

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香薹(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征

樊宇飞¹, 刘伟豪¹, 孙涛¹, 苑萌², 吕东威¹, 李先源², 王永敏^{1,3}, 王定勇^{1,3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 西南大学园艺园林学院, 重庆 400715; 3. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 为了解城市人工湿地水体中汞的时空分布及甲基化特征, 以便探究其潜在的汞暴露生态风险, 在重庆市选择4个不同类型的人工湿地, 于2017年3月~2018年3月, 按季度采集垂直剖面水样, 分析总汞(THg)和甲基汞(MeHg)的分布。结果表明: 城市人工湿地由于景观布局、功能设置不同, 其汞分布特征有一定差异。4个湿地水体THg均高于背景水域, 但远低于有污染历史的水体; 湿地中部水体THg均略高于进、出水口, 表明城市湿地对水体THg有截留作用。除彩云湖湿地出水口MeHg浓度高于入水口外, 其余3个湿地出水口MeHg均低于入水口; 湿地中水体MeHg呈随水深增加而升高的趋势, 且MeHg占THg的比例(MeHg/THg)均高于其他水域, 说明城市湿地具有净汞甲基化的作用。4个城市湿地水体THg春秋两季高, 夏季略有降低, 冬季最低; 水体MeHg冬季最低, 而其他三季差异不大但远高于冬季, 约为冬季的3倍。本研究明晰了城市湿地中汞的时空分布和甲基化规律, 探究了人类活动对湿地的干扰程度和湿地的响应特征以及湿地汞对下游流域的影响, 从控制潜在汞暴露风险的角度, 为人工湿地建设提供建议。

关键词: 人工湿地; 汞; 甲基汞; 甲基化; 季节变化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2226-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809203

Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands

FAN Yu-fei¹, LIU Wei-hao¹, SUN Tao¹, YUAN Meng², LÜ Dong-wei¹, LI Xian-yuan², WANG Yong-min^{1,3}, WANG Ding-yong^{1,3*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: To explore the spatial and temporal distribution and the methylation characteristics of mercury in different constructed wetlands in cities, and to understand the potential ecological exposure of mercury in urban wetlands, four artificial wetlands in Chongqing were studied from March 2017 to March 2018. The water samples were collected separately in four quarters, and the mass concentration of total mercury (THg) and methyl mercury (MeHg) was researched for one year. The results showed that the THg concentration in the four wetland waters is higher than the background value of the world's lakes and reservoirs for dam construction, but it is far lower than the waters with pollution history. The THg mass concentration of the water inside the wetlands is slightly higher than in the inlet and outlet. In addition, the THg mass concentration in the aquatic plant growing area, the construction area, the cruise ship parking area, and the frequent play area has an increasing trend, indicating that urban wetlands have a trapping and converging effect of the water's THg, so human activities influence total mercury a lot. The mass concentration of MeHg in the four wetland waters was slightly higher than that in other water bodies. With the exception of the Caiyun Lake, where the mass concentration of MeHg at the outlet was higher than that of the water inlet, the other three wetlands showed lower MeHg mass concentration in the outlet than the inlet. The mass concentration of MeHg in the wetland water increased with increasing water depth. The ratio of MeHg concentration to THg mass concentration (MeHg/THg) was higher than in other waters, indicating that urban wetlands have effect on net mercury methylation from waters. The photoreduction of mercury and its absorption by aquatic plants can reduce the mercury load from urban wetlands to downstream watersheds. The THg mass concentration of the four urban wetland water bodies was high in the spring and autumn, with a slight decrease in the summer, and lowest in the winter. The mass concentration of MeHg was the lowest in winter, and in the other three seasons it was basically flat, about three times higher than in winter. This study clarifies the temporal and spatial distribution and methylation of mercury in urban wetlands. It explores the degree of disturbance of human activities on wetlands and the response characteristics, as well as the impact of wetland mercury on downstream watersheds. To avoid potential mercury exposure, measures need to be established for the construction of artificial wetlands.

Key words: constructed wetland; mercury; methylmercury; methylation; seasonal variation

汞是一种具有严重生理毒性的全球性重金属污染物。汞主要以无机汞的形态存在于环境介质中, 无机汞一旦进入水生或湿地生态环境, 被转化为毒性更强的甲基汞^[1]。汞及其衍生物(尤其是甲基

收稿日期: 2018-09-26; 修订日期: 2018-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671469, 41603103); 国家大学生创新训练重点项目(201710635031)

作者简介: 樊宇飞(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: fanyufei@swu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

汞)因具有高机动性,易被生物富集等特点,受到了国内外研究者的广泛关注^[2].

湿地生态系统是介于水、陆生态系统之间的一种生态单元,广泛分布于世界各地,是地球上最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一^[3].湿地的类型有很多,主要包括河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地等自然湿地和淡水养殖场、废水处理场所、城市人工景观水面等人工湿地.湿地地处水陆交错地带,对流经湿地的污染物质具有去除作用,湿地因此也成为污染物重要的源和汇,影响污染物的地球化学循环.湿地易受人类活动影响,随着人类干扰强度的增大,自然湿地正在逐步退化和消失.借助河流、水库、暴雨集水池修建城市湿地公园为维护水体景观、涵养水源、改善水质提供了良好的方案,但与此同时城市环境也使得湿地污染物来源途径更加复杂多样,湿地环境变化会对湿地内部汞的生物地球化学循环产生重要的影响,同时也会为下游流域带来一定汞负荷.湿地原生境保护与人类活动之间的矛盾使得城市湿地已成为国内外相关学者亟待关注的新研究领域^[4].

