

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (475)
信息 (524, 586, 605, 624)	

九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究

郭莹莹¹, 陈坚¹, 尹希杰^{1*}, 孙治雷², 邵长伟³

(1. 国家海洋局第三海洋研究所海洋与海岸地质环境开放实验室, 厦门 361005; 2. 青岛海洋地质研究所国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071; 3. 山东省物化探勘查院, 济南 250013)

摘要: 利用静态顶空法在 2009 年 7 月测定了九龙江河口表层水体和沉积物孔隙水中甲烷浓度以及相关的环境参数, 并对甲烷浓度分布特征和控制因素进行了相关的分析。结果显示 56 个河口表层水的甲烷浓度在 $10.7 \sim 456.7 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 饱和度远超过大气平衡甲烷浓度, 由河口上端向中下端逐渐减小。4 个站位 (B1、B2、B3 和 B4 站位) 孔隙水中平均甲烷浓度 (分别为 2.212 、 4.47 、 2.8 和 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 从河口上端向下端快速减小, 与水体甲烷浓度水平变化趋势基本一致。B1 ~ B4 站位孔隙水中硫酸盐的浓度依次增大, 其平均值分别为 0.13 、 0.64 、 5.3 和 $16.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。九龙江河口表层水和孔隙水中甲烷浓度变化趋势, 表明河口上端沉积物中产甲烷菌降解有机质产生甲烷, 并以扩散的形式通过沉积物-水界面进入上部水体, 导致河口上端甲烷浓度增加; 而在河口下端海相区随着孔隙水中硫酸盐浓度增加, 沉积物中产甲烷过程逐渐受到硫酸盐还原过程的抑制, 河口下端孔隙水和表层水甲烷浓度相应降低。B2 和 B3 站位孔隙水中甲烷浓度随着深度增加分别由 43 和 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 1051 和 $57 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 结合总有机碳 (TOC) 和硫酸盐在沉积柱剖面上的变化趋势, 表明大量甲烷在沉积物硫酸盐-甲烷过渡带中被厌氧氧化, 这进一步抑制了沉积物中甲烷的释放强度。九龙江河口沉积物中甲烷的产生过程除有机质以外还受到孔隙水中硫酸盐浓度的控制, 而水体甲烷主要来源于河口上端盐度相对较低且富有机质的红树林潮间带湿地的释放。

关键词: 甲烷; 硫酸盐; 甲烷厌氧氧化; 孔隙水; 硫酸盐-甲烷过渡带; 九龙江口

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0558-07

Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It

GUO Ying-ying¹, CHEN Jian¹, YIN Xi-jie¹, SUN Zhi-lei², SHAO Chang-wei³

(1. Open Laboratory of Ocean & Coast Environmental Geology, Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China; 2. Key Laboratory of Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 3. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Jinan 250013, China)

Abstract: Distribution of methane in surface water and sediment of Jiulongjiang Estuary was investigated during July, 2009 through head-space method. The concentration of methane varies from 10.7 to $456.7 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ in the surface water at 56 sampled stations, and supersaturates relative to equilibrium with atmospheric methane. The concentration of methane decreases rapidly from estuarine upside margin to the open coastal ocean, resulting from mixing between high CH_4 -containing fresh water and low CH_4 -containing seawater. The sediment cores are situated in the upper estuarine coast and seaward boundary along the estuarine salinity gradient, representing the freshwater, half-brackish and marine water environment. Distribution of methane in porewater is consistent with that of surface water, which decreases rapidly from B1, B2, B3 to B4 stations, from $2.212 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ to $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. The concentration of sulfate in porewater increases gradually from B1, B2, B3 to B4 stations, with average value of 0.13 , 0.64 , 5.3 and $16.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. The trends of methane in surface water and porewater have illustrated a large amount of methane is generated via the process of organic matter degradation mediated by methanogens, moved across sediment-water interface, and entered to overlying water. In seaward boundary sediment with an abundance of sulphate in sediment, and sulphate in porewater inhibits the methanogenesis, the methane input from the sediment rapidly decreases. Depth profiles of methane in porewater B2 and B3 stations show an increase in concentration from 43 and $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ near the sediment-water interface to about 1051 and $57 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ at core end. According to the vertical profile of methane, total organic carbon (TOC) and sulfate trend, a large amount of methane is depleted via anoxic oxidation in methane-sulfate transition. The methane released from the low concentration of sulfate sediment intertidal wetland situated in upper estuarine could be the most important source in Jiulongjiang estuary.

