

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,张轶舜,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,罗冲,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氯效能 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)
地膜覆盖和施氮对菜地CH₄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CH₄和N₂O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,慈思,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)
超富集植物藿香蓟(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)

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¹, 王永敏^{1,2}, 樊宇飞¹, 吕东威¹, 王定勇^{1,2*}

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

摘要: 以重庆某集接纳生活污水处理厂出水、水质净化、休闲娱乐为一体的城市湿地公园为研究对象, 根据水流流向设点采样, 分析了湿地公园内污水处理区、湖泊深度净化区中总汞 (THg) 和甲基汞 (MeHg) 的分布特征, 并探讨了其源汇关系. 结果表明, 污水处理区出水 THg 质量浓度范围为 1.98 ~ 38.03 ng·L⁻¹ [平均值为 (9.10 ± 5.84) ng·L⁻¹], 出水 MeHg 质量浓度范围为 0.09 ~ 0.84 ng·L⁻¹ [平均值为 (0.34 ± 0.08) ng·L⁻¹]; 湖泊深度净化区 THg 质量浓度范围为 0.37 ~ 85.69 ng·L⁻¹ [平均值为 (6.76 ± 2.29) ng·L⁻¹], MeHg 质量浓度范围为 0.04 ~ 1.47 ng·L⁻¹ [平均值为 (0.35 ± 0.17) ng·L⁻¹], 人为活动对汞浓度的干扰较为明显. 水体总汞、甲基汞垂直分布规律具有一致性, 均表现出表层 < 深层. 通过物料衡算, 表明该湿地系统水体总汞每年降低 155.50 g, 水体甲基汞每年降低 1.65 g, 对下游水体具有保护作用.

关键词: 城市湿地; 水体; 汞; 时空分布; 物料衡算

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2219-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201810150

Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland

LIU Wei-hao¹, WANG Yong-min^{1,2}, FAN Yu-fei¹, LÜ Dong-wei¹, WANG Ding-yong^{1,2*}

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

Abstract: The distribution characteristics and the source-sink relationship of total mercury (THg) and methyl mercury (MeHg) were studied in a wastewater treatment area and in a lake deep purification area of a multifunctional urban wetland that integrates domestic sewage treatment plant effluent, water purification, and leisure entertainment in Chongqing. The results showed that the THg concentration ranged from 1.98 ng·L⁻¹ to 38.03 ng·L⁻¹ [average concentration was (9.10 ± 5.84) ng·L⁻¹] and MeHg concentration ranged from 0.09 ng·L⁻¹ to 0.84 ng·L⁻¹ [average concentration was (0.34 ± 0.08) ng·L⁻¹] in an outlet of wastewater treatment area. In the deep purification zone, the THg concentration ranged from 0.37 ng·L⁻¹ to 85.69 ng·L⁻¹ [average concentration of (6.76 ± 2.29) ng·L⁻¹] and the MeHg concentration ranged from 0.04 ng·L⁻¹ to 1.47 ng·L⁻¹ [average concentration of (0.35 ± 0.17) ng·L⁻¹]. The interference of human activities on mercury concentration is prominent. The vertical distribution of THg in the water is consistent with that of MeHg, the surface layer has lower values than the deep layer. Material balance suggested that THg in the wetland system decreases by 155.50 g per year, and MeHg decreases by 1.65 g per year, which has a protective effect on the downstream water.

Key words: urban wetland; water body; mercury; temporal and spatial distribution; material balance

随着我国城市化进程加快, 城市人工湿地数量也显著增多. 与自然湿地相比, 城市湿地有着众多其他自然湿地不可替代的生态功能, 比如调节城市气候、提供城市景观娱乐、保护城市生物多样性、城市防洪泄洪、污染物净化和降解等, 具有生态价值和社会价值, 是城市可持续发展所依赖的生态系统^[1-7]. 但是人工湿地中的各类污染物, 包括氮磷污染物、有机污染物、重金属污染物等对人类生活有一定潜在危害^[8]. 汞(Hg)作为一种具有稳定性、高毒性、生物累积性的重金属污染物之一^[9, 10], 在氧化还原条件下能与水体中微生物、可溶性碳等作用后产生毒性更强的甲基汞 (MeHg), 使湿地成为汞敏感生态系统^[11-13].

