

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM _{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM _{2.5} 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283)	
《环境科学》征稿简则 (1332)	
信息 (1350, 1509, 1582, 1644)	
专辑征稿通知 (1523)	

巨牡蛎 (*Crassostrea* sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积

刘锡尧, 袁东星*, 陈耀瑾

(厦门大学环境与生态学院, 厦门 361005)

摘要: 研究了巨牡蛎 (*Crassostrea* sp.) 对配备烟气海水脱硫装置电厂的脱硫海水中汞 (Hg) 的生物累积。在电厂的排水口 (实验点) 和参考点分别吊养牡蛎群, 定期采集样品, 测定海水中的 Hg 浓度和牡蛎的 Hg 含量 (均以干重计)。实验点和参考点海水中的总汞 (THg) 浓度分别为 $(120.6 \pm 55.5) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n=5$) 和 $(2.7 \pm 1.0) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n=5$), 甲基汞 (MeHg) 的浓度分别为 $(0.30 \pm 0.44) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n=5$) 和 $(0.28 \pm 0.31) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n=5$)。在 7 d 内, 实验点牡蛎体内 THg 含量从 $(138.3 \pm 14.3) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ($n=6$) 迅速增加到 $(3012 \pm 289) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ($n=6$), 且在后来的 34 d 内, 一直保持在 $2935 \sim 4490 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 的高含量水平; 而参考点牡蛎对 THg 未见明显累积, 为 $60.7 \sim 137.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间。暴露期间实验点牡蛎体内 MeHg 的含量未发生显著变化, 保持在 $55.4 \sim 73.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间。而参考点牡蛎 MeHg 含量呈略微下降的趋势, 但变化幅度不大, 在 $15.6 \sim 55.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间。本研究表明, 燃煤电厂排放的脱硫海水中的 THg 可被牡蛎迅速累积至很高的含量水平, 有不容忽视的潜在风险。脱硫海水中 MeHg 的浓度很低, 其在牡蛎体内未见明显累积; 在本研究的条件下, 未观测到牡蛎自身合成 MeHg 或将无机汞转化为 MeHg。

关键词: 汞; 生物累积; 牡蛎; 海水; 烟气海水脱硫

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1374-06

Bioaccumulation of Mercury in *Crassostrea* sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System

LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin

(College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study mercury (Hg) bioaccumulation in *Crassostrea* sp. exposed to waste seawater discharged from a coal-fired power plant equipped with a flue gas desulfurization system. Oysters were cultured in the discharge outlet of the power plant (studying site) and a control site, respectively. The total Hg (THg) concentrations (all counted as dry weight) of seawater in the studying and control sites were determined as $(120.6 \pm 55.5) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n=5$) and $(2.7 \pm 1.0) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n=5$), respectively, while methyl Hg (MeHg) concentrations were $(0.30 \pm 0.44) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n=5$) and $(0.28 \pm 0.31) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n=5$), respectively. The THg in oyster at the studying site increased dramatically from $(138.3 \pm 14.3) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ($n=6$) to $(3012 \pm 289) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ($n=6$) within 7 d, and remained at high levels of $2935 \sim 4490 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ for the next 34 d. In contrast, the THg in oyster at the control site showed no significant change, and kept at low levels of $60.7 \sim 137.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. After 41 d exposure, the MeHg in oyster at the studying site had no significant change, ranging from $55.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ to $73.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, and the content at the control site showed a slight decrease, ranging from 15.6 to $55.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. The study showed that THg in the waste seawater discharged at the coal-fired power plant could be quickly bioaccumulated by oyster to a great extent, the potential risk can thus not be ignored. MeHg concentration in the waste seawater was quite low, and no obvious bioaccumulation was found in oyster. Under the study conditions, no self-synthesis of MeHg or transformation of inorganic Hg into MeHg was found.

