

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究

徐林波¹, 高勤峰^{1*}, 董双林¹, 刘佳², 傅秀娟³

(1. 中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室, 青岛 266003; 2. 青岛大学国际商学院, 青岛 266071; 3. 青岛市崂山区海洋与渔业局, 青岛 266061)

摘要: 对荣成市靖海湾表层沉积物和悬浮颗粒物中典型重金属(Cu、Hg、Pb、Zn、Mn、Cd、Cr、As)的含量进行了测定,并根据国家海洋沉积物质量标准和 Hakanson 沉积物重金属潜在生态危害系数与危害指数方法评价了该水域重金属污染程度及潜在生态危害。结果表明,该水域表层沉积物重金属含量较低和潜在生态危害较轻,S2 采样点表层沉积物中 Cu 和 Zn 以及 S3 ~ S6 采样点表层沉积物中 Cd 符合第二类沉积物质量标准,其余各采样点重金属含量则均符合第一类沉积物质量标准,处于较清洁水平。靖海湾表层沉积物中重金属的危害程度顺序为 $Zn < Cr < Pb < Cu < As < Hg < Cd$ 。表层沉积物和悬浮颗粒物中重金属含量均以 S2 采样点最高,且随着与近海岸距离的增加重金属含量逐渐降低。表层沉积物烧失量和重金属含量的相关分析表明,烧失量与 Cu、Cr、Pb、Zn、Mn、Hg 和 As 均呈正相关关系。利用铅同位素技术对靖海湾表层沉积物和悬浮颗粒物进行铅污染源同位素示踪研究,结果表明,表层沉积物中²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb和²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值均大于悬浮颗粒物,表层沉积物和悬浮颗粒物的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值均在 S2 最小,且与该采样点铅的浓度变化趋势相反,即随着铅的浓度增大²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值呈现降低的趋势。通过比较典型铅稳定同位素²⁰⁶Pb与²⁰⁷Pb天然本底比值与人类活动排放源比值,推测表层沉积物和悬浮颗粒物中铅污染主要来源于工业排放和含铅汽油燃烧等人类生产生活活动。

关键词: 重金属; 稳定同位素; 生态评价; 污染物示踪; 靖海湾

中图分类号: X55; X820.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0476-08

Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique

XU Lin-bo¹, GAO Qin-feng¹, DONG Shuang-lin¹, LIU Jia², FU Xiu-juan³

(1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. International Business College, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 3. Laoshan Ocean and Fisheries Bureau, Qingdao 266061, China)

Abstract: The concentrations of typical heavy metals including Cu, Hg, Pb, Zn, Mn, Cd, Cr and As in the surface sediment and suspended particulate matter (SPM) in Jinghai Bay, Rongcheng city were tested. The degree of heavy metal pollution in the surface sediment was assessed according to the national standard of marine sediment quality. The potential ecological risk (PER) of heavy metals to marine ecosystem in Jinghai Bay was assessed using PER coefficient and risk index. The results showed that the levels of heavy metals and PER in the surface sediments were low enough to meet the requirement of the first class of the sediment quality standards except the levels of Cu and Zn in the sampling site S2 and Cd in S3, S4, S5 and S6 which met the requirements of the second class of the sediment quality standards. The PER coefficients of heavy metals increased following the sequence of $Zn < Cr < Pb < Cu < As < Hg < Cd$. The levels of heavy metals in surface sediment and SPM were the highest at S2 and gradually declined with the increasing distance between the sampling sites and the shoreline. The correlation analysis of the loss on ignition (LOI) and the levels of heavy metals showed that LOI was positively correlated to the levels of Cu, Cr, Pb, Zn, Mn, Hg and As in surface sediment. Stable isotope technique was used to trace the dominant sources of Pb contamination in surface sediments and SPM. The results showed that the ratios of ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb and ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb in surface sediment were more closely related to that of SPM. The ratio of ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb for both surface sediment and SPM was the lowest at the sampling site S2 and negatively correlated to the Pb concentration. The comparisons of Pb stable isotope ratio between the isotope ratios of natural and anthropogenic source showed that the Pb contamination was mainly derived from the human activities such as industrial discharges and leaded gasoline.

Key words: heavy metal; stable isotope; ecological assessment; pollutant tracer; Jinghai Bay

随着我国城市化和工业化的加速发展,海洋环境受生活污水和工业污染的危害日益严重,而近海湾是受人类活动影响强度最大的水域,也是陆源污染物主要的汇集地,近海水域沉积物成为污染物的一个“存储器”,在污染物的存储和运输过程中扮演着重要的角色,因此,近海水域沉积物被用来确定

污染物的来源、传递途径及归宿加以研究^[1-3]。由

收稿日期: 2012-04-07; 修订日期: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31172426); 国家科技支撑计划项目(2011BAD13B03); 国家海洋公益性行业科研专项(200905020); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目

作者简介: 徐林波(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为养殖生态学, E-mail: xulinbo-6@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qfgao@ouc.edu.cn

于重金属污染物能够通过食物链在生物体内传递和富集,最终影响人类的生存环境并危害到人类健康,而沉积物具有源和汇的双重作用,因此有关近海湾沉积物中重金属污染的研究已经成为国内外研究的焦点^[3~7].由于重金属铅同位素组成只与源区的铅同位素组成特征有关,而与重金属的迁移行为和轨迹没有关系,因而铅同位素示踪技术在判别土壤、大气、水体和人体中铅与相关重金属污染来源,区别汽车尾气铅污染和工业铅污染等方面已起到独特的作用并得到了广泛的应用^[8,9].

