

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬 (<i>Corbicula fluminea</i>) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价

徐姗姗¹, 李纯厚^{1*}, 徐娇娇¹, 肖雅元¹, 林琳¹, 黄小平²

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广州 510300; 2. 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301)

摘要: 为了解大亚湾石化排污区海域重金属污染现状及其潜在生态风险, 对该湾的海水、表层沉积物和生物(鱼)体中 7 种重金属(Zn、Pb、Cu、Cd、Cr、As、Hg)含量及空间分布进行了研究, 并分别采用综合污染指数法和生态风险指数法对海水和表层沉积物重金属污染程度及潜在生态危害进行了评价。结果表明, 2011~2012 年海水重金属含量较低, 除部分站位 Zn 和 Pb 超过海水水质第一类标准外, 未出现明显的重金属污染。海水重金属综合污染指数均值丰水期(0.72) > 枯水期(0.38), 表层沉积物重金属综合污染指数均值枯水期(7.77) > 丰水期(5.70), 枯水期表层沉积物重金属污染因子为 Hg, 其次为 As 和 Zn; 丰水期表层沉积物重金属污染因子为 Hg, 其次为 Zn 和 Cu。调查海域丰水期和枯水期间采集到的生物(鱼)体内各种重金属均未超标。重金属含量的相关性分析表明, 不同时期大亚湾石化排污区重金属间的相关程度差异明显。枯水期调查海域沉积物重金属潜在生态风险指数 RI(129.20) > 丰水期(102.86), 枯水期有 25% 的站位出现高警级风险。调查海域沉积物重金属潜在生态风险在丰水期是远岸海域高于沿岸海域, 湾口高于湾顶; 而在枯水期则相反。Hg 对大亚湾石化排污区海域存在强潜在生态风险, 其他 6 种重金属均为轻微潜在生态风险。

关键词: 大亚湾; 石化排污区; 重金属; 生态风险评价; 空间分布

中图分类号: X55; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2075-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.006

Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks

XU Shan-nan¹, LI Chun-hou¹, XU Jiao-jiao¹, XIAO Ya-yuan¹, LIN Lin¹, HUANG Xiao-ping²

(1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: This study aimed to gain a clear understanding on the status of pollution by heavy metals in the petrochemical sewage and the potential ecological risk caused by heavy metal pollution in the sea area of Daya Bay. The contents and spatial distributions of heavy metals including Zn, Pb, Cu, Cd, Cr, As and Hg in seawater, sediment and fishes collected from Daya Bay were analyzed. The comprehensive pollution index (CPI) and ecological risk indexes (ERIs) were used to evaluate the contaminated severity and potential ecological risks of heavy metals in seawater and sediment. The results showed that the contents of these heavy metals, except for those of Zn and Pb, in several stations set in Daya Bay from 2011 to 2012 were relatively low, which were lower than the quality standard of class I according to the China National Standard Criteria for Seawater Quality, suggesting that the seawater in Daya Bay has not been polluted yet by these heavy metals. The average CPI of heavy metals in seawater during flooding season (0.72) was higher than that during dry season (0.38) whereas the average CPI of heavy metals in sediment during dry season (7.77) was higher than that during flooding season (5.70). Hg was found to be the primary contaminating heavy metal in sediment during dry season, which was followed by As and Zn whereas during flooding season, Hg was the primary contaminating metal in sediment, followed by Zn and Cu. The contents of these 7 heavy metals in fishes collected from the surveyed areas were lower than those of the standard requirements. A correlation analysis indicated that there were significant differences in the correlations between the midst of the heavy metals in sea water and the different periods. The ERIs of heavy metals in sediment during dry season (129.20) was higher than that during flooding season (102.86), and 25% of the sampling sites among all stations were under the risk of high-level alarm. The potential ERIs of heavy metals in sediment in offshore waters were higher than those of inshore waters, and were higher in the bay-mouth than in the bay-head. However, the distributions of potential ERIs showed reversed trend during dry season. The comprehensive assessment results showed that Hg was the primary heavy metal with a high ecological risk whereas the potential ERIs for the other six heavy metals in the petrochemical sewage waters in Daya Bay were relatively low.

Key words: Daya Bay; petrochemical sewage area; heavy metals; ecological risk assessment; spatial distribution

收稿日期: 2013-10-08; 修订日期: 2013-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100362); 广东省科技计划项目(2011B031100001); 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所)开放项目(LTO1106)

作者简介: 徐姗姗(1979~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为海洋生态学, E-mail: xushannan@scsfri.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: scsleh@vip.163.com

污水排海是充分利用海洋的自净能力,跨越潮间带实现污染物水下排放的一种处理方法^[1]. 2012年,我国沿海约30%的排污口邻近海域海洋环境质量不能满足所在海洋功能区的海洋环境质量要求,主要污染物为石油类和重金属^[2]. 污水中的重金属污染物绝大部分以悬浮沉降的方式进入海底沉积物中,导致海洋底质生态环境的恶化,甚至还通过食物链影响并威胁着人类健康^[3~7]. 典型的中毒事件如甲基汞引起的“水俣病”和镉引起的“骨痛病”等就是典型的重金属中毒. 随着公众对环境污染的关注和重视,重金属污染评价在海洋环境质量评价中的地位越来越重要,已经成为海洋环境质量评价体系中的重要因子.

