

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 周雪明,亓雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM_{2.5} 的污染水平及来源解析 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金霞(1662)

CoCuMnO₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的势优势筛选 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe₃O₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH₄ 与 N₂O 浓度特征 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属去除的影响 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价

王乃姗^{1,2,3}, 张曼胤^{1,2,3*}, 崔丽娟^{1,2,3}, 马牧源^{1,2,3}, 颜亮^{1,2,3}, 穆泳林^{1,2,3}, 秦鹏^{1,2,3}

(1. 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091; 2. 北京汉石桥湿地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100091; 3. 河北衡水湖湿地生态系统定位观测研究站, 衡水 053000)

摘要:以河北衡水湖湿地为调查对象, 采用均匀设点采样分析, 研究了衡水湖湿地大气、表层水和土壤/沉积物中总汞含量及其分布特征; 同时采用地积累指数法和潜在生态风险指数法进行衡水湖湿地汞污染的生态风险评价。结果表明: 衡水湖湿地大气总汞含量变化范围为 1.0 ~ 5.0 ng·m⁻³, 平均值为 (2.9 ± 0.85) ng·m⁻³; 表层水总汞含量变化范围为 0.010 ~ 0.57 μg·L⁻¹, 平均值为 (0.081 ± 0.053) μg·L⁻¹; 土壤/沉积物总汞含量变化范围为 0.001 0 ~ 0.058 mg·kg⁻¹, 平均值为 (0.027 ± 0.013) mg·kg⁻¹。衡水湖湿地汞污染分布特征为, 表层水总汞浓度岸边显著高于湖中 ($P < 0.05$), 湖中沉积物总汞浓度显著高于岸边土壤 ($P < 0.05$); 岸边大气总汞浓度与土壤总汞浓度呈正相关关系; 高浓度汞富集总伴随剧烈的人为活动。地积累指数法表明衡水湖湿地地区汞污染为清洁程度; 潜在生态风险指数法表明衡水湖湿地地区汞污染风险为低生态风险。

关键词:衡水湖湿地; 汞; 污染现状; 分布特征; 生态风险

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1754-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.05.020

Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province

WANG Nai-shan^{1,2,3}, ZHANG Man-yin^{1,2,3*}, CUI Li-juan^{1,2,3}, MA Mu-yuan^{1,2,3}, YAN Liang^{1,2,3}, MU Yong-lin^{1,2,3}, QIN Peng^{1,2,3}

(1. Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. National Ecosystem Research Station of Hanshiqiao Wetland, Beijing 100091, China; 3. Ecosystem Research Station of Hengshuihu Wetland, Hengshui 053000, China)

Abstract: Investigation on the concentrations and the distribution characteristics of total mercury in atmosphere, water surface and soil/sediments of Hengshuihu wetland was carried out based on a uniform set point sampling method. The geoaccumulation index and potential ecological risk index methods were simultaneously used to assess the mercury pollution in Hengshuihu wetland ecosystem. The results showed that: the total mercury content in Hengshuihu wetland atmosphere ranged from 1.0 to 5.0 ng·m⁻³, with an average of (2.9 ± 0.85) ng·m⁻³; the total mercury content in water surface ranged from 0.010 to 0.57 μg·L⁻¹, with the average value of (0.081 ± 0.053) μg·L⁻¹; the total mercury content in soil/sediment ranged from 0.001 0 to 0.058 mg·kg⁻¹, with an average of (0.027 ± 0.013) mg·kg⁻¹. The distribution features of total mercury in Hengshuihu wetland were as follows: the total mercury concentration in surface water of the shore was significantly higher than that in the center ($P < 0.05$), but the total mercury concentration of sediments in the center of the lake was significantly higher than that at the shore ($P < 0.05$); the total mercury in the soil of shore had a consistent trend with that in the atmosphere; high concentrations of total mercury pollution were accompanied by severe human activities. The geoaccumulation index showed that mercury pollution in Hengshuihu wetland was at clean level; potential ecological risk index showed mercury contamination had a low ecological risk in Hengshuihu wetland.

Key words: Hengshuihu wetland; mercury; contamination status; distribution characteristics; ecological risk

汞(Hg)是一种具有生物毒性的重金属污染物, 同时由于其特殊的理化性质, 使得汞成为了一种全球性污染物^[1,2]。汞及汞的化合物对高等动物、人类具有很强的生物毒性, 其中又以具有脂溶性的甲基汞毒性最强, 甲基汞主要毒害神经系统、特别是中枢神经系统。因此汞虽然在自然表层水中多以痕量超痕量存在, 但是通过食物链的富集放大作用, 处在食物链顶端的生物体内可累计高浓度的汞, 进而威胁整个生态系统的安全。与其他重金属污染相比, 汞沸点极低, 在常温下即可挥发形成汞蒸气, 随季风进行区域性迁移, 同时汞又极易被物质吸附, 因

此可造成非直接汞源污染区的汞污染。

衡水湖湿地是我国的重要湿地, 是华北平原唯一保存完整的内陆淡水湿地生态系统类型的国家级自然保护区。根据 10 年前对衡水湖湿地进行的土水植物重金属污染研究来看^[3,4], 汞是衡水湖湿地地区的主要重金属污染物, 通过沉积物重金属潜在

收稿日期: 2015-11-04; 修订日期: 2015-12-21

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: 王乃姗(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生态学, E-mail: wangns1108@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cneco@126.com