随着我国海水养殖规模的增大,人们对养殖水域环境安全的关注程度日益提高. Blais^[10]通过利用稳定同位素技术测定了湖底沉积物中²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb的比值,以此来追溯工业排放铅对湖区沉积物中铅污染的相对贡献. 吴龙华等^[11]利用铅稳定同位素技术研究了土壤中铅污染的主要来源. 路远发等^[12]通过测定杭州西湖沉积柱中铅同位素比值,推算西湖受到铅污染的时间大约开始于1910年代,且主要来自汽车尾气. 山东省荣成市靖海湾地处山东省东北部(36°86'N, 122°13'E),是全国重要的海参养殖基地^[13]. 尽管近年来有关以铅同位素示踪对重金属污染溯源进行了上述研究,但未见对靖海湾内重金属污染水平和来源的报道. 本实验的研究目的拟通过测定靖海湾表层沉积物和悬浮颗粒物中典型重金属的含量分布,并采用铅同位素示踪技术对靖海湾表层沉积物和悬浮颗粒物中铅污染进行溯源分析,识别该海湾铅污染的主要来源,同时采用瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态危害评价方法进行评价,以期研究该水域表层沉积物和悬浮颗粒物中重金属的污染水平、污染物的来源及对靖海湾刺参养殖的影响提供参考.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

微波消解仪及配套的加热板和消解罐(型号 MDS-6,上海新仪微波化学科技有限公司),火焰-石墨炉原子吸收光谱仪 SOLAAR-M6(美国 Thermo 公司),流动注射氢化物发生器(型号 WHG-630A,北京浩天晖科贸有限公司),超纯水仪(德国 Millipore 公司). 实验过程当中所用的硝酸、硫酸、过氧化氢、盐酸均为优级纯,其它试剂不低于分析纯. 重金属标准液 Cu、Hg、Pb、Zn、Cd、Cr、Mn、As(国家计量科学研究院提供). 实验所用玻璃仪器和塑料样品袋均用1:3硝酸浸泡24 h以上,用自来水冲洗

后再用去离子水润洗3次.

1.2 样品采集

本实验于2011年10月在山东省荣成市靖海湾内进行. 采样点S1~S6分布如图1. 其中S1上游建有坤龙水库,并有入海河流青龙河. S2采样点附近有货运码头且离沿岸较近,该采样点可能受船舶运输和近岸陆源污染影响较大. S3和S4采样点右边为好当家海洋发展股份有限公司的海水养殖水域,两个采样点分别靠近海水养殖水域的两个进水口. S5和S6为距离沿岸较远的近海水域,且水深比其它近岸采样点大.

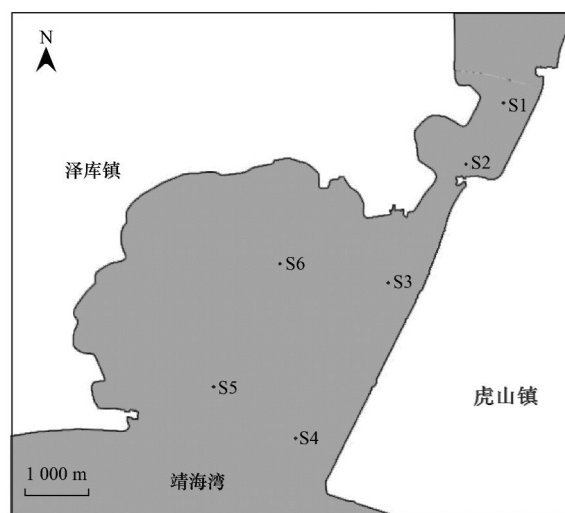


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

沉积物样品:表层沉积物用抓斗式采泥器采集,为确保采集的沉积物具有代表性,每个采样点取3次样品混匀后密封在塑料袋中-20℃冷冻待测.

悬浮颗粒物样品:用采水器采集水深1 m的水样于塑料桶内带回实验室,然后用真空抽滤泵过滤适量水样于 whatman G/F 玻璃纤维膜上,样品-20℃冷冻待测.

1.3 样品预处理

称取生物样品约0.2 g(沉积物样0.1 g)置于聚四氟乙烯消解罐内,加入硝酸和过氧化氢后在微波消解仪配套的加热板上进行预反应,然后放入微波消解仪内,设定消解程序进行消解. 样品消解完全后转移到加热板上加热赶酸至近干,然后把消解罐中溶液全部转移入10 mL容量瓶中,用超纯水定容待测,同时做空白实验. 为了检测分析方法的准确性,以标准样沉积物(代号 GBW07333 黄海洋沉积物,国家海洋局第二海洋研究所提供)作为标准品,与实验样品平行处理,测定标准品中相应重金属元

素的含量,并与其参考值进行比对,准确度范围为 91.5% ~ 100.7%,保证了样品处理和检测过程的准确性。

1.4 分析测定方法

1.4.1 重金属分析方法

As 用氢化物发生-原子吸收分光光度法, Hg 用冷原子吸收分光光度法, Pb、Cd、Cu、Zn、Mn、Cr 用火焰原子吸收分光光度法。每个试样做 3 个平行,并重复测定 3 次,重金属元素的相对标准偏差 (RSD%) 的变化范围为 0.1% ~ 7.2%,保证了测定数据的准确性。测定步骤参照《海洋监测规范》(GB 17378-2007) 进行。

1.4.2 铅同位素的分析方法

表层沉积物和悬浮颗粒物中铅同位素的丰度比 ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) 委托中国科学院广州地球化学研究所进行测定。

1.4.3 沉积物有机质评估方法

沉积物中有机质含量采用烧失量 (loss on

ignition, LOI) 来评估^[14,15]。称取适量表层沉积物样放入洁净的培养皿中于 105℃ 烘干 24 h 至恒重 (DW_{105}), 烘干后样品放入马弗炉中于 550℃ 下灼烧 2 h 后称重 (DW_{550}), 则烧矢量 LOI 的计算公式如下:

$$\text{LOI}(\%) = [(DW_{105} - DW_{550}) / DW_{550}] \times 100$$

1.4.4 潜在生态危害评价方法

沉积物样的污染评价模式根据瑞典学者 Hakanson 在 1980 年提出的沉积物潜在态危害评价方法^[16], 计算公式如下:

$$C_f^i = C^i / C_n^i, \quad E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i$$