大亚湾是我国亚热带海洋生物种质资源库,是许多经济鱼类产卵和越冬的场所和重要的水产养殖基地,也是南海区重要的临海石化工业基地之一^[8]. 由于经济发展的需要,中海壳牌石油化工有限公司于2000年在广东省惠州市大亚湾经济技术开发区建设并运营其石化联合工厂,石化区污水实行管道深海排放,排污口距惠东国家海龟自然保护区约6 km,排污管道在2006年中海壳牌投产前已建成,一直使用至今. 早期关于大亚湾海域重金属分布特征与评价已有一些报道^[9~14],但针对排污口附近海域重金属污染水平和生态风险评价却鲜见研究报道. 据调查,现有排海污水管线的排海能力为 $1150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,排海石化污水的污染物主要有:COD、石油类、重金属、硫化物、氨氮等. 其中重金属达标排放时的排放浓度分别为:Zn $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Pb $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Cu $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Cd $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总Cr $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、As $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Hg $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 等. 本研究主要以大亚湾石化排污区海域海水、沉积物和代表性经济鱼类为对象,对7种重金属(Zn、Pb、Cu、Cd、Cr、As、Hg)的含量及空间分布进行分析,并采用综合污染指数法和生态风险指数法对其重金属污染及潜在生态危害进行定量评价,以期对污水排海管理和海洋资源可持续利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 站位与样品采集

2011年8月(丰水期)和2012年1月(枯水期)分别对大亚湾石化排污区海域进行了2个航次的生态调查,站位的布设见图1. 调查海域布设12个站位,其中S9位于排污口中心区,S1~S4、S5~S8是

以排污口为中心,分别以2 000 m、1 000 m为半径,与东南西北4个方位的交点,其中半径1 000 m根据排污点和非自然保护区的相关位置确定. 2011年8月调查中,采集12个站位的表、底层水样和S1、S3、S4、S8~S12站位海底表层沉积物样品. 2012年1月调查中,采集12个站位的表、底层水样和S1~S4、S9~S12站位海底表层沉积物样品. 生物样品在调查海域底拖网获得. 由于大亚湾是一个半封闭的浅海湾,平均水深11 m,湾口最深处也不过21 m,海洋环境理化因子较为稳定,各站海水重金属的含量均采用表、底层均值. 样品的采集、运输、保存和分析均参照《海洋监测规范》(GB 17378-2007)所规定的方法进行.

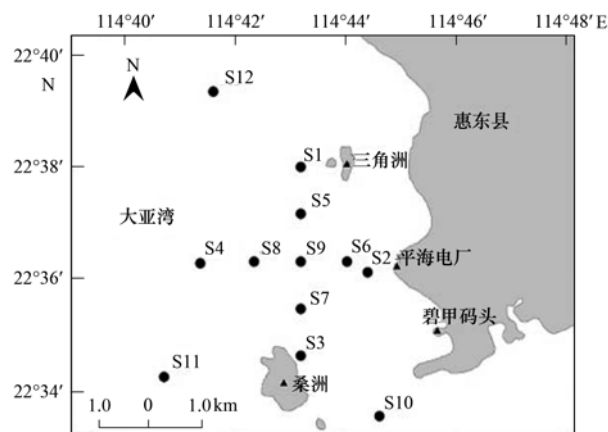


图1 大亚湾石化排污区海域生态环境调查站位示意

Fig. 1 Ecological environment survey stations of the petrochemical sewage waters in Daya Bay

1.2 研究方法

1.2.1 海水重金属污染评价

分析大亚湾石化排污区海水中Zn、Pb、Cu、Cd、总Cr、As和Hg的含量. 利用水质质量指数法对这7种重金属的污染水平进行综合评价^[15]:

$$A_i = \frac{c_i}{c_s^i} \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{c_s^i} \quad (2)$$

式中, A_i 为第*i*种重金属的相对污染指数, P 为重金属综合污染指数, c_i 为第*i*种重金属的实测浓度值, c_s^i 为第*i*种重金属的评价标准值. 各种重金属的评价标准采用《海水水质标准》(GB 3097-1997)第一类标准,Zn、Pb、Cu、Cd、总Cr、As和Hg的一类标准限值($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)分别为0.020、0.001、0.005、0.001、0.05、0.020和0.000 05. 海水重金属的污染水平等级^[16]划分为:污染指数<1,没有影响;污

染指数为 1~2, 轻微影响; 污染指数为 2~3, 中等影响; 污染指数为 3~5, 较强影响; 污染指数 >5, 严重影响。

1.2.2 沉积物重金属污染评价

分析大亚湾石化排污区海域表层沉积物中 Zn、Pb、Cu、Cd、总 Cr、As 和 Hg 的含量。采用单因子评价法对沉积物污染要素进行分析与评价:

$$C_f^i = \frac{c^i}{c_n^i} \tag{3}$$

式中, C_f^i 为第 i 种重金属的污染指数; c^i 为第 i 种重金属的实测浓度 ($\times 10^{-6}$); c_n^i 为第 i 种重金属的背景参考值, 本研究采用大亚湾工业化开发之前沉积物中重金属含量作为背景值^[9], 其中 Zn、Pb、Cu、Cd、总 Cr、As 和 Hg 的 c_n^i ($\times 10^{-6}$) 分别为 26.01、21.67、6.44、0.027、22.35、2.61、0.011。沉积物中单个污染物的污染程度用 C_f^i 值来表征^[17]: $C_f^i < 1$, 为低污染; $1 \leq C_f^i < 3$, 为中污染; $3 \leq C_f^i < 6$, 为较高污染; $C_f^i \geq 6$, 为很高污染。

多种重金属污染物的综合效应通过综合指数 C_d 来表示^[17]:

$$C_d = \sum_{i=1}^7 C_f^i \tag{4}$$

以 C_d 表征的综合污染程度划分为: $C_d < 5$, 为低污染; $5 \leq C_d < 10$, 为中污染; $10 \leq C_d < 20$, 为较高污染; $C_d \geq 20$ 时为高污染。

1.2.3 生物(鱼)体内残留重金属分析

以前鳞骨鲷 (*Osteomugil ophuyseni*)、龙头鱼

(*Harpodon nehereus*) 等大亚湾主要经济鱼类的肌肉组织样品, 分析大亚湾石化排污区海域生物(鱼)体中 Zn、Pb、Cu、Cd、总 Cr、As 和 Hg 的含量。生物(鱼)体内重金属含量评价标准采用《全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程》^[18] 中规定的生物质量标准评价。其中, Zn、Pb、Cu、Cd、总 Cr、As 和 Hg 的含量评价标准分别为 40、2.0、20、0.6、1.5、5.0、0.3 ($\times 10^{-6}$, 以湿重计)。

1.2.4 沉积物重金属潜在生态风险评价

采用潜在生态风险指数 (risk index, RI) 法^[17], 对沉积物重金属的生态风险进行评价。该方法不仅反映了某种特定环境中的每种重金属污染物的影响, 而且反映了多种重金属污染物的综合影响, 并且用定量的方法划分出潜在生态危害的程度^[19]。潜在生态风险指数值 (RI) 计算方法如下。