Key words: mercury; bioaccumulation; oyster; seawater; flue gas desulfurization

许多沿海地区的燃煤火力发电厂采用烟气海水脱硫工艺削减 SO_2 的排放。但 SO_2 被海水吸收排放的同时, 燃煤中的汞 (Hg) 也被吸收、排放到海域中^[1,2]。此部分 Hg 在海洋生物尤其是海产品体内累积, 对人类健康带来潜在风险, 但对此尚未有相关的研究报道。

牡蛎是我国重要的经济贝类之一, 在沿海地区分布广泛, 产量丰富。牡蛎对养殖、生长条件的要

求相对较低, 能够在高污染区存活, 能够耐受海水中较高浓度的重金属, 且寿命较长^[3]。据报道, 牡蛎对 Hg 的生物累积程度比大多数其它金属更大^[4], 对 Hg 的累积能力也比其它贝类更强^[5], 为此, 牡蛎可

收稿日期: 2012-07-05; 修订日期: 2012-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20777063, 40976070)

作者简介: 刘锡尧 (1985~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境化学与监测, E-mail: xyliuxmu@xmu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: yuandx@xmu.edu.cn

作为海洋环境中 Hg 污染的指示生物^[6]。

本研究在现场吊养巨牡蛎(*Crassostrea* sp.), 分析其对燃煤电厂脱硫海水中总汞(THg)和甲基汞(MeHg)的中长期累积规律, 以期为评估脱硫海水 Hg 暴露风险提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

研究区域实验点和参考点如图 1 所示, 实验点位于配备烟气海水脱硫装置的厦门 SY 电厂排放口, 参考点位于离实验点 2 150 m、接近鸡屿处。2008 年 7~8 月, 在实验点和参考点, 分别吊养采自厦门市同安牡蛎养殖区的牡蛎各约 100 个, 吊养深度为最低潮位以下约 1 m。实验共进行了 41 d, 以研究牡蛎对 SY 电厂脱硫海水中 MeHg 和 THg 的累积规律。

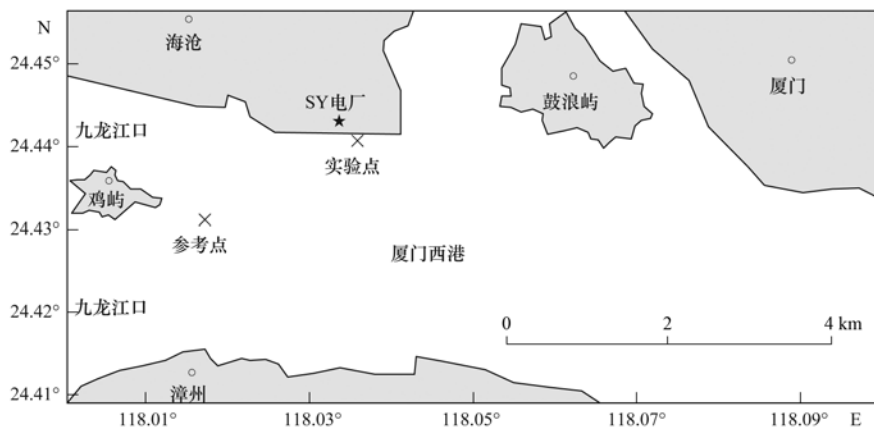


图 1 研究地点示意

Fig. 1 Map of studying area

1.2 样品的采集和测定的参数

在第 0、7、14、21、28、34、41 d, 取实验点和参考点牡蛎各 8~12 个, 以备测定其 THg 和 MeHg 含量。每次取样时, 现场记录海水温度、pH 等参数。采集两处的表层海水样品, 以备测定其 THg、总 MeHg、溶解态 THg 和溶解态 MeHg 的浓度, 以及盐度、叶绿素 a、浮游植物细胞总数、悬浮颗粒物、溶解氧、化学需氧量(高锰酸盐指数)等水质参数。

1.3 样品测定

(1) 牡蛎样品预处理 选取个体大小相近的牡蛎(壳长为 2.8~3.7 cm)6~10 个, 使用不锈钢刀剥去外壳后, 用塑料勺将软体组织全部取出, 用超纯水冲洗 3 遍后, 冷冻干燥。样品经磨碎、混匀后, 在 -20℃ 下密闭保存。

(2) 牡蛎样品 THg 分析 冷干后的样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HNO}_3$ (3/7, 体积比) 混合溶液消解后, 按 EPA 1631 方法^[7]测定。牡蛎样品 MeHg 分析: 冷干后的样品经 25% (质量分数) KOH 的甲醇溶液萃取后, 按照 EPA 1630 方法^[8]测定。

(3) 海水样品 THg、溶解态 THg 的测定 取现场采集、实验室 0.45 μm 微孔滤膜过滤后的海水样品, 按照 EPA 1631 方法^[7]进行。海水样总 MeHg、