尤其是近年来, 我国重视城市生态文明建设, 城市湿地成为城市环境很重要的一部分. 但城市湿地研究却滞后于城市发展, 影响到城市生态安全和

社会经济健康. 由于城市湿地的生态服务功能与乡野湿地有着明显的不同, 存在受人为活动干扰强烈、面积变小、功能减弱、污染加剧等问题. 这些特征使得汞在城市湿地水体中的迁移转化具有区别于其他生态系统的特殊性. 城市湿地的建设、维护对环境汞的分布及转化影响还不清楚. 特别地, 纳污是城市湿地的一个重要生态功能, 由于城市污水水质及污水处理工艺的复杂, 城市污水经污水厂处理排入城市湿地后可能影响接纳水体中总汞及甲基汞质量浓度.

鉴于此, 本文以重庆某城市湿地公园为例, 对水体中总汞与甲基汞的含量进行研究, 通过找出城

收稿日期: 2018-10-20; 修订日期: 2018-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671469, 41603103)

作者简介: 刘伟豪 (1993 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: liuweihao19930927@163.com

* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

市湿地水体中汞分布特征及其源汇关系,以期保证湿地公园的生态环境安全提供科学支持。

1 研究区概况

该城市湿地公园湿地面积 47 hm²,蓄水达 168 万 m³。水源主要来自一日处理量 1.7 万 t 的城市生活污水处理厂出水,另有一部分来自上游水库。该湿地公园在设计上以“立体湿地”为主要风格,形成溪流、池塘、梯田式人工湿地水体净化系统的组合。该城市湿地公园集接纳生活污水处理厂出水、水质净化、休闲娱乐等多功能,周围以居民生活区为主,人口密度大,人为活动较为频繁。

2 材料与方法

2.1 采样点设置和样品采集

根据湿地公园区域功能差异,分为两个区域:污水处理区和湖泊深度净化区。在两个区域内共布设 9 个采样点(图 1)。其中,污水处理区设置 4 个采样点,分别为:污水入口 1、污水入口 2、污水出口 1、污水出口 2;湖泊深度净化区设置 5 个采样点为:C1、C2、C3、C4、总出口。研究区水体流向如下:污水入口 1、2 → 污水出口 1、2 → C1 → C2 → C3 → C4 → 总出口。每个采样点环境有所区别,C1、C2 附近岸边种有大量水生植物且有供游客行走的步道,C3 位于湖泊中心但附近有曝气装置,C4 和总出口之间设有桥体,游客会长时间聚集于此。



图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites

于 2017 年 3 月 ~ 2018 年 2 月期间,每月用卡盖式采水器,在湖泊深度净化区 4 个采样点(C1、C2、C3、C4)处按照表层和深层(>8 m)采集水样,在污水处理区 4 个采样点(污入 1、污入 2、污出 1、污出 2)出水口接取样品;此外,分季节于 3 月、6 月、9 月和 12 月在湖泊深度净化区 4 个采样点各采集一次分层样品(表层、4 m、8 m、12 m)。将采集的水样转移至已进行超净处理的硼硅玻璃瓶中,放入冷藏箱中运回实验室待测。为避免污染,在所有

的操作过程中均佩戴一次性聚乙烯手套。

2.2 样品分析与质量控制

水样汞参照阎海鱼等^[14]和蒋红梅^[15]建立的自然水中痕量汞的分析方法测定:总汞(THg)用金汞齐-冷原子荧光光谱法进行测定;总甲基汞(MeHg)用蒸馏-乙基化结合 GC-CVAFS 法进行测定。

本实验用水均为超纯水(18.2 Milli-Q)。所有样品测定通过标准样测定、平行样控制及加标回收率(80% ~ 120%)进行质量控制,并对 5% 的样品进行重复测定,相对标准偏差 < 15%。

2.3 物料计算与数据分析

人工湿地污染物负荷总量与去除总量计算公式^[16]:

$$W_L = \sum_i^n ICW_i \times Q_i$$

$$W_R = \sum_i^n (ICW_i - ECW_i) \times Q_i$$

式中, W_L 为人工湿地污染物负荷总量(mg·d⁻¹), W_R 为人工湿地污染物去除总量(mg·d⁻¹), ICW_i 、 ECW_i 分别为人工湿地每天的进、出水污染物质量浓度(ng·L⁻¹), Q_i 为每天的进水流量。本文 Q_i 取 17 000 m³·d⁻¹,为污水厂每日处理水量。