生态风险评价可知衡水湖湿地沉积物中的汞为潜在高风险重金属元素。而近些年对衡水湖湿地汞污染的研究较少^[5,6],研究方向较为单一,尚未有研究完整的涉及大气、土壤和表层水这 3 个环境介质。鉴于此,本文以衡水湖湿地汞污染现状为研究对象,全面分析各个环境介质中的汞污染情况,从大的区域尺度说明衡水湖湿地的汞污染,反映衡水湖湿地整体的汞污染状况,可以给衡水湖湿地国家级自然保护区的生态环境安全和制定合理的保护措施提供基础数据,以期为研究非汞源污染区的自然湖泊汞污染状况奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河北衡水湖湿地保护区地处河北省衡水市境内,位于衡水市桃城区西南约 10 km 处,北倚衡水市区,南靠冀州市区,京开路(106 国道)沿衡水湖湿地边穿过,总体位置位于京津冀都市圈南缘,华北平原的东南部,面积 187.87 km²。衡水湖湿地湖面 75.00 km²,分为东西两湖,其中东湖面积 42.50 km²,西湖面积 32.50 km²,现东湖常年蓄水。东湖被人工修建的硬质岸堤隔绝成衡水湖和冀州小湖。本文的研究区为衡水湖。

衡水湖平均水深为 3~4 m,湖底平均高程 18 m。地区年平均降水量为 518.9 mm,降雨量年际变率大,时空分布不均;年蒸发量在 1 295.7~2 621.4 mm 之间,年平均蒸发量为 2 201.9 mm。衡水湖地表水资源主要来源是自然降水和人工引水。但由于年降水量远远低于年蒸发量,气候干旱,自然降水严重不足,因此衡水湖的水源主要依靠人工引水,水源主要引自黄河水。王口闸是引黄河水的主要闸口,黄河引水工程一般于每年年末 12 月至来年 1 月进行,年补水量为 150 万 m³。除每年的黄河引水工程外,衡水湖无径流的输入与输出。

衡水湖湿地周围无重工业,但多居民居住,人口密度大,人为活动剧烈。同时有 106 国道沿衡水湖湿地东岸穿过,106 国道为连通衡水市和冀州市的交通要道,时常有大型运输车队和私家车通过。衡水湖湿地北岸和西岸栽种行道树,行道树平均宽度为 10 m;硬质岸堤于 2015 年 4~5 月改造为健步道,岸堤的两侧修建铁栅栏,不可通车。湖中常年有渔民以捕鱼为生。同时夏季是衡水湖湿地旅游旺季,每年 6~9 月大批游客进湖采摘荷花莲蓬,并且在每年 9 月底衡水市承办大型环衡水湖湿地马拉松

赛跑,因此夏季人为活动对衡水湖的影响最为剧烈。

1.2 样品采集

第一次采样于 2015 年 5 月 28 展开,主要采集衡水湖湿地岸边采样点的表层水和土壤,以及对采样点大气中总汞浓度进行测定;第二次采样于 6 月 11 日展开,主要进入衡水湖湿地湖中采集表层水和沉积物。结合衡水湖湿地区域情况和实际采样过程,在衡水湖湿地的岸边和湖中布设间距均匀的采样点(图 1 和表 1),上述两种类型的采样点均由湖体东北角开始,按逆时针方向展开依次设置,其中编号 1~12 为岸边采样点,编号 13~19 为湖中采样点。

采样点中包括几个特殊点位置,包括 3 个闸口(大赵闸、南关新闻和王口闸)、原自来水厂、顺民庄以及荷花园。3 个闸口原作为衡水湖与外界进行径流输入输出的通道,现大赵闸和南关新闻已经停止使用,每年黄河引水从王口闸入衡水湖。顺民庄和荷花园为人为活动较多的两个地点,原自来水厂曾抽取衡水湖湖水作为居民用水的一个来源,但目前已弃用。

表 1 河北衡水湖湿地采样点分布位置

编号	位置	编号	位置
1	大赵闸	11	王口闸
2	北岸-1	12	荷花池
3	北岸-2	13	原自来水厂
4	北西岸交界	14	太极岛
5	顺民庄	15	缓冲区
6	西岸	16	核心区
7	南关新闻	17	近王口闸
8	岸堤-1	18	近 106 国道
9	岸堤-2	19	近管委会
10	王口闸护堤		

大气总汞(THg_a)使用俄罗斯 Lumex 塞曼效应汞分析仪(Lumex RA-915⁺)进行测定,测定时周围开阔无遮挡物影响。

表层水采集水面以下 10~15 cm 处,采样后盛放与经过超净技术处理的硼硅玻璃瓶中,同时用 0.5% 的盐酸酸化,然后放置于冰箱中冷藏避光保存。采集表层水的同时收集水质参数,水质参数使用美国维塞便携式水质分析仪 EXO 进行收集。

土壤采集表层土壤(0~10 cm);沉积物使用柱状底泥采集器采集表层沉积物(0~10 cm)。上述样品采集后用聚乙烯袋封存,带回实验室,剔除其中的植物根系、碎屑等杂物后自然风干。自然风干的土样研磨过 100 目尼龙筛,密封于聚乙烯袋中,置于阴凉干燥处待用。

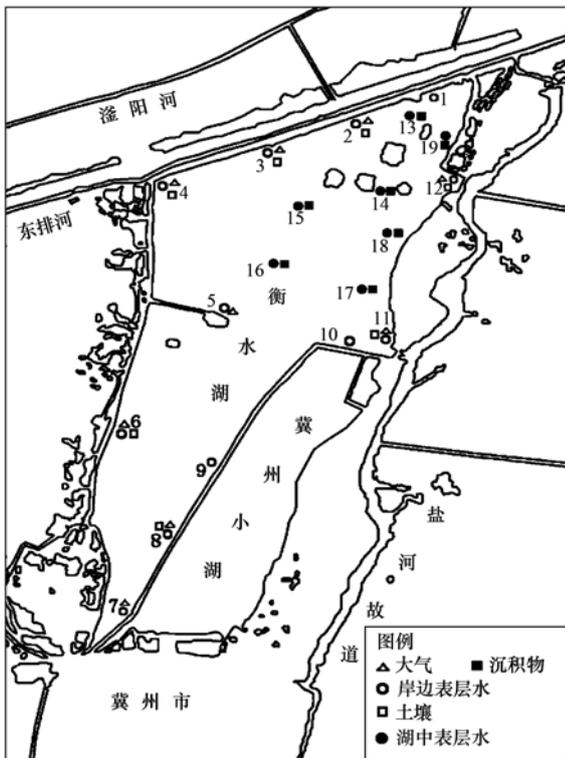


图1 河北衡水湖湿地采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Hengshuihu wetland