当前国内外湿地汞研究主要集中在自然湿地和高背景值的汞矿区域等天然环境或筑坝蓄水的新建水库和农业小流域等有明显点、面源污染的干扰环

境中^[5].而对处于城市之中与居民生活、健康息息相关的具有非点源污染的城市湿地研究较少.对于不同类型人工湿地汞的时空分布和迁移转化规律尚不明晰;对城市湿地内部汞循环及其汞在地球化学循环中起到的作用尚不明确.因此,本文选取重庆市主城区4个不同类型的人工湿地为研究对象,分析城市湿地中汞的时空分布特征及甲基化规律,进一步明晰汞在城市湿地中的地球化学循环以及城市湿地对下游流域的影响,明确人类活动对湿地生态的干扰程度和湿地的响应机制,从控制潜在汞暴露风险的角度,以期为人造湿地建设提供建议.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

重庆市位于长江中下游,境内多山地丘陵、河流水库.在20世纪90年代水体污染治理的历史背景下,形成了一大批资源复合型的城市湿地.本文选取重庆市主城区4个不同的人工湿地为研究对象:观音塘湿地(水体自净)、秀湖湿地(游玩休憩)、彩云湖湿地(污水处理)和园博园湿地(园林保护).于2017年3月起,分4个季度分层采集水体样品进行为期1a的研究.4个湿地公园的地理位置以及采样点示意如图1所示.

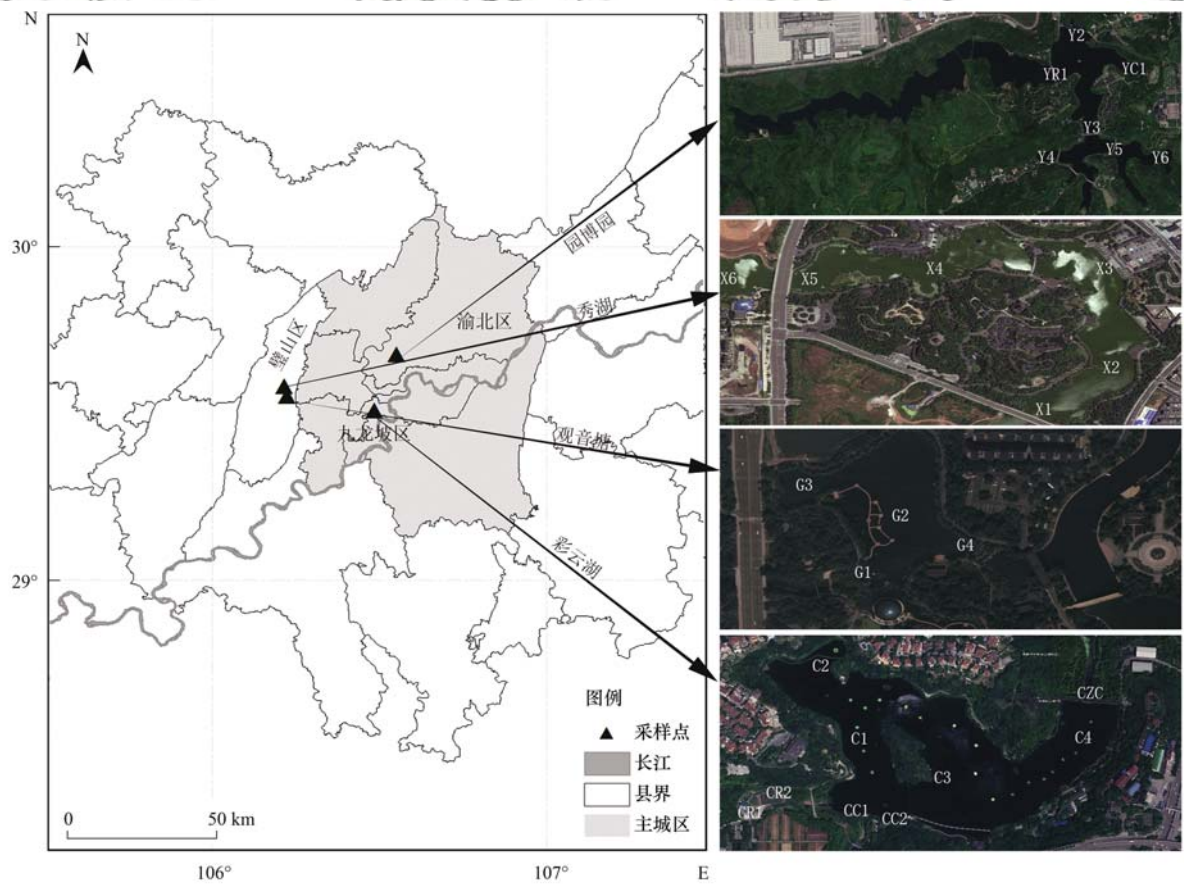


图1 采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points

观音塘湿地是璧南河污水整治项目的产物, 具有丰富的水生植物链, 现为湿地保护科普基地(定期有工作人员打捞水生植物枯落物)。秀湖湿地是为了改善因淡水养殖导致水体富营养化的居民饮用水源地水质、涵养水源依托壁南水库修建而成的城市湿地。园博园和彩云湖湿地位于城市集约化程度高的主城区, 临近居民区、工业区。园博园湿地是结合多功塔公园, 借助周围农田、丘陵地形蓄水形成的人工园林, 无早期污染历史。彩云湖湿地前身是有污染历史的垃圾堆放场和臭水塘, 为治理污染、净化水质借助上游的雨水收集池及桃花溪水系建成梯度明显的人工湿地。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 水样样品采集