本实验数据用 Microsoft Excel、SPSS 等软件进行数理统计分析,用 Origin 8.6 等进行图的绘制。

3 结果与讨论

3.1 水体汞的时间分布

于 2017 年 3 月 ~ 2018 年 2 月进行为期 1a 的定点采样。分析结果显示(图 2),城市生活污水经该污水处理厂处理后,出水 THg 质量浓度范围为 1.98 ~ 38.03 ng·L⁻¹,平均值为(9.10 ± 5.84) ng·L⁻¹。除 9 月以外,污水经污水处理厂处理后的总汞均有所降低,去除率范围为 29.0% ~ 96.5%,平均去除率达 69.2%,这表明城市生活污水处理厂能有效去除一定 THg;出水 MeHg 质量浓度范围为 0.09 ~ 0.84 ng·L⁻¹,平均值为(0.34 ± 0.08) ng·L⁻¹。该污水处理厂对 MeHg 也起到一定的去除效果(除 3、4、10 月以外),去除率范围 8.5% ~ 85.4%,平均去除率为 58.8%。这与李花等人的研究一致^[17, 18],发现污水处理工艺对 THg 及 MeHg 的去除有一定效果,主要由于二沉池和氧化沟对汞起到吸附和沉积的作用,且污水处理过程中发生了去甲基化,之后大部分汞进入污泥,只有一部分汞随出水排入受纳水体^[19-21],这些共同导致污水出口汞质量浓度降低。

湖泊深度净化区 THg 质量浓度范围为 0.37 ~ 85.69 ng·L⁻¹ [平均质量浓度为(6.76 ± 2.29)

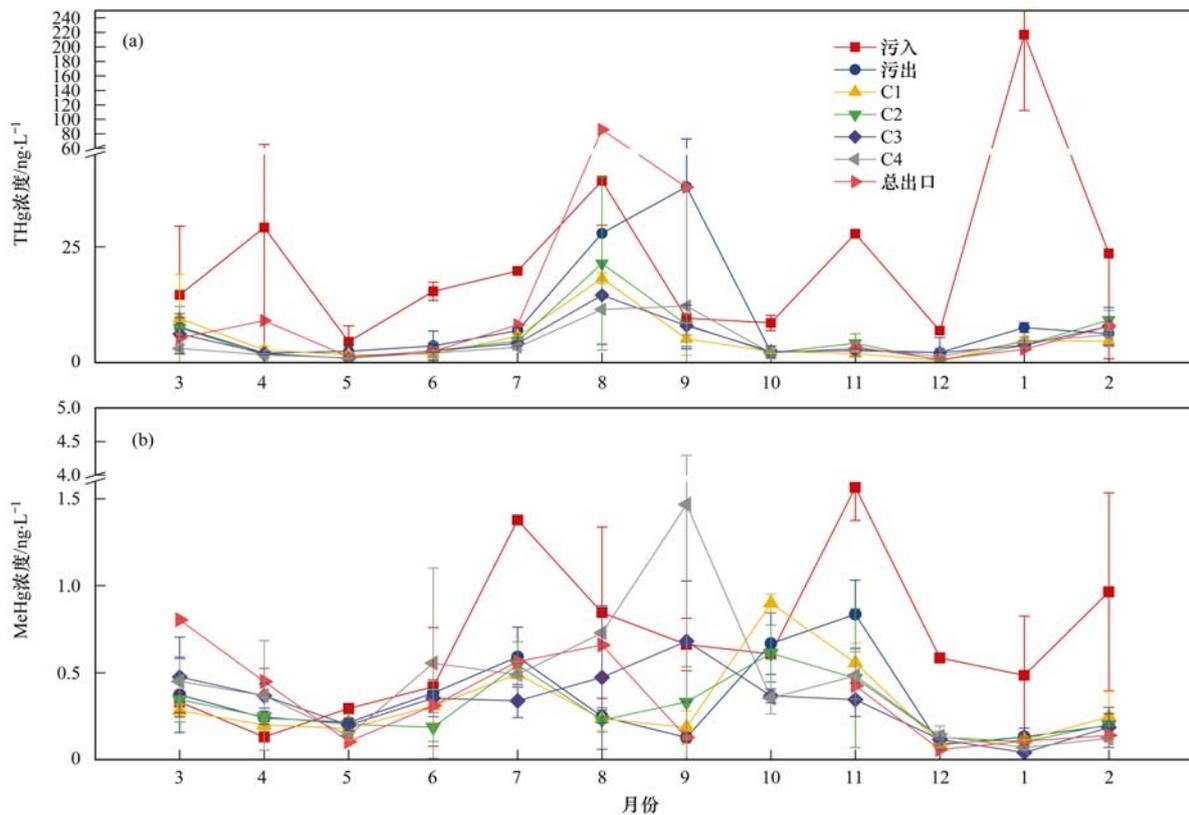


图2 不同采样点不同月份 THg 和 MeHg 质量浓度

Fig. 2 Concentration of THg and MeHg in different months at different sampling points