(1) 某单个重金属的潜在生态危害系数 E_r^i

$$E_r^i = T_r^i C_f^i \tag{5}$$

式中, T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数, 反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度; Zn、Pb、Cu、Cd、总 Cr、As 和 Hg 的 T_r^i 分别为 1、5、5、30、2、10 和 40; C_f^i 为第 i 种重金属的污染指数。

(2) 沉积物多种重金属潜在生态风险指数 RI

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{6}$$

用重金属潜在生态危害系数 (E_r^i) 和潜在生态风险指数 (RI) 表征沉积物污染等级的标准划分见表 1^[14, 20]。

表 1 潜在生态风险评价等级

Table 1 Indices of potential ecological risk assessment

生态风险	轻微	中等	强	很强	极强
E_r^i	<25	25~50	50~100	100~200	≥ 200
RI	<95	95~190	190~380	≥ 380	

1.2.5 沉积物重金属生态风险预警评估

排污口附近海域表层沉积物的重金属生态风险预警, 采用 Rapant 等^[21] 提出的生态风险预警指数 (I_{ER}) 法进行评估。结合调查海域表层沉积物重金属的污染特征, 以大亚湾工业化开发以前, 沉积物中重金属含量 (背景值)^[9] 作为计算依据:

$$I_{ER} = \sum_{i=1}^n I_{ERi} = \sum_{i=1}^n (c_{Ai}/c_{Ri} - 1) \tag{7}$$

式中, I_{ERi} 表示超过临界限量的第 i 种重金属生态风险预警指数; c_{Ai} 为第 i 种重金属的实测浓度 ($\times 10^{-6}$); c_{Ri} 为第 i 种重金属的背景参考值; I_{ER} 表示

各站点沉积物的重金属生态风险预警指数。

2 结果与分析

2.1 海水重金属污染现状

调查期间大亚湾石化排污区海水重金属含量见表 2。总体而言, 大亚湾石化排污区海水重金属含量丰水期 > 枯水期。丰水期该海域所有调查站位的 Zn 和个别站位的 Pb 含量超《海水水质标准》(GB 3097-1997) 第一类标准, Cu、Cd、总 Cr、As 和 Hg 均未出现超标现象; 枯水期该海域个别站位的 Zn 和 Pb 含量超《海水水质标准》(GB 3097-1997) 第一

类标准,Cu、Cd、总 Cr、As 和 Hg 均未出现超标现象. 调查海域丰水期各重金属相对污染指数均值为 $Zn(2.55) > Pb(1.70) > Cu(0.37) > 总\ Cr(0.14) > As(0.10) > Hg(0.08) > Cd(0.07)$, 丰水期石化排污区海水中主要重金属污染因子为 Zn, 其次为 Pb; 枯水期各重金属相对污染指数均值为 $Zn(1.04) > Pb(0.84) > Cd(0.38) > Cu(0.25) > As(0.12) > Hg(0.03) > 总\ Cr(0)$, 枯水期石化排污区海水中主要重金属因子为 Zn, 其次为 Pb(表 3).

从重金属的综合污染指数(表 3)来看, 丰水期海水重金属综合污染指数范围为 0.37~1.10, 最大值(1.10)出现在 S5 站, 最小值(0.37)出现在 S10

站, 整体表现为西南部海域污染程度高于东北部海域[图 2(a)]; 枯水期海水重金属综合污染指数范围为 0.20~0.78, 最大值(0.78)出现在 S10 站, 最小值(0.20)出现在 S3 站, 整体表现为调查海域西部和东南部海域海水重金属污染状况较为严重[图 2(b)]. 综合结果表明, 丰水期海水重金属综合污染指数均值(0.72)大于枯水期(0.38), 丰水期部分站位海水已受到重金属污染物的影响, 而枯水期调查海域海水尚未受到重金属污染物的影响, 但在丰水期和枯水期调查海域海水重金属 Zn 和 Pb 均有超标现象, 为影响调查海域海水质量的主要重金属污染物.

表 2 大亚湾石化排污区海域海水、表层沉积物及鱼类体内重金属含量¹⁾

重金属	Table 2 Heavy metals content in seawater, sediment and fishes in the petrochemical sewage waters of Daya Bay					
	海水/ $\mu g \cdot L^{-1}$		沉积物/ $mg \cdot kg^{-1}$		鱼类 $\times 10^{-6}$	
	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期
Zn	26.42~110.76 (50.93)	6.68~65.50 (20.89)	10.20~45.15 (31.36)	27.00~49.00 (37.66)	3.99	10.79
Pb	0.42~4.78 (1.70)	0.41~1.60 (0.84)	4.95~14.81 (11.64)	9.50~17.50 (11.66)	nd	0.038
Cu	0.75~4.52 (1.87)	0.32~2.74 (1.24)	2.55~6.21 (4.95)	3.00~7.25 (4.66)	0.31	0.27
Cd	0.03~0.10 (0.07)	0.11~0.68 (0.38)	0.002~0.006 (0.004)	0.002~0.009 (0.006)	nd	nd
Cr	0.22~1.38 (0.68)	nd	3.93~23.40 (14.55)	4.50~22.25 (12.22)	nd	0.02
As	1.82~2.49 (2.07)	2.26~2.60 (2.41)	0.34~0.61 (0.49)	4.42~6.43 (5.04)	0.201	0.075
Hg	0.0005~0.011 (0.004)	0.0005~0.008 (0.002)	0.01~0.04 (0.02)	0.02~0.04 (0.03)	0.016	0.018

