

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 ..... 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 ..... 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 ..... 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征及其对大气能见度的影响 ..... 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM<sub>10</sub> 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 ..... 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 ..... 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 ..... 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 ..... 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 ..... 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 ..... 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 ..... 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 ..... 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 ..... 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 ..... 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 ..... 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 ..... 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 ..... 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 ..... 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 ..... 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 ..... 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 ..... 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 ..... 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 ..... 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 的制备及其太阳光下降解土霉素 ..... 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 ..... 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 ..... 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 ..... 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 ..... 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 ..... 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 ..... 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 ..... 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 ..... 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物<sup>15</sup>N自然丰度对长期氮施加的响应 ..... 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 ..... 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 ..... 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 ..... 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 ..... 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 ..... 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 ..... 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe<sup>3+</sup> 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 ..... 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 ..... 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 ..... 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 ..... 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 ..... 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 ..... 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 ..... 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 ..... 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 ..... 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 ..... 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO<sub>2</sub> 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 ..... 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 ..... 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

# 燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响

梁鹏<sup>1,2</sup>, 王远娜<sup>1</sup>, 尤琼智<sup>1</sup>, 高雪飞<sup>1</sup>, 何杉杉<sup>1</sup>

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300; 2. 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 杭州 311300)

**摘要:** 为研究燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响, 以浙江省象山港渔业养殖区为研究对象, 对养殖区和对照区海水样品中不同形态汞浓度进行了测定. 结果表明, 燃煤电厂周围海域上覆水总汞浓度达到  $83.0 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 97.1 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ . 沉积物表层孔隙水中总溶解态汞随深度的下降而下降, 并且 10cm 以上孔隙水中溶解态汞浓度显著高于 10 cm 以下溶解态汞含量 ( $P < 0.001$ ), 以上结果表明象山港海域水体中较高的汞浓度很有可能源于燃煤电厂的烟气释放. 养殖区水体总汞浓度 ( $96.5 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 133 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 高于对照区 ( $69.5 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 39.4 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 主要源于养殖行为过程中从业人员生活污水的排放以及鱼饲料等物质在沉积物中的积累, 进而向上覆水中释放. 渔业养殖区孔隙水表层甲基汞 ( $24.0 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 16.7 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 浓度高于对照区 ( $6.60 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 5.11 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 说明渔业养殖行为造成了沉积物中有机质积累, 促进了汞的甲基化.

**关键词:** 渔业养殖; 燃煤电厂; 汞形态; 水生生态环境; 象山港

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2870-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.019

## Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment

LIANG Peng<sup>1,2</sup>, WANG Yuan-na<sup>1</sup>, YOU Qiong-zhi<sup>1</sup>, GAO Xue-fei<sup>1</sup>, HE Shan-shan<sup>1</sup>

(1. School of Environmental & Resources Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** To investigate the influence of marine aquaculture around coal power plant on Hg species change in aquatic ecological environment, the fish farming area in Xiangshan Harbor, Zhejiang province, was studied. The concentrations of different Hg species in sea water collected from marine aquaculture sites (MS) and references sites (RS) were measured. The result showed that the total mercury (THg) concentration in the surface water reached  $83.0 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 97.1 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ . Dissolved Hg (DHg) in pore water of core sediment decreased with the increasing depth. Meanwhile, the DHg content in pore water above 10 cm was significantly higher ( $P < 0.001$ ) than that below 10 cm, which confirmed the influence of coal-fired power plants on the surrounding areas. THg concentration in MS ( $96.5 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 133 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) was higher than that in RS ( $69.5 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 39.4 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), which was mainly resulted from the accumulation of sewage discharge by the employees and fish feed material in sediments during breeding that were further released to the overlying water. Methylmercury concentration in pore water of MS ( $24.0 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 16.7 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) was also significantly higher than that in RS ( $6.60 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1} \pm 5.11 \text{ pmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), which demonstrated that marine aquaculture activities promoted the methylmercury production by increasing the accumulation of organic matter in sediment.

**Key words:** aquaculture; coal power plant; mercury species; aquatic ecological environment; Xiangshan Harbor

汞是一种生物体非必需的高毒性重金属元素, 也是唯一一种主要以气态形式存在于大气中的重金属污染物<sup>[1~4]</sup>. 所有的汞化合物对人类和动物都具有极强的毒性, 其中以有机汞化合物(尤其是甲基汞和二甲基汞)的毒性最大<sup>[3]</sup>. 甲基汞能够通过食物链以生物积累和生物放大作用在不同生物体中进行富集, 当人们摄入甲基汞浓度较高的鱼类时, 其会在人体内积累, 对人类健康产生严重危害.