1.3 样品分析

大气总汞 (THg_a) 使用俄罗斯 Lumex 塞曼效应汞分析仪 (Lumex RA-915⁺) 直接进行测定获得, 测定时间段为 09:00 ~ 15:00, 每次测定前使用仪器自带校准系统校正仪器. 仪器稳定后, 每隔 30s 手动记录一次仪表上的读数, 共记录 6 次.

表层水中总汞 (THg_w) 利用 BrCl 氧化-SnCl₂ 还原-金捕汞管预富集-冷原子荧光光谱法测定^[7].

土壤/沉积物中总汞 (THg_s) 利用王水水浴消解 BrCl 氧化-SnCl₂ 还原-金捕汞管预富集-冷原子荧光光谱法测定^[8].

为了保证分析数据的可靠性, 样品采用国家标准物质进行质量监控 (水体汞 GSBZ50016-90、土壤 GBW07405). 水体汞标样的回收率为 86% ~ 103%, 土壤标样的回收率为 87% ~ 94%.

1.4 评价方法

1.4.1 地积累指数法

地积累指数法是德国的 Muller 于 1969 年提出的用于研究表层水沉积物中重金属污染程度的方法^[9], 现广泛用于沉积物中重金属污染的评价, 计算方法如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_i}{kB_i} \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为某一重金属的地积累指数; 为该重金属的实测值; k 为考虑到成岩作用可能引起的背景值的变动而设定的常数, 一般 $k = 1.5$; B_i 为该金属的地球环境背景值 (选择河北省表层土壤平均值, $\text{Hg} = 0.036 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

根据地积累指数 I_{geo} 数值的大小, 可以将沉积物中重金属的污染程度分为 7 个等级, 即 0 ~ 6 级, 对应关系见表 2.

表 2 地积累指数 I_{geo} 与重金属污染程度的关系

Table 2 Relationship between I_{geo} and contamination

		grades of heavy metals						
I_{geo}	0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5	
级数	0	1	2	3	4	5	6	
污染程度	清洁	轻度	偏中度	重度	偏重度	重度	严重	

1.4.2 潜在生态风险指数法

选用 Hakanson 提出的用于划分沉积物污染程度以及表层水潜在生态风险的潜在生态危害指数法^[10]来评价汞污染的潜在生态风险, 计算公式如下:

$$C_r^i = \frac{C_i}{C_n} \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (3)$$

式中, C_r^i 为某一金属的污染参数 (单因子污染参数); C_i 为沉积物中污染物的实测值; C_n 为污染物的环境背景值 (选择河北省表层土壤平均值, $\text{Hg} = 0.036 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); E_r^i 为潜在生态风险指数; T_r^i 为单个污染物的毒性响应参数 (Hg 的毒性响应参数为 40).

对于单个金属的潜在生态风险指数对应的潜在生态风险程度为: $E_r^i < 40$ 为低生态风险; $40 \leq E_r^i < 80$ 为中等生态风险; $80 \leq E_r^i < 160$ 为较高生态风险; $160 \leq E_r^i < 320$ 为高生态风险; $E_r^i \geq 320$ 为极高生态风险.

2 结果与讨论

2.1 Hg 污染现状

2.1.1 大气总汞浓度 (THg_a) 与分布特征

衡水湖湿地各采样点的 THg_a 均值分布在 $1.0 \sim 5.0 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 区域内 THg_a 均值为 $(2.9 \pm 0.85) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 略高于北半球大气总汞的背景浓度 $1.5 \sim 2.0 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[11,12] (图 2). 使用 Lumex RA-915⁺ 进行大气总汞测定时的气象条件为无风少云天气, 日平均气温 $20 \sim 27^\circ\text{C}$, 大气污染物扩散相对

缓慢。

图 2 表明, THg_a 均值最高值出现在 106 国道旁的采样点荷花池中, 为 $4.33 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 实时测定时最高可达 $10 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 一般出现高值时有运输车通过, 因此推测可能原因是运输车的尾气排放以及扬尘造成了大气总汞浓度的骤升; THg_a 均值最低值出现在采样点岸堤中, 仅为 $1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 衡水湖湿地周边无重工业, 夏初大气汞来源相对稳定而单一, 多来自居民活动, 106 国道运输车的尾气是夏初衡水湖湿

地地区大气总汞的主要来源. 万奇等^[13]对长白山地区大气气态总汞含量的季节性特征研究中表明, 大气气态总汞具有季节性变化特征, 按含量高低表现为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季. 因此推测衡水湖湿地大气总汞在夏初浓度最低, 是衡水湖湿地地区大气气态总汞的区域背景值. 夏初衡水湖总汞浓度略大于北半球大气总汞的背景浓度, 表明该地区受到一定程度的大气汞污染.

2.1.2 表层水总汞(THg_w)浓度与分布特征

衡水湖湿地 THg_w 在 $0.010 \sim 0.57 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, THg_w 平均浓度为 $(0.081 \pm 0.053) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中岸边 THg_w 平均浓度为 $(0.099 \pm 0.043) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 湖中 THg_w 平均浓度为 $(0.052 \pm 0.009) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3). 有研究表明^[14], 表层水中的总汞浓度能够被某些水质参数所影响, 本研究将表层水总汞浓度与 4 个主要水质参数(水温、pH、溶解氧和氧化还原电位)进行 Pearson 相关矩阵分析, 相关矩阵表(表 3)表明表层水总汞浓度与水温、pH、溶解氧和氧化还原电位这 4 个水质参数均不存在统计意义上的显著相关性.