用 Nisiki 采样器在每个采样点采集水样, 从表层到深层按照每 4 m 采取一个水样样品, 保存于超净化处理(30% 硝酸浸泡 24 h 后, 500℃ 高温 40 min)的 500 mL 高硼硅玻璃瓶, 放入冷藏样品箱(4℃)中带回实验室存放。一周内测定其溶解性有机碳(DOC)、活性汞(RHg)、THg、MeHg 质量浓度。每次采集样品时现场测定水体 pH(PT-10 便携式 pH 测定仪, 德国 Sartorius 公司)、溶解氧 DO(550A 便携式溶解氧仪, 美国 YSI 公司)指标。全年累计共采得水样样本 386 个。

1.2.2 水样分析方法

过滤部分水样(0.45 μm Millipore 滤膜)测定 DOC(TOC 分析仪), 未过滤水样的 THg 和 MeHg 浓度分别按照金汞齐富集-原子荧光法^[6]和蒸馏-乙基化 GC-CVAFS 法^[7]测定。水样总磷(TP)和总氮

(TN)分别采用钼酸铵分光光度法^[8]和碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法^[9]测定。

1.2.3 质量控制

样品指标测定过程中, 采用空白实验、平行测定及加标回收控制质量, 实验空白值较低, 仅为样品测定值的 1% ~ 5%。平行样测定相对标准偏差 -8.6%。THg 加标回收率为 83% ~ 121%, MeHg 加标回收率 90% ~ 115%。

2 结果与讨论

2.1 城市湿地水体中汞浓度分布

重庆市 4 个人工湿地 THg 质量浓度在(4.17 ± 2.85) ~ (7.59 ± 11.33) ng·L⁻¹, MeHg 浓度(0.30 ± 0.18) ~ (0.39 ± 0.71) ng·L⁻¹之间(表 1), 远低于我国环境质量标准(GB 3838-2002)^[10]中规定的 I 类地表水汞质量浓度标准(50 ng·L⁻¹)。与国内外其他水体相比, 城市人工湿地 THg 质量浓度高于美国的 Spring Lake、加拿大的 Experimental Reservoir 等背景水体^[11~13], 但低于云南滇池等富营养化严重或有汞污染历史的湖泊水系^[14~16]; 高于同地区人为污染少的森林湖泊四面山大洪海^[17], 但低于具有相似地质条件, 有典型点源、面源污染的三峡库区农田小流域和长寿湖水库^[18,19]。MeHg 质量浓度均略高于以上水域。城市湿地水体虽易受城市环境和人为活动影响, 但相对受工业排放点源污染和农业面源污染的湿地系统, 接受经过污水处理厂处理过后的生活污水的城市湿地水体所受的汞污染较小, 以水体维护、园林保护和游玩休憩为功能定位城市湿地所受汞污染更微乎其微。

表 1 重庆市人工湿地 THg 和 MeHg 质量浓度与国内外水体比较

Table 1 THg and TMeHg concentrations in the wetlands in Chongqing and other aquatic systems

地名	水体功能	湖水			文献
		THg/ng·L ⁻¹	MeHg/ng·L ⁻¹	MeHg/THg/%	
Spring Lake, USA	背景值	1.5 ± 0.87	0.1 ± 0.12	6.7	[11]
Experimental Reservoir, Canada	新建水库	1.1 ~ 6.0	0.1 ~ 2.1	9.0	[12]
Balaton Lake, Hungary	旅游景点	1.4 ~ 6.5	0.08 ~ 0.44	5.7	[13]
小浪底水库	筑坝拦蓄	1.72 ± 0.40			[14]
红枫湖	富营养化	2.5 ~ 14	0.05 ~ 0.92	2.0	[15]
滇池	曾经汞污染	30 ± 8	0.24 ± 0.7	0.8	[16]
四面山大洪海	森林湖泊	1.89 ± 0.72	0.13 ± 0.04	6.9	[17]
农田小流域	三峡库区	13.54 ± 10.55	0.22 ± 0.42	1.6	[18]
长寿湖水库	富营养化	14.7 ± 12.24	0.41 ± 0.47	2.8	[19]
观音塘湿地	富营养化	4.27 ± 1.76	0.30 ± 0.18	8.2	本研究
秀湖湿地	游玩休憩	4.59 ± 2.19	0.38 ± 0.23	9.9	本研究
园博园湿地	园林保护	4.17 ± 2.85	0.35 ± 0.25	13.8	本研究
彩云湖湿地	废污回用	7.59 ± 11.33	0.39 ± 0.71	15.4	本研究

2.2 城市人工湿地中汞的空间分布特征

2.2.1 城市人工湿地水体汞沿水流方向的分布特征

从表 2 看, THg 质量浓度在 4 个人工湿地出

水口均低于进水口, 均有所降低, 但在湿地内部(尤其是个别点位)有所抬升。水体流经观音塘、秀湖、园博园湿地前后, MeHg 质量浓度以及

MeHg/THg 有所降低, 彩云湖湿地则呈现相反的趋势.