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot C^i / C_n^i$$

式中, C_f^i 、 E_r^i 和 T_r^i 分别为第 i 种重金属污染系数、潜在生态危害系数和毒性系数; C^i 为沉积物重金属浓度实测值; RI 为多种重金属潜在危害指数; C_n^i 为参照值。参照值 C_n^i 采用工业化以前沉积物中重金属的最高背景值 (见表 1), 潜在生态危害评价指标 (见表 2)^[17,18]。

表 1 重金属的背景参考值和毒性系数

Table 1 Background reference values (C_n^i) and toxicity coefficient (T_r^i) of heavy metals

元素	Cu	Hg	Pb	Cr	Zn	As	Cd
$C_n^i (\times 10^{-6})$	50	0.25	70	90	175	15	1
T_r^i	5	40	5	2	1	10	30

表 2 潜在生态危害评价指标

Table 2 Indices for potential ecological risk assessment

生态危害	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	

2 结果与分析

2.1 重金属含量变化

2.1.1 沉积物中重金属含量分析

如表 3 所示, 不同采样点的同一重金属元素和同一采样点的不同重金属元素的含量各不相同。6 个采样点中, 表层沉积物中重金属含量 (除 Cd 外), 均以 S2 的含量最高, S1 次之, 且 S2 含量显著高于

对应元素的站位最低值。S2 的重金属含量最高可能与该站位点建有一个港口, 船舶的维修以及船舶本身对该采样点的水体影响较大有关。S1 的重金属含量次之, 且较接近其它站位点的含量, 原因可能与该站位点处于河流的上游, 且接近入海口处, 陆源污染物排放和 S2 位点的影响是造成该站位点浓度仅次于最高值的原因。Cu 和 Cr 的采样点浓度排序相同, 为 S2 > S1 > S4 > S3 > S5 > S6, 原因可能为 Cu

表 3 沉积物中不同重金属含量分析¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Analysis of heavy metal contents in different sediment matter/mg·kg⁻¹

采样点	Cu	Cr	Pb	Zn	Mn	Cd	Hg	As
S1	34.34 ± 0.17 ^a	58.69 ± 1.29 ^a	22.03 ± 6.76 ^a	139.64 ± 2.60 ^a	1 250.60 ± 15.84 ^a	0.48 ± 0.071 ^{ab}	0.045 41 ± 0.002 3 ^a	8.46 ± 0.10 ^a
S2	75.35 ± 0.45 ^b	62.17 ± 8.47 ^a	29.35 ± 2.96 ^b	162.19 ± 2.91 ^b	1 441.98 ± 7.03 ^b	0.39 ± 0.062 ^a	0.047 67 ± 0.000 6 ^b	9.60 ± 0.39 ^b
S3	31.22 ± 0.60 ^c	56.66 ± 2.96 ^a	19.89 ± 1.78 ^{ac}	118.32 ± 1.50 ^c	1 119.17 ± 9.27 ^c	0.66 ± 0.14 ^c	0.040 32 ± 0.000 9 ^c	6.69 ± 0.40 ^c
S4	32.39 ± 0.31 ^d	58.84 ± 0.73 ^a	19.27 ± 2.95 ^{ac}	102.99 ± 1.11 ^d	1 115.23 ± 10.24 ^c	0.63 ± 0.10 ^{bc}	0.041 34 ± 0.001 0 ^c	6.00 ± 0.26 ^c
S5	29.15 ± 0.37 ^e	55.76 ± 6.37 ^a	15.22 ± 1.63 ^c	88.77 ± 0.31 ^c	1 011.10 ± 20.32 ^d	0.62 ± 0.016 ^{bc}	0.033 97 ± 0.001 1 ^d	6.70 ± 0.74 ^c
S6	24.28 ± 0.27 ^f	45.61 ± 3.55 ^b	13.69 ± 1.27 ^c	81.84 ± 0.60 ^f	925.38 ± 12.27 ^c	0.66 ± 0.052 ^c	0.044 03 ± 0.000 9 ^a	4.93 ± 0.28 ^d

1) 同一列用不同字母标注表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 下同

和 Cr 在沉积物中具有同源性. Pb、Zn 和 Mn 采样点浓度排序相同,为 S2 > S1 > S3 > S4 > S5 > S6,原因可能为 Pb、Zn 和 Mn 在表层沉积物中具有同源性. 此外,S6 重金属含量最低(Cd 和 Hg 除外),原因可能是该站点点离海岸边缘较远,且位于入海口处,受陆源性污染较小.

2.1.2 悬浮颗粒物中重金属含量分析

如表 4 所示,同一采样点的不同重金属元素含量变化不同,同一种重金属元素在不同采样点之间的变化也有差异性. 由表 4 可知,悬浮颗粒物中重金属元素的变化在 6 个采样点中不存在相同变化趋势的两个采样点,原因可能与悬浮颗粒物中重金属含量受水体中悬浮颗粒物组成成分的影响

较大. As、Cd、Pb 和 Mn 均在 S2 站位的含量最高,原因可能与 S2 处的港口和近岸的污染有关. 此外,同一采样点悬浮颗粒物中的同一重金属含量均存在显著性差异,因此,悬浮颗粒物中重金属含量与所处的位置存在很大联系,分析一个大型水体时应该设置尽量多的采样点,如此才能保证分析的数据的准确性. 悬浮颗粒物中 Cu、Cr、Mn 的含量均低于表层沉积物中的浓度,而 Pb、As、Hg、Cd 的含量则高于表层沉积物中对应元素的含量,原因可能为 Cu、Cr、Mn 受颗粒物的吸附作用影响较小,受沉降作用在表层沉积物中不断积累;而 Pb、As、Hg、Cd 受颗粒物的吸附作用显著,主要吸附在悬浮颗粒物中.

