

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

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

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小微 (817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷 (826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔 (835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明 (842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋 (849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永 (857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文 (864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼 (874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品 (882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成 (892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙 (900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影 (907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍 (914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽 (919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲 (927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华 (933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉 (943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军 (950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛 (955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可 (962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴 (968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军 (974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥 (979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹 (986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广 (993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广 (998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广 (1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔 (1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇 (1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利 (1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强 (1034)
海州湾滩涂重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威 (1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波 (1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅 (1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶 (1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏 (1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光 (1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲 (1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水 (1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉 (1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西 (1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强 (1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花 (1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆 (1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍 (1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明 (1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强 (1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶 (1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛 (1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰 (1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强 (1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川 (1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明 (1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲 (1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明 (1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙 (1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

海州湾潮滩重金属污染的历史记录

张瑞¹, 张帆², 刘付程¹, 尹福军², 丁迎军¹, 高金荣¹, 陈晶¹, 邵威¹

(1. 淮海工学院测绘工程学院海洋技术系, 连云港 222005; 2. 江苏省海洋资源开发研究院, 连云港 222001)

摘要: 近岸海域是区域源汇过程的汇, 记载了区域环境演变的重要信息. 2010 年在海州湾潮滩采集得到 4 个沉积物柱样, 对沉积物柱样进行了重金属元素测定, 结合核素²¹⁰Pb 测年结果, 研究了海州湾潮滩重金属污染历史及人类活动对其影响. 运用 Al 元素作为粒度的代用指标对重金属进行标准化, 并获取了重金属富集系数和人为污染的重金属通量. 研究表明, 粒度控制效应并不是影响海州湾潮滩地区重金属分布的最主要因素, 并且各重金属元素之间具有良好的相关性, 说明该区域重金属元素具有来源一致性; 海州湾潮滩沉积物中除重金属 Cr 和 Cu 表现为弱富集外, 其他重金属元素 Cd、Cr、Cu、Mn、Pb 和 Zn 均表现为强富集, 并且表层沉积物中重金属含量均高于该区域的背景值, 这表明近 50 年以来, 海州湾潮滩已明显受到人类污染源的影响, 从而造成沉积物中重金属不断富集累积; 自 20 世纪 50 年代至 2000 年初海州湾潮滩沉积物中人为污染活动输入的重金属通量呈现出波动增加的趋势, 这种变化特征与区域社会、经济发展阶段相吻合; 而从 2005 年以来随着区域产业结构优化调整, 环境监管力度加强, 潮滩沉积物中人为来源的重金属通量呈现出减少的趋势.

关键词: 重金属; 污染; 人类活动; 潮滩; 沉积物

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-1044-11

History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay

ZHANG Rui¹, ZHANG Fan², LIU Fu-cheng¹, YIN Fu-jun², DING Ying-jun¹, GAO Jin-rong¹, CHEN Jing¹, SHAO Wei¹

(1. Department of Marine Technology, School of Geodesy and Geomatics Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China; 2. Jiangsu Marine Resources Development Research Institute, Lianyungang 222001, China)

Abstract: Coastal zone could be considered as an important sink of regional source to sink and preserve historical records of environmental evolution. Four sediment cores, collected from tidal flat at Haizhou Bay near Lianyungang City, were examined for concentrations of heavy metals including Cd, Cr, Cu, Mn, Pb and Zn in core sediments to investigate the historical input of trace metals. In addition, sediment rates of cores LH3 and LH4 were determined based on radionuclide ²¹⁰Pb. The results showed that grain size control effect was not the main factor that influenced the distribution of heavy metals. Heavy metals concentrations in the surface sediments were higher than these regional background values. Furthermore, Al element as a proxy of grain size was selected for normalization and calculation of metal enrichment factor (EF) and anthropogenic heavy metal fluxes. The results revealed that heavy metals in tidal flats were continuously enriched in the past decades, meanwhile, tidal flats have been significantly subjected to contaminations due to anthropogenic activities. Moreover, the depth profiles of heavy metals fluxes correspond to scenario of social-economy development of Lianyungang, which is an important urban area near Haizhou Bay. From 1950s to 2005, anthropogenic fluxes of metals increased with fluctuations, whereas, since 2005 anthropogenic fluxes declined, which may be correlated to the adjustment of industrial structure as well as the strengthened environmental regulation.