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$], MeHg 质量浓度范围为 $0.04 \sim 1.47 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [平均质量浓度为 $(0.35 \pm 0.17) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$]. 从季节分布来看, THg 质量浓度在夏季高于其它季节, 并且各采样点 THg 质量浓度均在 8 月出现峰值, 这主要可能与 8 月人为活动较频繁有关. 其游客数量约是其它月份的 2~10 倍, 特别是总出口处的观赏桥附近, 游客与车辆较多, 停留时间较长, 人为干扰较剧烈, 导致该月份总出口处 THg 质量浓度达到了 $85.69 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

从图 2(b) 可以得到, 各个采样点 MeHg 质量浓度变化趋势没有明显规律. 这主要是由于本研究区域体系复杂, 污水厂和湿地公园一体化, 影响甲基汞生成的因素较多. 一方面, 污水厂的氧化沟工艺会影响甲基汞的生成, 而二沉池对流经的污染物起到吸附去除的作用等^[17, 18]; 另一方面, 湿地环境也有利于甲基汞的形成^[22].

在春、夏两季, 湖泊深度净化区 C1 采样点 THg 质量浓度分别为 $4.84 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.31 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 随水流流动, THg 质量浓度呈现降低的趋势, 到 C4 采样点时分别为 $1.87 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.54 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 比 C1 采样点分别下降了 61.4% 和 43.9%. 而在秋、冬两季, C1 采样点水体 THg 浓度分别为 $3.61 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.51 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 随水流流动, THg 质量浓度呈现出增加的趋势, 流至 C4 采样点时质量浓度分

别达到 $14.01 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.26 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 比 C1 采样点分别增加了 2.88 倍和 0.30 倍. 在总出口处, THg 质量浓度在春、夏、秋、冬四季都有一个上升趋势, 夏季达到最高值 $32.06 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

湖泊深度净化区 C1~C4 采样点 MeHg 质量浓度表现为: 秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季. 在春、夏、秋、冬四季 C1 点 MeHg 质量浓度分别为 0.22 、 0.33 、 0.46 和 $0.14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 而到 C4 点分别为 0.32 、 0.56 、 1.00 和 $0.12 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 从图 2(b) 可以看出, 温度对甲基汞的分布影响较大, 气温低的月份甲基汞含量较低, 正如不同季节甲基汞分布所示 [图 3(b)], 各采样点甲基汞在冬季呈现最低值 (除污入外). 有研究表明^[23, 24], 水温升高, 可以促进汞的甲基化过程. 四季湖泊水体各采样点在甲基汞质量浓度变化趋势上相似, 但差异并不明显. 这可能由两个原因造成, 第一, 底泥中的汞释放到水相中的速度十分缓慢, 有研究表明^[25] 底泥沉积物是表层水体汞的重要储存库, 但沉积物中的汞重新释放进入水相环境是一个特别缓慢的过程, 需要十年甚至更久的时间. 第二, 进入到水相中的汞可能被生物体所吸收.

3.2 水体汞的垂直分布

该湿地公园湖泊水体 THg 和 MeHg 的垂直变化范围分别为 $0.07 \sim 23.11 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.05 \sim 1.52$

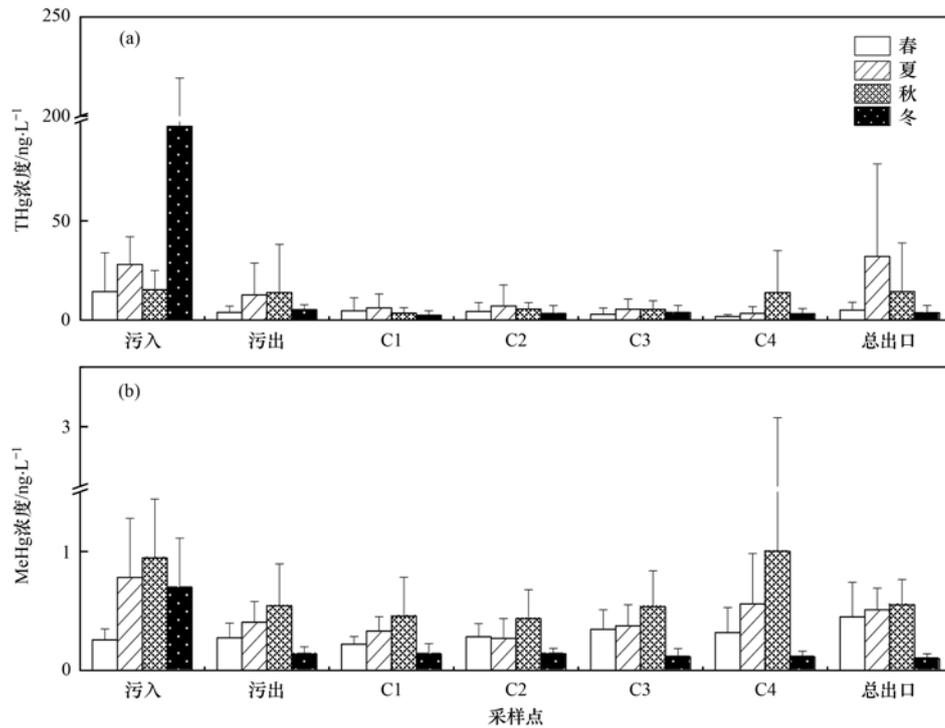


图3 不同季节随水流流向各采样点水体 THg 和 MeHg 质量浓度

Fig. 3 Concentration of THg and MeHg in water at different sampling points in different seasons