湿地系统中水体汞的来源主要分为内源汞和外源汞, 内源汞主要受地质来源和湿地环境条件影响, 外源汞受流经湿地的水流来源、大气干湿沉降以及周边环境和人类活动影响. 甲基汞的浓度主要与可促进汞甲基化微生物活性以及提高汞生物可利用性的环境条件相关^[20,21]. 一方面, 人工湿地内部 THg 质量浓度的变化容易受到上游来水水质、暴雨突发事件和高地径流的影响. 彩云湖湿地前置暴雨集水池-污水处理设施, 上游来水量大、流速快、水质变化复杂, 使得湿地被迫接纳大量外来水体, 其内部 THg 质量浓度有所抬升, 但从总体上来看, 彩云湖湿地对上游来水有很强的缓冲和稀释作用. 园博园湿地较为封闭, 降雨事件带来的高地径流携带大量颗粒物进入水体, 引起湿地内部水体 THg 质量

浓度的升高; 另一方面, 人工湿地自身的景观设置和地质来源也会对湿地内部的 THg 质量浓度产生影响. 观音塘湿地拥有层次丰富的水生植物, 利于颗粒物沉降, 对水体颗粒物有一定截留作用, 且水生植物的根系分泌物以及枯落物脱落、降解可能导致水体中 DOC 质量浓度增加, 而 DOC 和腐殖质能与汞生成稳定的络合物, 能够吸收大气沉降和径流输入的汞, 促进 THg 的转运^[3]. 如表 3 所示湿地水体 THg 质量浓度和 DOC 含量表现出极显著正相关关系. 与此同时, 观音塘湿地中对水生植物残体高频率打捞也对汞转运有重要影响. 虽然湿地内部 THg 质量浓度可能受到各种外界和自身条件影响有所增加, 但湿地系统对下游流域 THg 输出表现为削减的态势, 这可能是由于人工湿地水生植物对颗粒物的截留作用以及长时间水力停留所产生的沉降作用及对水生植物枯落物的定期打捞.

表 2 重庆市不同人工湿地水体汞质量浓度和水质参数

Table 2 Mercury concentration and water quality parameters of different constructed wetlands in Chongqing											
名称	点位	RHg /ng·L ⁻¹	THg /ng·L ⁻¹	MeHg /ng·L ⁻¹	MeHg/THg /mg·mL ⁻¹	TP /mg·mL ⁻¹	TN /ng·L ⁻¹	DOC /mg·L ⁻¹	DO /mg·L ⁻¹	Eh	pH
秀湖湿地公园	入口	0.41	4.74	0.42	0.09	0.05	0.40	5.36	11.5	137	8.2
	内部	0.37	4.86	0.38	0.09	0.03	0.38	5.80	9.5	143	8.3
	出口	0.37	4.39	0.36	0.08	0.04	0.38	4.26	9.8	93	8.4
观音塘湿地公园	入口	0.52	4.51	0.42	0.09	0.15	0.47	4.02	10.1	137	7.9
	内部	0.42	4.81	0.28	0.07	0.16	0.43	6.41	11.7	124	8.0
	出口	0.36	3.97	0.22	0.07	0.14	0.39	3.53	7.4	162	7.8
彩云湖湿地公园	入口(集水池)	0.95	10.58	0.41	0.05	0.67	0.25	17.01	29.8	98	7.5
	入口	0.81	5.36	0.24	0.07	0.10	0.25	4.76	12.9	187	8.0
	内部	0.50	5.90	0.40	0.14	0.09	0.22	10.80	23.5	139	8.8
	出口	0.62	5.19	0.44	0.22	0.06	0.2	6.28	18.3	161	8.4
园博园湿地公园	入口	0.90	4.31	0.33	0.11	0.11	0.42	1.54	11.4	173	8.0
	内部	0.47	4.50	0.34	0.07	0.07	0.37	6.12	10.3	117	8.6
	出口	0.64	3.96	0.26	0.06	0.07	0.37	4.99	10.6	115	8.4

表 3 重庆市湿地水体汞与水质参数的相关性

Table 3 Correlation between mercury and water quality parameters of wetland water in Chongqing									
项目	相关性	THg	MeHg	TP	TN	DOC	DO	Eh	pH
THg	Pearson 相关性		0.364	0.908 **	-0.536	0.923 **	0.890 **	-0.315	-0.433
MeHg	Pearson 相关性			0.15	-0.206	0.385	0.466	-0.264	0.185

MeHg 净含量是沉积物汞释放、湿地甲基化和水体稀释作用等多重因素相互影响的结果, 对水生植物枯落物的定期打捞可以带走植株体内富集的 MeHg, 有利于削减湿地 MeHg 库. 沉积物的汞释放是水体 MeHg 的重要来源, 对于观音塘、秀湖、园博园湿地而言, 其底泥发育较浅、沉积物汞背景值较低, 而彩云湖湿地由于具有早期的重金属污染历史, 其沉积物中 THg 和 MeHg 质量浓度较高, 且表层沉积物中有机质丰厚、微生物活跃, 也使其甲基化作用更为明显^[22,23]. 另外, 沉积物中的甲基汞占

比较高, 甲基汞可能通过间隙水向水体释放. 彩云湖湿地对下游流域的 MeHg 输出总体呈增加趋势, 可能为下游流域带来一定汞负荷.

