

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 退建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙旻 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤铜含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响

毛雯¹, 孙荣国¹, 王定勇^{1,2*}, 马明¹, 张成¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 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: 为研究硝酸根(NO_3^-)对水体中甲基汞(MMHg)光化学降解的影响, 采用室内模拟试验, 验证了不同波长光照条件下, NO_3^- 在MMHg光化学反应中的作用, 探讨了 NO_3^- 浓度对MMHg光解速率及产物的影响, 并根据溶液中 Hg^{2+} 的浓度分析了MMHg光解反应的进行程度. 结果表明, 在自然光(NL)和紫外光(UV)条件下, 只加入了 NO_3^- 的处理MMHg光降解速率分别为 0.10 、 $0.046 \text{ L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$, Hg^0 的释放通量分别为 1.05 、 1.27 ng , Hg^{2+} 的最终浓度分别为 16.97 、 $28.92 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$; 在未加入 NO_3^- 和加入了 $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ 的条件下, MMHg的剩余浓度相差不大, 其光降解速率也分别在 0.052 、 $0.015 \text{ L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右, Hg^0 的释放通量分别为 23.81 、 15.38 ng , Hg^{2+} 的浓度均小于 $10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 且呈现先增加后减小趋势. 在可见光(VL)照射下, 各处理下MMHg的光降解速率无显著性差异($P=0.56$), 为 $0.003 \text{ L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右, Hg^0 的释放通量均为 5 ng 左右, Hg^{2+} 的浓度未超过 $3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 也呈现出先增加后减小的趋势. 在NL条件下, 随浓度 NO_3^- 的增加, MMHg的光降解速率也增加, 且各处理间存在显著性差异($P<0.05$), Hg^0 的生成量随 NO_3^- 浓度的增加而减少, 而 Hg^{2+} 的浓度也随 NO_3^- 浓度的增加而增加. 可见在有紫外光的条件下, NO_3^- 对MMHg光降解反应历程、反应速率以及产物有重要影响.

关键词: 甲基汞; 光化学降解; 硝酸根; 羟基自由基; 反应历程; 光照条件

中图分类号: X122; X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2218-07

Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body

MAO Wen¹, SUN Rong-guo¹, WANG Ding-yong^{1,2}, MA Ming¹, ZHANG Cheng¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: To study effects of nitrate (NO_3^-) on monomethylmercury (MMHg) photodecomposition (PD), laboratory experiments were conducted to investigate the role of NO_3^- in MMHg PD under various light radiations, and to examine effects of NO_3^- concentration gradients on MMHg PD rates and end products. We analysed the react processes according to Hg^{2+} concentration. The results indicated that in the reactor exposed to natural and ultraviolet radiation, and treated with NO_3^- , the rates of MMHg PD were calculated to be $0.10 \text{ L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$ and $0.046 \text{ L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively, Hg^0 fluxes were 1.05 and 1.27 ng , respectively, and Hg^{2+} concentrations were $16.97 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $28.92 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. In the experiments which were not spiked with nitrate or spiked with benzoic acid, MMHg PD rates were calculated to be $0.052 \text{ L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$ and $0.015 \text{ L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively, Hg^0 fluxes were 23.81 ng and 15.38 ng , respectively, and all concentrations of Hg^{2+} ($< 10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) represented a trend of increasing firstly and then decreasing. There were no differences among the reactions exposed to visible light ($P=0.56$), the PD rate was about $0.003 \text{ L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$, Hg^0 flux was about 5 ng , and Hg^{2+} concentrations showed a trend of increasing firstly and then decreasing. In the reactor exposed to natural light, with the increasing concentration of NO_3^- , MMHg PD rate increased, Hg^0 flux decreased, and Hg^{2+} concentration increased with respect to time. All results indicate that NO_3^- has a significant effect on the react process, PD rate, and end products.

Key words: monomethylmercury; photodecomposition; nitrate; hydroxyl radical; react process; light condition

汞是一种有毒的重金属元素, 在环境中以多种形式存在, 其中毒性最强的是甲基汞(MMHg). MMHg是一种神经毒素, 可以通过食物链侵入动物或人体的大脑和神经系统, 造成听觉错乱、视野收缩、运动性共济失调等健康危害^[1,2].