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 如图4所示,各采样点水体 THg 和 MeHg 在剖面上具有较强的波动性,并没有表现出明显的规律性.由于人工湿地受人为活动影响较大,水体汞的来源复杂,除了沉积物再悬浮外,生活污水、土壤侵蚀和地表径流的贡献也不容忽视.

受环境因素影响,水体表层和底层汞的来源和形态转化是不同的,因而对表层和底层水体汞的分布分别进行了研究.结果发现,表层水体 THg 平均

浓度在8月最高,为 $13.42 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,而在12月最低,为 $0.95 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; MeHg 平均浓度在11月最高,达到 $0.51 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,在12月最低,仅为 $0.12 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.对于底层水体,THg 平均浓度在8月最高,达到 $22.04 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,5月最低,为 $1.27 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; MeHg 平均浓度在10月最高,达到 $0.62 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,12月最低,为 $0.12 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.从图5可以看出,除少数月份外,表层 THg 和 MeHg 含量小于底层,这说明沉积物可能是上覆水中汞的重要来源.有研究表明^[26,27],厌氧微生物的汞甲基化是水生环境中 MeHg 产生的主要途径.与水体相比,水体-沉积物界面形成的低氧和强还原状态有利于提高厌氧汞甲基化微生物的活性,进行汞甲基化,形成的 MeHg 会向上覆水释放,导致上覆水 MeHg 浓度要高于表层水体^[28-30].另外,被湖泊底泥吸附的汞在一系列物理、化学或生物的作用下(如颗粒物再悬浮、底栖生物扰动等)再次进入水体,导致水体深层甲基汞浓度较高^[31].湖泊的水源虽然是经污水厂处理后汇入的城镇生活污水,但其有机质、富营养化程度依然较高,而有机质的腐解是一个耗氧过程,会消耗水体内大量氧气,使湖底成为一个有利于汞甲基化的厌氧环境^[32].

3.3 水体汞的质量平衡分析

水生环境系统中,物料平衡是估算污染源的重要方法,能够为化学污染物浓度监测提供有效信息,有利于水环境质量的评价^[33].目前,人工湿地

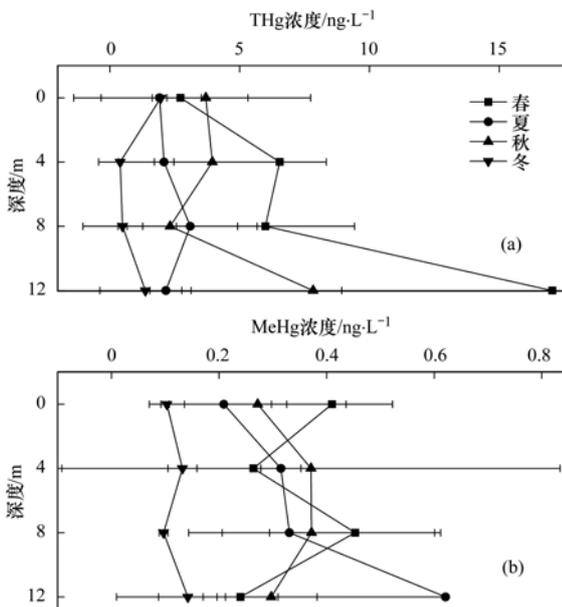


图4 不同季节不同采样点垂直断面水体 THg 和 MeHg 质量浓度

Fig. 4 Concentrations of THg and MeHg in vertical section of different sampling points in different seasons