对 4 个湿地各个点位数据进行平均, 并按照水流方向做成箱式图, 如图 2 所示. 4 个人工湿地水体 THg 和 MeHg 质量浓度沿湖分布均呈现波动趋势, 一方面, 其变化范围受到上游来水水质变化、暴雨突发事件和高地径流等因素影响, 另一方面, 水生植物的生长和人为活动的干扰也是湿地内部水体波动的重要影响因素. 挺水植物生长区的漂浮植

物设置区附近水体 THg 和 MeHg 质量浓度有所波动,可能是由于植物对水体悬浮颗粒物的拦截作用以及植物根系分泌物的影响.例如:彩云湖湿地 CZ1 和 CZ2 号漂浮植物设置区,观音塘湿地 G3 号洄水区.施工区域附近、游船停泊区和游玩频繁区

域 THg 质量浓度较其他水域有明显上升.例如:秀湖湿地 X1 和 X2 号临近商业住宅区建筑和河堤工程施工区域, X3 号处有游览船舶、休憩亭和喷泉装置, X6 号临近新建别墅区.说明人类活动对于湿地系统的影响较大,城市湿地是生态敏感脆弱区.

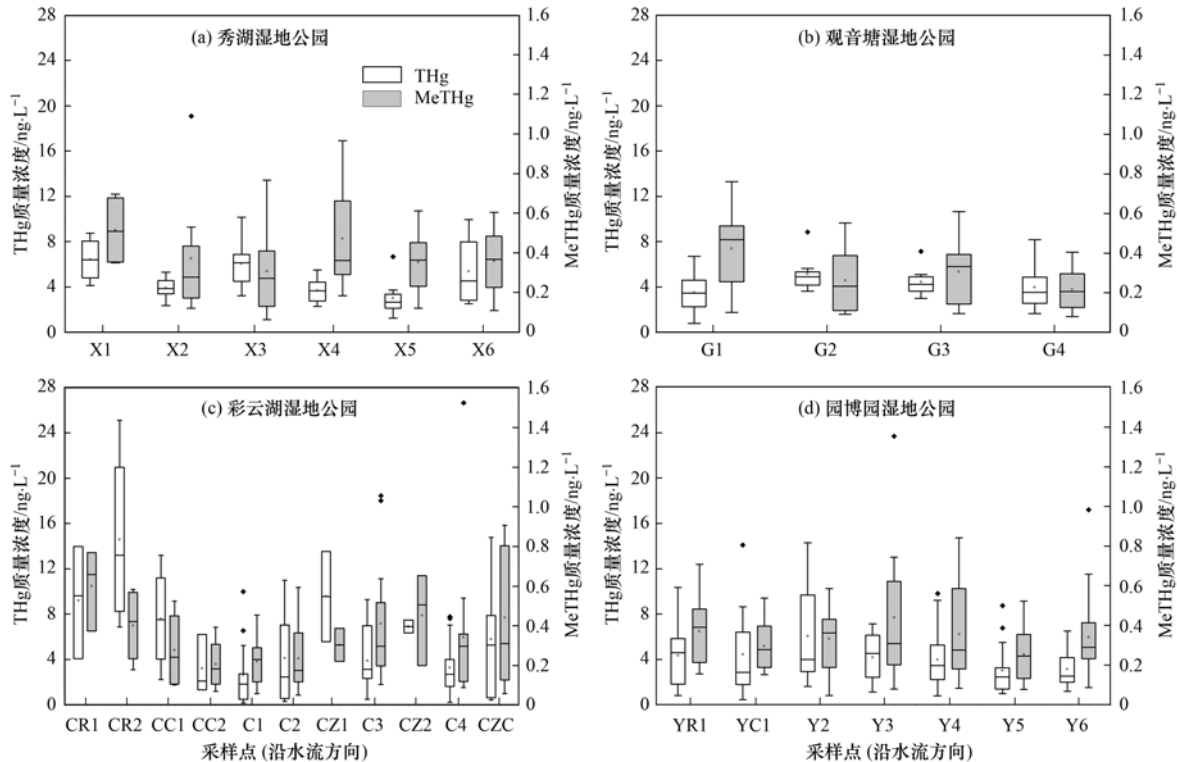


图2 重庆人工湿地 THg 和 MeHg 质量浓度沿水流方向变化

Fig. 2 Mass concentration of THg and MeHg in constructed wetlands in Chongqing with variation along the water flow

观音塘湿地具有丰富的水生植物且定时打捞植物枯落物残体的措施,使得水体流经观音塘湿地整体呈现出污染物沉降、削减的效果,湿地保护示范效果明显.以休憩游玩为主要功能的秀湖湿地受到人为干扰程度最大.水体经暴雨集水池流经彩云湖湿地公园,水质得到明显改善,湿地内部水体汞质量浓度较流经暴雨集水池前明显降低,同时在入水流量大的前提下,湿地内部 MeHg 质量浓度仍有所抬升,这说明彩云湖湿地甲基化环境条件充分,甲基化的作用强,是 MeHg 的一个热点源,但从出水来看,彩云湖 MeHg 产出对下游带来的汞负荷并不大,其源汇作用并不十分显著.园博园湿地个别点位 THg 和 MeHg 质量浓度在受到降雨事件影响下变化大,其水体维护、园林保护作用明显.城市湿地对于上游水质、水量变化和突发降雨事件有一定的缓冲作用.不同的功能设置和景观布局也对人工湿地汞分布产生深远的影响.湿地生态系统在汞地球化学循环中的作用是明显的,诸多过程都会对汞的分布产生影响,是全球重要的碳汇和汞汇,也是重要的甲基汞源^[24],但不同因素作用的强弱以及多

种化学过程的集中作用可能使城市湿地的源、汇作用表现得不尽相同.