溶解态 MeHg 的测定: 按照 EPA 1630 方法^[8]进行。

(4) 海水水质参数测定 均按照文献[9]进行。

1.4 统计分析

实验点和参考点海水水质参数、海水样中各形态 Hg 的浓度、牡蛎中的 MeHg 含量比较, 均采用配对样本均数比较(*T* 检验)的方法; 实验点和参考点牡蛎 THg 和 MeHg 含量随暴露时间变化的趋势判断, 采用秩相关分析(spearman correlation analysis)的方法。

2 结果与分析

2.1 海水水质参数

如表 1 所示, 实验点海水温度显著高于参考点; pH 显著低于参考点; 悬浮颗粒物的含量远高于参考点; 叶绿素 a 浓度略微低于参考点, 但差异不显著。实验点和参考点的海水溶解氧、高锰酸盐指数和盐度无显著性差异; 浮游植物细胞总数也无显著性差异。综上, 两处海水水质参数的差异主要体现在悬浮颗粒物、温度和 pH 上。

2.2 海水中 Hg 的形态

如表 2 所示, 实验点海水 THg 浓度显著高于参考点, 实验点海水 THg 浓度符合国家二类海水水质标准, 参考点符合国家一类标准^[10]。脱硫海水中总

MeHg 和溶解态 THg 占 THg 的比例很小,分别为 0.2% 和 5.1%, Hg 的主要赋存形态为颗粒态无机汞(94.8%),两处海水总 MeHg、溶解态 THg 无显著性差异.

表 1 实验点和参考点海水水质参数¹⁾

Table 1 Seawater conditions of the studying and control sites

参数	参考点	实验点	配对样本均数比较 (<i>T</i> 检验)	显著性水平
温度/℃	30.0 ± 1.3	32.1 ± 1.8	<i>P</i> = 0.009 (<i>n</i> = 4)	**
pH	7.86 ± 0.10	6.77 ± 0.40	<i>P</i> = 0.015 (<i>n</i> = 4)	*
悬浮颗粒物/mg·L ⁻¹	9.50 ± 1.60	76.47 ± 7.81	<i>P</i> = 0.003 (<i>n</i> = 3)	**
盐度	19.23 ± 7.22	23.76 ± 5.57	<i>P</i> = 0.388 (<i>n</i> = 3)	NS
溶解氧/mg·L ⁻¹	6.44 ± 0.82	5.93 ± 0.35	<i>P</i> = 0.366 (<i>n</i> = 2)	NS
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	1.43 ± 0.55	0.98 ± 0.28	<i>P</i> = 0.438 (<i>n</i> = 3)	NS
叶绿素 a/μg·L ⁻¹	6.73 ± 1.25	5.70 ± 1.39	<i>P</i> = 0.059 (<i>n</i> = 2)	NS
浮游植物细胞总数/个·L ⁻¹	4.61 × 10 ⁵ ± 1.60 × 10 ⁵ (<i>n</i> = 4)	4.41 × 10 ⁵ ± 1.12 × 10 ⁵ (<i>n</i> = 4)	<i>P</i> = 0.572 (<i>n</i> = 4)	NS

1) ** 表示 0.001 < *P* < 0.01, 非常显著; * 表示 0.01 < *P* < 0.05, 显著; NS 表示 *P* > 0.05, 不显著

表 2 海水 THg、溶解态 THg、总 MeHg 和溶解态 MeHg 浓度¹⁾

Table 2 THg, dissolved THg, total MeHg and dissolved MeHg concentrations in seawater

参数	参考点	实验点	配对样本均数比较 (<i>T</i> 检验)	显著性水平
THg/ng·L ⁻¹	2.7 ± 1.0	120.6 ± 55.5	<i>P</i> = 0.009 (<i>n</i> = 5)	**
溶解态 THg/ng·L ⁻¹	1.0 ± 0.2	6.2 ± 3.4	<i>P</i> = 0.258 (<i>n</i> = 2)	NS
总 MeHg/ng·L ⁻¹	0.28 ± 0.31	0.30 ± 0.44	<i>P</i> = 0.910 (<i>n</i> = 2)	NS
溶解态 MeHg/ng·L ⁻¹	N. D	N. D		
总 MeHg/THg/%	10.4	0.2		
溶解态 THg/THg/%	37.0	5.1		