人类从海洋中获取水产食物, 主要有两条途径, 一是捕捞, 二是养殖. 长久以来, 由于过度捕捞, 渔业资源呈现枯竭状<sup>[5]</sup>, 而人们对水产品的需求量却不

断增大, 海洋养殖随之迅速发展. 1950 年, 全球养殖渔业年产量不到 1 万 t, 但是到 2010 年, 已经达到 5 987 万 t<sup>[6]</sup>. 中国大陆是全球最大的养殖渔业产地. 2010 年全年产量为 3 673 万 t, 达到全球产量的 61%<sup>[6]</sup>. 然而, 水产养殖过程会带来大量的环境问题, 水产养殖过程中产生大量的污染物会对自身养

收稿日期: 2015-02-10; 修订日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(21307114); 中国博士后科学基金项目(2013M540719); 浙江农林大学科研启动基金项目(2012FR051)

作者简介: 梁鹏(1983~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为汞元素的环境地球化学循环, E-mail: liangpeng2727@163.com

殖水体造成严重的污染,例如,有机质的不断积累、水体富营养化以及药物滥用等<sup>[7]</sup>。

燃煤是全球人为大气汞排放的最主要来源,燃煤释放的汞已占全球人为排放总量的 60%,在中国达到 70% 以上,其中燃煤电厂汞排放占大气汞排放总量的 33.6%,居行业首位<sup>[8,9]</sup>。燃煤对周边环境带来的汞污染问题不可小视<sup>[10]</sup>。陕西宝鸡燃煤电厂周边土壤中汞浓度高出当地背景值 5 倍,上海市燃煤电厂周边大气环境中的汞浓度比背景值高出 2.58~5.36 倍<sup>[11]</sup>。

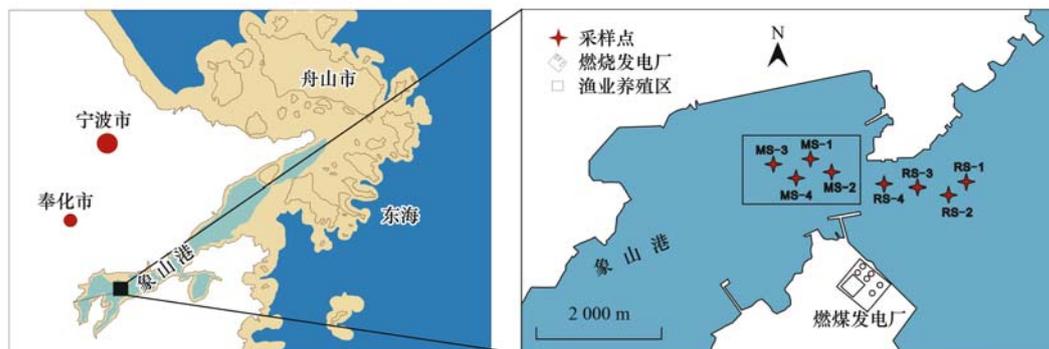
目前,只有少数研究对养殖区汞的地球化学循环过程进行了初步探讨<sup>[12-14]</sup>。但是,以上研究主要针对的是渔业养殖区沉积物中汞的形态变化,并且,这些研究中养殖区周围都没有明显的汞污染源。而关于养殖区环境水体中汞的形态变化研究还鲜有报道。此外,关于养殖区周围汞污染源对海洋水环境汞污染程度的影响也同样鲜有报道。因此,调查养殖区水生生态系统环境以及燃煤电厂周围海域中的汞污染情况甚为重要,这直接关系到人类通过食用养殖水产品所造成的甲基汞暴露情况。据此,本研究的目的是通过

分析燃煤电厂周围海域渔业养殖区与对照区上覆水和孔隙水中不同汞形态的含量,以探明燃煤电厂烟气排放以及渔业养殖行为水体汞含量的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点

采样地点设在浙江省典型渔业养殖区宁波奉化象山港(图 1)。宁波市养殖面积 44 268 hm<sup>2</sup>,其中象山港是浙江省典型的水产养殖基地。其海域面积 563 km<sup>2</sup>,内湾狭长(约 70 km),水深约 10 m,地处副热带海洋季风气候区,全年主导风向为 NW(15%),累年平均风速 4.57 m·s<sup>-1</sup>。是一个半封闭性港湾<sup>[15,16]</sup>。在港底海域,海流较平稳,水交换缓慢,95% 水交换约需 4 个月<sup>[17,18]</sup>。港湾区域内有一燃煤火电厂,该火电厂于 2006 年正式动工,2009 年下半年顺利实现双机投产。该电厂一期工程装机 4×600 MW 亚临界燃煤机组,最终规划容量为 4×600 MW + 4×1 000 MW 燃煤机组,电厂 2012 年电煤吞吐量达到 1 030 万 t,每年产生粉煤灰 60×10<sup>4</sup> t,若不能及时治理,将会给大气环境带来严重压力。