1) 括号内数据为平均值; nd 表示未检出

2.2 沉积物重金属污染现状

调查期间大亚湾石化排污区海域沉积物重金属含量见表 2. 总体而言, 该海域沉积物重金属含量枯水期 > 丰水期. 调查海域沉积物重金属单因子污染指数和多种重金属污染物综合指数的计算结果见表 3. 根据单个污染物污染程度分级, 在丰水期, 调查海域沉积物 S8(3.2)和 S10(3.2)站的 Hg 为较高污染, 其余站位的 Hg 为中污染; 个别站位的总 Cr、Zn 为中污染, 其余站位为低污染; 所有站位的 Pb、Cu、Cd 和 As 为低污染. 从均值上分析, 7 种重金属污染程度依次为 $Hg(2.19) > Zn(1.21) > Cu(0.77) > 总\ Cr(0.65) > Pb(0.54) > As(0.19) > Cd(0.15)$. 由此看出, 丰水期调查海域沉积物重金属污染因子为 Hg, 其次为 Zn 和 Cu. 在枯水期, 调查海域沉积物除 S4、S9 和 S11 站的 Hg 为中污染, 其余站位为较高污染; S2、S3 和 S12 站的 As 为较高污染, 其余站位

为中污染; 所有站位的 Zn 和个别站位的 Cu 为中污染; 所有站位的 Pb、总 Cr 和 Cd 为低污染. 从均值上分析, 7 种重金属污染程度依次为 $Hg(2.36) > As(1.93) > Zn(1.45) > Cu(0.72) > 总\ Cr(0.55) > Pb(0.54) > Cd(0.22)$, 因此, 枯水期调查海域沉积物重金属污染因子为 Hg, 其次为 As 和 Zn.

根据综合污染程度分级(表 3), 丰水期调查海域沉积物中多种重金属综合污染指数范围为 2.75~7.53, 均值为 5.70. 最大值(7.53)出现在 S10 站, 最小值(2.75)出现在 S3 站, 其中 S1、S3 和 S9 为低污染, S4、S8、S10、S11 和 S12 为中污染. 平面分布显示调查海域西北部和 S10 站位附近沉积物重金属污染较其他区域严重[图 3(a)]. 枯水期调查海域沉积物中多种重金属综合污染指数范围为 5.89~10.9, 均值为 7.77. 最大值(10.9)出现在 S2 站位, 最小值(5.89)出现在 S9 站位, 其中 S2 和 S12 站为

表 3 大亚湾石化排污区海域海水及沉积物重金属的污染指数和综合污染指数¹⁾
Table 3 Pollution indices and comprehensive pollution index of heavy metals in seawater and sediment
of the petrochemical sewage waters in Daya Bay

重金属	海水		沉积物	
	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期
Zn	1.32 ~ 5.54 (2.55)	0.33 ~ 3.27 (1.04)	0.39 ~ 1.74 (1.21)	1.04 ~ 1.88 (1.45)
Pb	0.42 ~ 4.78 (1.70)	0.41 ~ 1.60 (0.84)	0.23 ~ 0.68 (0.54)	0.44 ~ 0.81 (0.54)
Cu	0.15 ~ 0.90 (0.37)	0.06 ~ 0.55 (0.25)	0.40 ~ 0.96 (0.77)	0.47 ~ 1.13 (0.72)
Cd	0.03 ~ 0.10 (0.07)	0.11 ~ 0.68 (0.38)	0.07 ~ 0.22 (0.15)	0.07 ~ 0.33 (0.22)
Cr	0.04 ~ 0.28 (0.14)	0	0.18 ~ 1.05 (0.65)	0.20 ~ 1.00 (0.55)
As	0.09 ~ 0.12 (0.10)	0.11 ~ 0.13 (0.12)	0.13 ~ 0.23 (0.19)	1.69 ~ 2.46 (1.93)
Hg	0.01 ~ 0.21 (0.08)	0.01 ~ 0.16 (0.03)	1.02 ~ 3.22 (2.19)	1.54 ~ 3.80 (2.36)
综合污染指数	0.37 ~ 1.10 (0.72)	0.20 ~ 0.78 (0.38)	2.75 ~ 7.53 (5.70)	5.89 ~ 10.9 (7.77)

1) 括号内数据为平均值

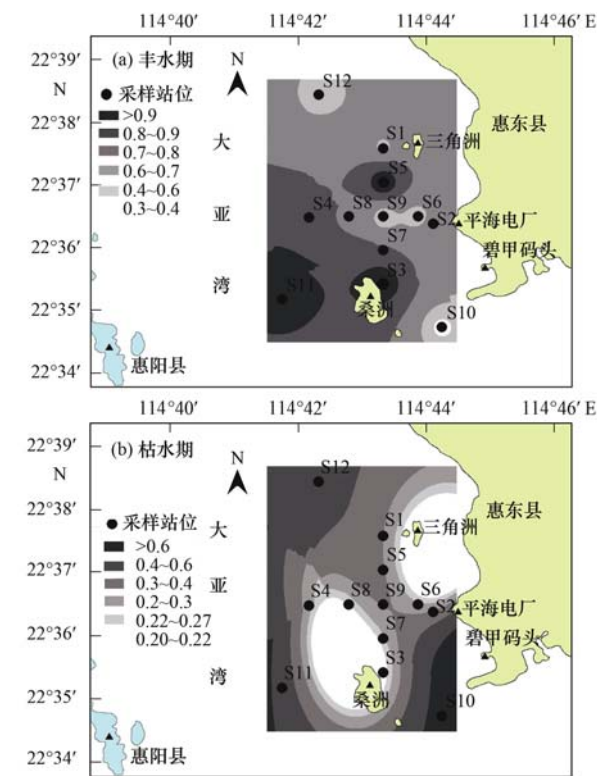


图 2 大亚湾石化排污区海域海水重金属综合污染指数平面分布
Fig. 2 Distribution of comprehensive pollution index of heavy metals
in the petrochemical sewage waters of Daya Bay

较高污染, S1、S3、S4、S9、S10、S11 站位为中污染. 平面分布显示调查海域北部和东部沉积物重金属污染较其他区域严重, 特别是平海电厂附近的 S2、S6 和 S12 站位所在的海域沉积物重金属污染情