MMHg可以通过生物和非生物途径进行降解. 水体及底泥中微生物和淡水藻类微生物对MMHg的去甲基化已被证实^[3,4]. Seller等^[5]首次证实了表面湖水中MMHg会发生光降解反应, 并通过物质质量

守恒的计算发现, 微生物去甲基化可能不是水体中MMHg去除的主要途径. Inoko^[6]提出了MMHg溶液能在 $185 \sim 254 \text{ nm}$ 波长的照射下发生降解. 有室

收稿日期: 2012-09-04; 修订日期: 2012-11-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430004); 国家自然科学基金项目(41173116, 40973079); 西南大学研究生科技创新基金项目(kb2011013)

作者简介: 毛雯(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: maowenqj@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

内试验得出 MMHg 是在紫外光(100 ~ 400 nm)条件下降解的^[7,8]. 一些研究也证实了 MMHg 主要在 280 ~ 400 nm 的紫外光下发生降解^[9]. 而也有研究认为,随着湖水深度的加深,MMHg 的光降解主要是靠可见光(VL)引发的^[10]. 在不同的生态系统中,可能是由于水体的理化性质、光照条件的不同导致 MMHg 降解的途径和速率有所差异.

光照条件下自然水体中产生的自由基引发的 MMHg 光降解可能是 MMHg 脱甲基的一种重要途径. Zepp 等^[11]指出了 MMHg 被 $\cdot\text{OH}$ 氧化的二级反应速率常数为 $2.0 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$,但自然水体中这个反应的具体机制和对环境影响并没有详细指出. Chen 等^[8]进一步研究发现,光照引发水体中的硝酸盐产生的 $\cdot\text{OH}$,能促进表层水体中 MMHg 光降解,并对 $\cdot\text{OH}$ 引起的 MMHg 的降解机制进行分析. 但在自然水体中 $\cdot\text{OH}$ 对 MMHg 的光降解的确切机制和环境因素的影响还没有具体的描述,且对其光降解产物的影响也未见报道.

基于此,本研究采用室内模拟试验,验证了 NO_3^- 对 MMHg 在各波段光照射下的降解影响,探讨了 NO_3^- 浓度对其降解速率的影响,并根据反应中生成 Hg^{2+} 的浓度分析了 MMHg 光降解的反应历程,以期今后研究自然水体中 NO_3^- 对 MMHg 光化学行为影响提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料与准备

试验所用的 MMHg 标准使用液购自美国布鲁克斯(Brooks Rand)公司. 试验中所需的玻璃仪器在使用前均用硝酸(成都市科龙化工试剂厂)(25%,体积比)浸泡 24 h,然后经马弗炉 500℃ 灼烧 30 min,在洁净无汞的环境下冷却使用. 试验中所用的管子均为聚四氟乙烯管(Brooks Rand). 在试验过程中,避免污染需佩戴一次性手套. 使用的无汞超纯水水温为 20℃,室内温度为 $20^\circ\text{C} \pm 0.7^\circ\text{C}$.

1.2 试验装置

试验装置(图 1)是以石英玻璃为材料制成的圆柱形反应器,内径 15 cm,高 25 cm^[12]. 氙气作为载气,经金汞齐净化后由底部进入反应器,将 MMHg 光降解生成的 Hg^0 吹出,经干燥剂(Soda lime,德国)除湿后以 RA-915⁺ 多功能汞分析仪(Lumex, Russia)测定载气中 Hg^0 的浓度,以此表征 MMHg 光降解生成 Hg^0 的量. 以氙气灯作为光源,透过凸透镜(深圳市雅嘉美光电有限公司),再经过不同的滤波

器(南通瑞森光学元件科技有限公司),获得不同波长的光源. 反应器表面的可见光强度为 $3.91 \times 10^4 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (检测器型号:TES-1335,探测波段:400 ~ 800 nm,台湾泰仕电子工业股份有限公司),紫外光强度为 $2000 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (检测器型号:TN-2340,探测波段:290 ~ 390 nm,台湾泰纳电子工业股份有限公司).

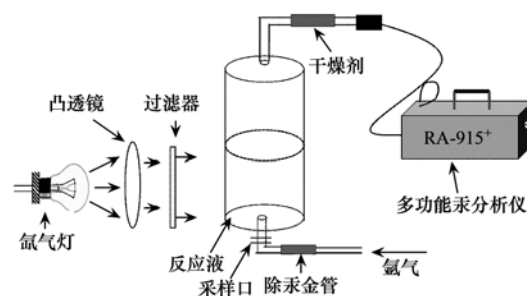


图 1 反应装置示意

Fig. 1 Schematic of the reactor

1.3 试验方法与设计

首先向洁净无汞的石英反应器内注入 2 L 无汞超纯水,按图 1 所示链接所有管路,通入流量为 $1.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的氙气. 为除去水中痕量的汞,在加入反应试剂前应至少通气 30 min 以上,并同时打开氙气灯. 然后关闭氙气灯,加入反应试剂,使反应器处在相应的光照条件下. 每隔 30 min 从反应器底部取样 2 mL,用于分析溶液中残留的 MMHg,MMHg 和 Hg^{2+} 的检测方法严格按照美国环境保护署 Method 1630^[13]和 Method 1631^[14]进行检测. MMHg 光降解产生的 Hg^0 直接由 RA-915⁺ 在线监测.