表 4 悬浮颗粒物中不同重金属含量分析/mg·kg⁻¹

Table 4 Analysis of heavy metal contents in total particulate matter/mg·kg ⁻¹							
采样点	Cu	Cr	Pb	As	Mn	Cd	Hg
S1	19.06 ± 1.48 ^a	34.98 ± 4.86 ^a	59.89 ± 3.14 ^a	79.12 ± 7.93 ^a	220.32 ± 5.24 ^a	0.91 ± 0.14 ^a	0.24 ± 0.002 2 ^a
S2	18.48 ± 1.69 ^a	15.42 ± 2.82 ^b	176.69 ± 6.59 ^b	90.08 ± 10.22 ^a	566.48 ± 2.69 ^b	2.57 ± 0.062 ^b	0.093 ± 0.004 0 ^b
S3	11.07 ± 0.53 ^{bc}	45.36 ± 4.45 ^c	47.60 ± 9.59 ^{ad}	16.81 ± 8.08 ^b	257.89 ± 3.93 ^c	0.36 ± 0.013 ^c	0.77 ± 0.001 3 ^c
S4	13.27 ± 0.94 ^b	53.98 ± 5.16 ^c	48.49 ± 1.87 ^{ad}	34.45 ± 5.38 ^c	155.37 ± 2.16 ^d	1.20 ± 0.037 ^a	0.40 ± 0.001 9 ^d
S5	8.76 ± 1.94 ^c	3.056 ± 2.37 ^d	158.62 ± 5.22 ^c	76.30 ± 9.29 ^a	117.36 ± 3.58 ^c	1.85 ± 0.074 ^d	0.14 ± 0.002 1 ^c
S6	12.50 ± 1.36 ^b	74.11 ± 8.76 ^c	45.59 ± 6.47 ^d	28.42 ± 5.33 ^{bc}	407.54 ± 6.06 ^f	0.26 ± 0.061 ^c	0.32 ± 0.004 2 ^f

2.2 沉积物生态评价

本研究选用靖海湾内表层沉积物中 7 种重金属来评价其对潜在危害水平(见表 5). 结果表明,同种重金属元素在不同站点点的潜在危害系数不同,且同一站点点的不同重金属元素间的潜在危害系数不同. 6 个站点点的多种重金属潜在危害指数(RI)保持一致,无显著性差异. 其中,As、Hg 和 Cr 的潜在危害系数在不同站点点之间的变化不显著,Cu、Pb、Zn 和 Cd 在不同站点点之间的变化较明显. 由表 5 可知,7 种重金属元素的潜在危害系数均小于 25,属于轻微危害水平或者无危害水平. As、Hg、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的潜在危害系数以及 RI 均在 S2 为最大值,表明 S2 的重金属污染水平最高. 由于 S2 处建有一个码头,因此该站点点可能受货船和陆源污染的

影响使重金属污染处于一个较高的水平. As、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的潜在危害系数以 S6 为最小值,表明站点点的污染水平相对较小,原因可能与该点远离海岸,受陆源污染的影响较小. RI 在 S1 最小,原因可能与该站点点处于河流域的上游,受港口和陆源的影响较小,水质相对较好. 表层沉积物中重金属的危害程度顺序为 Zn < Cr < Pb < Cu < As < Hg < Cd,该结果与丘耀文等^[17]的研究结果相似. 多种重金属的危害系数 RI 在所有月份均显著低于 95,表明该水域总体重金属危害处于轻微危害水平. 对比 GB 18668-2002《海洋沉积物质量》(见表 6)中有关重金属的限量标准,可以看出靖海湾内表层沉积物中 As、Hg、Cr 和 Pb 的含量在 6 个采样点中的含量均小于限量标准,符合第一类沉积物质量标准,属

表 5 不同采样点重金属的潜在生态危害系数和危害指数

Table 5 Potential ecological risk factors and risk indices of heavy metals in different sites								
采样点	E_r^i						RI	
	Cu	As	Hg	Pb	Zn	Cd	Cr	
S1	3.434 ± 0.017 ^a	5.640 ± 0.068 ^a	7.266 ± 0.37 ^a	1.574 ± 0.48 ^a	0.798 ± 0.015 ^a	14.40 ± 2.12 ^{ac}	1.304 ± 0.027 ^a	34.536 ± 2.92 ^a
S2	7.535 ± 0.045 ^b	6.400 ± 0.26 ^b	7.627 ± 0.10 ^b	2.097 ± 0.21 ^b	0.927 ± 0.017 ^b	11.70 ± 1.86 ^a	1.382 ± 0.19 ^a	37.668 ± 2.68 ^a
S3	3.122 ± 0.060 ^c	4.450 ± 0.26 ^c	6.451 ± 0.15 ^c	1.420 ± 0.13 ^{ac}	0.676 ± 0.009 ^c	19.80 ± 4.09 ^b	1.259 ± 0.066 ^a	37.178 ± 4.76 ^a
S4	3.239 ± 0.031 ^d	4.001 ± 0.17 ^c	6.614 ± 0.17 ^c	1.376 ± 0.21 ^{ac}	0.589 ± 0.006 ^d	18.90 ± 3.07 ^c	1.308 ± 0.016 ^a	36.027 ± 3.67 ^a
S5	2.915 ± 0.037 ^e	4.467 ± 0.49 ^c	5.435 ± 0.17 ^d	1.087 ± 0.12 ^c	0.507 ± 0.002 ^c	21.60 ± 0.48 ^c	1.239 ± 0.14 ^a	37.250 ± 1.43 ^a
S6	2.428 ± 0.027 ^f	3.287 ± 0.19 ^d	7.045 ± 0.15 ^a	0.978 ± 0.09 ^c	0.468 ± 0.003 ^f	19.80 ± 1.56 ^b	1.014 ± 0.079 ^b	35.020 ± 2.10 ^a

于较清洁水平.而表层沉积物中 Cu 和 Zn 的含量均在 S2 符合第二类限量标准,其它采样点则符合一类标准. Cd 的含量则 S1 和 S2 符合一类标准, S3 ~ S6 个采样点符合二类标准.