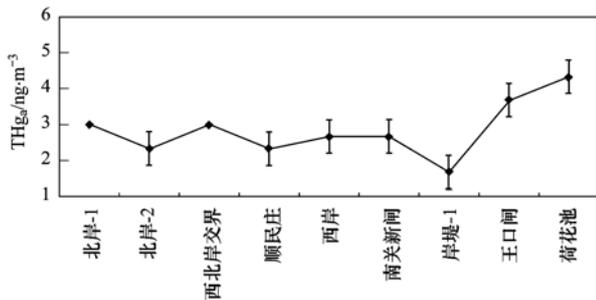


图 2 衡水湖湿地大气总汞的浓度分布

Fig. 2 Distribution of total mercury in atmosphere of Hengshuihu wetland

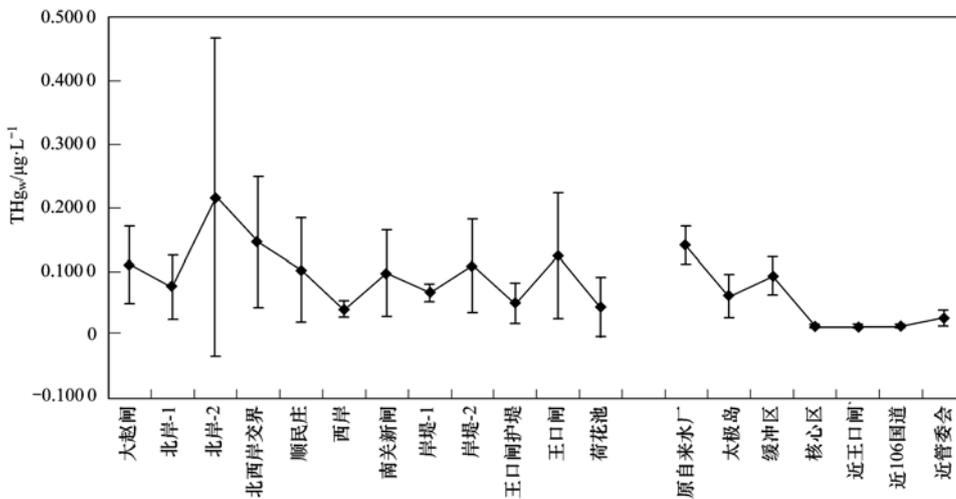


图 3 衡水湖湿地表层水总汞的浓度分布

Fig. 3 Distribution of total mercury in water surface of Hengshuihu wetland

表 3 衡水湖湿地表层水总汞与水质参数间的 Pearson 矩阵¹⁾

Table 3 Pearson's correlation matrix between the total mercury and the variables in surface water of Hengshuihu wetland

	THg_w	温度	溶氧量	pH	氧化还原电位
THg_w	1				
温度	0.332 0	1			
溶氧量	0.337 5	-0.038 25	1		
pH	-0.124 4	-0.191 1	0.300 2	1	
氧化还原电位	-0.168 2	-0.052 22	-0.141 2	-0.065 25	1

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

图 3 表明,衡水湖湿地岸边采样点 THg_w 高值出现在采样点北岸-2、西北岸交界、顺民庄、王口闸等地,湖中 THg_w 的高值则出现在自来水厂、太极岛和缓冲区,这与实际采样过程中,采样点周围是否有行道树遮挡以及人为活动多少直接相关. 实际采样中发现,当地渔民在北岸-2、西北岸交界和王口闸等点放置了多条提供游客进入衡水湖湿地嬉戏和捕鱼的渔船,渔船多采用柴油机作为动力装置;顺民庄的采样点设置在渔船码头,顺民庄为当地居民的一个居住点;湖中的采样点自来水厂、太极岛和缓冲区位于衡水湖湖中航道上,平时渔民捕鱼一般按照航道行进,人为扰动比其他湖中心的采样点剧烈.

2.1.3 土壤/沉积物总汞 (THg_s) 浓度和分布特征

衡水湖湿地土壤/沉积物 THg_s 变化范围为

$0.0010 \sim 0.058 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, THg_s 整体均值为 $(0.027 \pm 0.013) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中绕湖岸边共取 7 个土壤采样点, THg_s 平均值为 $(0.0061 \pm 0.0051) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 湖中沉积物共取 7 个采样点, THg_s 平均值为 $(0.027 \pm 0.013) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4). 图 4 表明,岸边土壤 THg_s 高值出现在 106 国道旁的采样点王口闸和荷花池中;湖中 THg_s 高值出现在采样点太极岛和近王口闸处. 对比河北省表层土壤总汞浓度平均值 $0.036 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 衡水湖湿地土壤和沉积物中的总汞浓度均低于环境背景值,说明衡水湖湿地土壤中不存在汞污染问题,但是在靠近 106 国道的采样点中汞相对富集,同时结合先前对衡水湖湿地沉积物中汞分布特征的研究^[5],认为人为活动是造成衡水湖湿地土壤中汞相对富集的主要原因.