MS: 养殖区; RS: 对照区

图 1 浙江省象山港样品采样点示意

Fig. 1 Sampling sites around Xiangshan Harbor, Zhejiang Province

### 1.2 样品采集

#### 1.2.1 采样点布置

样品于 2014 年 7 月在奉化象山港进行采集。对采样地养殖区设置 4 个平行采样点进行采样,对养殖区 1 km 以外未曾有过渔业养殖的区域(对照区)也等距设置 4 个采样点进行采样。所有的采样点距离燃煤电厂约 2 km。

#### 1.2.2 采样器准备

因天然未受污染水体中汞的质量浓度极低( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 级)。采样前对采样所用硼硅玻璃器皿进行严格预处理:用自来水加洗涤剂清洗干净,再用

10% 的酸浸泡 24 h 以上,之后先用自来水漂洗,然后用超纯水漂洗 3 次,放入马弗炉中加热至 500℃ 并保持 15 min 以上,自然冷却。冷却后,用双层聚乙烯保鲜袋包好,放置箱中备用。

#### 1.2.3 水样采集与保存

采集的样品包括:上覆水体(包括表层:距水面 0.5 m、中间层:水深的 1/2 处、底层:与沉积物交界的界面水)以及沉积物孔隙水(每 1 cm 间隔进行采集)。

用卡盖式水体采样器(普利特, QCC15)分别采集上覆水。采集到的样品装入硼硅玻璃瓶(已用样

品润洗3次),现场加入0.5%的工艺超纯HCl( $12 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),密封后用双层聚乙烯保鲜袋包好.未过滤水样用于分析总汞,总甲基汞和总悬浮物<sup>[20]</sup>.过滤的水样现场用 $0.45 \mu\text{m}$  Millipore 滤膜过滤后同未过滤水样一样处理保存,用于分析溶解态汞和溶解态甲基汞<sup>[19]</sup>.滤膜对折放入无色聚乙烯塑料袋中保存.采集到的水样带回实验室保存在冰箱中( $0 \sim 4^\circ\text{C}$ ),28 d内进行分析,避免汞的损失和形态转化.

用柱状采样器(自制)对采样点沉积物进行采集,采集上来的沉积物在保证厌氧的条件下进行分割(每1 cm进行一次分割,共分割20 cm),分割出来的沉积物装入经酸处理的离心管中,带回实验室冷冻保存.

采样操作过程中均使用一次性聚乙烯手套,避免操作过程中的污染.

### 1.3 样品分析

#### 1.3.1 试剂与仪器

主要试剂: $18.25 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$  超纯水; HCl:优级纯(含汞 $<5 \text{ pg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  HAc-NaAc 缓冲液; 272 g 优级纯醋酸钠和118 mL 优级纯冰醋酸溶于超纯水中,定容至1.0 L.

1%  $\text{NaBEt}_4$ :将每瓶1.0 g 蜡封装  $\text{NaBEt}_4$  (Sodium tetraethyl borate)溶于100 mL 预先冷却至 $0^\circ\text{C}$ 的2% KOH 溶液,摇匀,分装至20个5 mL 聚四氟乙烯瓶中,盖紧,避光冷冻保存.临用前取一小瓶解冻.

甲基汞标准溶液: $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  甲基汞标准溶液(Brooks Rand Ltd., 美国).

主要仪器:样品总汞以及甲基汞分析采用气相色谱-冷原子荧光法进行分析,所使用仪器为:Brooks Rand(美国)测汞仪.

#### 1.3.2 实验方法

##### (1) 水样总汞分析

水样总汞及溶解态汞的测定采用闫海鱼<sup>[3]</sup>等建立的金汞齐富集与冷原子荧光法,该方法最低检出限为 $0.01 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ .颗粒态汞由总汞与溶解态汞之差而得.

##### (2) 水样甲基汞分析

水样甲基汞的测定采用蒋红梅等建立的蒸馏-乙基化结合气相色谱-冷原子荧光法,该方法最低检出限为 $0.009 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ .同样颗粒态甲基汞由总甲基汞与溶解态甲基汞之差而得.

##### (3) 孔隙水甲基汞分析

对分割后的沉积物进行离心,离心条件为 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,25 min.在厌氧条件下,用10 mL 一次性针

筒从离心管中将孔隙水抽滤出来,由于样品量较少,而溶解态汞以及溶解态甲基汞能更好地反映水中不同形态汞的活性.因此,孔隙水中只分析溶解态汞和溶解态甲基汞,其测定方法与表层水总汞和甲基汞相同.此外,由于溶解态甲基汞含量极低,将所采的4个重复样品合并进行测定.

##### (4) 水样溶解性有机碳分析

溶解性有机碳浓度分析采用日本岛津 TOC-VCPH 型总有机碳分析仪进行测定.样品采用自动进样,进样量为 $50 \mu\text{L}$ ;作为载气,流量为 $150 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ <sup>[20]</sup>.