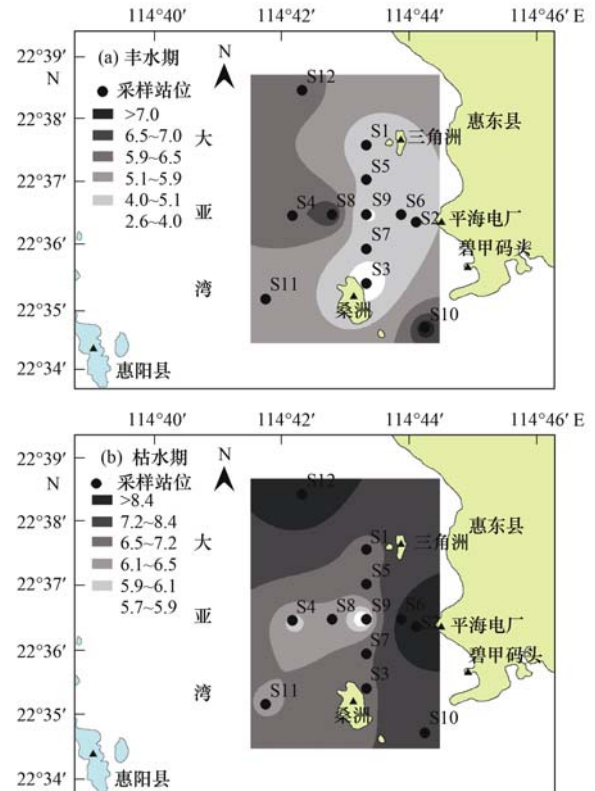


图 3 大亚湾石化排污区海域沉积物重金属
综合污染指数平面分布
Fig. 3 Distribution of comprehensive pollution index of heavy metals
in sediment of the petrochemical sewage waters in Daya Bay

况最为严重[图 3(b)]. 综合结果表明, 丰水期沉积物重金属综合污染指数(5.70)小于枯水期(7.77), 调查海域枯水期沉积物重金属污染程度大于丰水期

沉积物重金属污染程度.

2.3 生物(鱼)体内重金属残留分析

大亚湾石化排污海域生物体(鱼类)中在丰水期和枯水期的重金属含量见表2. 在丰水期,生物体中 Zn、Pb、Cu、Cd、Cr、As、Hg 总平均含量分别为 3.99×10^{-6} 、nd(未检出)、 0.31×10^{-6} 、nd(未检出)、nd(未检出)、 0.201×10^{-6} 、 0.016×10^{-6} . 枯水期,生物体内 Zn、Pb、Cu、Cd、Cr、As、Hg 总平均含量分别为 10.79×10^{-6} 、 0.038×10^{-6} 、 0.27×10^{-6} 、nd(未检出)、 0.02×10^{-6} 、 0.075×10^{-6} 、 0.018×10^{-6} . 由于鱼类具有游动性,因此本次调查鱼类重金属含量仅报道平均值. 结果显示,丰水期和枯水期调查海域采集到的鱼类体内各种重金属均未超标.

2.4 沉积物、海水与生物(鱼)体重金属间相关性

表4 大亚湾石化排污区丰水期和枯水期重金属含量的相关性¹⁾

Table 4 Correlations between the concentrations of heavy metals in the petrochemical sewage waters of Daya Bay during flooding season and dry season

	Zn	Pb	Cu	Cd	Cr	As	Hg	海水	沉积物	鱼体
Zn	1	0.265	0.494	0.784 *	0.174	0.910 **	0.317	-0.095	0.523	-0.76
Pb	0.867 **	1	0.969 **	-0.374	0.996 **	-0.159	0.997 **	-0.301	0.130	-0.051
Cu	0.948 **	0.980 **	1	-0.137	0.942 **	0.089	0.980 **	-0.294	0.251	-0.064
Cd	0.077	-0.430	-0.243	1	-0.458	0.965 *	-0.316	0.125	0.422	0.040
Cr	0.833 **	0.998 **	0.965 **	-0.488	1	-0.250	0.988 **	-0.298	0.082	-0.044
As	0.996 **	0.908 **	0.973 **	-0.013	0.879 **	1	-0.104	0.031	0.481	-0.055
Hg	0.817 **	0.945 **	0.918 **	-0.411	0.943 **	0.857 **	1	-0.290	0.159	-0.023
海水	-0.712 *	-0.736 *	-0.741 *	0.178	-0.725 *	-0.732 *	-0.734 *	1	0.423	0.616
沉积物	-0.242	-0.241	-0.251	0.043	-0.236	-0.246	-0.195	0.529	1	0.423
鱼体	-0.395	-0.420	-0.436	0.130	-0.416	-0.406	-0.283	0.283	0.759 *	1

1) 黑体字部分为枯水期重金属含量相关系数,其他部分为丰水期重金属含量相关系数; * 表示相关性显著水平 0.05(双尾); ** 表示相关性显著水平 0.01(双尾); n=9

2.5 沉积物重金属潜在生态风险评价

大亚湾石化排污区海域沉积物单个重金属的潜在生态危害系数和多种重金属潜在生态风险指数的计算结果见表5. 根据单个重金属潜在生态危害系数的等级划定标准(表1),丰水期,各站位 Zn、Pb、Cu、Cd、总 Cr 和 As 的潜在生态危害系数均小于 25,为轻微潜在生态风险等级; S9 站的 Hg 潜在生态危害系数为 40.97,为中等潜在生态风险等级, S1、S3、S12 站位的 Hg 为强潜在生态风险等级, S4、S8、S10、S11 站位的 Hg 为很强潜在生态风险等级. 各种重金属的潜在生态危害为 Hg(87.41) > Cd(4.52) > Cu(3.85) > Pb(2.69) > As(1.89) > 总 Cr(1.30) > Zn(1.21). 调查海域沉积物重金属潜在生态风险指数 RI 范围为 53.56 ~ 148.2,均值为 102.86. 最大值(148.2)出现在 S8 站,最小值(53.56)出现在 S9 站,根据潜在生态风险指数的等

级划分标准(表1), S1、S3、S9 和 S12 为轻微潜在生态风险等级, S4、S8、S10 和 S11 为中等潜在生态风险等级,潜在生态风险指数的平面分布显示调查海域西南部和南部沉积物重金属污染较其他区域严重,沉积物潜在生态风险表现为远岸海域高于近岸海域,湾口高于湾顶[图4(a)].