Key words: methane; sulfate; anoxic oxidation methane; porewater; methane-sulfate transition; Jiulongjiang estuary

收稿日期: 2011-04-07; 修订日期: 2011-08-30

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项 (海三科 2009056); 福建省青年基金项目 (2010J05095); 福建省海岸带调查项目 (908-01-FJ-III)

作者简介: 郭莹莹 (1984 ~), 女, 助理工程师, 主要研究方向为海洋生物地球化学。

* 通讯联系人, E-mail: yinxijie2003@163.com

甲烷是一种重要的温室气体,吸收太阳辐射的能力是二氧化碳的 20 倍,在控制地球热辐射平衡和大气化学反应过程中发挥着重要的作用^[1]. 近年来全球变暖一直是各国关注的热点,大气中甲烷浓度的增加被认为是导致全球升温的重要原因之一^[2]. 据报道大气中甲烷的含量(体积分数)由工业革命前的 0.7×10^{-6} 增加到现在的 1.77×10^{-6} ,并以每年 1% ~ 2% 的速度增长^[3],因此世界各国科学家对甲烷的源和汇及其强度变化进行了大量的研究^[4~13]. 由于近岸河口地区高的有机通量,甲烷生物地球化学循环过程在该地区异常活跃,因此河口地区在全球的甲烷的循环中具有重要作用^[14].

九龙江河口是我国东南沿海亚热带海洋气候地区典型的强潮汐河口之一,河口湾的发育受几组断裂的控制,形成了复杂多样的沉积环境,河口主要由富有机质的潮间带淤泥海滩、红树林湿地沼泽和海相沉积等类型组成^[15]. 河口地区水动力过程受到强潮汐过程的影响,具有高的流速和混合强度,其沉积环境和水动力过程有利于沉积物甲烷的产生和释放,因此九龙江河口为甲烷生物地球化学过程的研究提供了适宜的场所. 目前国内对甲烷循环过程的研究主要集中在稻田、湿地或者沼泽等淡水环境^[15~20],对河口海岸

带地区甲烷循环过程研究报道还相对较少^[11,13,21].

本研究利用顶空平衡法测定九龙江河口水体和沉积物孔隙水中的甲烷浓度,以及相关的化学参数(盐度、TOC、 SO_4^{2-}),确定该地区水体和沉积物中的甲烷浓度空间分布,并分析其变化规律和环境化学控制因素,以期为进一步了解河口地区甲烷分布规律、来源以及通量提供参考信息.

1 材料与方法

1.1 站位分布与样品采集

2009 年 7 月 3 日考察船从九龙江河口上端到下游共采集 56 个表层水样和 4 根沉积柱. 沉积柱、表层水样站位分布如图 1. 水样用 5L 的 Niskin 采水器采集,用带有玻璃管的软管引出. 海水采集到甲板后,尽快洗涤顶空瓶(20 mL)两遍,然后将软管插入瓶底注入海水,注入过程中要保证避免产生气泡和漩涡,当水装满并且溢出约瓶体积的一半时,慢慢抽出玻璃管,用针管加入 0.5 mL HgCl_2 ,将一插有注射器针头的橡皮塞迅速塞上并旋紧,将多余水通过针头排出,避免留有气泡. 样品采集后于保温箱中低温避光保存. 表层水盐度和温度现场用衡欣盐度计(AZ8371)测定.

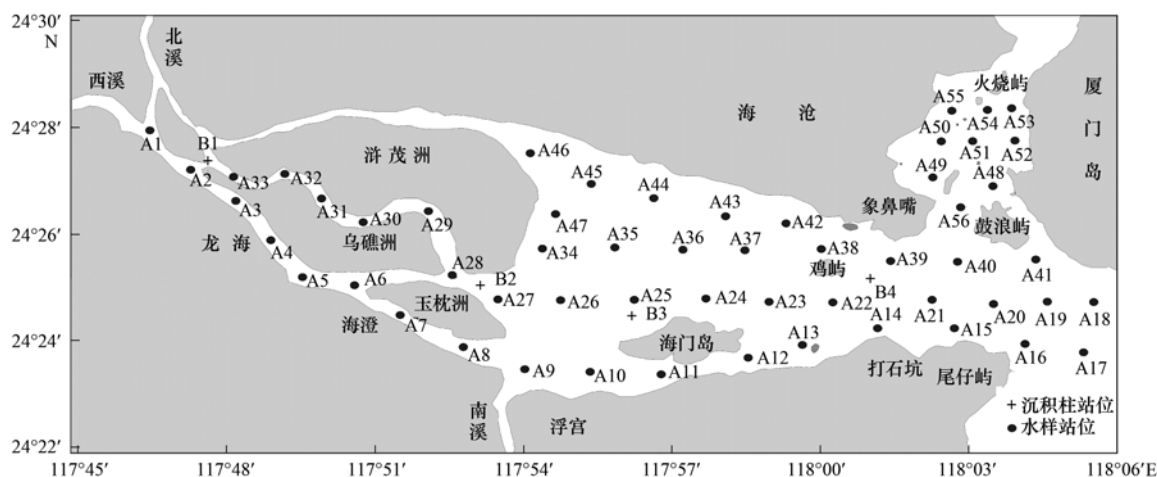


图 1 九龙江河口表层水样和沉积柱站位分布示意

Fig. 1 Study area and distribution of surface water stations and sediment core in the Jiulongjiang estuary