##### (5) 水样总颗粒物分析

总颗粒物采用 GB 11901-89 烘干称重法,量取充分混合均匀的试样100 mL 抽吸过滤,使水分全部通过孔径 $0.45 \mu\text{m}$  醋酸纤维滤膜.取出载有悬浮物的滤膜放在原恒重的称量瓶里,移入烘箱中于 $103 \sim 105^\circ\text{C}$  下烘干1 h 后移入干燥器中,冷却至室温后,称其重量.

## 2 结果与讨论

### 2.1 燃煤电厂对周围水体汞含量的影响

表1 详列出本研究中上覆水体不同形态汞的浓度.所有表层水体总汞浓度达到 $83.0 \text{ pmol}\cdot\text{L}^{-1} \pm 97.1 \text{ pmol}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $20.8 \sim 402 \text{ pmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),明显高于黄海( $8.45 \text{ pmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )、长岛海峡( $2.3 \sim 19.9 \text{ pmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )、康涅狄格河河口( $\sim 10 \text{ pmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )和南海海域( $11.6 \text{ pmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[21~23]</sup>.这可能受到采样点附近燃煤电厂的影响.煤中的汞在较高温度下主要以元素态汞进入大气,随着温度的逐渐降低,烟气中的元素态汞经过氧化转化为活性汞,活性汞的无机化合物易溶于水,并与烟气中的飞灰等颗粒物相互作用,通过化学/物理吸附部分转变为颗粒态汞,颗粒态汞易通过干/湿沉降迁移到海面,在释放源附近沉积,对周围海域产生负面影响<sup>[24~26]</sup>.已有研究表明,距电厂1~3 km 的环形区域受燃煤汞排放影响较大<sup>[27]</sup>,本研究样品采样点距电厂约为2 km.因此,该区域受燃煤电厂影响会较大.

### 2.2 渔业养殖行为对水体汞浓度及形态的影响

表1 反映了宁波奉化养殖区与对照区表层水体中不同形态汞浓度的差异.养殖区表层和底层水总汞浓度高于对照区,并且养殖区中间层水总汞浓度较表层和底层低,这主要受到渔业养殖行为的影响.表层水体总汞高,主要是由于养殖过程中从业人员生活污水直接排放,导致表层水体汞浓度升高.底层

表 1 养殖区 (MS) 与对照区 (RS) 不同层水体中汞形态的浓度/ $\text{pmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 1 Concentrations of Hg species in different layers of water body at marine aquaculture sites (MS) and reference sites (RS)/ $\text{pmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 

位置	总汞			溶解态汞			颗粒态汞		
	MS + RS	MS	RS	MS + RS	MS	RS	MS + RS	MS	RS
表层	102 ± 129	123 ± 186	80.6 ± 58.1	30.4 ± 40.4	38.6 ± 60.0	22.3 ± 6.18	71.5 ± 93.1	84.7 ± 126	58.3 ± 62.7
中间层	50.1 ± 25.5	46.8 ± 26.0	53.4 ± 28.4	27.4 ± 24.5	32.1 ± 34.3	22.8 ± 13.0	22.6 ± 24.4	14.7 ± 8.71	30.6 ± 33.8
底层	97.0 ± 108	119 ± 158	74.6 ± 31.0	18.4 ± 12.2	10.7 ± 2.92	26.1 ± 13.4	78.6 ± 110	109 ± 156	48.5 ± 39.1
全部	83.0 ± 97.1	96.5 ± 133	69.5 ± 39.4	25.4 ± 27.4	27.1 ± 38.2	23.7 ± 10.4	57.6 ± 84.5	69.4 ± 113	45.8 ± 44.1

水体总汞高,则主要是受底泥向水体释放汞的影响,水体渔业养殖过程中会投加大量的鱼饲料,但是只有约 40% 的鱼饲料可以被鱼体所食用,其他的都会富集到沉积物中<sup>[28]</sup>.此外,鱼体粪便等也会在沉积物表层富集,同样可能会导致沉积物中汞浓度增加.大量的研究表明,表层沉积物是上覆水体重要的汞“源”<sup>[29]</sup>.因此,渔业养殖行为加剧了养殖区水环境中汞污染的程度.

水体颗粒物含量会影响水环境中颗粒态汞的含量.颗粒物对汞有很强的吸附能力,汞的固液相分配

系数达到了  $10^3 \sim 10^5$ <sup>[30]</sup>.本研究中,底层水中颗粒物质量浓度(表 2)以及颗粒态汞的摩尔分数均高于表层水及中间层,此外,颗粒态汞占总汞的比例显著高于溶解态汞占总汞的比例(图 2),这主要是因为海水扰动沉积物可以使表层沉积物再悬浮,从而增加底层水中颗粒物的含量.渔业养殖区鱼体的活动会更进一步搅动底层水体,使底层水体中沉淀的泥沙、鱼体排泄物等沉积物随扰动水流运动,增加了颗粒物对汞的吸附作用,从而使底层水体颗粒态汞浓度变高<sup>[31]</sup>.