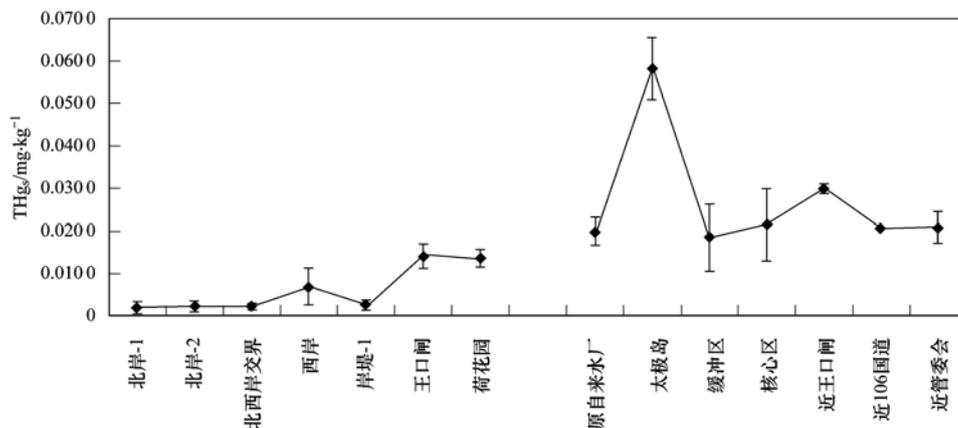


图 4 衡水湖湿地土壤/沉积物总汞的浓度分布

Fig. 4 Distribution of total mercury in soil/sediment of Hengshuihu wetland

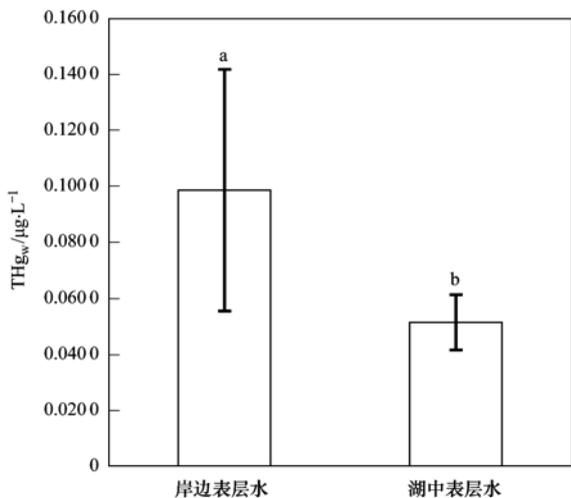
2.1.4 Hg 在不同环境位置和介质中的对比

衡水湖湿地保护区管委会近年加大对衡水湖湿地的环境治理工作,逐渐关闭衡水湖湿地周边所有的重污染企业,限制居民废水排入衡水湖,并且每年进行一次湖中河道淤泥的清淤工程,同时每年从黄河引水补充水源.

在这样的政策条件下,分析不同环境位置下 THg_w 和 THg_s 的差异性(图 5),结果表明,岸边 THg_w 与湖中 THg_w 存在显著差异($P < 0.05$),岸边表层水总汞浓度显著高于湖中心;而图 6 则表明岸边 THg_s 显著低于($P < 0.05$)湖中 THg_s . 不同环境位置下 THg_s 与 THg_w 分布呈现完全相反的趋势. 因此衡水湖湿地中汞来自外源汇入累积,内源释放扩散不是汞的主要来源. 对于 THg_s 与 THg_w 分布特征的可能原因是,与土壤相比较,表层水对污染物容忍程度低,影响表层水总汞浓度属于短期反映,有人为扰动剧烈的地方对应表层水总汞浓度较高,而土壤/

沉积物中汞浓度是长期积累后的反映. 同时汞极易被腐殖质等吸附固定,因此进入水体中的部分汞被沉积物固定,这也是造成沉积物中总汞浓度显著高于岸边土壤的原因.

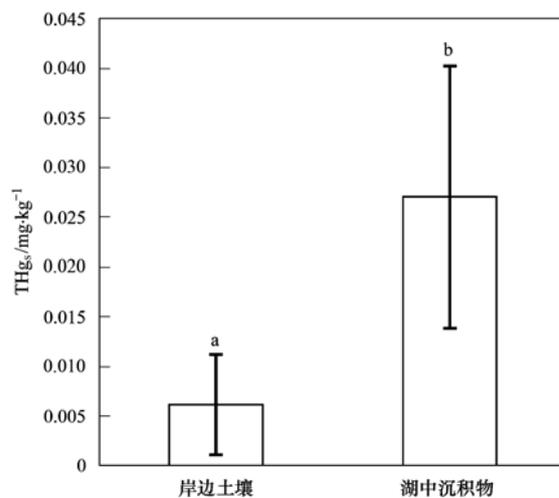
对岸边相同位置采样点 THg_a 、 THg_w 和 THg_s 进行线性相关回归分析(图 7),结果表明, THg_a 与 THg_s 相关性较好,且呈现正相关关系,而 THg_w 与 THg_a 、 THg_s 之间的相关性均较差. 钱建平等^[15]研究发现越靠近公路边的土壤汞污染越严重,公路边的土壤明显受到汽车尾气汞污染的影响. 因此推测衡水湖湿地岸边 THg_a 、 THg_w 和 THg_s 出现这样的相关性的可能原因是衡水湖湿地岸边靠近道路,运输车辆排放尾气以及带来扬尘,尾气和扬尘传输的距离有限,其中的汞最先沉降到岸边土壤中,同时衡水湖湿地保护区管委会为保护衡水湖湿地的环境,在岸边种植了大量的行道树将道路与衡水湖湿地隔开.



a, b 表示有显著差异, $P < 0.05$

图 5 衡水湖湿地表层水总汞浓度岸边与湖中对比

Fig. 5 Comparison of total mercury concentrations in water surface of shore with center of Hengshuihu wetland



a, b 表示有显著差异, $P < 0.05$

图 6 衡水湖湿地土壤/沉积物总汞浓度岸边与湖中对比

Fig. 6 Comparison of total mercury concentrations in soil/sediment of shore with center of Hengshuihu wetland