柱状沉积物用重力采样器(采样管为聚碳酸酯,其内径为 75 mm,长 100 cm)采集. 为方便取样,自采样管两侧以 4 cm 间隔垂向钻孔(钻孔直径为 1.5 cm),采样前在管壁外侧分别用胶带密封. 用虹

吸法吸出柱状沉积物上覆水,用去头的注射器从采样管两侧分别取出 5 mL 沉积物用于孔隙度和甲烷浓度的测定. 对于柱状沉积物以 4 cm 为间隔分层,将分好的沉积物装入密实袋中,用氮气吹洗 1 min

后密封保存在冷藏箱中,带回实验室.采样后 24 h 内将部分样品在 4℃ 进行离心(离心速率为 5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,离心 15 min),离心出的孔隙水用针头式过滤器(滤膜孔径为 0.45 μm)过滤,冷藏保存.

表 1 柱状沉积物及站位信息

Table 1 Characteristics of sediment core sampling localities

站位	经纬度	表层沉积物 温度/℃	盐度	底层水溶解氧 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
B1	E117°47'30.0" N24°27'37.6"	21.3	0.7	3.36
B2	E117°53'0.00" N24°25'02.7"	20.3	3.3	3.18
B3	E117°55'44.2" N24°24'49.6"	19.7	12.7	4.97
B4	E118°01'35.3" N24°25'13.1"	18.6	23.8	6.93

1.2 水体甲烷浓度测定

采用静态顶空方法测定:用 10 mL 超纯氮气置换顶空瓶中的水样后,在 25℃ 恒温水浴中振荡达到平衡,用注射器将 2 mL 去离子水注入采样瓶内,同时用气密针抽取 2 mL 顶空的气体,将针筒拔出后缓慢推出 1 mL 的气体样品,之后迅速将剩余 1 mL 气体注入进样阀中,并按下 start 键开始测定.色谱条件:检测器, FID, 温度 300℃; 进样口温度 120℃; 色谱柱为 Porpark Q 填充柱(2 m×3 mm, 80/100 目); 载气, 99.999% 氮气, 流速 30 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$. 对每个样品重复测 2 次,测定误差 $\pm 3.0\%$. 根据公式 $c_L = [c_g \times (\beta RT/22.356 + V_g/V_L)] \times 1\,000/22.356$ 计算水样中溶解的甲烷气体浓度 c_L ($\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$). 式中, c_g 是气-液达到平衡时顶空气中甲烷气体的浓度($\times 10^{-6}$), β 是甲烷气体的 Bunsen 溶解度 [$\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{Pa})^{-1}$], 参照文献[22]的公式计算, R 是甲烷气体体积常数 [$\text{L}\cdot\text{Pa}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$], T 是平衡时顶空瓶的绝对温度(K), 22.356 是甲烷的摩尔体积 ($\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$), V_g 是采样瓶上方顶空的体积(mL), V_L 是采样瓶内剩余水样的体积(mL).

1.3 沉积物 TOC、空隙度和孔隙水甲烷、 SO_4^{2-} 浓度的测定

TOC 测定:取一定量的沉积物样品,加入 4 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 至过量,反应 24 h. 用去离子水洗酸 3 次后,将样品置于烘箱内 60℃ 烘干,恒重后称量,研磨成粉末.准确称取约 7 mg 用元素分析仪(Vario E-III)进行测定 TOC,每个样品平行测定 2 次,分析测试误差为 $\pm 0.2\%$ ($n=5$). 经数据处理后计算得到沉积物中 TOC 含量(%).

孔隙度测定:3 mL 样品放入 25 mL 磨口瓶中,

密封保存,回实验室后 105℃ 烘 24 h,恒重后称量,计算样品前后重量差,换算为孔隙水的体积.孔隙度以单位体积沉积物所含水的体积表示.

孔隙水甲烷浓度测定:在 20 mL 顶空瓶中预先加入 3 mL 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液以抑制沉积物产甲烷菌的活动,然后放入 3 mL 沉积物,丁基橡胶塞密封,铝盖压紧,摇匀后低温保存,甲烷测定方法如上.沉积物中甲烷浓度根据孔隙度换算为单位体积孔隙水中甲烷浓度($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$).

孔隙水中的 SO_4^{2-} 浓度用离子色谱仪(DIONEX-3000 型,美国戴安公司)测定,测量误差 $\pm 0.5\%$ ($n=5$).