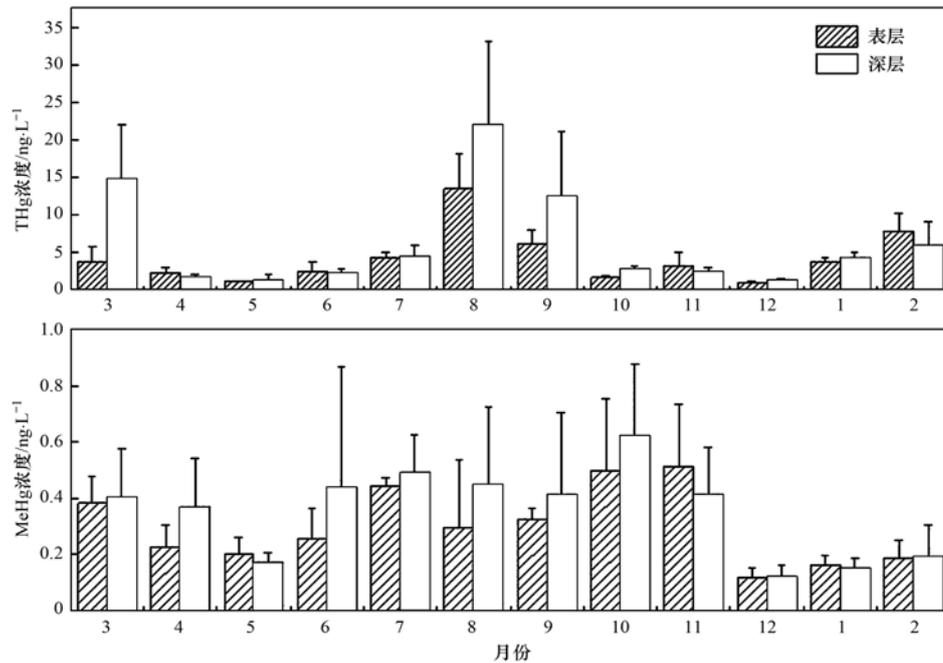


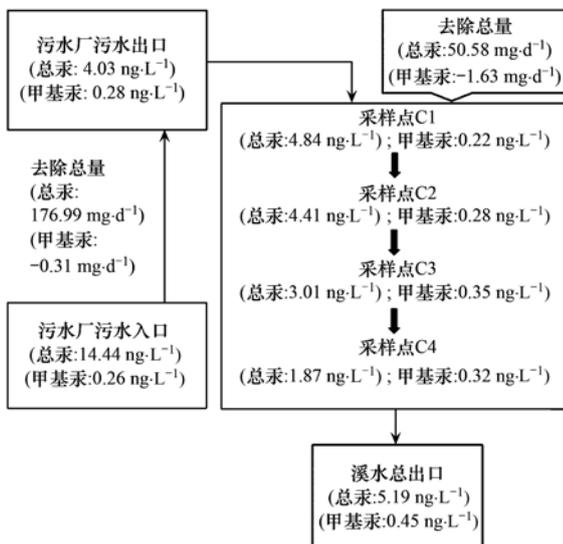
图5 不同月份水体表层、深层 THg、MeHg 质量浓度

Fig. 5 Concentrations of THg and MeHg in the surface and deep layers of water in different months

中汞的迁移转化途径尚无定论，仍需进行讨论和深入研究。本文在探讨了汞浓度变化的基础上，基于汞的地球化学循环平衡模型，量化分析汞在人工湿地中的动态变化特征。

因此，根据人工湿地污染物负荷总量与去除总量计算公式，笔者定量分析了春、夏、秋、冬四季该城市湿地公园水体汞的迁移特征。以春季为例，图6展示了该季节水体汞随水流方向(污水入口1、2→污水出口1、2→C1→C2→C3→C4→总出口)的分布以及迁移量。

从污水处理区和湖泊深度净化区两个区域来



负值代表增加

图6 春季湿地水体物料衡算示意

Fig. 6 Schematic diagram of water balance in the wetland in spring

看，在春季污水处理区，城市污水经污水厂处理后 THg 总量减少了 176.99 mg·d⁻¹，而 MeHg 总量增加了 0.31 mg·d⁻¹。之后，水体流经湖泊深度净化区，经湖泊环境净化后 THg 总量减少了 50.58 mg·d⁻¹，而 MeHg 总量增加了 1.63 mg·d⁻¹。最后，水体汇入溪流时，THg 和 MeHg 平均质量浓度分别为 5.19 ng·L⁻¹ 和 0.45 ng·L⁻¹。如果将污水进入污水厂，最终流向小溪看作一个整体，经该系统处理净化后，THg 降低了 157.25 mg·d⁻¹，而 MeHg 增加了 3.30 mg·d⁻¹。