为研究 NO_3^- 对水体中 MMHg 光降解的影响,本试验以 KNO_3 (重庆市华东化工有限公司)为 NO_3^- 供体,苯甲酸(成都天华化工科技有限公司)为去除 NO_3^- 影响的试剂. 试验处理为:MMHg、MMHg + NO_3^- 、MMHg + $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ 、MMHg + NO_3^- + $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ (反应器内 NO_3^- 浓度为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MMHg 浓度为 $20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$),光照条件为:自然光(NL,280 ~ 800 nm)、可见光(VL,400 ~ 800 nm)、紫外光(UV,280 ~ 400 nm)及黑暗. 为探究 NO_3^- 浓度对 MMHg 光降解的影响,向反应器中加入不同浓度的 NO_3^- 溶液(NO_3^- 浓度分别为:0、0.1、0.5、2.5、10、15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),光照条件为 NL.

1.4 计算方法

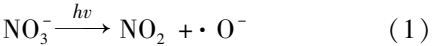
MMHg 光降解反应级数采用尝试法和半衰期法来计算^[15]. Hg^0 的释放通量依照 Zhang 等^[12]的方法计算.

2 结果与分析

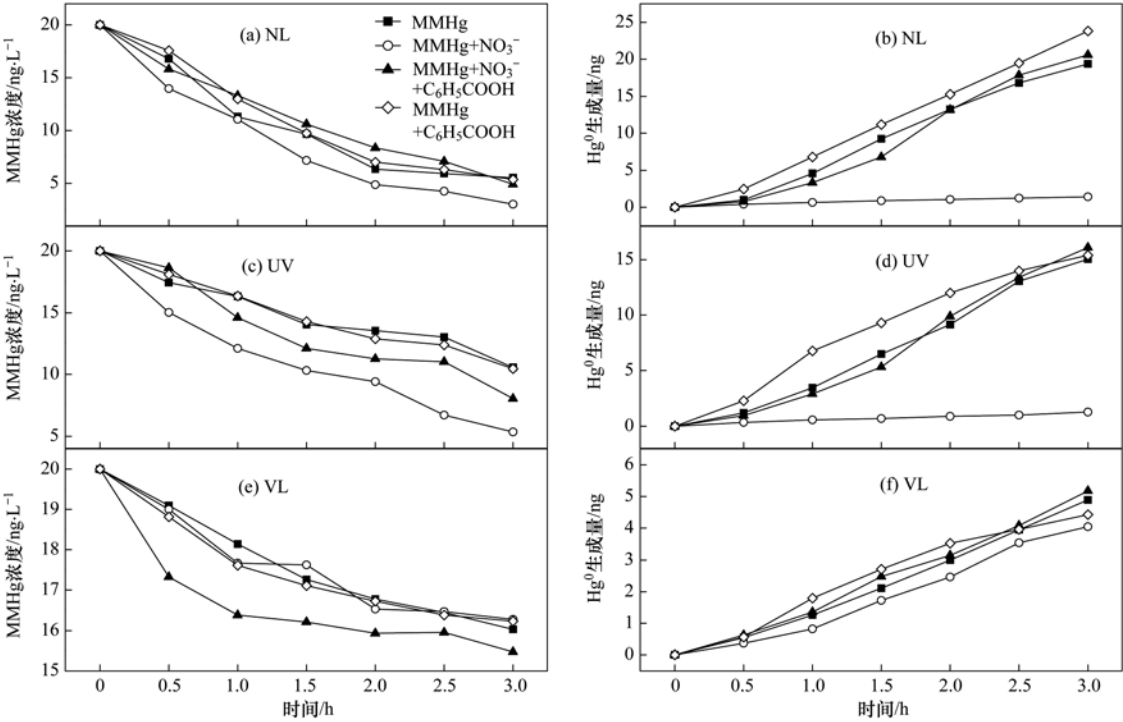
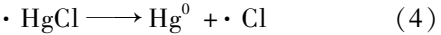
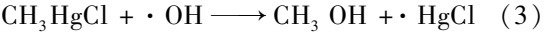
2.1 硝酸根离子对甲基汞光降解的影响