Key words: heavy metal; contamination; anthropogenic activities; tidal flat; sediment

近海沉积物记录了工业革命以来人类活动释放到环境中各种污染物质的来源、分布、迁移和转化的历史, 成为反演、追溯区域环境污染历史的最佳工具^[1~3]. 潮滩是陆海相互作用最活跃的地方, 是海岸系统的重要组成部分, 受人类活动的影响显著, 也是全球变化的敏感区域, 因此成为海岸带陆海相互作用研究的重点对象之一. 进入河口海岸潮滩地区的绝大多数重金属元素都吸附在水体中的悬浮泥沙中, 由于在潮滩水动力环境、潮滩植被阻滞等因素的影响下这些吸附了重金属元素的泥沙颗粒不断地在潮滩湿地沉降、累积下来, 因此潮滩湿地具有

滨海河口污染过滤器的作用, 并且成为了陆源重金属元素的汇, 同时也是二次重金属污染的源^[4]. 由于重金属的毒性、生物富集能力和不可降解性的特征, 重金属累积特征一直是河口海岸环境污染研究所关注的热点^[5~7], 并且通过对沉积地层中重金属元素沉积记录的分析, 人们可以重建区域环境污染

收稿日期: 2012-05-31; 修订日期: 2012-08-06

基金项目: 南京大学污染控制与资源化研究国家重点实验室开放基金项目(PCRRF11024); 淮海工学院自然科学类校内课题项目(Z2011001); 淮海工学院科研启动基金项目(KQ09041)

作者简介: 张瑞(1982~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为近海环境演变, E-mail: rzhang_838@163.com

的历史^[2,3,8~10].

自 20 世纪 50、60 年代开始,海州湾海域已经受到人类活动的影响. 尤其是 20 世纪 90 年代以来连云港地区的社会、经济快速发展,滨海城市化进程加快,成为推动江苏经济持续增长的重要推动力. 但随着社会、经济的快速崛起,城市毗邻的海域环境受到了人类活动的严重影响. 研究表明,人为输入的重金属元素已经使得海州湾沉积物重金属元素富集,尤其是临洪河河口地区,整个河口区域的重金属生态危害性严重^[11~15]. 然而目前研究多着眼于近岸海域及河口水下现代沉积物重金属污染的空间分布特征及评价方面,对于滨海潮滩湿地沉积物重金属污染历史演化过程的研究非常少. 因此本研究将通过对滨海潮滩湿地采集的柱状沉积物样品重金属含量的测试分析,分析和探讨海州湾潮滩沉积物中重金属污染的累积特征、影响因素以及历史演变过程,以期评价快速城市化进程中人类活动对近海环境造成的影响提供科学依据.

1 研究区域概况

海州湾位于苏鲁两省交界处,北起山东日照岚山区的佛手咀,南至连云港市高公岛,是一个濒临黄海的大喇叭口形开敞海湾,湾口宽 42 km,海湾面积为 876.39 km²,岸线长 86.81 km^[16]. 海州湾为明显的季风气候,年降水量近 1 000 mm. 该海域渔场为我国八大渔场之一,同时也是淮北盐场的海盐生产基地. 自上世纪 30 年代以来,该地区近岸海洋活动频繁,各种海洋建设工程持续进行,如今海州湾已成为苏北的重要经济区,同时又是连云港实施海湾型经济的重要载体^[11]. 临洪河是海州湾中的重要入海河流,由于临洪河入海水沙通量较小,因此河口潮流作用强于径流作用,河口形状呈喇叭状,为典型潮汐河口^[16]. 由于受涨落潮流的影响,临洪河入海径流向偏南方向扩散^[17]. 同时临洪河又是连云港工农业活动的重要排污通道. 大量未经处理的废污水直接排入河道水体中,对区域水质造成了很大的污染,据统计 2010 年全市废水排放总量为 2.26×10^8 t,并且 2010 年临洪河口入海河流重金属排放总量高达 47 t^[18,19].

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

2010 年 4 月份在海州湾南部的潮滩采集 4 个沉积物柱状样,分别为 LH1、LH2、LH3 和 LH4(图

1),所有沉积物柱状样采集均利用内径 70 mm、外径 75 mm 的 PVC 管直接打入地下获取. 在现场采样时仅对采样管进行了简单的标记,发现可能由于柱样取样较短,并且沉积物松软便于采样管贯入地下,因此这 4 个柱样的压缩率可忽略不计. 采样点的定位利用 GPS 手持定位仪测定,精度为 5 m. 柱状样现场密封保存,带回实验室后,取出样品沿纵向解剖,照像,进行岩性、沉积构造描述. 取分割的一半柱状样保存,另一半以 1 cm 间隔分样.