1) N. D 表示未检出; ** 表示 0.001 < *P* < 0.01, 非常显著; NS 表示 *P* > 0.05, 不显著

2.3 牡蛎 THg 含量的变化

如图 2 所示,从第 0 d 到第 7 d,实验点牡蛎 THg 含量从 (138.3 ± 14.3) ng·g⁻¹ (*n* = 6, 干重, dw) 迅速增加到 (3 012 ± 289) ng·g⁻¹ (*n* = 6), 日累积速率达 410.5 ng·g⁻¹, 且在后来的 34 d 内, 一直保持在 2 935 ~ 4 490 ng·g⁻¹ 的高含量水平, 但在第 21 ~ 28 d 之间, 牡蛎 THg 下降了 32.8%, 原因可能是牡蛎正处于产卵期(厦门巨牡蛎的产卵高峰期为 5 ~ 9 月), 本研究观察到牡蛎的内脏由白色变透明, 且变得清瘦, 说明发生了大规模产卵^[11]. 而参考点牡蛎对 THg 未见明显累积, 牡蛎 THg 在 60.7 ~ 137.5 ng·g⁻¹ 之间, 甚至呈略微下降的趋势(秩相关分析: Correlation coefficient = -0.429, *P* = 0.337).

2.4 牡蛎 MeHg 含量的变化

如图 3 所示,实验点牡蛎 MeHg 含量虽显著高于参考点 (*P* < 0.001), 但对 MeHg 未见累积趋势(秩相关分析: Correlation coefficient = -0.143, *P* = 0.760), 牡蛎 MeHg 含量未发生显著变化, 始终保持在 55.4 ~ 73.1 ng·g⁻¹ 之间. 而参考点牡蛎 MeHg 含量呈略微下降的趋势(秩相关分析: Correlation coefficient = -0.679, *P* = 0.094), 但变化幅度不大,

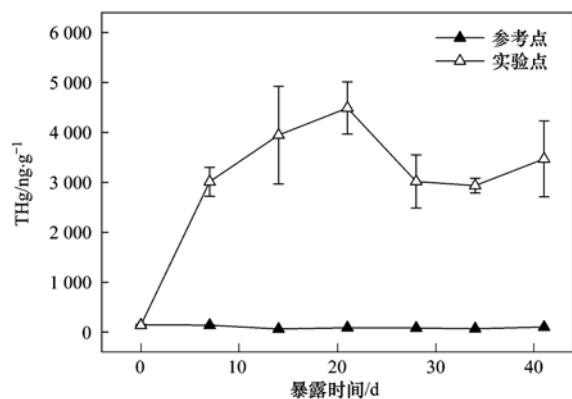


图 2 牡蛎 THg 含量随暴露时间的变化

Fig. 2 THg concentration in oyster as a function of exposure time

保持在 15.6 ~ 55.6 ng·g⁻¹ 之间.

3 讨论

3.1 脱硫海水水质参数变化

测得的实验点海水温度显著高于参考点, 源自烟气与海水的交换; 实验点海水 pH 显著低于参考点, 原因是海水吸收烟气中酸性 SO₂ 导致 pH 值降低. 实验点海水中悬浮颗粒物的含量远高于参考点, 是因为在烟气海水脱硫工艺运行时, 经过静电除

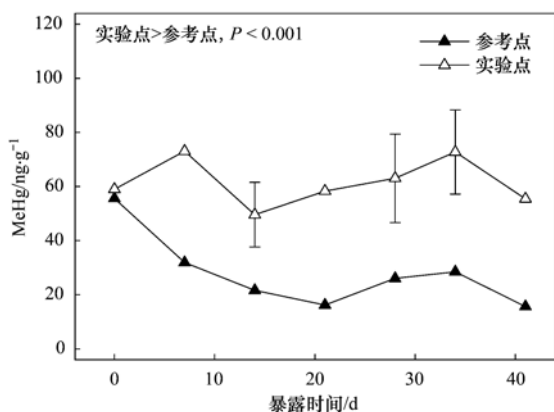


图3 牡蛎 MeHg 含量随暴露时间的变化

Fig. 3 MeHg concentration in oyster as a function of exposure time

尘器的剩余飞灰被洗涤到脱硫海水中,造成海水中悬浮颗粒物浓度增加.国内学者的相关研究也得到类似结果^[12].

3.2 脱硫海水中 Hg 的浓度

本研究测得实验点海水即脱硫海水 THg 浓度为 $(120.6 \pm 55.5) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 因受潮位、海流方向、电厂工况和燃煤 Hg 含量波动等多方面因素的影响,测定结果的标准偏差较大. Liang 等^[2]在 2008 年监测了 SY 电厂附近海域,测得排水口海水 THg 浓度为 $93 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 吴来贵^[13]测得深圳西部电厂曝气池出口海水 THg 浓度为 $40 \sim 100 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 本研究的测定结果与上述相关报道相近. 实验点海水 THg 浓度虽远高于参考点,但仍然较低,符合国家二类海水水质标准,且与国内学者在相关海域的监测结果^[14]处在相同的量级.