在不同光照条件下,反应器内 MMHg 浓度均表现为下降趋势[图 2(a)、2(c)、2(e)],在 NL、UV 及 VL 条件下,反应器内 MMHg 分别降解了 72.29%、47.14%、18.62%,可见紫外光对 MMHg 的降解有很大影响. 在 NL 和 UV 条件下,只加入 NO₃⁻ 处理的 MMHg 的剩余浓度要明显低于其余处理,MMHg 的降解速率如表 1 所示,分别为:0.10、0.046 L·(ng·h)⁻¹;在未加入 NO₃⁻ 和有·OH 清除剂的处理下,MMHg 的剩余浓度相差不大,其光降解速率均低于加入 NO₃⁻ 处理后的情况. 可见 C₆H₅COOH 对 MMHg 的光降解无影响,并且有效的抑制了·OH 的作用. 在 VL 条件下,各处理下的 MMHg 剩余浓度相差不大,均在 16 ng·L⁻¹ 左右,其光降解速率也明显低于 NL 和 UV 条件,仅为 0.003

L·(ng·h)⁻¹,由方差分析发现,VL 条件下各处理间无显著性差异($P=0.56$). 说明了只有在紫外光存在的情况下,NO₃⁻ 对 MMHg 的光降解速率有一定影响. 而在黑暗条件下,无论是否加入了 NO₃⁻ 和 C₆H₅COOH,均未发现 MMHg 降解,也未检测到有 Hg⁰ 生成(图 2 中未标出). 这是由于,经特定波长(280~400 nm)照射后,溶液中 NO₃⁻ 发生以下光化学反应^[16]:



MMHg 能在紫外光条件下发生光降解,其本质是光照提供的光能量使 MMHg 的 C—Hg 键断裂. NO₃⁻ 产生的·OH 攻击 C—Hg 键并使其断裂,从而加快了 MMHg 光降解. 其降解机制可能为:



(a)、(c)、(e)MMHg 浓度变化趋势;(b)、(d)、(f)生成 Hg⁰ 的规律

图 2 不同光照条件下,反应器内 MMHg 浓度变化趋势及生成 Hg⁰ 的规律

Fig. 2 Trend of MMHg concentrations and Hg⁰ flux in the reactor exposed to various light conditions

表 1 MMHg 光化学降解速率

Table 1 Measured rates of MMHg photodegradation under various light conditions

项目	处理	纯 MMHg	MMHg + 2.5 mg·L ⁻¹ NO ₃ ⁻	MMHg + 2.5 mg·L ⁻¹ NO ₃ ⁻ + C ₆ H ₅ COOH	MMHg + C ₆ H ₅ COOH
平均反应	NL	0.051	0.101	0.052	0.053
速率 $v/\text{L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$	UV	0.013	0.046	0.024	0.015
	VL	0.003	0.003	0.002	0.003

根据量子理论,只有能被分子吸收的光能,才能引起分子的转动、振动或电子能级发生变化,由低能态被激发至高能态,从而引发光化学反应. 由于分子基态与激发态的能量是不连续的,受激分子从基态到激发态所需的能量要与光子的能量相匹配,即并非任意波长都能引发分子的电子跃迁. 在 VL 条件下,其波长长、光能相对弱,分子吸收的辐射能小于电子跃迁所需的激发能量,故 VL 不足以引发 NO_3^- 发生光化学反应产生 $\cdot\text{OH}$ ^[11],只有少量的光能被甲基汞吸收引发其降解. 因而 VL 条件下的 MMHg 降解速率较低.