对于不同季节而言，不同水体区域对 THg 和 MeHg 的源汇归趋行为有所差异(表1)。在污水处理区，4个季节的水体经污水厂工艺处理后 THg 均有所下降，冬季减少最多(1567.98 mg·d⁻¹)；MeHg 在夏、秋、冬三季均呈现降低趋势，冬季降低值最大(9.50 mg·d⁻¹)，而春季略有升高(0.31 mg·d⁻¹)。这可能是由于春节期间饮食丰富造成污水厂中有机质含量增加，因而春季污水处理区 MeHg 增加。对于湖泊深度净化区，水体 THg 在不同季节具有不同特征。在春、夏两季，湖泊环境对水体 THg 有去除效果，而秋、冬两季则相反；对于甲基汞而言，湖泊环境除了在冬季对水体 MeHg 有去除效果外(0.39 mg·d⁻¹)，在其它3个季均表现出 MeHg 增加趋势。这可能是由于冬季温度较低，湖泊内 MeHg 的原位生成较弱。对于整个湿地公园来说，从水体进入污水厂至流入溪流，除夏季水体 THg 质量浓度略有增加以外，其余3个季节均有所

减少;而水体 MeHg 质量浓度除春季略有升高,另外 3 个季节均呈下降趋势。

表 1 不同季节不同系统 THg、MeHg 去除总量¹⁾/mg·d⁻¹

Table 1 Total removal of THg and MeHg in different seasons and systems/mg·d⁻¹

季节	系统	总汞去除总量	甲基汞去除总量
春	污水厂	176.99	-0.31
	湖体	50.58	-1.63
	整体	157.25	-3.30
夏	污水厂	259.92	6.36
	湖体	47.09	-3.87
	整体	-67.77	4.59
秋	污水厂	22.37	6.83
	湖体	-176.81	-9.24
	整体	15.62	6.67
冬	污水厂	1567.98	9.50
	湖体	-12.74	0.39
	整体	1594.13	10.12

1) 负值代表增加,下同

通过物料衡算得出了研究期间该湿地公园汞迁移与变动情况(表 2),在污水处理系统,水体 THg 每年降低 184.99 g,水体 MeHg 每年降低 2.04 g;而在湖体系统,水体 THg 每年增加 8.38 g,水体 MeHg 每年增加 1.31 g。总体而言,尽管湿地中湖体有净甲基汞的产生,而对于整个湿地公园,水体 THg 每年降低 155.50 g,水体 MeHg 每年降低 1.65 g,对下游水体具有保护作用。

表 2 不同系统 THg、MeHg 日去除总量/mg·d⁻¹

Table 2 Daily removal amount of THg and MeHg in different systems/mg·d⁻¹

系统	总汞去除总量	甲基汞去除总量
污水厂	506.81	5.60
湖体	-22.97	-3.59
整体	424.81	4.52

4 结论

该城市湿地中的污水处理区对流入的城市生活污水中无机汞和甲基汞均具有去除作用。城市湿地系统可消纳进入系统中的汞和甲基汞,对下游水体具有保护作用。

参考文献:

- [1] 殷康前,倪晋仁. 湿地研究综述[J]. 生态学报, 1998, 18(5): 539-546.
Yin K Q, Ni J R. Review of wetland studies[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(5): 539-546.
- [2] 葛继稳. 湿地资源及管理实证研究——以“千湖之省”湖北省为例[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 傅娇艳,丁振华. 湿地生态系统服务、功能和价值评价研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 681-686.
Fu J Y, Ding Z H. Research progress on wetland ecosystem

