积物中 Cu、Zn 赋存特征及其与营养盐的相关性分析[J]. 生态环境学

- 报, 2014, **23**(2): 277-282.
- [18] 刘良, 张祖陆. 南四湖表层沉积物重金属的空间分布、来源及污染评价[J]. 水生态学杂志, 2013, **34**(6): 7-15.
- [19] 包正铎, 王建旭, 冯新斌, 等. 贵州万山汞矿区污染土壤中汞的形态分布特征[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 907-913.
- [20] 萨茹莉, 何江, 吕昌伟, 等. 南海湖沉积物中 Hg 的形态分布特征[J]. 沉积学报, 2009, **27**(6): 1178-1183.
- [21] 宁彤. 巢湖流域土壤和河、湖沉积物汞的分布特征、成因及生态风险[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [22] 贾旭威, 王晨, 曾祥英, 等. 三峡沉积物中重金属污染累积及潜在生态风险评估[J]. 地球化学, 2014, **43**(2): 174-179.
- [23] Chen C X, Zheng B H, Jiang X, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of mercury in sediments of Lake Taihu, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(2): 316-325.
- [24] 何天容, 冯新斌, 郭艳娜, 等. 红枫湖沉积物中汞的环境地球化学循环[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1768-1774.
- [25] Young D R, Johnson J N, Soutar A, *et al.* Mercury concentrations in dated varved marine sediments collected off southern California[J]. *Nature*, 1973, **244**(5414): 273-275.
- [26] 张祖陆, 牛振国, 孙庆义, 等. 南四湖底泥污染及其变化过程[J]. 中国环境科学, 1999, **19**(1): 30-33.
- [27] 王起超, 沈文国, 麻壮伟. 中国燃煤汞排放量估算[J]. 中国环境科学, 1999, **19**(4): 318-321.
- [28] 张成, 杨永奎, 王定勇. 重庆大气汞人为排放及其预测[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(8): 904-908.
- [29] 冯新斌, 付学吾, Sommar J, 等. 地表自然过程排汞研究进展及展望[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 845-856.
- [30] 孟博, 冯新斌, 陈春宵, 等. 乌江流域不同营养水平水库水体中汞的含量和形态分布[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 951-960.
- [31] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1266-1273.
- [32] 苏秋克, 祁士华, 蒋敬业, 等. 武汉城市湖泊汞的环境地球化学评价[J]. 地球化学, 2006, **35**(3): 265-270.
- [33] 丁振华, 刘金铃, 李柳强, 等. 中国主要红树林湿地沉积物中汞的分布特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2210-2215.
- [34] 王亚平, 潘小菲, 岑况, 等. 汞和镉在土壤中的吸附和运移研究进展[J]. 岩矿测试, 2003, **22**(4): 277-283.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行