2 结果与分析

2.1 九龙江河口表层水甲烷浓度的水平分布

九龙江河口表层水中溶解甲烷浓度水平分布如图 2 所示.表层水体中甲烷浓度范围为 10.7 ~ 456.7 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 92.4 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$.高浓度甲烷主要出现在河口上端靠近红树林和潮滩的站位(110.8 ~ 456.7 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$)以及厦门码头附近海域站位(60 ~ 212.1 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$);低浓度甲烷均出现在河口下中端.从图 2 中可以看出除位于码头附近的 A48 ~ A54 站位外,九龙江口表层水溶解甲烷水平分布的基本特征主要表现为从河口上端向外海迅速减小.56 个站位表层水样盐度分布范围为 0.2 ~ 25.9,水平分布的变化趋势表现为从河口上端向下端快速的增加.根据各站位测定的盐度和溶解甲烷浓度数据(除去 11 个异常站位),对其进行相关性作图(图 3),由该图可以看出九龙江河口表层水中溶解甲烷浓度随着盐度的增加快速的减小.

2.2 九龙江河口沉积物中甲烷、TOC 和 SO_4^{2-} 浓度空间分布

为研究河口不同环境沉积物孔隙水中甲烷浓度的分布,分别从河口上端淡水区(B1 站位),河口中段红树林潮滩(B2 和 B3 站位),河口下端海相区(B4 站位)采集 4 个站位沉积柱. B1 站位孔隙水中甲烷浓度范围在 717 ~ 3 873 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 2 212 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,垂直剖面上次表层 10 cm 深度存在极大值,由孔隙水甲烷浓度的变化趋势表明大量的甲烷通过沉积水界面进入上覆水体; B2 站位位于玉枕洲红树林潮间带,孔隙水中甲烷浓度范围 43 ~ 1 051 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值 447 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,垂直剖面上甲烷浓度随深度增加逐渐增大.位于海门岛红树林潮间带 B3 站位孔隙水中甲烷浓度明显降低,在

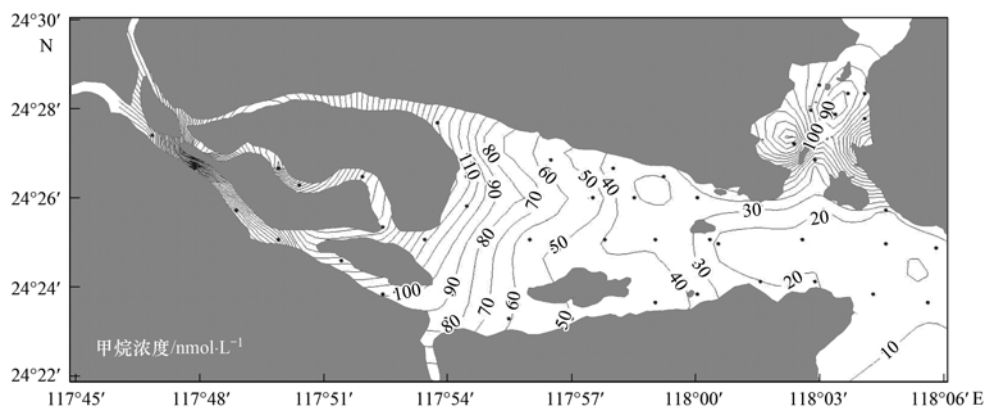


图2 九龙江河口表层水中甲烷分布

Fig.2 Distribution of dissolved methane in surface water of the Jiulongjiang estuary

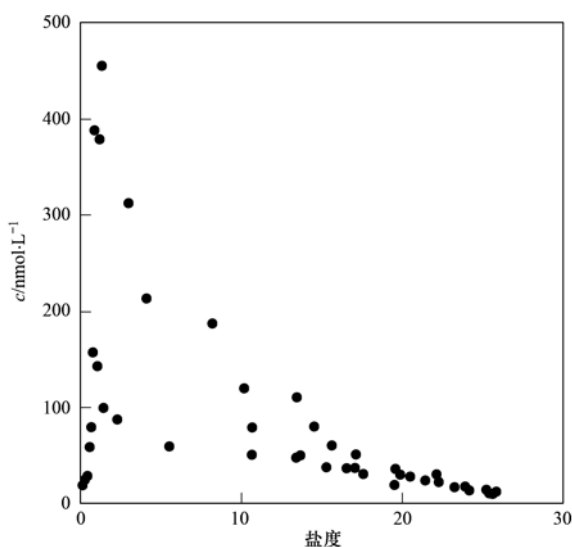


图3 九龙江河口表层水甲烷浓度和盐度相关性

Fig.3 Methane concentration vs. salinity in the Jiulongjiang estuary

上部 0 ~ 20 cm 甲烷浓度较小, 其值为 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 随深度增加其浓度在沉积柱底部增至 $57 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明正常环境下从沉积物中扩散进入上层水体的甲烷量相对与 B1 和 B2 站位显著减小; 位于海相区的 B4 站位孔隙水中甲烷浓度更低, 整个沉积柱孔隙水中甲烷浓度在 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 并且在垂直剖面上没有出现增加的趋势, 表明该站位对上覆水体甲烷浓度贡献可以被忽略。