2.2.2 人工湿地水体汞的垂直分布特征

4 个湿地水体 THg 和 MeHg 浓度随深度变化呈现波动趋势(图 3),这是由于水体本身的扰动性质决定的.除部分样点外,THg 质量浓度总体上深层大于表层.表层和深层的汞分布是表层水体受干湿沉降、人为影响带来的外源汞和潜层沉积物颗粒物扰动产生的游离内源汞耦合作用的结果.不同地质来源、污染历史的沉积物汞的质量浓度不同,沉积物含水率、孔隙率、间隙水流动性不同,界面水最容易受沉积物间隙水和颗粒物的影响,而表层水体直接接触大气,易受到大气干湿沉降外源汞的影响,同时也容易受到人类活动干扰.彩云湖湿地的污染历史造成沉积物背景值含量较高,水体流速快、流量大,易扰动底部颗粒物、沉积物对水体 THg 贡献效果明显.秀湖湿地 X1 和 X2 号附近有工地施工,表层水体总汞质量浓度反常升高.彩云湖湿地 C3 号(漂浮植物设置区)表层 THg 质量浓度大于 4m 层,这可能是由于植物根系的拦

截作用, 园博园湿地 Y1、Y5 和 Y6 号可能与周围丘陵山地有关, 颗粒物可能在雨水作用下随地表径流进入水体, 从而导致表层水体 THg 略有升高. MeHg 垂直分布总体呈现出深层大于浅层的趋势, 这说明虽然有水体的扰动, 但水体 MeHg 含量分布仍受到了底泥释放 MeHg 较为明显的影响. 彩云湖湿地与其他 3 个湿地相比, 其历史污染造成沉积物具有较高的汞质浓度, 导致其垂直变化更为明显. 另外, 界面反应是双向过程, 大气中的汞通过干湿沉降进入水中, 水中的二价汞在生物

和化学作用下又生成元素汞, 通过水面挥发到大气中. 水中的汞通过吸附、沉淀、生物吸收等途径进入沉积物, 沉积汞也向上覆水中释放, 在空间分布上一方面受水体内在属性的影响, 另一方面也与渔业养殖、工业活动、农业耕种等人为外源输入干扰因素有关^[25,26].

2.3 城市人工湿地中汞的季节分布特征

如表 4 所示, 4 个人工湿地中, THg 质量浓度春秋两季高, 夏季有所降低, 而冬季最低. 夏季, 湿地水体流量大、流速快, 水体的稀释作用可能是

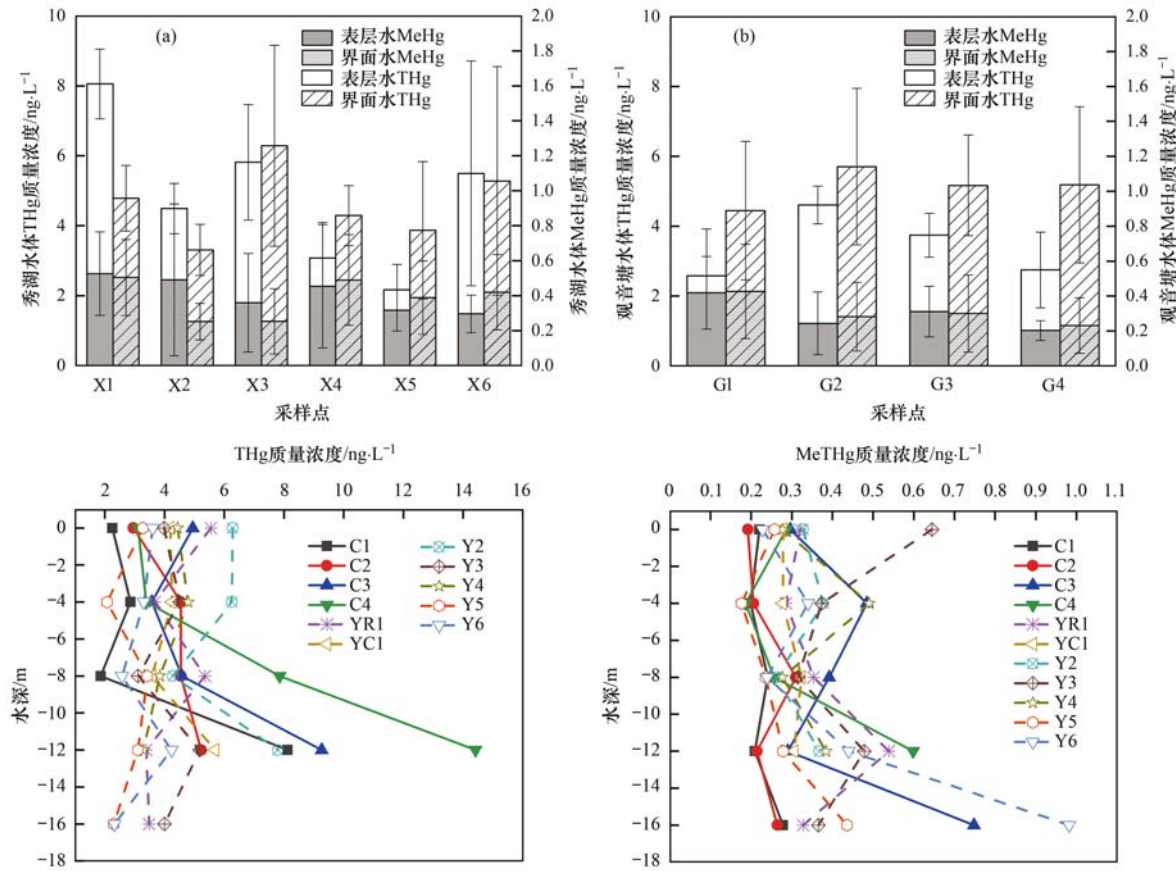


图 3 重庆市人工湿地水体汞质量浓度垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of mercury concentration in constructed wetland waters in Chongqing