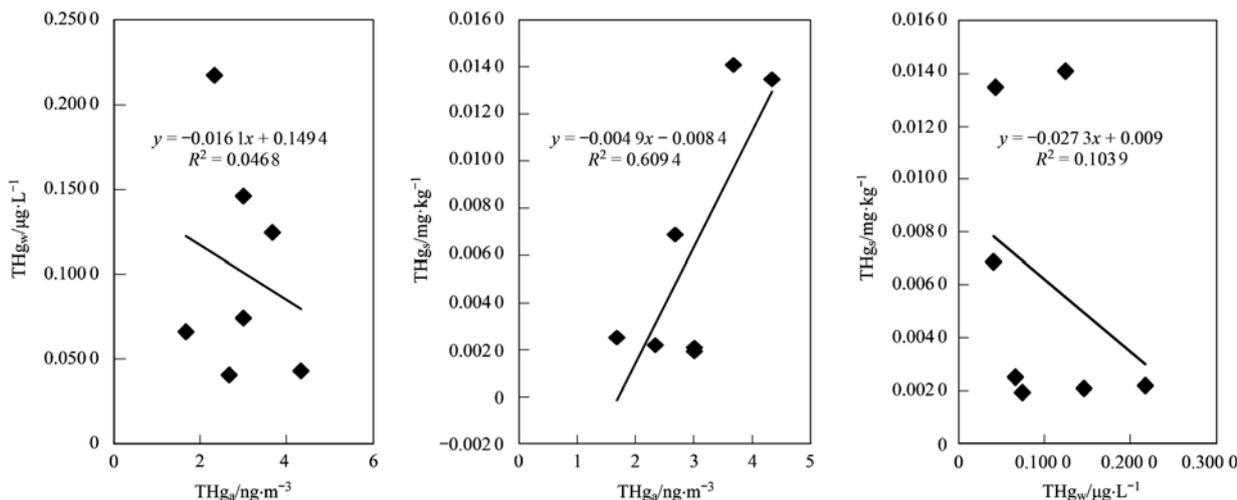


图 7 衡水湖湿地岸边大气、表层水与土壤之间总汞浓度的相关性

Fig. 7 Correlation between total mercury contents in atmosphere, water surface and soil of shore of Hengshuihu wetland

2.2 生态风险评价

2.2.1 地积累指数法

使用地积累指数法来评价衡水湖湿地土壤/沉积物中的汞污染的程度(表 4), 得出衡水湖湿地土壤/沉积物中汞的 I_{geo} 指数均为负值, 污染级数均为清洁级别, 衡水湖湿地地区没有受到汞的污染。

2.2.2 潜在风险指数法

使用潜在风险指数法来评价衡水湖湿地土壤/沉积物中汞的潜在生态风险程度(表 5), 可以看出, 衡水湖湿地地区汞潜在生态风险指数除去太极岛采样点均小于 40, 为低生态风险, 即汞对整个衡水湖湿地的生态环境不会产生不利影响。太极岛采样点的潜在生态风险指数为 64.76, 为中度生态风险。就

个别采样点存在中度生态风险而言, 衡水湖湿地沉积物中累积的汞可能影响衡水湖湿地的生态安全, 但考虑到其余各采样点低生态风险的状况, 可在后续研究中特别监测太极岛附近沉积物中汞含量与潜在生态风险。

2.3 Hg 污染现状与 10 年前的比较与分析

关于衡水湖湿地汞污染的前期研究, 在 2005 年的 5 月和 6 月对衡水湖湿地进行了土、水和植物中重金属污染的调研^[3,4], 因此根据 10 年间采样点的不同, 选择与本研究采样点一致的进行表层水和土壤/沉积物总汞浓度数据的比较和分析(图 8 和图 9)。

2005 年衡水湖湿地 THg_w 平均浓度为(0.58 ±

表 4 衡水湖湿地土壤/沉积物汞地积累指数及污染级数

Table 4 Values of index of geoaccumulation and pollution grades of mercury in soil/sediment of Hengshuihu wetland

岸边土壤	I_{geo} 指数	污染级数	湖中沉积物	I_{geo} 指数	污染级数
北岸-1	-9.01	0	原自来水厂	-5.65	0
北岸-2	-8.82	0	太极岛	-4.10	0
西北岸交界	-8.90	0	缓冲区	-5.76	0
西岸	-7.18	0	核心区	-5.54	0
岸堤-1	-8.63	0	近王口闸	-5.06	0
王口闸	-6.15	0	近 106 国道	-5.60	0
荷花园	-6.21	0	近管委会	-5.58	0

表 5 衡水湖湿地土壤/沉积物汞潜在风险指数及潜在生态风险评价

Table 5 Potentially ecological risk index and grades of mercury in soil/sediment of Hengshuihu wetland

岸边土壤	E_r^i	潜在生态风险程度	湖中沉积物	E_r^i	潜在生态风险程度
北岸-1	2.16	低生态风险	原自来水厂	22.11	低生态风险
北岸-2	2.45	低生态风险	太极岛	64.76	中度生态风险
西北岸交界	1.11	低生态风险	缓冲区	20.56	低生态风险
西岸	7.64	低生态风险	核心区	23.87	低生态风险
岸堤-1	2.81	低生态风险	近王口闸	33.24	低生态风险
王口闸	15.65	低生态风险	近 106 国道	22.89	低生态风险
荷花园	14.97	低生态风险	近管委会	23.20	低生态风险