枯水期,各站位 Zn、Pb、Cu、Cd、总 Cr 和 As 的潜在生态危害系数均小于 25,为轻微潜在生态风险等级; S3、S4、S9、S10 和 S11 站位的 Hg 为强潜在生态风险等级, S1、S2 和 S12 站位的 Hg 为很强潜在生态风险等级. 各种重金属的潜在生态危害为 Hg(94.44) > As(19.30) > Cd(6.61) > Cu(3.62) > Pb(2.69) > Zn(1.45) > 总 Cr(1.09). 调查海域沉积物重金属潜在生态风险指数 RI 范围为 88.87 ~ 195.4,均值为 129.20. 最大值(195.4)出现在 S2 站,最小值(88.87)出现在 S9 站,根据潜在生态风

表 5 大亚湾石化排污区海域沉积物重金属的潜在生态危害系数和潜在生态风险指数¹⁾

Table 5 Potential ecological risk coefficients and potential ecological risk indices of heavy metals in sediment of the petrochemical sewage waters in Daya Bay

项目	Zn	Pb	Cu	Cd	Cr	As	Hg	RI
丰水期	0.39~1.74 (1.21)	1.14~3.42 (2.69)	1.98~4.82 (3.85)	2.11~6.62 (4.52)	0.35~2.09 (1.30)	1.32~2.33 (1.89)	40.97~129.0 (87.41)	53.56~148.2 (102.86)
枯水期	1.04~1.88 (1.45)	2.19~4.04 (2.69)	2.33~5.63 (3.62)	2.12~9.89 (6.61)	0.40~1.99 (1.09)	16.92~24.63 (19.30)	61.67~151.9 (94.44)	88.87~195.4 (129.20)

1) 括号内数据为平均值

险指数的等级划分标准(表1),S4、S9和S11为轻微生态潜在生态风险等级,S1、S2、S3、S10和S12为中等潜在生态风险等级,潜在生态风险指数的平面分布显示调查海域北部和东部沉积物重金属污染较其他区域严重,沉积物潜在生态风险表现为近岸海域高于远岸海域,湾顶高于湾口[图4(b)]。

沉积物重金属潜在生态风险评价结果表明,沉积物重金属 Hg 对大亚湾石化排污区海域的生态环境存在着强潜在生态风险,其他重金属对调查海域的生态环境存在着轻微潜在生态风险,Hg 是主要潜在生态危害因子。丰水期调查海域沉积物重金属潜在生态风险指数 RI(102.86) < 枯水期(129.20),丰水期和枯水期重金属对调查海域污染的程度均属于中等潜在生态风险等级。

2.6 沉积物重金属生态风险预警评估

根据沉积物重金属生态风险预警评估方法和分级标准对研究海域表层沉积物中重金属进行了生态风险预警评估,评估结果见表6。从综合指数来看,丰水期调查海域有75%样点处在无警级别,属于最低生态风险,有25%样点处于低警级风险状态;枯水期调查海域有50%样点处在无警级别,属于最低生态风险,有25%样点处于低警级风险状态,有25%样点处于高警级风险状态。

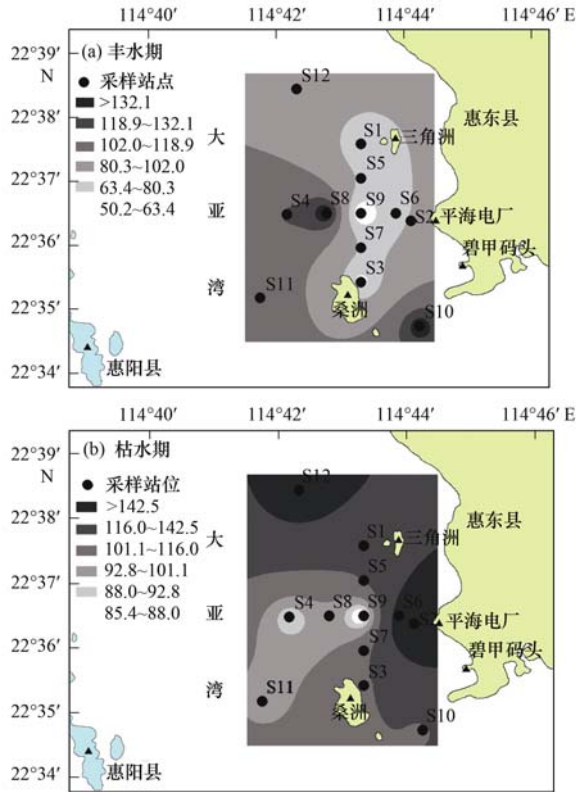


图 4 大亚湾石化排污区海域沉积物重金属潜在生态风险指数平面分布示意

Fig. 4 Distribution of potential ecological risk index of heavy metals in sediment of the petrochemical sewage waters in Daya Bay

表 6 大亚湾石化排污海域表层沉积物重金属生态风险预警评估/%

Table 6 Ecological risk warning assessment of heavy metals in sediment of the petrochemical sewage waters in Daya Bay/%

时间	风险分级	风险状态	单项生态风险指数							综合指数
			As	Hg	Cd	Cu	Pb	总 Cr	Zn	
丰水期	$I_{ER} \leq 0$	无警级	100	0	100	100	100	87.5	25	75
	$0 < I_{ER} \leq 1.0$	低警级	0	50	0	0	0	12.5	75	25
	$1.0 < I_{ER} \leq 3.0$	中警级	0	50	0	0	0	0	0	0
	$3.0 < I_{ER} \leq 5.0$	高警级	0	0	0	0	0	0	0	0
	$I_{ER} > 5.0$	极高警级	0	0	0	0	0	0	0	0
枯水期	$I_{ER} \leq 0$	无警级	0	0	100	75	100	100	0	50
	$0 < I_{ER} \leq 1.0$	低警级	62.5	37.5	0	25	0	0	100	25
	$1.0 < I_{ER} \leq 3.0$	中警级	37.5	62.5	0	0	0	0	0	0
	$3.0 < I_{ER} \leq 5.0$	高警级	0	0	0	0	0	0	0	25
	$I_{ER} > 5.0$	极高警级	0	0	0	0	0	0	0	0