从图 4 可以看出, 4 个站位 (B1、B2、B3 和 B4) 表层沉积物孔隙水 SO_4^{2-} 浓度与甲烷浓度的变化呈相反的变化趋势。随着距离海岸的增加和盐度增大, 孔隙水中 SO_4^{2-} 的浓度依次增大, 其平均值分别为 0.13、0.64、5.3 和 $16.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。B1 站位整个垂直剖面上由于 SO_4^{2-} 浓度较低, 没有明显的变化趋

势; B2 和 B3 站位孔隙水中 SO_4^{2-} 随深度增加而快速的减小, 其中 B2 站位 SO_4^{2-} 在 45 cm 附近全部消耗殆尽, 而 B3 站位在 57 cm 深度附近其浓度减小到 $1.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; B4 站位孔隙水中 SO_4^{2-} 在采样深度上由表层的 $19.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小到底部的 $13.7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。参考现场测定 4 个站位盐度数据 (分别为 0.5、5.7、13.3 和 23.7), 表明沉积物孔隙水中 SO_4^{2-} 浓度水平分布与盐度密切相关。

4 个站位 (B1、B2、B3 和 B4) 沉积物中 TOC 的平均含量分别为 1.91%、1.58%、1.61% 和 1.17%, 随着距离海岸的增加沉积物中 TOC 含量有减小的趋势, 其中 B3 站位沉积物 TOC 含量相对偏高, 可能主要是 B3 站位位于红树林湿地潮间带, 植物碎屑对该站位 TOC 含量增加有一定的贡献。

3 讨论

甲烷浓度测定结果表明夏季九龙江河口水体中溶解甲烷浓度远高于与大气中平衡的甲烷浓度值 ($2.0 \sim 3.0 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$), 通过海气界面向大气中释放甲烷, 是大气甲烷的源区。表层水中甲烷浓度分布表现出高的空间分布变化特性。以往的研究发现控制河口甲烷浓度分布的因素主要包括: 海岸湿地甲烷的水平输入, 沉积物释放, 海气界面扩散速率, 咸淡水物理混合稀释过程等^[10, 23~26]。九龙江河口上端区域站位表层水中甲烷浓度较高, 沿入海方向随着盐度的增加, 甲烷浓度迅速降低。根据各站位表层海水中溶解的甲烷浓度和盐度的相关曲线, 可以看出九龙江河口溶解甲烷浓度随着盐度的增加而快速减小, 这一规律与全球其它河口 (Loire estuary、Thames estuary、Humber and Tyne estuary、珠江口等) 甲烷和