在不同的光照条件下,各种处理反应产物 Hg^0 的释放通量随时间的增加而增加[图 2(b)、2(d)、2(f)]. VL 条件下,各处理的 Hg^0 生成量也无太大差异($P = 0.066$),最高仅为 5.17 ng. 而 MMHg + NO_3^- 处理分别经 NL 和 UV 照射后, Hg^0 的释放通量为:1.41、1.27 ng,占加入汞的比例分别为 7.03%、6.34%;而 MMHg, MMHg + NO_3^- + $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$, MMHg + $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ 处理分别在 NL 和 UV 条件下生成的 Hg^0 的量无太大差异(P 值分别为 0.25、0.084),分别为 20、16 ng 左右. 由此可见 NO_3^- 的加入明显降低了 Hg^0 的生成量. 这是由于 NO_3^- 在有紫外光的条件下产生 $\cdot\text{OH}$,而 $\cdot\text{OH}$ 有很强的氧化性,可以将 Hg^0 先氧化为 Hg^+ ,而 Hg^+ 不稳定进一步转化为 Hg^{2+} [其二级反应速率为 $2.0 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$]^[17],也可以直接将 Hg^0 氧化为 Hg^{2+} . 因此 NO_3^- 对 Hg^0 的生成具有明显的抑制作用. 通过分析经各种光照条件照射后,MMHg 和 MMHg + $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ 处理下,MMHg 的降解速率和产物浓度相差不大,说明 $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ 对 MMHg 的光降解没有影响,且 $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ 作为 $\cdot\text{OH}$ 的清除剂,有效地抑

制了由 NO_3^- 光化学反应引发的作用,使 Hg^0 的量不断升高.

2.2 NO_3^- 浓度对 MMHg 光降解的影响

在 NL 条件下,经不同浓度的 NO_3^- 处理后,MMHg 降解速率不同[图 3(a)]. 随 NO_3^- 浓度的增加,在 3 h 后 MMHg 分别降解了:70.81%、84.93%、86.24%、85.27%、98.42%、99.27%,可见 NO_3^- 浓度越高,MMHg 降解越多,其剩余浓度就越低. 通过动力学计算发现,不同 NO_3^- 浓度在 NL 条件下 MMHg 光降解反应仍为二级动力学反应,经 6 种不同 NO_3^- 浓度(0、0.1、0.5、2.5、10、15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理后,MMHg 光降解速率分别为 0.044、0.10、0.11、0.10、0.96、2.2 $\text{L} \cdot (\text{ng} \cdot \text{h})^{-1}$. 通过对多种 NO_3^- 浓度作用下 MMHg 光降解速率进行方差分析发现,各处理间存在显著性差异($P < 0.05$),说明 NO_3^- 浓度对 MMHg 的光降解有着重要的影响,且影响程度随 NO_3^- 浓度的增加而增加.

在 NL 照射下,不同浓度 NO_3^- 条件下 Hg^0 的生成量随时间的增加而增加[图 3(b)]. 在未加 NO_3^- 与加入 NO_3^- 的情况下, Hg^0 的生成量存在显著的差异($P < 0.05$),3 h 后未加 NO_3^- Hg^0 的生成量最多(19.35 ng,平均释放通量为 $6.45 \text{ ng} \cdot \text{h}^{-1}$),是其他几种处理的 7.0 ~ 18.6 倍. 且随着 NO_3^- 浓度的增加, Hg^0 的平均释放通量逐渐减小,当 NO_3^- 浓度为 15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其平均释放通量仅为 0.35 $\text{ng} \cdot \text{h}^{-1}$. 对各处理的 Hg^0 平均释放通量进行方差分析,发现各处理间存在显著性差异($P < 0.05$),说明 NO_3^- 浓度对 Hg^0 的生成量有着重要的影响.