3.3 牡蛎对 THg 的生物累积

按照生物累积金属动力学模型^[15],将生物体当作箱室,生物体内金属浓度由金属输入生物体和生物体输出金属的速率共同决定,金属含量随时间的变化可表示为: $\text{d}C/\text{d}t = k_1 C_m - k_2 C$, 式中, k_1 为吸收常数 $[\text{L} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}]$, C_m 为环境相金属浓度 $(\text{ng} \cdot \text{L}^{-1})$, k_2 为排出速率常数, C 为生物体金属含量 $(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})$. 对上式积分,当输入大于输出时,某一时间点生物体的金属含量 (C_t) 为: $C_t = C_0 + k_1 C_m / k_2 \times (1 - e^{-k_2 t})$, 为生物累积曲线; 在稳定状态下, $\text{d}C/\text{d}t = 0$, 生物体金属含量 (C_{ss}) 为: $C_{ss} = C_0 + k_1 C_m / k_2$. 当输入小于输出时, $C_t = C_0 - k_1 C_m / k_2 \times (1 - e^{-k_2 t})$, 为生物排出曲线; 在稳定状态下, $C_{ss} = C_0 - k_1 C_m / k_2$. 生物富集系数 (BCF) 为: $\text{BCF} = (C_{ss} - C_0) / C_m$.

将实验点牡蛎 THg 含量与暴露时间进行拟合,因 Hg 输入大于输出,得到牡蛎的生物累积曲线 $y =$

$138.3 + 3418 \times (1 - e^{-0.3046x})$, 如图 4 所示. 根据动力学方程, $k_2 = 0.3046 \text{ d}^{-1}$; $k_1 = 7.95 \text{ L} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$; 生物半衰期 $B_{1/2} = \ln 2 / k_2 = 2.3 \text{ d}$; $C_{ss} = C_0 + 3418 = 3553.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} (\text{dw})$, 在暴露 14.7 d 后牡蛎体内 THg 含量即可趋于稳定; 生物富集系数 BCF 为 2.83×10^4 .

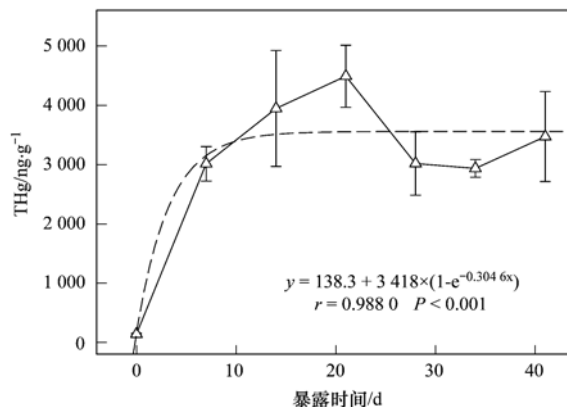


图4 实验点牡蛎 THg 生物累积动力学拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of THg bioaccumulation kinetics for oyster at the studying site

将参考点牡蛎 THg 含量与暴露时间进行拟合,因 Hg 输入大于输出,得牡蛎的排出曲线 $y = 144.5 - 64.0 \times (1 - e^{-0.1138x})$, 如图 5 所示. 根据动力学方程, $k_1 = 2.70 \text{ L} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$; $k_2 = 0.1138 \text{ d}^{-1}$; $B_{1/2} = \ln 2 / 0.1138 = 6.1 \text{ d}$; C_{ss} 为 $80.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} (\text{dw})$, 在暴露约 37 d 后牡蛎体内 THg 含量趋于稳定.