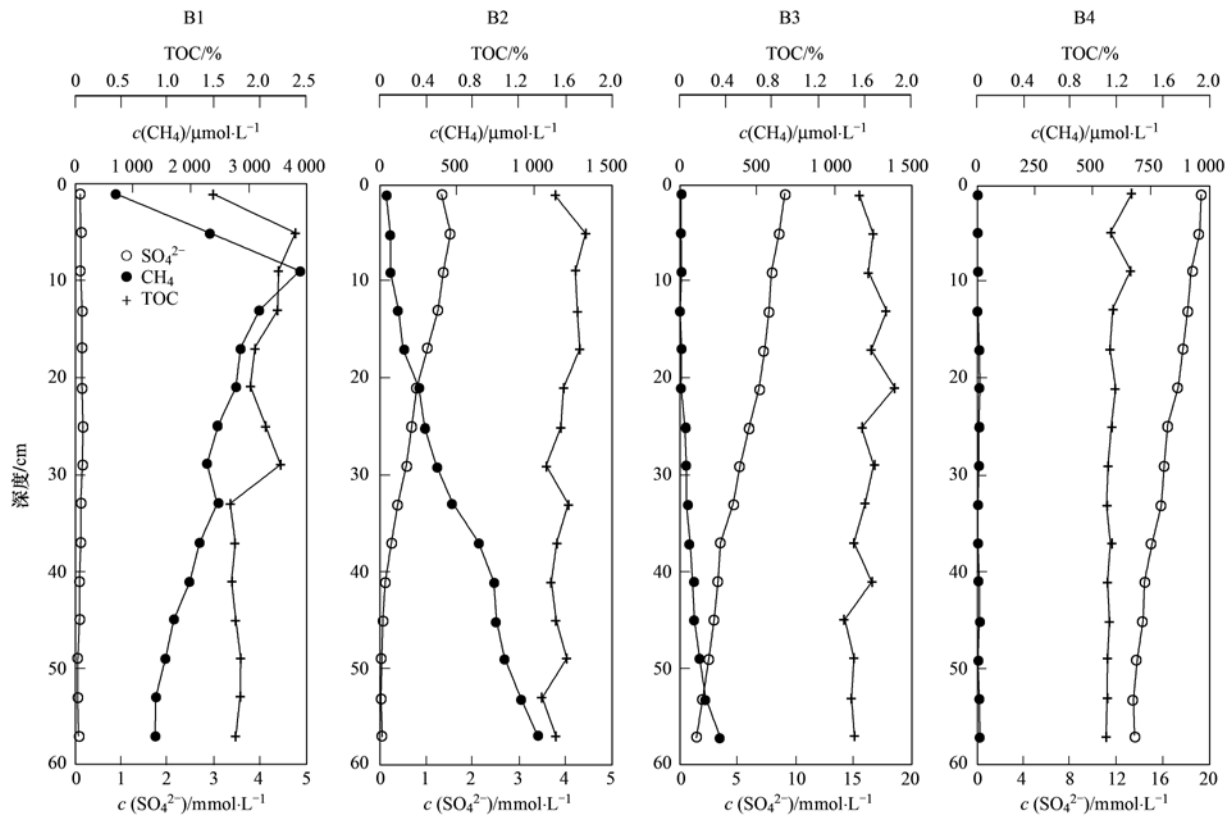


图4 4个站位孔隙水 SO_4^{2-} 、 CH_4 浓度和沉积物 TOC 含量

Fig. 4 Vertical profiles of sulfate, methane and TOC at four stations (B1, B2, B3 and B4)

盐度的相关性基本一致^[5,6,10,27~29]。九龙江河口表层水甲烷浓度随盐度梯度快速减小,除了受到一般河口所具有的物理化学过程影响以外,还因为九龙江河口属于强潮汐河口,为正规的半日潮^[15],河口湾内较强的水动力环境,导致含有高浓度甲烷的河口上端淡水与含有低浓度甲烷的海水可以充分的混合。另外,不同沉积环境使得河口上端和下端水体的甲烷输入强度存在较大差异(下面将对其进行详细的论述),最终导致河口表层水甲烷浓度从河口上端向下端呈现水平梯度分布。位于厦门岛码头附近的4个站位(A48~A51)甲烷浓度明显高于附近其它的站位,表明这4个站位存在其它方式的甲烷输入。结合这几个站位附近环境,推测这几个站位高的甲烷浓度可能主要位于码头附近的船舶油污排放所致^[10]。

以往的研究表明甲烷可以通过产甲烷细菌在富含有机物的缺氧沉积物中产生,并通过沉积物-水界面交换扩散至底层海水中^[30,31]。沉积物中甲烷产生的速率在很大程度上取决于可降解的有机质的数量^[32,33]。从4个站位沉积物中有机质含量的分布来看,B1站位沉积物中有机质含量最高,而B4站位最

低,由4个站位甲烷和有机质浓度相关性表明沉积物中有机质浓度对甲烷产生速率具有重要的影响。B3站位和B2站位沉积物中有机质含量基本一致,而甲烷浓度存在较大的差异,表明沉积物中甲烷分布除了受到有机质影响外还受到其它因素控制。由图4可以看出4个站位孔隙水中甲烷浓度随着 SO_4^{2-} 浓度的减小快速增加,表明九龙江河口海岸带沉积物中甲烷的产生速率受到孔隙水中 SO_4^{2-} 的浓度的控制。这主要是在沉积物的上部产甲烷菌和硫酸盐还原菌对沉积物中电子供体(乙酸和氢等基质)存在竞争,硫酸盐还原菌比产甲烷菌更容易获得电子,具有高的竞争优势^[34],因此当沉积物中有硫酸盐存在时,这些电子供体优先被硫酸盐还原菌所利用,使得产甲烷速率受到强烈的抑制。B1站位位于河口上端淡水区沉积物孔隙水 SO_4^{2-} 浓度较低,同时沉积物有机质充足,大量的有机质被产甲烷菌充分利用降解产生甲烷,使得孔隙水中甲烷浓度快速增加。位于河口中部的B2和B3站位沉积物上部由于孔隙水 SO_4^{2-} 的存在,甲烷产生速率受到一定的抑制作用,B2站位沉积物中随着 SO_4^{2-} 在40 cm深度附近被消耗殆尽,沉积下部产生的大量甲烷

沿浓度梯度逐渐向上部扩散; B3 站位沉积物中除硫酸盐还原对产甲烷过程的抑制, 沉积物下部产甲烷带中产生的甲烷在向上扩散的过程中, 在硫酸盐-甲烷过渡带内发生甲烷厌氧氧化与硫酸盐还原耦合作用^[14,35,36], 进一步限制了 B3 站位沉积物中甲烷向上部水体的排放. B4 站位在采样深度范围内孔隙水中高的 SO_4^{2-} 浓度强烈抑制了产甲烷菌的活性, 导致该站位沉积物中极低的甲烷浓度. 对 4 个站位甲烷浓度分布和沉积环境分析可以看出在九龙江河口地区沉积物中甲烷浓度除受到有机质浓度影响外, 主要受孔隙水中 SO_4^{2-} 供给强度的控制.