表 2 养殖区 (MS) 与对照区 (RS) 表层水体中溶解性有机碳与总悬浮颗粒物浓度的比较/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 2 Comparison of dissolved organic carbon and total suspended particles in surface water body of marine aquaculture sites (MS) and references sites (RS)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 

位置	溶解性有机碳		颗粒物	
	MS	RS	MS	RS
表层	22.2 ± 0.717	21.0 ± 0.420	10.4 ± 1.72	19.4 ± 11.9
中间层	22.3 ± 0.713	21.1 ± 0.249	68.7 ± 30.6	29.7 ± 16.1
底层	23.2 ± 1.04	22.0 ± 0.909	80.7 ± 9.14	48.6 ± 19.1

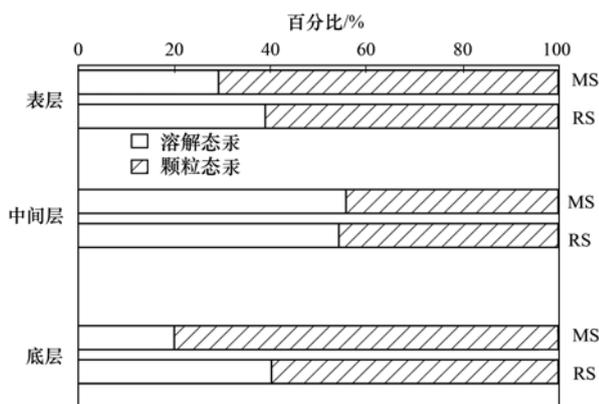


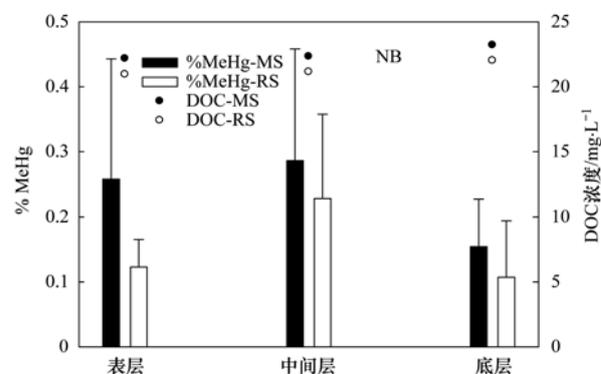
图 2 养殖区 (MS) 与对照区 (RS) 溶解态汞和颗粒态汞占总汞含量的空间变化

Fig. 2 The % DHg and % PHg in different layers of sea water collected from marine aquaculture sites (MS) and reference sites (RS)

### 2.3 渔业养殖行为对水体甲基汞浓度的影响

表 3 反映了渔业养殖区与对照区水体中甲基汞的浓度.从中可以看出,养殖区水体中甲基汞浓度高于对照区,且底层水甲基汞浓度最高.这可能与渔

业养殖行为有关,有机质对汞的甲基化影响一直以来都存在争论,渔业养殖流失到海水中的饵料(鱼排泄物),造成有机质的大量富集,有机质可以通过刺激异养微生物的活性使汞的甲基化率增加,腐殖酸或富里酸也可直接促进甲基化<sup>[32]</sup>;如图 3 所示,本研究对

图 3 上覆水中总甲基汞占总汞的百分含量 (%MeHg) 与溶解性有机碳 (DOC) 在养殖区 (MS) 和对照区 (RS) 水体中的空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of percentage of TMeHg in THg (%MeHg) and concentration of dissolved organic carbon (DOC) in overlying water collected from aquaculture sites (MS) and reference sites (RS)

水体中溶解性有机碳的测定结果也表明,养殖区水体中各个层的溶解性有机碳质量浓度均高于对照区.虽然有些研究认为,渔业养殖行为可以抑制汞的甲基化<sup>[12]</sup>,特别是在养殖历史久的区域.但本研究中,宁波奉化采样点渔业养殖时间较短(约 10 a),养殖区沉积物腐殖质腐熟程度较低,与甲基汞的络合作用较弱,因此,本研究结果表明在养殖时间短的海洋养殖

区,沉积物中有机质的积累可以促进汞的甲基化.此外,底层水体甲基汞浓度高于表层水体,主要是由于厌氧条件下更容易形成甲基汞<sup>[33,34]</sup>.并且,已有研究表明在光照条件下自然水体中产生的自由基引发的甲基汞光降解是甲基汞脱甲基的一种重要途径,光照引发水体中的硝酸盐产生的羟基自由基,能促进表层水体中甲基汞光降解<sup>[35,36]</sup>.