- service and its valuation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 681-686.
- [4] 俞孔坚,李迪华,潮洛蒙. 城市生态基础设施建设的十大景观战略[J]. 规划师, 2001, 17(6): 9-13, 17.
Yu K J, Li D H, Chao L M. Ten landscape strategies to build urban ecological infrastructure[J]. Planners, 2001, 17(6): 9-13, 17.
- [5] 曹鹏飞. 浅谈城市湿地生态功能退化的原因及其恢复与保护[J]. 福建林业科技, 2008, 35(1): 176-179, 196.
Cao P F. Preliminary study on the cause of the city wetland ecology function degradation and its restoration with the protection [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2008, 35(1): 176-179, 196.
- [6] 崔保山,杨志峰,李英华,等. 城市拓展中湿地的综合保护与发展[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 462-471.
Cui B S, Yang Z F, Li Y H, et al. The integrated wetland conservation and development in the context of city expansion [J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(4): 462-471.
- [7] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995, 16(3): 83-86.
Wu X L. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands[J]. Environmental Science, 1995, 16(3): 83-86.
- [8] 刘超翔,胡洪营,张建,等. 不同深度人工复合生态床处理农村生活污水的比较[J]. 环境科学, 2003, 24(5): 92-96.
Liu C X, Hu H Y, Zhang J, et al. Rural sewage treatment performance of constructed wetlands with different depths [J]. Environmental Science, 2003, 24(5): 92-96.
- [9] Orihel D M, Paterson M J, Blanchfield P J, et al. Temporal changes in the distribution, methylation, and bioaccumulation of newly deposited mercury in an aquatic ecosystem [J]. Environmental Pollution, 2008, 154(1): 77-88.
- [10] Celo V, Lean D R S, Scott S L. Abiotic methylation of mercury in the aquatic environment [J]. Science of the Total Environment, 2006, 368(1): 126-137.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 闫海鱼,冯新斌,高立海,等. 天然水体中痕量汞的形态分析方法研究[J]. 分析测试学报, 2003, 22(5): 10-13.
Yan H Y, Feng X B, Shang L H, et al. Speciation analysis of ultra trace levels of mercury in natural waters [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2003, 22(5): 10-13.
- [15] 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.
- [16] 赵建. 人工湿地对污染河水的净化效果及机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. 43-45.
- [17] 李花, 毛宇翔, 李永, 等. 汞在城市污水处理厂的赋存特征及质量平衡——总汞[J]. 环境化学, 2014, **33**(7): 1059-1065.
Li H, Mao Y X, Li Y, *et al.* Occurrence and mass balance of mercury at a sewage treatment plant. Part I: total mercury[J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(7): 1059-1065.
- [18] 李花, 毛宇翔, 李永, 等. 汞在城市污水处理厂的赋存特征及质量平衡——甲基汞[J]. 环境化学, 2014, **33**(8): 1287-1293.
Li H, Mao Y X, Li Y, *et al.* Occurrence and mass balance of mercury at a sewage treatment plant. Part II: methylmercury[J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(8): 1287-1293.
- [19] Balogh S J, Nollet Y H. Methylmercury input to the Mississippi River from a large metropolitan wastewater treatment plant[J]. Science of the Total Environment, 2008, **406**(1-2): 145-153.
- [20] Gilmour C C, Bloom N S. A case study of mercury and methylmercury dynamics in a Hg-contaminated municipal wastewater treatment plant[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, **80**(1-4): 799-803.
- [21] Balogh S J, Nollet Y H. Mercury mass balance at a wastewater treatment plant employing sludge incineration with offgas mercury control[J]. Science of the Total Environment, 2008, **389**(1): 125-131.
- [22] 刘汝海, 刘诗璇, 王杰, 等. 秋冬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.
- [23] Nguyen H L, Leermakers M, Kurunzi S, *et al.* Mercury distribution and speciation in Lake Balaton, Hungary [J]. Science of the Total Environment, 2005, **340**(1-3): 231-246.
- [24] Hall B D, Manolopoulos H, Hurley J P, *et al.* Methyl and total mercury in precipitation in the Great Lakes region [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(39): 7557-7569.
- [25] 李永华, 王五一, 杨林生, 等. 汞的环境生物地球化学研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, **23**(6): 33-40.
Li Y H, Wang W Y, Yang L S, *et al.* A review of mercury in environmental biogeochemistry [J]. Progress in Geography, 2004, **23**(6): 33-40.
- [26] 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 & Technology, 2001, **31**(3): 241-293.
- [27] 冯新斌, 仇广乐, 付学武, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 436-457.
Feng X B, Qiu G L, Fu X W, *et al.* Mercury pollution in the environment[J]. Progress in Chemistry, 2009, **21**(2-3): 436-457.
- [28] Bloom N. Determination of picogram levels of methylmercury by aqueous phase ethylation, followed by cryogenic gas chromatography with cold vapour atomic fluorescence detection [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, **46**(7): 1131-1140.
- [29] 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.
- [30] Shi J B, Ling L N, Jiang G B, *et al.* The speciation and bioavailability of mercury in sediments of Haihe River, China [J]. Environment International, 2005, **31**(3): 357-365.
- [31] Vale C, Ferreira A M, Micaelo C, *et al.* Mobility of contaminants in relation to dredging operations in a mesotidal estuary (Tagus estuary, Portugal) [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(6-7): 25-31.
- [32] Yan H Y, Feng X B, Shang L H, *et al.* The variations of mercury in sediment profiles from a historically mercury-contaminated reservoir, Guizhou province, China[J]. Science of the Total Environment, 2008, **407**(1): 497-506.
- [33] 刘妍, 张蕴, 韩晓盈, 等. 清洁生产审核中物料平衡的难点及应用实例[J]. 环境科学与管理, 2013, **38**(3): 163-168.
Liu Y, Zhang Y, Han X Y, *et al.* Problems and application examples of material balance in cleaner production audits [J]. Environmental Science and Management, 2013, **38**(3): 163-168.

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 elatinoideis</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, GUO 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-kan, 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-jiang, <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)