九龙江河口表层水和沉积物中甲烷的空间分布特征, 表明夏季九龙江较强的地表径流, 导致上层水盐度减小(0.2~1.0), 位于河口上端沉积物孔隙水中 SO_4^{2-} 的供给受到限制, 沉积物中有机质被产甲烷菌充分利用, 产生大量的甲烷, 甲烷以气泡和富甲烷孔隙水的形式进入上层水体, 导致九龙江河口上端低盐度区表层水具有较高的甲烷浓度. 河口中部随着盐度增加孔隙水中硫酸盐浓度逐渐增大, 在沉积物上部产甲烷过程部分受到抑制, 但是随着深度增加, SO_4^{2-} 逐渐被消耗殆尽, 沉积物下部产生的甲烷沿浓度梯度扩散进入上部沉积物中, 部分扩散进入上层水体. 同时, 九龙江河口红树林湿地表层沉积物受潮汐和底栖生物扰动等物理过程的作用, 进一步加速沉积物中甲烷气向上层水体的释放, 因此红树林湿地附近表层水中的甲烷浓度明显高于正常海相区溶解甲烷的浓度^[9,10,34]. 河口下端海相区盐度较高, 孔隙水中 SO_4^{2-} 的供给充足, 产甲烷过程受到强烈的抑制, 孔隙水中甲烷浓度较低, 对上层水的甲烷浓度增加的贡献基本忽略. 因此, 河口下端水体中的甲烷可能主要来源于河口上端高浓度甲烷水体的扩散. 九龙江河口表层水和沉积物中甲烷浓度空间分布的变化趋势, 表明九龙江河口水体甲烷主要来源于河口上端红树林潮间带湿地沉积物的释放.

4 结论

(1) 九龙江河口表层水中甲烷浓度远超过大气甲烷平衡的浓度, 为大气甲烷的源区; 表层水中甲烷浓度空间分布由河口上端向中下端逐渐减小, 主要反映了河口下端低浓度甲烷海水和河口上端高浓度甲烷水的混合作用.

(2) 沉积物孔隙水中甲烷浓度从河口上端淡水沉积区向海相区逐渐减小, 孔隙水中甲烷浓度在水平和垂向方向上随着硫酸盐浓度增加快速减小, 表

明九龙江河口沉积物产甲烷速率随着孔隙水中硫酸盐浓度增加逐渐受到抑制.

(3) 九龙江河口水体和沉积物甲烷浓度的空间分布表明水体甲烷主要来自河口上端盐度相对较低且富有机质的红树林潮间带湿地和泥滩, 并通过沉积物-水界面的扩散进入上覆水体, 因此沉积物甲烷的输入是九龙江河口水体甲烷的主要来源.

参考文献:

- [1] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming [J]. *Nature*, 1990, **344**(6266): 529-531.
- [2] IPCC. Summary for policymakers [A]. In: Solomon S, D Qin, M Manning, *et al.*, (eds.). *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Khalil M A K, Rasmussen R A. Atmospheric methane: recent global trends [J]. *Environmental Science Technology*, 1990, **24**(4): 549-553.
- [4] Bange H W, Bartell U H, Rapsomanikis S, *et al.* Methane in the Baltic and North Seas and a reassessment of the marine emissions of methane [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8**(4): 465-480.
- [5] Upstill-Goddard R C, Barnes J, Frost T, *et al.* Methane in the southern North Sea: low-salinity inputs, estuarine removal, and atmospheric flux [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**(4): 1205-1217.
- [6] Middelburg J J, Nieuwenhuize J, Iversen N, *et al.* Methane distribution in European tidal estuaries [J]. *Biogeochemistry*, 2002, **59**(1-2): 95-119.
- [7] Zhang G L, Zhang J, Kang Y B, *et al.* Distributions and fluxes of methane in the East China Sea and the Yellow Sea in spring [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**: C07011, doi: 10.1029/2004JC002268.
- [8] Zhang G L, Zhang J, Ren J L, *et al.* Distributions and sea-to-air fluxes of methane and nitrous oxide in the North East China Sea in summer [J]. *Marine Chemistry*, 2008, **110**(1-2): 42-55.
- [9] Zhang G L, Zhang J, Liu S M, *et al.* Methane in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent marine area: riverine input, sediment release and atmospheric fluxes [J]. *Biogeochemistry*, 2008, **91**(1): 71-84.
- [10] Zhou H Y, Yin X J, Yang Q H, *et al.* Distribution, source and flux of methane in the western Pearl River Estuary and northern South China Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2009, **117**(1-4): 21-31.
- [11] 杨红霞, 王东启, 陈振楼, 等. 长江口崇明东滩潮间带甲烷(CH_4)排放及其季节变化 [J]. *地理科学*, 2007, **27**(3): 408-413.
- [12] 叶勇, 卢昌义, 林鹏. 厦门东屿白骨壤林土壤甲烷的产生量、氧化量、传输率与库量 [J]. *台湾海峡*, 2001, **20**(2): 236-