在有 $\cdot\text{OH}$ 的条件下,其会攻击 C—Hg 键致使 MMHg 降解. 在 NL 条件下, NO_3^- 浓度越高,产生的

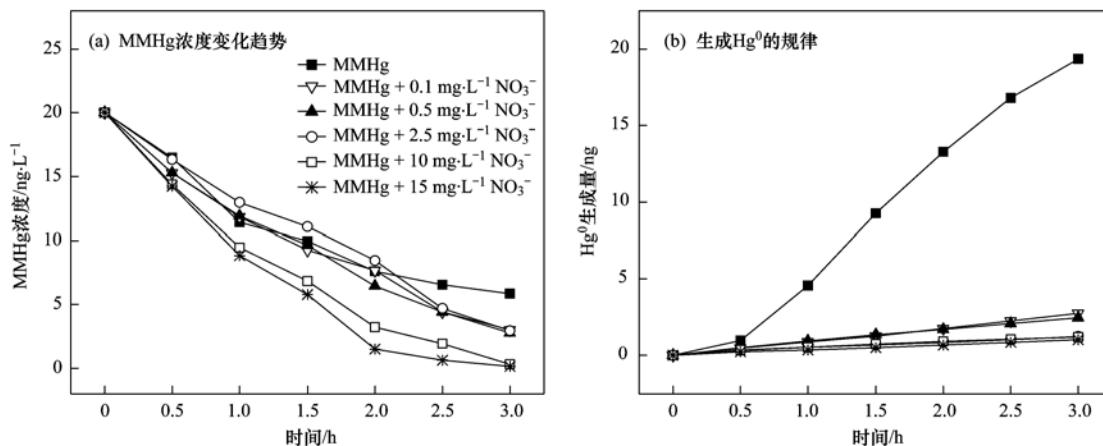


图3 NL 条件下反应器内 MMHg 浓度变化趋势及生成 Hg^0 的规律

Fig. 3 Trend of MMHg concentrations and Hg^0 flux in the reactor exposed to natural light treated with various nitrate concentration gradients

·OH也就越多,·OH的浓度增多使其与 MMHg 间的有效碰撞机率增加, C—Hg 键更容易受到攻击而断裂,使其降解速率加快. 由于·OH极强的氧化性,可以将 Hg^0 转化为 Hg^{2+} , 当 NO_3^- 浓度增加时,游离的·OH也增多,加快了 Hg^0 的转化,因而其生成量也就减少.

2.3 Hg^{2+} 的生成

在 NL 条件下,经不同浓度的 NO_3^- 处理, Hg^{2+} 的变化趋势如图 4 所示. 随着 NO_3^- 浓度的增加,溶液中 Hg^{2+} 的浓度也增加,当 NO_3^- 浓度为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 3 h 后 Hg^{2+} 的浓度达到了 $38.89 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 是未加 NO_3^- 的 12.67 倍. 在 UV 条件下,只加入 NO_3^- 后 Hg^{2+} 的浓度也呈现逐渐增加的趋势,其余各处理与 VL 条件下所有处理都出现图 4 中纯 MMHg 所呈现的趋势,均是先增加后下降,且都低于 $8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 这是由于 MMHg 降解最先生成的是 Hg^{2+} 和 Hg^+ ,之后再形成 Hg^0 . 在反应初期 MMHg 浓度较高,其降解速率大于 Hg^0 的生成速率, Hg^{2+} 在溶液中逐渐累积,浓度增加,当反应达到一定程度后, MMHg 浓度降低,其降解速率也减小,生成的 Hg^{2+} 和 Hg^+ 的量也就减小,但 Hg^0 仍继续生成,因而 Hg^{2+} 浓度呈下降趋势. 而在有紫外光的条件下, NO_3^- 提供的·OH 加快了 MMHg 的光降解速率,使生成的 Hg^{2+} 增加,同时·OH的强氧化性抑制 Hg^{2+} 还原为 Hg^0 ,使生成的 Hg^{2+} 浓度不断增加,并随着 NO_3^- 浓度的增加,转化生成的 Hg^{2+} 越多. 因而 Hg^{2+} 的浓度体现了 MMHg 光降解的反应历程.

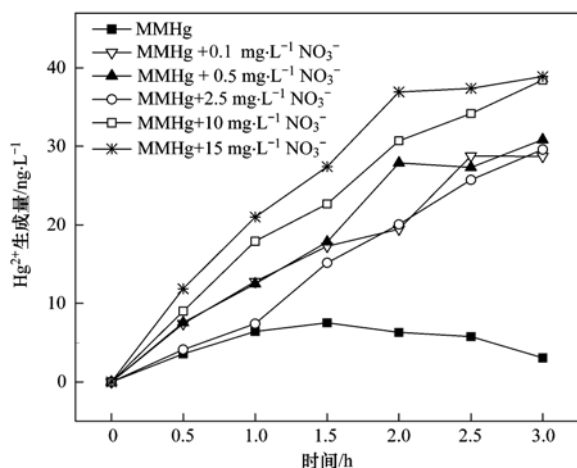


图 4 在 NL 条件下 Hg^{2+} 的生成量

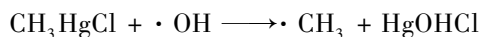
Fig. 4 Hg^{2+} concentration in the reactor exposed to natural light