表 4 重庆市人工湿地汞质量浓度季节变化

Table 4 Seasonal variation of mercury concentration in constructed wetlands in Chongqing

项目	名称	春季	夏季	秋季	冬季
THg 质量浓度平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	观音塘	5.59	3.45	4.14	3.91
	秀湖	6.15	4.19	5.50	3.08
	园博园	5.12	2.75	6.92	1.77
	彩云湖	10.38	5.29	8.40	2.00
MeHg 质量浓度平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	观音塘	0.40	0.36	0.31	0.11
	秀湖	0.43	0.52	0.39	0.16
	园博园	0.42	0.40	0.37	0.16
	彩云湖	0.46	0.35	0.34	0.16
MeHg/THg(平均值)/%	观音塘	7.2	10.4	8.1	3.2
	秀湖	7.1	12.6	7.4	5.3
	园博园	8.3	13.7	6.9	5.7
	彩云湖	8.5	15.2	8.7	5.4

其 THg 质量浓度低的主要原因. 而在冬季, 水体流量小、流速低、颗粒物携带量少且易于沉降, 底部沉积物不易受到扰动, 此外冬季湿地公园游客量小, 人为扰动也较小, 因而 THg 浓度最低. 水体 MeHg 质量浓度也在冬季最低, 而其它季节变化不大, 约是冬季的 3 倍. 季节变化带来的温度、微生物活性等甲基化条件变化, 使得湿地甲基化作用具有季节性差异. 夏季, 尽管湿地上游水流量较大, 对湿地水体 MeHg 的质量浓度有稀释作用, 但植物处于生长期, 其根系分泌物和枯落物为土壤中的微生物提供了更多的营养物质, 微生物活性强, 同时温度、沉积物含水率、氧化还原电位、盐度、有机物质、硫酸盐含量等外部条件更为适宜汞甲基化^[27,28], 因而 MeHg 质量浓度和 MeHg/THg 较高. 而冬季温度较低, 微生物活性低, 不利于无机汞甲基化, 因此 THg 浓度较高但 MeHg 浓度非常低. 观音塘和园博园湿地在秋冬两季表现出较强的水体净化能力和效果, 水体 MeHg 质量浓度降低最为明显, 而秋冬两季是植物枯落物凋落最频繁的季节从侧面说明打捞植物枯落物对输出湿地内部 MeHg 积累具有重要意义.

3 结论

(1) 重庆市 4 个人工湿地 THg 质量浓度高于世界淡水湖泊背景值和同地区的森林湖泊, 低于同地区有典型点源、面源污染的三峡库区农业小流域和长寿湖水库, 远低于有污染历史的水域(彩云湖湿地与有汞污染历史的百花湖相当); MeHg 质量浓度略高于其他天然水体且城市湿地内部水体 MeHg/THg 占比高于其他水体.

(2) 城市湿地对流入湿地水体 THg 有截留、汇聚作用. 湿地内部环境为汞甲基化提供了良好物质和外部条件, 是甲基化的热点区域.

(3) 城市湿地水体汞分布变化受到了湿地自身的地质来源、景观布局和功能设置的影响, 水生植物生长区域汞含量异常波动, 施工区域附近、游船停泊区、游玩频繁区域 THg 质量浓度较其他水域有明显上升. 水生植物密布的观音塘湿地体现出一定的水体自净能力; 以休憩游玩的秀湖湿地受到人为干扰强度最大, 是生态脆弱区; 上游设置暴雨集水池且有污染历史的彩云湖湿地是 MeHg 的热点源, 但对下游流域影响不大.

参考文献:

[1] Ullrich S M, Tanton T W, Abdrashitova S A. Mercury in the aquatic environment: A review of factors affecting methylation [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2001, **31**(3): 241-293.

[2] Zhang H, Feng X B, Larssen T, *et al.* Bioaccumulation of methylmercury versus inorganic mercury in rice (*Oryza sativa* L.) grain[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(12): 4499-4504.

[3] Lindqvist O, Johansson K, Bringmark L, *et al.* Mercury in the Swedish environment — Recent research on causes, consequences and corrective methods[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1991, **55**(1-2): xi-261.

[4] 吕宪国. 湿地生态系统保护与管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 22-24.

[5] 王起超, 刘汝海, 吕宪国, 等. 湿地汞环境过程研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, **17**(6): 881-885.

Wang Q C, Liu R H, Lu X G, *et al.* Progress of study on the mercury process in the wetland environment [J]. Advance in Earth Sciences, 2002, **17**(6): 881-885.

[6] 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.

[7] 蒋红梅, 冯新斌, 梁琰, 等. 蒸馏-乙基化 GC-CVAFS 法测定天然水体中的甲基汞[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(5): 568-571.