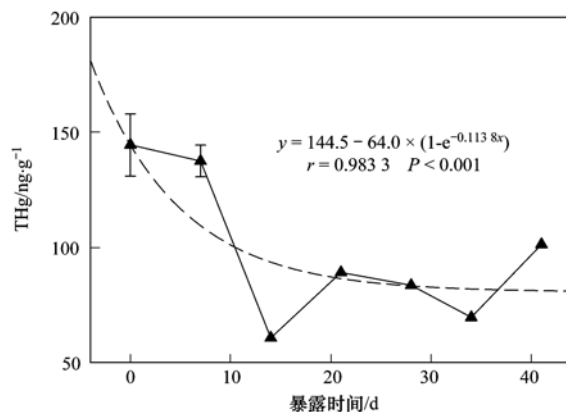


图5 参考点牡蛎 THg 生物累积动力学拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of THg bioaccumulation kinetics for oyster at the control site

根据报道,可将 8.0 作为牡蛎湿重 (ww) 和干重 (dw) 的换算因子^[3]. 经过折算后,在第 7~41 d, 实验点牡蛎 THg 含量为 $0.367 \sim 0.561 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} (\text{ww})$. 比较相关的国内和国际标准可知^[16~18], 实验点牡蛎 THg 含量峰值超过了大多数国内外的限

- mercury in tropical estuarine systems, Northeast Brazil [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2005, **74**(3): 582-588.
- [4] Denton G R W, Burdon-Jones C. Influence of temperature and salinity on the uptake, distribution and depuration of mercury, cadmium and lead by the black-lip oyster *Saccostrea echinata* [J]. Marine Biology, 1981, **64**(3): 317-326.
- [5] Najdek M, Sapunar J. Total and methyl-mercury content in bivalves, *Mytilus galloprovincialis* lamarek and *Ostrea edulis* linnaeus; Relationship of biochemical composition and body size [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1987, **39**(1): 56-62.
- [6] Meyer U, Hagen W, Medeiros C. Mercury in a northeastern Brazilian mangrove area, a case study: potential of the mangrove oyster *Crassostrea rhizophorae* as bioindicator for mercury [J]. Marine Biology, 1998, **131**(1): 113-121.
- [7] U. S. EPA Method 1631, Revision E, 2002. Mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry[S].
- [8] U. S. EPA Method 1630, 1998. Methyl mercury in water by distillation, aqueous ethylation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry[S].
- [9] GB 17378-2007. 海洋监测规范[S].
- [10] GB 3097-1997. 海水水质标准[S].
- [11] Cunningham P A, Tripp M R. Accumulation and depuration of mercury in the American oyster *Crassostrea virginica*[J]. Marine Biology, 1973, **20**(1): 14-19.
- [12] 张志红, 唐茂平. 漳州后石电厂 6 × 600 MW 超临界机组海水脱硫工艺介绍[J]. 中国电力, 2002, **35**(7): 69-71.
- [13] 吴来贵. 深圳西部电厂 4 号机组海水脱硫系统监测分析[J]. 热能动力工程, 2003, **18**(2): 200-202.
- [14] 许廖奇, 刘汝海, 王金玉, 等. 春季胶州湾海水汞的形态研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 42-47.
- [15] 王文雄. 微量金属生态毒理学和生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 116-118.
- [16] GB 2762-2005. 食品中污染物限量[S].
- [17] Canadian Food Inspection Agency. Canadian shellfish sanitation program-manual of operations [S]. Ottawa, ON, Canada, 2009.
- [18] State/Territory health departments within Australia and New Zealand. Australia New Zealand food standards code [S]. Australia Legislation, 2010.
- [19] 沈益绿, 马继臻, 平仙隐, 等. 巨牡蛎对重金属的生物富集动力学特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(4): 783-788.
- [20] 陈海刚, 林钦, 蔡文贵, 等. 3 种常见海洋贝类对重金属 Hg、Pb 和 Cd 的积累与释放特征比较[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(3): 1163-1167.
- [21] 王晓丽, 孙耀, 张少娜, 等. 牡蛎对重金属生物富集动力学特性研究[J]. 生态学报, 2004, **24**(5): 1086-1090.
- [22] Palmer S J, Presley B J, Taylor R J, *et al.* Field studies using the oyster *Crassostrea virginica* to determine mercury accumulation and depuration rates [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1993, **51**(3): 464-470.
- [23] Cunningham P A, Tripp M R. Factors affecting the accumulation and removal of mercury from tissues of the American oyster *Crassostrea virginica*[J]. Marine Biology, 1975, **31**(4): 311-319.
- [24] Kopfler F C. The accumulation of organic and inorganic mercury compounds by the eastern oyster (*Crassostrea virginica*) [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1974, **11**(3): 275-280.
- [25] Blackmore G, Wang W X. The transfer of cadmium, mercury, methylmercury, and zinc in an intertidal rocky shore food chain [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, **307**(1): 91-110.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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