3 讨论

大亚湾石化排污区海域海水在丰水期受到重金属轻微影响,枯水期则尚未受到影响。然而,不论是丰水期还是枯水期,调查海域表层沉积环境均出现重金属较高污染影响,丰水期和枯水期重金属对调查海域的污染程度均属于中等潜在生态风险等级。海水和沉积物中重金属污染程度的差异与很多因素有关,沉积物中重金属的背景值通常较高,而且由于重金属污染物极难降解,水相中的含量甚微,在受纳水体中能迅速由水相转入固相(即悬浮物和沉积物),最终进入沉积物中;另外沉积物中的重金属主要以惰性态(如硫化物形式)存在,因此表现为沉积物的重金属污染程度一般要高于水相^[22]。丰水期海水重金属污染较枯水期略严重,这与过去认为的丰水期海水重金属污染程度小于枯水期的结果^[16]不同,可能因为大亚湾是一个半封闭性海湾,海水交换周期长,调查海域海水重金属含量及污染程度不仅与季节间降雨有关,而且与人类活动以及海洋自身扰动等因素有关^[23~26]。调查海域沉积物重金属污染枯水期较丰水期严重,与2006~2007年期间对整个大亚湾表层沉积物重金属的研究结果^[14]有所不同,表明石化排污区海域相对于整个海湾而言有其特殊性,沉积物重金属含量及污染程度受多种因素共同作用表现出一定的季节差异性。

丰水期和枯水期调查海域海水重金属 Zn 和 Pb 均有超标现象,其他 5 种重金属均未超标,重金属 Zn 和 Pb 为影响调查海域海水质量的主要重金属污染物,但 Zn 和 Pb 这两种重金属含量测定的最高值并未超出 1986 年和 1987 年时的监测范围,因此 Zn 和 Pb 超一类标准主要是由背景浓度较高引起的^[27]。丰水期调查海域沉积物重金属主要污染因子为 Hg,其次为 Zn 和 Cu,枯水期调查海域沉积物重金属主要污染因子为 Hg,其次为 As 和 Zn。从调查海域沉积物中各种重金属的潜在生态危害系数来看,丰水期各重金属的潜在生态危害为 $Hg(87.41) > Cd(4.52) > Cu(3.85) > Pb(2.69) > As(1.89) > 总 Cr(1.30) > Zn(1.21)$,枯水期各重金属的潜在生态危害为 $Hg(94.44) > As(19.30) > Cd(6.61) > Cu(3.62) > Pb(2.69) > Zn(1.45) > 总 Cr(1.09)$ 。可能是由于各重金属的生态毒性系数不同,另一方面也可能是因为某些重金属元素虽然富集程度较高,但其具有亲颗粒性,容易被悬浮物迁移进入沉积物中矿化埋藏使它们对生物的毒性降低。因此,为

了全面反映沉积物中重金属的污染状况,应将单因子指数法和潜在生态危害指数法相结合,并加上相应的生物或生态效应指标^[28]。值得关注的是 Hg 对调查海域沉积环境存在着强潜在生态风险,在一些站位甚至存在着很强潜在生态风险,而其他 6 种重金属对调查海域的生态环境均存在着轻微潜在生态风险。这与 2006~2007 年期间对大亚湾表层沉积物重金属的研究结果^[14]相一致,表明大亚湾的 Hg 污染未能得到有效遏制,应采取有效措施控制 Hg 输入,防止污染加剧。

除枯水期鱼体与沉积物重金属总体呈显著正相关($P < 0.05$)外,其他分布在海水、沉积物和鱼体间重金属含量无相关性($P > 0.05$)。丰水期和枯水期大亚湾石化排污区重金属间的相关程度差异明显,但 Hg 和 Pb、Cu、Cr 在丰水期和枯水期均存在显著正相关性($P < 0.01$),说明 Pb、Cu、Cr 和 Hg 受不同水体环境的影响小,协同作用明显,可以初步认为四者来自于同一污染源^[14]。

鱼类是监测环境污染的重要生物指示物^[29, 30],常用于描述环境的污染状况和生态效应。目前国内尚未有较完整与统一的评价海洋生物体内残毒水平的标准,常用的海洋生物质量标准 GB 18412-2001 的参照生物是海洋贝类。由于不同生物种类残毒水平的显著差异,本研究不采用此标准,而是根据我国海岸带和海涂资源综合调查中采用的海洋生物评价标准。研究结果表明,丰水期和枯水期调查海域采集到的鱼类体内各种重金属均未超标。然而,从具体检测结果来看,石化排污海域生物体内 Cu 和 Zn 这 2 种元素含量高于其它元素的含量,这反映了鱼类对 Cu 和 Zn 的主动吸收,以及对 Hg、As、Pb、Cd 和 Cr 等代谢的差异。与 1990~1991 年广东省海岛资源综合调查^[31]和 2001 年^[13]等历史调查结果相比,大亚湾海域经济类生物体(鱼)重金属含量处于不断下降的趋势。由此说明大亚湾海域作为水产资源保护区,多年来生态环境受到较好地保护,生物资源并未受到重金属的污染。

大亚湾石化排污区海域沉积物重金属潜在生态风险的空间分布为:丰水期,远岸海域高于近岸海域,湾口高于湾顶;枯水期,近岸海域高于远岸海域,湾顶高于湾口。可能是丰水期雨量相对充沛,加上沿岸径流带入冲淡水,使得湾内重金属向湾外迁移,而枯水期雨量少,石化污水和陆源污水不易被稀释和向湾外迁移。虽然从沉积物重金属潜在生态风险的空间分布,并未看出石化排污对调查海域重金

属污染程度以及分布有直接影响,然而,沉积物重金属生态风险预警评估结果显示,枯水期调查海域沉积物重金属已经出现了高警级风险。从大亚湾石化排污口污水输入黄毛山-三角洲海域的年通量变化来看,2007 年废水排放量为 $583.6 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$,2011 年输入调查海域的废水量已达 $1\,007.4 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[32],且随着石化项目的运转,石化污水排放量仍在逐年增加,在时间的累积下不能排除其在大亚湾海域生态环境造成的影响,因此应加大对该海域环境监测的力度。

4 结论

(1)大亚湾石化排污区海域海水重金属含量整体表现为丰水期高于枯水期。丰水期海水重金属综合污染指数(0.72) > 枯水期(0.38),除部分站点 Zn 和 Pb 超过海水水质第一类标准外,未出现明显的重金属污染。