表 6 海洋沉积物质量标准

Table 6 Standards of marine sediment

重金属 ($\times 10^{-6}$)	一类	二类	三类
汞(Hg) $\leq$	0.20	0.50	1.00
镉(Cd) $\leq$	0.50	1.50	5.00
铅(Pb) $\leq$	60.0	130.0	250.0
锌(Zn) $\leq$	150.0	350.0	600.0
铜(Cu) $\leq$	35.0	100.0	200.0
铬(Cr) $\leq$	80.0	150.0	270.0
砷(As) $\leq$	20.0	65.0	93.0

2.3 沉积物中有机质含量和重金属相关分析

在河口营养物质的循环和食物网研究当中,有机物含量是评价研究中的一个重要指标,而烧失量(loss on ignition, LOI)是估计沉积物中有机物质和碳酸盐含量的一种常见的并且被广泛使用的方法. 6 个站点点的 LOI 变化见图 2,从中可见 S2 的有机物质含量最高, S5 和 S6 最低,与对应站点点表层沉积物中的重金属含量在 6 个采样点的分布一致. 表明表层沉积物中重金属的含量与有机质含量存在一定的相关性. 靖海湾表层沉积物中有机质的分布趋势为从入海口至近海逐渐降低,与重金属含量变化趋势相吻合. 阮金山等^[19]对泉州湾沉积物中重金属的研究表明该湾重金属的分布特征为湾顶水域高于湾口水域. 6 个取样点的烧失量和重金属的相关性分

析见表 7. 从中可见, LOI 与 Cu、Cr、Pb、Zn、Mn、Hg 和 As 均呈正相关关系,且与 Cu、Cr、Pb、Zn 和 Mn 呈极显著正相关,表明表层沉积物中的典型重金属污染物主要存在表层有机物质当中. 表层沉积物中 Cu、Cr、Pb、Zn、Mn 和 As 的含量两两之间存在显著正相关关系,而 Cd 与 Cu、Pb、Zn、Mn、Hg 和 As 呈显著负相关,表明 Cu、Cr、Pb、Zn、Mn 和 As 在靖海湾表层沉积物中的分布来源具有不同程度上的同源性,而 Cd 的在表层沉积物中的来源与 Cu、Pb、Zn、Mn、Hg 和 As 具有差异性,原因可能与表层沉积物的物理吸附有关. Borg 等^[15]研究表明,表层沉积物中有机碳含量与沉积物中 Zn、Cu、Pb、Cd 和 Ni 含量呈正相关关系. 李玉等^[3]对胶州湾内表层沉积物的重金属分析显示, Cu、Zn、Cd、Cr 之间呈显著正相关,表明胶州湾表层沉积物中这几种重金属可能有着共同的来源:城市污水和海事活动.

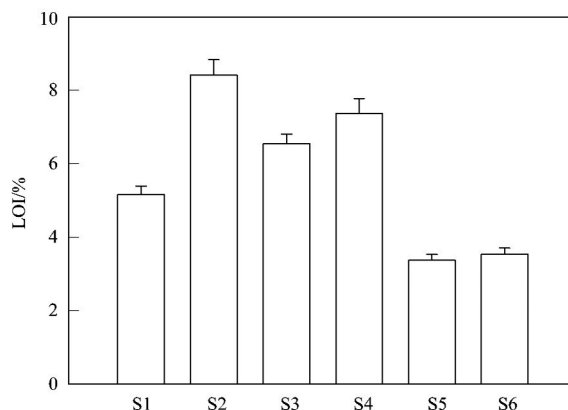


图 2 不同采样点的烧失量变化

Fig. 2 Changes of loss on ignition at different sites

表 7 沉积物烧失量及沉积物重金属含量间的相关系数¹⁾

Table 7 Result of correlation analysis between loss on ignition and heavy metals contents in the sediment

	LOI	Cu	Cr	Pb	Zn	Mn	Cd	Hg
Cu	0.7129**							
Cr	0.6371**	0.5260*						
Pb	0.7412**	0.8008**	0.5887*					
Zn	0.7369**	0.8311**	0.6327**	0.8485**				
Mn	0.7860**	0.8899**	0.6815**	0.8588**	0.9771**			
Cd	-0.4283	-0.7179**	-0.3837	-0.7116**	-0.7393**	-0.7655**		
Hg	0.5238*	0.5598*	0.1462	0.5915**	0.6511**	0.6131**	-0.5510*	
As	0.5482*	0.8061**	0.6347**	0.7830**	0.9180**	0.9151**	-0.7551**	0.4423

1) * 表示显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$); 数据源自 6 个采样点, 每采样点采集 3 个重复

2.4 靖海湾表层沉积物中重金属含量与其它海域的对比分析

为了衡量靖海湾表层沉积物中重金属的污染水平,与其它海湾进行了比较,结果见表 8. 对比其它海湾的表层沉积物重金属可知,靖海湾的含量总体上属于中等水平. 其中 Mn 的含量在所有的海湾中

含量最高. Cu 的含量仅次于胶州湾^[3]和大港湾^[20]的含量. Cr 含量仅低于胶州湾^[3,21],而高于渤海湾^[22]、荣成湾月湖^[23]和泉州大港湾^[19]. Pb 含量仅高于胶州湾^[21]和荣成湾月湖^[23],而显著低于其它几个海湾的含量. Zn 的含量处于中间水平,高于胶州湾、渤海湾、荣成湾月湖和泉州大港湾,低于厦

门西港^[24]、东山湾^[25]、湄洲湾^[26]、泉州湾^[27],与海陵湾的含量相近. Mn 的含量则在对比的几个海湾中最高,且显著高于其它海湾^[17],原因可能与该海域表层沉积物的组成结构有关. Cd 的含量低于胶州湾^[21]、山东湾、泉州大港湾和海陵湾. Hg 的含量低于胶州湾^[3]、渤海湾和海陵湾,高于泉州大港湾. As 的含量最低,且显著低于胶州湾^[3]、渤海湾和大港湾.