Jiang H M, Feng X B, Liang L, *et al.* Determination of methyl mercury in waters by distillation-GC-CVAFS technique [J]. China Environmental Science, 2004, **24**(5): 568-571.

[8] 黄敏. 钼酸铵分光光度法准确测定地表水中总磷的研究[J]. 环境科学与管理, 2017, **42**(9): 141-143.

Huang M. Determination of total phosphorus in surface water with ammonium molybdate spectrophotometric method [J]. Environmental Science and Management, 2017, **42**(9): 141-143.

[9] 彭鹏, 石慧. 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定水样中的总氮[J]. 污染防治技术, 2008, **21**(2): 86-88.

Peng P, Shi H. Determination of total nitrogen in waste water by alkaline potassium persulfate digestion-UV spectrophotometric method[J]. Pollution Control Technology, 2008, **21**(2): 86-88.

[10] 江苏省环境监测中心, 国家环境保护地表水环境有机污染物监测分析重点实验室. 地表水环境质量 80 个特定项目监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.

[11] Hines N A, Brezonik P L, Engstrom D R. Sediment and porewater profiles and fluxes of mercury and methylmercury in a small seepage lake in northern Minnesota [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(24): 6610-6617.

[12] Gray J E, Hines M E. Biogeochemical mercury methylation influenced by reservoir eutrophication, Salmon Falls Creek Reservoir, Idaho, USA [J]. Chemical Geology, 2009, **258**(3-4): 157-167.

[13] Nguyen H L, Leermakers M, Kurunczi S, *et al.* Mercury distribution and speciation in Lake Balaton, Hungary [J]. Science of the Total Environment, 2005, **340**(1-3): 231-246.

[14] 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 等. 汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 121-129.

Cheng L, Mao Y X, Ma B J, *et al.* Speciation and spatial-temporal variation of mercury in the Xiaolangdi Reservoir [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 121-129.

[15] He T R, Feng X B, Guo Y N, *et al.* The impact of eutrophication on the biogeochemical cycling of mercury species in a reservoir: a case study from Hongfeng Reservoir, Guizhou, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **154**(1): 56-67.

- [16] Wang S F, Zhang M M, Li B, *et al.* Comparison of mercury speciation and distribution in the water column and sediments between the algal type zone and the macrophytic type zone in a hypereutrophic lake (Dianchi Lake) in Southwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **417-418**: 204-213.
- [17] 孙涛, 马明, 王永敏, 等. 西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1880-1887.
- Sun T, Ma M, Wang Y M, *et al.* Migration and transformation of mercury in unsubmerged soil and sediment at one typical forest reservoir in Southwest China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1880-1887.
- [18] 王娅, 赵铮, 木志坚, 等. 三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4095-4102.
- Wang Y, Zhao Z, Mu Z J, *et al.* Spatial and temporal distribution of mercury in water of a small typical agricultural watershed in the Three Gorges Reservoir Region [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4095-4102.
- [19] 白薇扬, 张成, 唐振亚, 等. 长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3649-3661.
- Bai W Y, Zhang C, Tang Z Y, *et al.* Seasonal variations in vertical profile of Hg species and the influential factors in Changshou Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3649-3661.
- [20] Kelly C A, Rudd J W M, St. Louis V L, *et al.* Is total mercury concentration a good predictor of methyl mercury concentration in aquatic systems? [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **80**(1-4): 715-724.
- [21] Gustin M S, Chavan P V, Dennett K E, *et al.* Evaluation of wetland methyl mercury export as a function of experimental manipulations[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(6): 2352-2359.
- [22] Regnell O, Elert M, Höglund L O, *et al.* Linking cellulose fiber sediment methyl mercury levels to organic matter decay and major element composition[J]. *Ambio*, 2014, **43**(7): 878-890.
- [23] Ma M, Du H X, Wang D Y, *et al.* Biotically mediated mercury methylation in the soils and sediments of Nam Co Lake, Tibetan Plateau[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 243-251.
- [24] Bachand P A M, Bachand S M, Fleck J A, *et al.* Reprint of "Methylmercury production in and export from agricultural wetlands in California, USA: the need to account for physical transport processes into and out of the root zone"[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **484**: 249-262.
- [25] 刘汝海, 王起超, 吕宪国, 等. 三江平原湿地汞的地球化学特征[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(5): 661-663.
- Liu R H, Wang Q C, Lü X G, *et al.* The geochemistry characteristic of mercury in Sanjiang Plain Marsh [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(5): 661-663.
- [26] 王起超, 王书海, 王稔华, 等. 松花江吉林——扶余江段沉积汞释放速率的模拟研究[J]. *地理科学*, 1990, **10**(4): 365-371.
- Wang Q C, Wang S H, Wang R H, *et al.* Study on releasing rate of mercury from sediments in JILIN-FUYU reach of the SongHua River [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1990, **10**(4): 365-371.
- [27] Veiga M M, Meech J A, Oñate N. Mercury pollution from deforestation[J]. *Nature*, 1994, **368**(6474): 816-817.
- [28] 刘汝海, 刘诗璇, 王杰, 等. 秋夏季黄河三角洲湿地土壤汞和甲基汞的变化[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 272-279.
- Liu R H, Liu S X, Wang J, *et al.* Change of mercury and methylmercury in Yellow River Delta wetlands from autumn to summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 272-279.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoides</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)