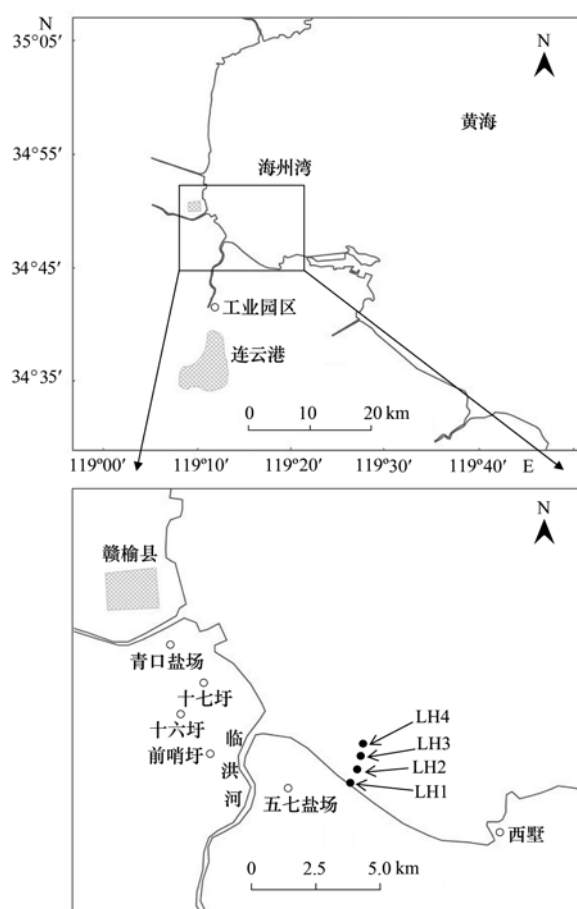


图 1 海州湾潮滩沉积物柱状样采样站信息

Fig. 1 Location map of study area and sampling site

2.2 样品指标测定

在实验室中,样品放在烘箱中烘干,温度控制在 40℃ 左右. 量取一定体积的沉积物湿样并称量其重量,然后在烘箱中低温烘干至恒重,再称量其重量,以计算沉积物干密度. 沉积物样品利用英国 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行沉积物粒度分析,沉积物粒度参数采用矩值法^[20]进行计算. 选取部分样品去除植物残体和石块,研磨细,以用于重金属元素测定. 重金属元素含量测定采用 Anton Paar 公司 Multiwave 3000 微波消解仪进行消解,利用美

国 Thermo 公司全谱直读等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行测定,所用试剂为优级纯试剂,实验用水为超纯水. 沉积物粒度分析和重金属元素测定在江苏省海洋资源开发研究院分析测试中心完成,加入国家标准物质进行质量控制,测试相对误差 $<5\%$. 利用 Po- α 法对其进行 ^{210}Pb 分析,具体实验分析方法参考已有的研究成果^[21],仪器为低本底的 α 谱仪(576A Alpha Spectrometer, 美国 EG&G 公司生产). ^{210}Pb 分析在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成.