表 8 靖海湾和其它海湾表层沉积物中重金属元素平均含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 8 Average concentrations of heavy metals in surface sediments in Jinghai Bay and other bays/mg·kg ⁻¹									
海区	Cu	Cr	Pb	Zn	Mn	Cd	Hg	As	文献
靖海湾	37. 79	56. 29	19. 91	115. 63	1 143. 91	0. 59	0. 042	7. 06	本研究
胶州湾	9. 29	91. 99	1. 38	85. 73	425. 13	0. 69	—	—	[21]
胶州湾	53. 04	99. 20	35. 17	95. 88	474. 00	0. 50	0. 212	30. 27	[3]
渤海湾	26. 00	49. 00	22. 40	73. 60	626. 00	0. 15	0. 065	13. 80	[22]
荣成湾月湖	13. 10	36. 08	6. 70	17. 22	8. 40	0. 15	—	—	[23]
厦门西港	30. 00	—	25. 60	215. 00	647. 00	0. 20	—	—	[24]
东山湾	19. 00	—	58. 80	172. 00	—	1. 34	—	—	[25]
湄洲湾	19. 40	—	47. 00	243. 00	730. 00	—	—	—	[26]
泉州湾	21. 00	—	52. 00	220. 00	623. 00	—	—	—	[27]
大港湾	42. 80	—	35. 40	—	—	0. 06	0. 023	22. 60	[20]
泉州大港湾	16. 40	41. 40	34. 40	100. 60	—	1. 00	—	—	[19]
海陵湾	31. 82		36. 31	107. 15		0. 26	0. 115		[17]

1) “—”表示文献中没有相关数据

2.5 表层沉积物中铅稳定同位素组成分析

重金属铅有 4 种稳定同位素:²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb 和²⁰⁸Pb. 由于铅的 4 种同位素质量大,而不同同位素之间的相对质量差较小,因此铅同位素丰度组成受外界条件(生物作用、温度和压力等)的变化影响较小,而主要受到源区初始铅含量和放射性铀、钍衰变反应的制约,因此具有特殊的“指纹”作用^[28,29]. 靖海湾表层沉积物和悬浮颗粒物样品中铅的同位素组成见表 9 和表 10. 表层沉积物样品和悬浮颗粒物样品²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb和²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值在不同采样点之间均无显著性差异,表层沉积物²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb和²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值均大于悬浮颗粒物. 表层沉积物和悬浮颗粒物的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值均在 S2 最小,且与该采样点铅的浓度变化趋势相反,即随着铅的浓度增大

²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值呈现降低的趋势,该结果与吴龙华等^[11]对土壤铅污染的研究中结果相同,同时²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值在表层沉积物和悬浮颗粒物中也存在类似的变化趋势. Hoven 等^[30]报道了²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb的天然本底值接近 1. 210. 杨红梅等^[8]指出沉积物中不同深度残留相中的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值相当稳定,且均值 1. 202 可能为天然背景值. Sturges 等^[31]指出自然条件下产生的 Pb,其²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 比值一般较高(>1. 20),而人为原因产生的 Pb 其²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb则较低,一般为 0. 96 ~ 1. 20. 本实验中悬浮颗粒物²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值变化范围为1. 155 2 ~ 1. 160 5,表层沉积物²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值变化范围为1. 175 0 ~ 1. 180 5,²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb比值均小于 1. 20,结果表明表层沉积物和悬浮颗粒物中 Pb 主要由人为原因产生,且受自然条件影响较小.

表 9 悬浮颗粒物中铅同位素比值分析

Table 9 Pb isotopic composition of total particulate matter						
样品编号	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	
悬浮颗粒物	S1	37. 612 0 ± 0. 012 6	15. 538 1 ± 0. 003 7	17. 951 7 ± 0. 004 6	2. 095 2 ± 0. 000 31	1. 155 3 ± 0. 000 058
	S2	37. 768 9 ± 0. 007 5	15. 556 2 ± 0. 002 4	17. 970 4 ± 0. 002 6	2. 101 7 ± 0. 000 31	1. 155 2 ± 0. 000 046
	S3	37. 608 0 ± 0. 009 6	15. 541 7 ± 0. 002 7	17. 961 4 ± 0. 003 1	2. 093 9 ± 0. 000 30	1. 155 7 ± 0. 000 059
	S4	37. 489 8 ± 0. 010 8	15. 534 9 ± 0. 003 7	17. 997 4 ± 0. 004 3	2. 083 1 ± 0. 000 28	1. 158 5 ± 0. 000 069
	S5	37. 430 4 ± 0. 008 7	15. 524 2 ± 0. 003 0	18. 015 7 ± 0. 002 7	2. 077 7 ± 0. 000 24	1. 160 5 ± 0. 000 045
	S6	37. 667 4 ± 0. 008 9	15. 546 3 ± 0. 002 8	18. 025 2 ± 0. 002 9	2. 089 7 ± 0. 000 34	1. 159 5 ± 0. 000 066