表 3 养殖区 (MS) 与对照区 (RS) 表层水体中不同形态甲基汞浓度的比较/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Comparison of different methylmercury species concentration in surface water body of marine aquaculture sites (MS) and reference sites (RS)/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

位置	总甲基汞			溶解态甲基汞			颗粒态甲基汞		
	MS + RS	MS	RS	MS + RS	MS	RS	MS + RS	MS	RS
表层	0.080 ± 0.028	0.091 ± 0.033	0.07 ± 0.022	0.059 ± 0.022	0.063 ± 0.012	0.055 ± 0.030	0.021 ± 0.019	0.028 ± 0.023	0.015 ± 0.012
中间层	0.106 ± 0.049	0.096 ± 0.034	0.117 ± 0.064	0.057 ± 0.014	0.053 ± 0.016	0.061 ± 0.012	0.049 ± 0.045	0.042 ± 0.023	0.056 ± 0.064
底层	0.086 ± 0.077	0.119 ± 0.06	0.053 ± 0.025	0.046 ± 0.018	0.058 ± 0.007	0.034 ± 0.019	0.040 ± 0.072	0.061 ± 0.104	0.019 ± 0.007
全部	0.091 ± 0.054	0.102 ± 0.060	0.080 ± 0.047	0.054 ± 0.018	0.058 ± 0.012	0.050 ± 0.023	0.037 ± 0.049	0.044 ± 0.059	0.030 ± 0.039

与总汞不同的是,多数甲基汞是以溶解态形式存在,而非颗粒态(图 4).这主要是由于甲基汞的固液分配系数远低于总汞,只有  $10^{1.5} \sim 10^{3.5}$ <sup>[30]</sup>,这表

明甲基汞不易在颗粒物上富集.但甲基汞毒性更大,以溶解态形式存在的甲基汞更容易通过生物富集及生物放大作用在不同生物体中进行积累,从而对人类及其他生物造成危害.

## 2.4 孔隙水中溶解态汞以及溶解态甲基汞浓度的空间分布

图 5(a)反映了养殖区与对照区不同深度孔隙水中溶解态汞的浓度.从中可以看出,表层孔隙水中,养殖区的溶解态汞浓度远高于对照区,当深度大于 3 cm 时,养殖区的溶解态汞浓度却低于对照区;随着深度的增加,溶解态汞浓度在养殖区与对照区均呈现下降趋势,当深度大于 10 cm 后,溶解态汞浓度趋于稳定,这主要由于燃煤电厂对周围海域的影响,沉积物柱中的总汞含量能够比较真实地反映流域汞的污染历史<sup>[16]</sup>,燃煤电厂投入运行后,大气汞沉降对表层沉积物污染明显,而沉积物中汞向孔隙水的释放使孔隙水也具有相同特性,使得表层孔隙

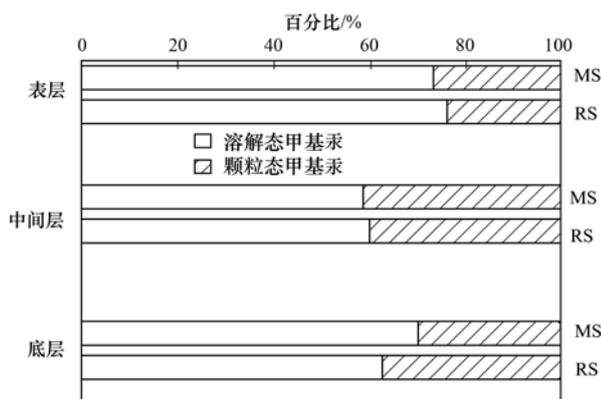


图 4 养殖区 (MS) 与对照区 (RS) 溶解态甲基汞和颗粒态甲基汞占总汞含量的空间变化

Fig. 4 The %DMeHg and %PMeHg in different layers of sea water collected from marine aquaculture sites (MS) and reference sites (RS)