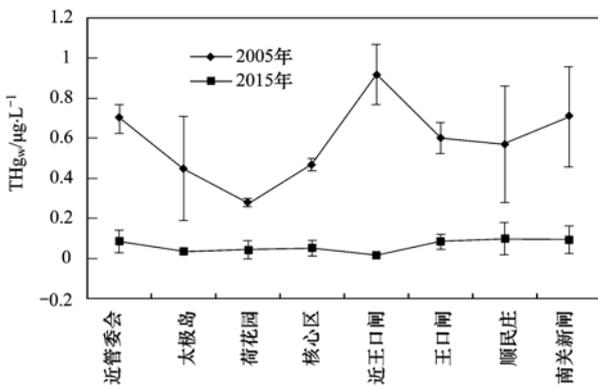


图 8 衡水湖湿地 2005 年与 2015 年表层水总汞浓度对比
Fig. 8 Comparison of total mercury concentrations in water surface of year 2005 with 2015 of Hengshuihu wetland

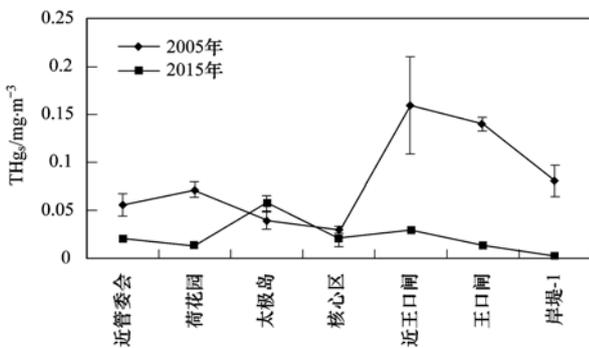


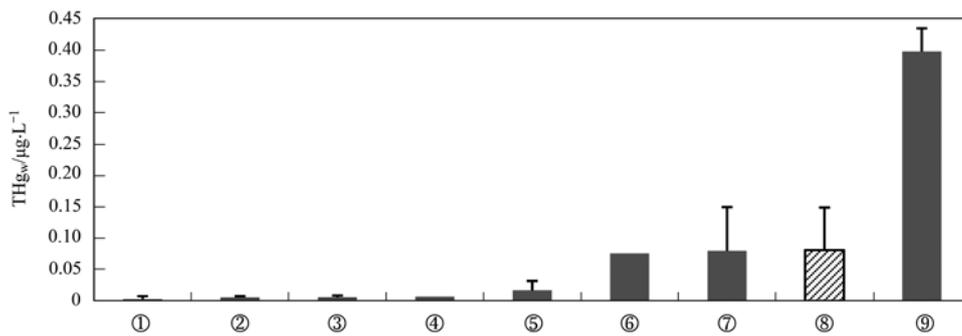
图 9 衡水湖湿地 2005 年与 2015 年土壤/沉积物总汞浓度的对比
Fig. 9 Comparison of total mercury concentrations in soil of year 2005 with 2015 of Hengshuihu wetland

0.18) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 而 2015 年衡水湖湿地 THg_w 平均浓度

为 $(0.081 \pm 0.053) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 与表层水中的总汞浓度相差一个数量级; 2005 年衡水湖湿地 THg_s 均值为 $(0.082 \pm 0.045) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而 2015 年衡水湖湿地 THg_s 均值为 $(0.027 \pm 0.013) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤/沉积物中总汞浓度在王口闸附近有明显降低. 结合水文局提供的衡水湖湿地水质的历史资料, 2005 年衡水湖湿地表层水为 V 类水标准, 现水质已经改善为 III 类水标准; 2005 年对衡水湖湿地沉积物中的常见重金属污染进行了潜在生态风险评价, 结果表明 Hg 是高风险元素, 沉积物中的重金属污染主要以 Hg 污染为主^[4], 而现在对衡水湖湿地土壤/沉积物中的 Hg 进行潜在生态风险评价则得出了 Hg 为低生态风险的结论. 衡水湖湿地汞污染得到了明显的改善.

2.4 Hg 污染与其他湖泊的对比比较

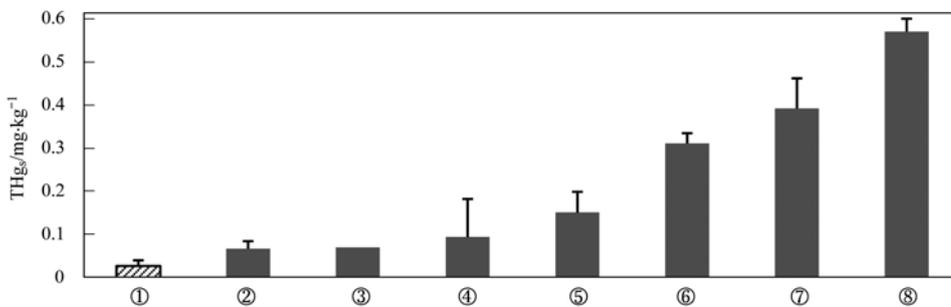
衡水湖湿地 Hg 污染与国内外湖泊相比^[16~28] (图 10 和图 11), 衡水湖湿地 THg_w 与太湖近似, 在国内外均处于高水平; 比较不同湖泊沉积物总汞浓度, 衡水湖湿地 THg_s 处于极低水平 (图 10 和图 11). 比较贵州红枫湖、江苏太湖和洪泽湖与衡水湖湿地 Hg 污染的特征: 贵州是中国汞矿最主要的开采地, 贵州境内的湖泊或多或少受到直接的汞污染, 红枫湖表层水中总汞浓度处于低水平, 但沉积物中的总汞浓度则处于高污染水平; 江苏太湖和洪泽湖均属长江流域水系, 太湖、洪泽湖与衡水湖湿地同为无直接汞污染湖泊, 水体和沉积物总汞浓度近似, 均处于中游水平.