表 10 表层沉积物中铅同位素比值分析
Table 10 Pb isotopic composition of surface sediment matter

样品编号	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
S1	$38.622\ 6 \pm 0.006\ 7$	$15.604\ 7 \pm 0.002\ 3$	$18.397\ 7 \pm 0.002\ 7$	$2.099\ 3 \pm 0.000\ 23$	$1.179\ 0 \pm 0.000\ 041$
S2	$38.544\ 3 \pm 0.007\ 4$	$15.600\ 8 \pm 0.002\ 4$	$18.330\ 8 \pm 0.002\ 6$	$2.102\ 7 \pm 0.000\ 20$	$1.175\ 0 \pm 0.000\ 041$
S3	$38.629\ 6 \pm 0.006\ 6$	$15.605\ 7 \pm 0.002\ 3$	$18.403\ 2 \pm 0.002\ 2$	$2.099\ 1 \pm 0.000\ 19$	$1.179\ 3 \pm 0.000\ 032$
S4	$38.632\ 8 \pm 0.006\ 6$	$15.606\ 2 \pm 0.002\ 4$	$18.407\ 8 \pm 0.002\ 4$	$2.098\ 7 \pm 0.000\ 16$	$1.179\ 5 \pm 0.000\ 043$
S5	$38.628\ 1 \pm 0.006\ 5$	$15.605\ 1 \pm 0.002\ 4$	$18.411\ 4 \pm 0.002\ 6$	$2.098\ 1 \pm 0.000\ 15$	$1.179\ 8 \pm 0.000\ 044$
S6	$38.637\ 6 \pm 0.008\ 4$	$15.606\ 0 \pm 0.002\ 3$	$18.422\ 2 \pm 0.002\ 8$	$2.097\ 3 \pm 0.000\ 24$	$1.180\ 5 \pm 0.000\ 059$

3 讨论

3.1 重金属含量变化

根据不同站位点的重金属含量变化得知, S2 表层沉积物中重金属含量最高, 原因可能与该站位点离岸边很近且建有一个码头. 而运输船停靠时排放的污染物和船舶建造和维修等作业排放的废弃物也加速了该点的重金属污染, 因此该站位点表层沉积物中重金属含量最高, 但潜在危害生态评价处于轻微污染水平, 因此对附近养殖水域影响较小. S1 站位点的重金属含量次之, 该站位点处于入海河流的上游, 污染物主要来自上游水体, 因此主要受到河岸生活污水和工业废水排放的影响. S5 和 S6 的重金属含量最低, 采样点距离 S2 和近海岸较远, 因此受到陆源污染物和港口的影响较小. 靖海湾沉积物中重金属含量和有机质含量随着距离海岸和海水深度的增加, 从入海口到近海逐渐递减, 因此近海岸重金属污染主要来自近岸的人为污染所致, 该结果与文献[19, 21]的调查结果相似.

3.2 重金属污染来源

近海岸底泥中重金属的来源主要有 3 个方面. ①入海河流中污染物质在海底中不断沉积以及近海岸污染物人为排放和随降水进入大海在底部沉积. ②大气沉降. 大气中的重金属元素随着空气的流动扩展到海面上空, 经过大气颗粒物的凝聚作用最终沉降到底部. ③海底岩石的自然分化. 海底岩石自然分化释放的重金属元素形成了重金属的原始背景值. 靖海湾表层沉积物中重金属的危害生态程度顺序为 $\text{Zn} < \text{Cr} < \text{Pb} < \text{Cu} < \text{As} < \text{Hg} < \text{Cd}$, 且潜在危害指数远小于最低级别的污染水平值 95, 且对比 GB 18668-2002《海洋沉积物质量》中有关重金属的限量标准, 可以看出靖海湾内表层沉积物中 As、Hg、Cr 和 Pb 的含量在 6 个采样点中的含量均小于限量标准, 符合第一类沉积物质量标准, 而表层沉积物中 Cu 和 Zn 的含量均在 S2 符合第二类限量标准, Cd 的含量在 S3 至 S6 4 个采样点符合二类标准, 除了

S2 站位点重金属污染水平微高外, 靖海湾表层沉积物重金属污染总体上属于较清洁水平.

3.3 铅污染溯源

环境中铅污染的来源具有多样性, 主要来自煤炭燃烧、工业生产和汽车尾气的排放, 根据铅同位素的“指纹特征”, 国内外的研究主要集中在利用样品铅同位素的组成特征与各种端元物质, 即各类污染物的代表物质的组成特征进行比较^[11], 然后根据两者的相似程度及运用聚类分析等统计方法来确定污染的主要来源. 本实验未采集到靖海湾附近的端元物质作对比, 因此只能根据不同端元物质的同位素组成范围来大致推测靖海湾的污染物的来源. 王琬等^[32]指出大气中铅污染主要来源于人类生产生活活动, 包括燃煤、工业排放和含铅汽油燃烧等, 其中铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值分别为 1.06 ~ 1.08、1.14 ~ 1.22 和 1.14 ~ 1.18. 本实验中悬浮颗粒物 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值变化范围为 1.1552 ~ 1.1605, 表层沉积物 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值变化范围为 1.175 0 ~ 1.180 5, 两者均处于工业排放和含铅汽油燃烧所在的比值范围之内, 且均小于天然背景值 1.20, 因此靖海湾内表层沉积物和悬浮颗粒物中铅污染主要来自人为污染, 且主要来自与工业排放和含铅汽油燃烧, 而靖海湾上游河流、湾内港口的建设和船舶运输以及机动车辆大量使用所排放的尾气对靖海湾表层沉积物和悬浮颗粒物中铅污染也具有一定的影响.

4 结论

(1) 靖海湾表层沉积物中重金属含量和有机质含量随着海岸距离和海水深度的增加, 从入海口到近海逐渐降低, 其中采样点 S2 的重金属和有机质含量最高, 采样点 S6 最低.

(2) 靖海湾表层沉积物中重金属的危害程度顺序为 $\text{Zn} < \text{Cr} < \text{Pb} < \text{Cu} < \text{As} < \text{Hg} < \text{Cd}$, 除采样点 S2 重金属污染水平微高外, 靖海湾表层沉积物重金属含量总体上符合第一类沉积物质量标准, 属于较清洁水平.