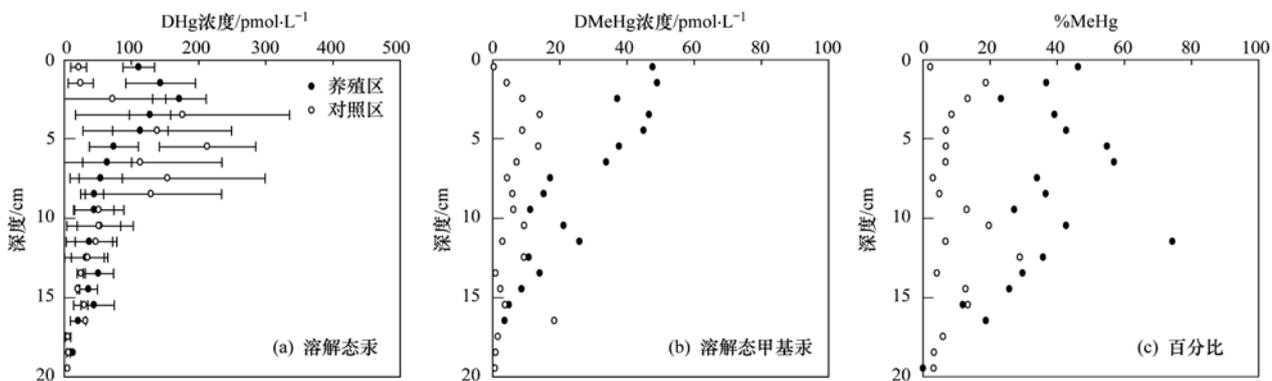


图 5 孔隙水中溶解态汞、溶解态甲基汞和溶解态甲基汞占溶解态汞的百分比

Fig. 5 Concentrations of DHg and DMeHg as well as %MeHg in sediment pore water

水(10 cm 以下)汞浓度明显低于 10 cm 以上的孔隙水。

图 5(b) 显示了养殖区与对照区不同深度孔隙水中溶解态甲基汞浓度的变化情况, 可以明显看出, 表层孔隙水甲基汞浓度明显高于底层, 是由于甲基汞在沉积物-界面水附近更容易形成。养殖区沉积物孔隙水中甲基汞浓度同样显著高于对照区, 说明渔业养殖行为促进了汞的甲基化<sup>[31]</sup>。这与上文上覆水体研究结论相一致。并且, 孔隙水中甲基汞占总汞比例在养殖区也明显高于对照区[图 5(c)], 水生系统中甲基汞占总汞的比例是判断甲基汞产率(甲基化强度)的一个重要指标。这可进一步证实渔业养殖行为促进了孔隙水中汞的甲基化, 特别是在表层沉积物孔隙水中。

### 3 结论

(1) 燃煤电厂对水体汞浓度的影响: 整个采样区表层水总汞浓度明显高于其他海域, 孔隙水表层 10 cm 内溶解态汞浓度显著高于 10 cm 以下水样, 说明这片海域受附近燃煤电厂影响严重。

(2) 渔业养殖行为对水体汞浓度及形态的影响: 渔业养殖行为中的人为活动以及富集在沉积物中的汞向水体的再释放导致养殖区表层和底层水总汞浓度高于对照区, 说明渔业养殖行为会促进水体汞浓度的增加。

(3) 渔业养殖行为对水体甲基汞浓度及形态的影响: 养殖区水体中甲基汞浓度高于对照区, 且底层水甲基汞浓度最高。孔隙水中甲基汞浓度以及甲基汞占总汞的比例在养殖区均高于对照区。从本实验的研究结果来看, 渔业养殖行为促进了汞的甲基化。

致谢: 感谢浙江省土壤污染生物修复重点实验室对本研究的支持。汪奇、夏钰琪、武帅、虞超、刘欢、陈霞等在采样和实验方面提供了帮助, 在此一并致谢!

#### 参考文献:

- [ 1 ] Chiaradia M, Cupelin F. Gas-to-particle conversion of mercury, arsenic and selenium through reactions with traffic-related compounds? Indications from lead isotopes [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(2): 327-332.
- [ 2 ] Ebinghaus R, Slemr F. Aircraft measurements of atmospheric mercury over southern and eastern Germany [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(6): 895-903.
- [ 3 ] 闫海鱼, 冯彩艳. 水产养殖对水生生态系统中汞甲基化影响研究进展 [J]. *环境化学*, 2012, **31**(11): 1782-1786.
- [ 4 ] 张福旺, 赵金平, 陈进生, 等. 滨海城市气溶胶中颗粒态汞的分布特征 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2273-2278.
- [ 5 ] 郭根喜, 陶启友, 胡昱, 等. 深水网箱——海洋养殖先进生产产力 [J]. *科学养鱼*, 2013, (1): 16-17.
- [ 6 ] FAO. *Fishery and Aquaculture Statistics* [M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.
- [ 7 ] Aguado-Gimenez F, Garcia-Garcia B. Assessment of some chemical parameters in marine sediments exposed to offshore cage fish farming influence: a pilot study [J]. *Aquaculture*, 2004, **242**(1-4): 283-295.
- [ 8 ] 蒋靖坤, 郝吉明, 吴焯, 等. 中国燃煤汞排放清单的初步建立 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 34-39.
- [ 9 ] 李辉, 王强, 朱法华. 燃煤电厂汞的排放控制要求与监测方法 [J]. *环境工程技术学报*, 2011, **1**(3): 226-231.
- [ 10 ] 王晓浩, 王娟, 王文华. 燃煤烟气中汞排放对周边环境的影响 [J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 928-932.
- [ 11 ] 刘文霞, 李博, 吴明作, 等. 燃煤烟气对土壤-小麦系统中汞累积及分布的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(1): 30-35.
- [ 12 ] Liang P, Shao D D, Wu S C, *et al.* The influence of mariculture on mercury distribution in sediments and fish around Hong KONG and adjacent mainland China waters [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(7): 1038-1043.
- [ 13 ] Shao D D, Liang P, Kang Y, *et al.* Mercury species of sediment and fish in freshwater fish ponds around the Pearl River Delta, PR China: Human health risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(4): 443-448.
- [ 14 ] Meng B, Feng X B, Chen C X, *et al.* Influence of eutrophication on the distribution of total mercury and methylmercury in hydroelectric reservoirs [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**(5): 1624-1635.
- [ 15 ] 蔡惠文, 孙英兰, 张学庆. 象山港网箱养殖对海域环境的影响及其养殖环境容量研究 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, **7**(11): 71-76.
- [ 16 ] 王金辉, 秦玉涛, 孙亚伟, 等. 象山港重点增殖区重金属残留量分布及污染源分析 [J]. *海洋渔业*, 2005, **27**(3): 225-231.
- [ 17 ] 朱艺峰, 黄简易, 林霞, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1498-1509.
- [ 18 ] 李婷, 韩晓, 林霞. 象山港国华电厂强增温海域浮游植物群落结构的季节性格局 [J]. *生态科学*, 2014, **33**(2): 353-360.
- [ 19 ] 孟博. 西南地区敏感生态系统汞的生物地球化学过程及健康风险评估 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2011.
- [ 20 ] 陈欣, 张霄宇, 雷惠. 长江口 CDOM 的光谱吸收特征以及 DOC 物源示踪意义 [J]. *海洋环境科学*, 2012, **31**(5): 625-630.
- [ 21 ] Ci Z J, Zhang X S, Wang Z W, *et al.* Distribution and air-sea exchange of mercury (Hg) in the Yellow Sea [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**: 2881-2892.
- [ 22 ] Rollhus K R, Fitzgald W F. The evasion and spatial/temporal distribution of mercury species in Long Island Sound, CT-NY [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, **65**(3): 407-418.