①Lake Gosainkunda, Nepal^[16]; ②Lake Phewa, Nepal^[16]; ③Lake Superior, U. S.^[17]; ④红枫湖, 贵州^[18]; ⑤洪泽湖, 江苏^[19]; ⑥百花湖, 贵州^[20]; ⑦太湖, 江苏^[19]; ⑧本研究; ⑨Kodai, India^[21]

图 10 衡水湖湿地水体总汞浓度与其他湖泊的比较

Fig. 10 Comparison of total mercury concentrations in waterbody of Hengshuihu wetland with other lakes



①本研究; ②Lake Neusiedl, Austria^[22]; ③洪泽湖, 江苏^[23]; ④太湖, 江苏; ⑤乌梁素海, 内蒙古^[25]; ⑥Kodai, India^[21]; ⑦红枫湖, 贵州^[26]; ⑧Lake Geneva, Switzerland^[27]

图 11 衡水湖湿地沉积物总汞浓度与其他湖泊的比较

Fig. 11 Comparison of total mercury concentrations in sediment of Hengshuihu wetland with other lakes

3 结论

(1)衡水湖湿地汞污染在总量上有: THg_a 略高于北半球大气汞平均浓度范围; THg_w 为地表水环境质量标准中的Ⅲ类水标准; THg_s 低于河北省和全国总汞浓度平均值, 在个别地区相对富集. 在分布特征上有: 岸边 THg_w 显著高于湖中 THg_w , 但岸边 THg_s 显著低于湖中 THg_s ; 岸边 THg_a 与 THg_s 呈正相关关系. 衡水湖湿地中汞主要来源为外源汇入累积, 同时人为活动是影响汞在衡水湖湿地中累积和分布的重要原因.

(2)应用地积累指数法和潜在生态指数法, 评价衡水湖湿地区域内汞污染的生态风险, 结果均显示低生态风险, 即汞不会造成衡水湖湿地生态风险.

(3)与 10 年前衡水湖湿地地区相比较, 汞污染程度从高生态风险降低为低生态风险; 在国内外湖泊中, 衡水湖湿地汞污染状况与一般无直接汞污染的湖泊类似, THg_w 处于较高水平, 但 THg_s 是极低水平, 整体处于中游水平, 区域环境良好.

参考文献:

- [1] Lindqvist O. Special issue of first international on mercury as a global pollutant[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1991, **56** (1): 19-22.
- [2] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury—an overview [J]. Atmospheric Environment, 1998, **32**(5): 809-822.
- [3] Zhang M Y, Cui L J, Sheng L X, *et al.* Distribution and enrichment of heavy metals among sediments, water body and plants in Hengshuihu Wetland of Northern China[J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(4): 563-569.
- [4] 张曼胤, 崔丽娟, 盛连喜, 等. 衡水湖湿地底泥重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 湿地科学, 2008, **5**(4): 362-369.
- [5] 陈吉, 李秋华, 李仲根, 等. 河北省衡水湖沉积物中汞的分布特征及生态风险[J]. 生态毒理学报, 2014, **9**(5): 908-915.
- [6] 黎聪, 李晓文. 衡水湖湿地恢复预案空间模拟及生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(6): 1312-1321.
- [7] 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.
- [8] 李仲根, 冯新斌, 何天容, 等. 王水水浴消解-冷原子荧光法测定土壤和沉积物中的总汞[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, **24**(2): 140-143.
- [9] Förstner U, Ahlf W, Calmano W. Sediment quality objectives

- and criteria development in Germany [J]. *Water Science and Technology*, 1993, **28**(8-9): 307-316.
- [10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Effler S W, Bloom N S. Seasonal variability in the mercury speciation of Onondaga Lake (New York)[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1990, **53**(3-4): 251-265.
- [15] 钱建平, 张力, 张爽, 等. 桂林市汽车尾气汞污染[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 944-950.
- [16] Sharma C M, Kang S C, Sillanpää M, *et al.* Mercury and selected trace elements from a remote (Gosainkunda) and an urban (Phewa) lake waters of Nepal[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, **226**: 6.
- [17] Babiarz C, Hoffmann S, Wieben A, *et al.* Watershed and discharge influences on the phase distribution and tributary loading of total mercury and methylmercury into Lake Superior [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 299-310.
- [18] 何天容, 吴玉勇, 冯新斌. 富营养化对贵州红枫湖水库汞形态和分布特征的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(2): 208-214.
- [19] 王伟, 樊祥科, 黄春贵, 等. 基于长期定位监测数据的江苏主要湖泊渔业水质比较分析与综合评价[J]. *江苏农业科学*, 2015, **43**(4): 371-374.
- [20] 侯亚敏, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州百花湖表层水中不同形态汞的分布规律[J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(2): 125-132.
- [21] Karunasagar D, Krishna M V B, Anjaneyulu Y, *et al.* Studies of mercury pollution in a lake due to a thermometer factory situated in a tourist resort: Kodaikkanal, India [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **143**(1): 153-158.
- [22] Jirsa F, Pirker D, Krachler R, *et al.* Total Mercury in sediments, macrophytes, and fish from a shallow steppe lake in Eastern Austria[J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2014, **11**(8): 1263-1275.
- [23] 余辉, 张文斌, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 437-444.
- [24] 张于平, 瞿文川. 太湖沉积物中重金属的测定及环境意义[J]. *岩矿测试*, 2001, **20**(1): 34-36.
- [25] 赵胜男, 史小红, 李畅游, 等. 乌梁素海水体汞的分布特征及污染风险评估[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(2): 221-227.
- [26] 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.
- [27] Diez E G, Bravo A G, à Porta N, *et al.* Influence of a wastewater treatment plant on mercury contamination and sediment characteristics in Vidy Bay (Lake Geneva, Switzerland)[J]. *Aquatic Sciences*, 2014, **76**(S1): 21-32.
- [28] 滑丽萍, 华璐, 高娟, 等. 中国湖泊底泥的重金属污染评价研究[J]. *土壤*, 2006, **38**(4): 366-373.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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@reces. 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@reces. 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