(3) 悬浮颗粒物 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值变化范围为1.155 2~1.160 5,表层沉积物 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值变化范围为1.175 0~1.180 5,且其比值大小与铅浓度呈负相关关系.两者比值均处于工业排放和含铅汽油燃烧所产生的铅污染 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 的比值范围之内,且均小于天然背景值1.20,表明该海区表层沉积物和悬浮颗粒物中铅污染主要来源于工业排放和含铅汽油燃烧等人类生产生活活动.

参考文献:

- [1] 张春云,王印庚,荣小军,等.国内外海参自然资源、养殖状况及存在问题[J]. 海域水产研究,2004,25(3): 89-97.
- [2] 田蕴,郑天凌,王新红. 厦门西港表层海水中多环芳烃(PAHs)的含量、组成及来源[J]. 环境科学学报,2004,24(1): 50-55.
- [3] 李玉,俞志明,曹西华,等. 重金属在胶州湾表层沉积物中的分布与富集[J]. 海洋与湖沼,2005,36(6): 580-589.
- [4] 阮金山,许翠娅,罗冬莲. 福建兴化湾海水、沉积物及水产生物体内重金属的分析与评价[J]. 热带海洋,2000,19(1): 52-56.
- [5] 廉雪琼,王运芳,陈群英. 广西近岸海域海水和沉积物及生物体中的重金属[J]. 海洋环境科学,2001,20(2): 59-62.
- [6] Karadede H, Ünlü E. Concentrations of some heavy metals in water, sediment and fish species from the Atatürk Dam Lake (Euphrates), Turkey[J]. Chemosphere, 2000, 41(9): 1371-1276.
- [7] Chapman P M, Wang F Y, Adams W J. Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids [J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(22): 3937-3941.
- [8] 杨红梅,路远发. 铅同位素示踪技术在重金属污染研究中的应用[J]. 华南地质与矿产,2004,(4): 71-77.
- [9] Munksgaard N C, Batterham G J, Parry D L. Lead isotope ratios determined by ICP-MS: Investigation of anthropogenic lead in seawater and sediment from the Gulf of Carpentaria, Australia [J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, 36(7): 527-534.
- [10] Blais J M. Using isotopic tracers in lake sediments to assess atmospheric transport of lead in Eastern Canada[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1996, 92(3-4): 329-342.
- [11] 吴龙华,张长波,章海波,等. 铅稳定同位素在土壤污染物来源识别中的应用[J]. 环境科学,2009,30(1): 227-230.
- [12] 路远发,陈好寿,陈忠大,等. 杭州西湖与运河沉积物铅同位素组成及其示踪意义[J]. 地球化学,2006,35(4): 443-452.
- [13] 任贻超,王芳,董双林,等. 荣成靖海湾海参养殖池塘初级生产力季节变化特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2010,40(3): 24-28.
- [14] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results [J]. Journal of Paleolimnology, 2001, 25(1): 101-110.
- [15] Borg H, Jonsson P. Large-scale metal distribution in Baltic Sea sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 1996, 32(1): 8-21.
- [16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [17] 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.
- [18] 陈静生,王忠,刘玉机. 水体金属污染潜在危害:应用沉积学方法评价[J]. 环境科技,1989,9(1): 16-25.
- [19] 阮金山,吴立峰,罗冬莲,等. 泉州大港湾海水、沉积物及水产生物体内重金属的含量分布[J]. 海洋通报,2004,23(3): 41-45.
- [20] 余文翎,王峰,李妙聪. 大港湾海域环境质量现状评价与分析[J]. 海洋开发与管理,2010,27(7): 33-38.
- [21] 殷效彩,杨永亮,余季金,等. 胶州湾表层沉积物重金属分布研究[J]. 青岛大学学报,2001,14(1): 76-80.
- [22] 黄华瑞. 渤海湾某些重金属及其它元素的分布与转移[J]. 海洋科学集刊,1988,29: 191-21.
- [23] 殷效彩,杨永亮,乌大年等. 山东荣成湾月湖沉积底泥重金属研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版),1999,12(4): 75-79.
- [24] 陈松,廖文卓,许爱玉,等. 厦门西港表层沉积物的化学特征[J]. 台湾海峡,1992,11(2): 131-137.
- [25] 阮金山. 东山湾养殖区表层沉积物的分布特征及环境评价[J]. 热带海洋,1997,16(3): 83-89.
- [26] 许爱玉,陈松,骆炳坤,等. 湄洲湾表层沉积物中重金属的地球化学特征[J]. 台湾海峡,1993,12(1): 16-20.
- [27] 许爱玉,骆炳坤,陈松. 泉州湾表层沉积物中重金属的地球化学特征[J]. 台湾海峡,1989,8(4): 383-388.
- [28] Komárek M, Ettler V, Chrastný V, et al. Lead isotopes in environmental sciences: a review [J]. Environment International, 2008, 34(4): 562-577.
- [29] 胡忻,曹密. 南京市内河道沉积物中重金属元素形态及Pb稳定同位素组成[J]. 环境科学研究,2009,22(4): 398-403.
- [30] Hoven H M, Gaudette H E, Short F T. Isotope ratios of $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ in eelgrass, *Zostera marina*, indicate sources of Pb in an estuary[J]. Marine Environmental Research, 1999, 48(4-5): 377-387.
- [31] Sturges W T, Barrie L A. Lead $^{206}/^{207}$ isotope ratios in the atmosphere of North America tracers of US and Canadian emissions[J]. Nature, 1987, 329(6135): 144-146.
- [32] 王琬,刘咸德,鲁毅强,等. 北京冬季大气颗粒物中铅的同位素丰度比的测定和来源研究[J]. 质谱学报,2002,23(1): 21-29.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-qiang, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i> (810)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行