(2)Hg 对大亚湾石化排污区海域的生态环境存在强潜在生态风险,甚至达到很强潜在生态风险,其他 6 种重金属对调查海域的生态环境存在轻微潜在生态风险。

(3)除枯水期鱼体与沉积物重金属总体呈显著正相关($P < 0.05$)外,其他分布在海水、沉积物和鱼体间重金属含量无相关性($P > 0.05$)。

(4)生物资源并未受到重金属的污染。丰水期和枯水期调查海域采集到的生物(鱼)体内各种重金属均未超标,生物体(鱼)质量良好。

(5)调查海域西南部和南部沉积物重金属污染较其他区域严重,沉积物潜在生态风险表现为远岸海域高于近岸海域,湾口高于湾顶。

参考文献:

- [1] 陈艳卿,田仁生. 污水排海工程生物监测[J]. 海洋环境科学, 1996, **15**(1): 42-46.
- [2] 国家海洋局. 2012 年中国海洋环境状况公报[EB/OL]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyhjzlgbl/201303/t20130329_24713.html, 2013-03-29.
- [3] 张瑞,张帆,刘付程,等. 海州湾潮滩重金属污染的历史记录[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1044-1054.
- [4] 徐林波,高勤峰,董双林,等. 靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 476-483.
- [5] 秦延文,郑丙辉,李小宝,等. 渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2359-2367.
- [6] 王增焕,林钦,李刘冬,等. 不同海域鲍体镉分布特征与健康风险评价[J]. 南方水产科学, 2013, **9**(1): 22-27.
- [7] 王增焕,林钦,李刘冬,等. 华南沿海贝类体镉的调查与膳食暴露评估[J]. 南方水产科学, 2012, **8**(5): 9-14.
- [8] 陈丕茂,袁华荣,贾晓平,等. 大亚湾杨梅坑人工鱼礁区渔业资源变动初步研究[J]. 南方水产科学, 2013, **9**(5): 100-108.
- [9] 张银英. 大亚湾沉积物中重金属元素背景值研究[J]. 热带海洋, 1991, **10**(3): 76-80.
- [10] Yu X J, Yan Y, Wang W X. The distribution and speciation of trace metals in surface sediments from the Pearl River Estuary and the Daya Bay, Southern China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, **60**(8): 1364-1371.
- [11] Gao X L, Chen C T A, Wang G, et al. Environmental status of Daya Bay surface sediments inferred from a sequential extraction technique [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, **86**(3): 369-378.
- [12] Gu Y G, Wang Z H, Lu S H, et al. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify source of anthropogenic impacts on metallic elements in sediments from the mid Guangdong coasts, China [J]. Environmental Pollution, 2012, **163**: 248-255.
- [13] 王增焕,林钦,王许诺,等. 大亚湾经济类海洋生物体的重金属含量分析[J]. 南方水产, 2009, **5**(1): 23-28.
- [14] 谷阳光,王朝晖,方军,等. 大亚湾表层沉积物中重金属分布特征及潜在生态危害评价[J]. 分析测试学报, 2009, **28**(4): 449-453.
- [15] 林洪瑛,韩舞鹰. 珠江口伶仃洋枯水期十年前后的水质状况与评价[J]. 海洋环境科学, 2001, **20**(2): 28-31.
- [16] 蔡文贵,林钦,贾晓平,等. 考洲洋重金属污染水平与潜在生态危害综合评价[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(3): 343-347.
- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [18] 《全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程》编写组. 全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程[M]. 北京: 海洋出版社, 1986. 235.
- [19] 赵沁娜,徐启新,杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005, (1): 111-116.
- [20] 丘耀文,朱良生. 海陵湾沉积物中重金属污染及其潜在生态危害[J]. 海洋环境科学, 2004, **23**(1): 22-24.
- [21] Rapant S, Kordik J. An environmental risk assessment map of the Slovak Republic; application of data from geochemical atlases [J]. Environmental Geology, 2003, **44**(4): 400-407.
- [22] 陈静生,陶澍,邓宝山,等. 水环境化学[M]. 重庆: 高等教育出版社, 1987. 99-164.
- [23] Ye F, Huang X P, Zhang D W, et al. Distribution of heavy metals in sediments of the Pearl River Estuary, Southern China: Implications for sources and historical changes [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(4): 579-588.
- [24] Chen T R, Yu K F, Li S, et al. Heavy metal pollution recorded in Porites corals from Daya Bay, northern South China Sea [J]. Marine Environmental Research, 2010, **70**(3-4): 318-326.

- [25] Gao X L, Chen S Y. Petroleum pollution in surface sediments of Daya Bay, South China, revealed by chemical fingerprinting of aliphatic and alicyclic hydrocarbons [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **80**(1): 95-102.
- [26] Wu M L, Wang Y S. Using chemometrics to evaluate anthropogenic effects in Daya Bay, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **72**(4): 732-742.
- [27] 易华. 大亚湾海域重金属变化趋势分析[J]. *广东化工*, 2012, **39**(14): 111-113.
- [28] 张少峰, 林明裕, 魏春雷, 等. 广西钦州湾沉积物重金属污染现状及潜在生态风险评价[J]. *海洋通报*, 2010, **29**(4): 450-454.
- [29] Qiu Y W, Lin D, Liu J Q, *et al.* Bioaccumulation of trace metals in farmed fish from South China and potential risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**(3): 284-293.
- [30] Xu W, Yan W, Huang W, *et al.* Mercury profiles in surface sediments from ten bays along the coast of Southern China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **76**(1-2): 394-399.
- [31] 广东省海岛资源综合调查大队. 大亚湾海岛资源综合调查报告[M]. 广州: 广东科技出版社, 1993. 150-169.
- [32] 徐娇娇, 徐姗楠, 李纯厚, 等. 大亚湾石化排污区海域冬季生态环境质量评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(7): 1456-1466.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2013年9月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2012年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2012年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分77.8,排名第一,总被引频次6489,影响因子1.156.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2012年度《环境科学》综合评价总分77.8,在被统计的30种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人