- 244.
- [13] 王东启, 陈振楼, 王军, 等. 夏季长江口潮间带 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量特征 [J]. 地球化学, 2007, **36**(1): 78-88.
- [14] Wu Z J, Zhou H Y, Peng X T, *et al.* Anaerobic oxidation of methane: geochemical evidence from pore-water in coastal sediments of Qi'ao Island (Pearl River Estuary), southern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(16): 2006-2015.
- [15] 《中国海湾志》编纂委员会. 中国海湾志(第十四分册 重要河口) [M]. 北京: 海洋出版社, 1998. 705-710.
- [16] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 川中丘陵区冬灌田甲烷和氧化亚氮排放研究 [J]. 应用生态学报, 2005, **16**(3): 539-544.
- [17] 杜尧东, 刘锦鑫, 杨宁, 等. 赤红壤早稻田甲烷排放通量及其影响因素 [J]. 生态学杂志, 2005, **24**(8): 939-942.
- [18] 丁维新, 蔡祖聪. 沼泽甲烷排放及其主要影响因素 [J]. 地理科学, 2002, **22**(5): 619-625.
- [19] 段晓男, 王效科, 陈琳, 等. 乌梁素海湖泊湿地植物区甲烷排放规律 [J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 455-459.
- [20] 赵静, 张桂玲, 吴莹, 等. 长江中溶存甲烷的分布与释放 [J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 18-25.
- [21] 汪青, 刘敏, 侯立军, 等. 崇明东滩湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放的时空差异 [J]. 地理研究, 2010, **29**(5): 935-945.
- [22] Wiesenburg D A, Guinasso N L Jr. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1979, **24**(4): 356-360.
- [23] De Angelis M A, Scranton M I. Fate of methane in the Hudson River and estuary [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, **7**(3): 509-523.
- [24] Watanabe S, Higashitani N, Tsurushima N, *et al.* Annual variation of methane in seawater in Funka Bay, Japan [J]. Journal of Oceanography, 1994, **50**(4): 415-421.
- [25] Bange H W, Dahlke S, Ramesh R, *et al.* Seasonal study of methane and nitrous oxide in the coastal waters of the southern Baltic Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, **47**(6): 807-817.
- [26] Jones J B, Mulholland P J. Influence of drainage basin topography and elevation on carbon dioxide and methane supersaturation of stream water [J]. Biogeochemistry, 1998, **40**(1): 57-72.
- [27] Rehder G, Keir R S, Suess E, *et al.* The multiple sources and patterns of methane in North Sea waters [J]. Aquatic Geochemistry, 1998, **4**(3-4): 403-427.
- [28] Scranton M I, McShane K. Methane fluxes in the southern North Sea: the role of European rivers [J]. Continental Shelf Research, 1991, **11**(1): 37-52.
- [29] Deborde J, Anschutz P, Guérin F, *et al.* Methane sources, sinks and fluxes in a temperate tidal Lagoon; The Arcachon lagoon (SW France) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, **89**(4): 256-266.
- [30] Martens C S, Kump J V. Biogeochemical cycling in an organic-rich coastal marine basin- I. methane sediment-water exchange processes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, **44**(3): 471-490.
- [31] Ivanov M V, Pimenov N V, Rusanov I I, *et al.* Microbial processes of the methane cycle at the north-western shelf of the Black Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, **54**(3): 589-599.
- [32] Heyer J, Berger U. Methane emission from the coastal area in the Southern Baltic Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, **51**(1): 13-30.
- [33] Floodgate G D, Judd A G. The origins of shallow gas [J]. Continental Shelf Research, 1992, **12**(10): 1145-1156.
- [34] Winfery M R, Zeikus J G. Effect of sulfate on carbon and electron flow during microbial methanogenesis in freshwater sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1977, **33**(2): 275-281.
- [35] Reeburg W S. Oceanic methane biogeochemistry [J]. Chemistry Review, 2007, **107**(2): 486-513.
- [36] Valentine D L, Reeburg W S. New perspectives on anaerobic methane oxidation [J]. Environmental Microbiology, 2000, **2**(5): 477-484.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《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)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行