- [23] Rolffhus K R, Lambory C H, Fitzgetald W F, *et al.* Evidence for enhanced mercury reactivity in response to estuarine mixing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(C11): 3353.
- [24] Gibb W H, Clarke F, Mehta A K. The fate of coal mercury during combustion [J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, **65** - **66**: 365-377.
- [25] 殷立宝, 嵯玉群, 徐齐胜, 等. 中国燃煤电厂汞排放规律 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, **33**(29): 1-8.
- [26] 李扬, 张军营, 何北惠, 等. 煤热解气化过程中汞的形态转化和释放规律 [J]. *工程热物理学报*, 2008, **29**(10): 1775-1779.
- [27] 郑剑铭, 周劲松, 何胜, 等. 燃煤电厂汞排放对周边环境的影响 [J]. *化工学报*, 2009, **60**(12): 3104-3111.
- [28] HKAFCD. Fish Feed Management. Good Aquaculture Practices Series 1. Hong Kong Agriculture, Fisheries and Conservation Department[Z]. 2009.
- [29] 冯彩艳, 闫海鱼, 俞奔, 等. 网箱养鱼对水库水体甲基汞的影响 [J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(6): 1438-1446.
- [30] 锤寰, 王文雄. 沉积物中汞的生物可利用性研究进展 [J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 165-178.
- [31] Ci Z J, Zhang X S, Wang Z W, *et al.* Phase speciation of mercury(Hg) in coastal water of the Yellow Sea, China [J]. *Marine Chemistry*, 2011, **126**(1-4): 250-255.
- [32] Ullrich S M, Tanton T W, Abdrashitova S A. Mercury in the aquatic environment: a review of factors affecting methylation [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2001, **31**(3): 241-293.
- [33] Matilainen T. Involvement of bacteria in methylmercury formation in anaerobic lake waters [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **80**(1-4): 757-764.
- [34] Korthals E T, Winfrey M R. Seasonal and spatial variations in mercury methylation and demethylation in an oligotrophic Lake [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987, **53**(10): 2397-2404.
- [35] 毛雯, 孙荣国, 王定勇. 硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2218-2224.
- [36] 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.

## CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method .....	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing .....	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants .....	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information .....	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM <sub>2.5</sub> and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China .....	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM <sub>10</sub> .....	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data .....	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin .....	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications .....	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wanguyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River" .....	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City .....	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River .....	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau .....	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China .....	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory .....	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang .....	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System .....	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region .....	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment .....	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ , $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China .....	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth .....	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application .....	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope .....	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment .....	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation .....	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline .....	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal .....	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems .....	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor .....	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone .....	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China .....	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China .....	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant $^{15}\text{N}$ Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China .....	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau .....	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere .....	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus .....	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation .....	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil .....	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag .....	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism .....	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation .....	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L. ....	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L. ....	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil .....	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable .....	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms .....	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation .....	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature .....	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure .....	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO <sub>2</sub> Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit .....	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs .....	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行