3 讨论

水生系统的化学组成和物理性质对其中发生的光化学过程有重要影响^[18]. 大部分有机无机化合

物、各种阴阳离子在太阳光的作用下会发生一系列的光化学反应,生成多种如 $^1\text{O}_2$ 、 O_2^- 、 H_2O_2 、·OH等活性物质^[19]. 这些活性物质又会进一步引发或促进多种稳定物质发生光化学反应. 其中·OH是一种非常重要的活性基团,在各物质的环境化学过程中有重要作用. 在天然水体中,其产生过程十分复杂. Faust 等^[20]指出 Fe(II)-多羧络合物(如柠檬酸、丙二酸、草酸络合物)在太阳光下发生光化学反应是地表水中·OH的重要来源. 也有研究发现天然有机质、铁化合物、 H_2O_2 、 $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ 等发生光化学反应也是自然水体中·OH的重要来源^[21~25]. 由于 NO_3^- 在紫外光的照射下可以在水溶液中发生反应生成·OH,故本试验以 NO_3^- 在有紫外光的条件下发生降解反应作为·OH的供体,以 $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ 作为·OH的去除剂,同时设置了黑暗、可见光等光照条件作为对照,探讨了·OH对 MMHg 光降解的影响. 本试验以纯水作为反应液,虽然其理化性质与自然河湖水有较大的差异,但适用于单纯研究·OH在 MMHg 光降解中的作用,可以直观地反映出 NO_3^- 与 MMHg 间的光化学反应过程.

太阳光中的紫外线光能可以使自然水体中 MMHg 的 C—Hg 键断裂,或者由光化学反应产生的活性基团攻击 C—Hg 键引发 MMHg 光降解. 而目前对 MMHg 光降解的研究主要集中在实地水环境中降解速率研究,对于各种阴阳离子、有机物对其降解速率特别是降解产物影响的研究少见报道. 有研究发现光照引发水体中产生的·OH、 $^1\text{O}_2$ 等可能是诱发 MMHg 降解的主要活性基团^[26~28],但也有研究发现 MMHg 光降解速率不受·OH的影响. Chen 等^[8]研究表明,溶液中有·OH时,MMHg 的光降解速率常数为 $9.88 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$,呈二级动力学反应. 其降解机制为反应式(3)或为:



本研究发现由·OH 可以促进 MMHg 光降解,其降解速率随 NO_3^- 浓度的增加而提高,呈二级动力学反应,但是由于试验条件等因素的影响导致反应速率有一定的差异. Gårdfeldt 等^[29]认为,·OH利用其自身较强的氧化性,可以将 Hg^0 氧化成 Hg^{2+} . 本试验所采用的试验方法可以直接检测 MMHg 光降解反应过程中 Hg^0 的通量,直观的反应了·OH对 MMHg 光降解反应产物的影响,且根据溶液中 Hg^{2+} 的实时浓度分析了 MMHg 光降解反应历程,这对于深入研究·OH在实际水环境中对 MMHg 光降解及汞的光化学循环的影响有重要意义.

4 结论

(1) 本研究分析了不同波长条件下 NO_3^- 对 MMHg 光降解速率及产物的影响, 根据其降解产物 (Hg^0 、 Hg^{2+}) 探讨了 MMHg 光降解反应历程, 表明了 NO_3^- 对 MMHg 光降解速率及产物的影响程度取决于光照条件。在有紫外光存在的条件下 (NL 和 UV), NO_3^- 的加入提高了 MMHg 的光降解速率, 同时促进其降解产物 Hg^0 向 Hg^{2+} 转化, 使 Hg^0 的释放通量降低, Hg^{2+} 的生成量增加。

(2) NO_3^- 的浓度对 MMHg 的光降解速率有一定的影响, 其降解速率随 NO_3^- 浓度的增加而增加, 且相比于对照降解速率提高了 2.39 ~ 44.01 倍。同时随 NO_3^- 浓度的增加, Hg^0 向 Hg^{2+} 的转化能力也逐渐加强, Hg^{2+} 的生成量逐渐增加。

参考文献:

- [1] Harada M. Minamata disease: Methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution [J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 1995, **25**(1): 1-24.
- [2] 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**(6): 241-293.
- [3] Xun L, Campbell N E R, Rudd J W M. Measurements of specific rates of net methyl mercury production in the water column and surface sediments of acidified and circumneutral lakes [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1987, **44**(4): 750-757.
- [4] Beneš P, Havlík B. Speciation of mercury in natural waters. In: Nriagu J Q (Ed.). *The Biogeochemistry of Mercury in the Environment* [M]. Amsterdam: Elsevier/North Holland Biomedical Press, 1979. 175-202.
- [5] Sella P, Kelly C, Rudd J, et al. Photodegradation of methylmercury in lakes [J]. *Nature*, 1996, **380** (6576): 694-697.
- [6] Inoko M. Studies on the photochemical decomposition of organomercurials-methylmercury (II) chloride [J]. *Environmental Pollution (Series B)*, 1981, **2**(1): 3-10.
- [7] Gårdfeldt K, Sommar J, Strömberg D, et al. Oxidation of atomic mercury by hydroxyl radicals and photoinduced decomposition of methylmercury in the aqueous phase [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(17): 3039-3047.
- [8] Chen J, Pehkonen S O, Lin C J. Degradation of monomethylmercury chloride by hydroxyl radicals in simulated natural waters [J]. *Water Research*, 2003, **37** (10): 2496-2504.
- [9] 孙荣国, 毛雯, 马明, 等. 水体中甲基汞光化学降解特征研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4329-4334.
- [10] Hammerschmidt C R, Fitzgerald W F. Photodecomposition of methylmercury in an arctic Alaskan lake [J]. *Environment Science and Technology*, 2006, **40**(4): 1212-1216.
- [11] Zepp R G, Hoigne J, Bader H. Nitrate-induced photooxidation of trace organic chemicals in water [J]. *Environment Science and Technology*, 1987, **21**(5): 443-450.
- [12] Zhang Y T, Sun R G, Ma M, et al. Study of inhibition mechanism of NO_3^- on photoreduction of $\text{Hg}(\text{II})$ in artificial water [J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(2): 171-176.
- [13] United States EPA- 821-R- 01- 020, Method 1630: Methyl mercury in water by distillation, aqueous ethylation, purge and trap, and CVAFS [S].
- [14] United States EPA- 821-R- 01- 020, Method 1631: Methyl mercury in water by distillation, aqueous ethylation, purge and trap, and CVAFS [S].
- [15] 鲁新宇, 刘建兰, 冯鸣. 物理化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 249-250.
- [16] Vaughan P P, Blough N V. Photochemical formation of hydroxyl radical by constituents of natural waters [J]. *Environment Science and Technology*, 1998, **32**(19): 2947-2953.
- [17] Lin C J, Pehkonen S O. Aqueous free radical chemistry of mercury in the presence of iron oxides and ambient aerosol [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(24): 4137-4125.
- [18] Zafriou O C, Jousset-Dubien J, Zepp R G. Photochemistry of natural waters [J]. *Environmental Science and Technology*, 1984, **18**(12): 358-371.
- [19] 邓南圣, 吴峰. 环境光化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 69-159.
- [20] Faust B C, Zepp R G. Photochemistry of aqueous iron (III)-polycarboxylate complexes: roles in the chemistry of atmospheric and surface waters [J]. *Environmental Science and Technology*, 1993, **27**(12): 2517-2522.
- [21] Langford C H, Carey J H. The charge transfer photochemistry of the hexaquoiron (III) ion, the chloropentaquoiron (III) ion, and the MYMm-dihydroxo dimer explored with tert-butyl alcohol scavenging [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1975, **53**(16): 53-2430.
- [22] Fenton J J H. Oxidation of tartaric acid in presence of iron [J]. *Chemical Society*, 1894, **65**: 899-910.
- [23] Zepp R G, Faust B C, Hoigne J. Hydroxyl radical formation in aqueous reactions (pH 3-8) of iron (II) with hydrogen peroxide: the photo-Fenton reaction [J]. *Environment Science and Technology*, 1992, **26**(2): 313-319.
- [24] Vermilyea A W, Voelker B M. Photo-fenton reaction at near neutral pH [J]. *Environment Science and Technology*, 2009, **43** (18): 6927-6933.
- [25] Zafriou O C, Ture M B. Nitrate photolysis in seawater by sunlight [J]. *Marine Chemistry*, 1979, **8**(1): 33-42.
- [26] Tossell J A. Theoretical study of the photodecomposition of methyl Hg complexes [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 1998, **102**(20): 3587-3591.
- [27] Hoigné H J, Bader H. Ozone and hydroxyl radical-initiated

- oxidations of organic and organometallic trace impurities in water.
In: Brinckman F E (Ed.). Organometals and Organometaloids
[J]. Occurrence and Fate in the Environment. ACS Symposium
Series, 1978, **81**(18): 292-313.
- [28] Munthe J. The aqueous oxidation of elemental mercury by ozone
[J]. Atmospheric Environment, 1992, **26**(8): 1461-1468.
- [29] Gårdfeldt K, Feng X B, Sommar J, *et al.* Total gaseous mercury
exchange between air and water at river and sea surfaces in
Swedish coastal regions [J]. Atmospheric Environment, 2001,
35(17): 3027-3038.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototoxic Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人