3 结果与讨论

3.1 沉积物粒度特征分析和沉积速率计算

通过沉积物粒度分析得知(图2),沉积物以粉砂为主,其次是黏土,砂含量最少. 沉积物柱样 LH1 采自潮上带,平均粒径介于 $6.3 \sim 7.7 \varphi$ ($\varphi = -\log_2 d$, d 为沉积物颗粒直径,单位为 mm)之间,平均值为 7.3φ ,分选系数介于 $0.9 \sim 2.4$ 之间,偏态介于 $-2.2 \sim 0.6$ 之间,峰态介于 $1.2 \sim 2.9$ 之间,其中黏土含量介于 $22.1\% \sim 31.4\%$ 之间,平均值为 27.4% ,粉砂含量介于 $55.1\% \sim 72.4\%$ 之间,平均值为 68% ; 柱样 LH2 和 LH3 采自潮间带,柱样 LH2 的平均粒径介于 $4.9 \sim 7.9 \varphi$ 之间,平均值为 6.6φ ,分选系数介于 $0.8 \sim 2.8$ 之间,偏态介于 $-1.5 \sim 1.7$ 之间,峰态介于 $1.1 \sim 3.0$ 之间,其中黏土含量介于 $15.1\% \sim 41.6\%$ 之间,平均值为 25.5% ,粉砂含量介于 $31.4\% \sim 80.9\%$ 之间,平均值为 62.5% ; 柱样 LH3 的平均粒径介于 $6.4 \sim 7.7 \varphi$ 之间,平均值为 7.2φ ,分选系数介于 $0.7 \sim 1.1$ 之间,偏态介于 $-1.1 \sim 0.7$ 之间,峰态介于 $1.0 \sim 1.8$ 之间,其中黏土含量介于 $0.1\% \sim 35.1\%$ 之间,平均值为 16.9% ,粉砂含量介于 $64.9\% \sim 98.3\%$ 之间,平均值为 82.7% ; 柱样 LH4 采自靠近潮下带地区,平均粒径介于 $4.6 \sim 7.0 \varphi$,平均值为 6.1φ ,分选系数介于 $0.4 \sim 2.0$ 之间,偏态介于 $-1.7 \sim 0.7$ 之间,峰态介于 $0.6 \sim 2.2$ 之间,并且柱样 LH4 粉砂含量最高,平均含量为 95.9% ,黏土平均含量为 2% ,砂平均含量为 2.1% . 分析可知柱样 LH1 沉积物粒度最细,柱样 LH3 和 LH4 沉积物粒度最粗,从陆向海断面上表现出从高潮滩到低潮滩沉积物逐渐变粗. 沉积物粒度分布特征主要反映了其沉积环境的特征,由于受到潮流的侵蚀滞后效应和沉降滞后效应以及波浪等水动力因素的影响,潮流流速由海向岸变小,潮流向上搬运的沉积物越来越细,因此表现出沉积物向海

逐渐变粗,并且受低能水动力因素影响,潮滩沉积物主要以黏土质粉砂为主^[22]. 从剖面上可以得知,这4个柱样均表现出沉积物颗粒从底部向表层逐渐变细的趋势,反映了该区域泥沙不断淤积导致海底高程逐渐增大,水动力作用逐渐变弱,沉积物逐渐变细. 另外西大堤建成后,导致海州湾南部水动力环境变弱,这样可能使得水体中悬浮泥沙更容易落淤海底,更加剧了沉积物细化趋势^[22,23].

通过实验分析获得了沉积物中总 ^{210}Pb 比活度,但是由于沉积物柱样取样长度的限制,沉积物柱样未能获得补偿 ^{210}Pb ,根据前人研究,该区域补偿 ^{210}Pb 比活度约为 $1.3 \text{ dpm} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[11,24],因此过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)活度 = 总 ^{210}Pb 比活度 - 补偿 ^{210}Pb 比活度. 沉积物柱样 LH3 和 LH4 的过剩 ^{210}Pb 剖面如图3所示,总体上过剩 ^{210}Pb 随深度增加而减小,因此利用 CFS 模型^[25]计算出了柱样 LH3 和 LH4 的沉积速率,计算得到柱样 LH3 平均沉积速率约为 $0.85 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$,柱样 LH4 的平均沉积速率约为 $1.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$. 前人研究结果表明海州湾南部近岸海域沉积速率在 $0.51 \sim 1.15 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间^[11,24,26],因此本研究获得的潮滩沉积速率与前人研究结果基本一致.

3.2 海州湾潮滩重金属含量分布特征

3.2.1 海州湾潮滩重金属水平分布特征

从表1可知,总体上海州湾潮滩表层沉积物重金属元素含量从陆向海呈现出先减小后增高的趋势,并且沉积物柱样元素 Cd、Cr、Cu、Mn 和 Zn 平均含量表现出从陆向海逐渐降低的趋势,而元素 Pb 的含量变化表现出上升趋势. 由于潮滩低能的水动力环境、滩面植被的阻滞以及重金属元素吸附效应等因素的影响,因此使得潮滩成为重金属元素重要的“汇”,从而在空间上表现出从陆到海潮滩沉积物的重金属元素含量逐渐降低. 而由于海州湾南部潮滩区域的水动力环境较弱,水体中的泥沙颗粒容易落淤,潮下带的沉积速率也较高,因此使得低潮滩表层沉积物重金属含量高于中潮滩和高潮滩. 表2为所有样品中的各重金属元素与粒度之间的相关性及各重金属元素之间的相关性,从表中可以看出,重金属元素与沉积物平均粒径之间显示了较弱的相关关系,说明本区域沉积物的粒度控制效应不是影响重金属元素分布的主要影响因素. 重金属元素之间均存在明显的相关性,说明沉积物中的这些重金属来源可能相似并且具有相似的迁移特征.

3.2.2 海州湾潮滩重金属垂直分布特征

图4表示了沉积物柱状样的重金属垂直剖面.

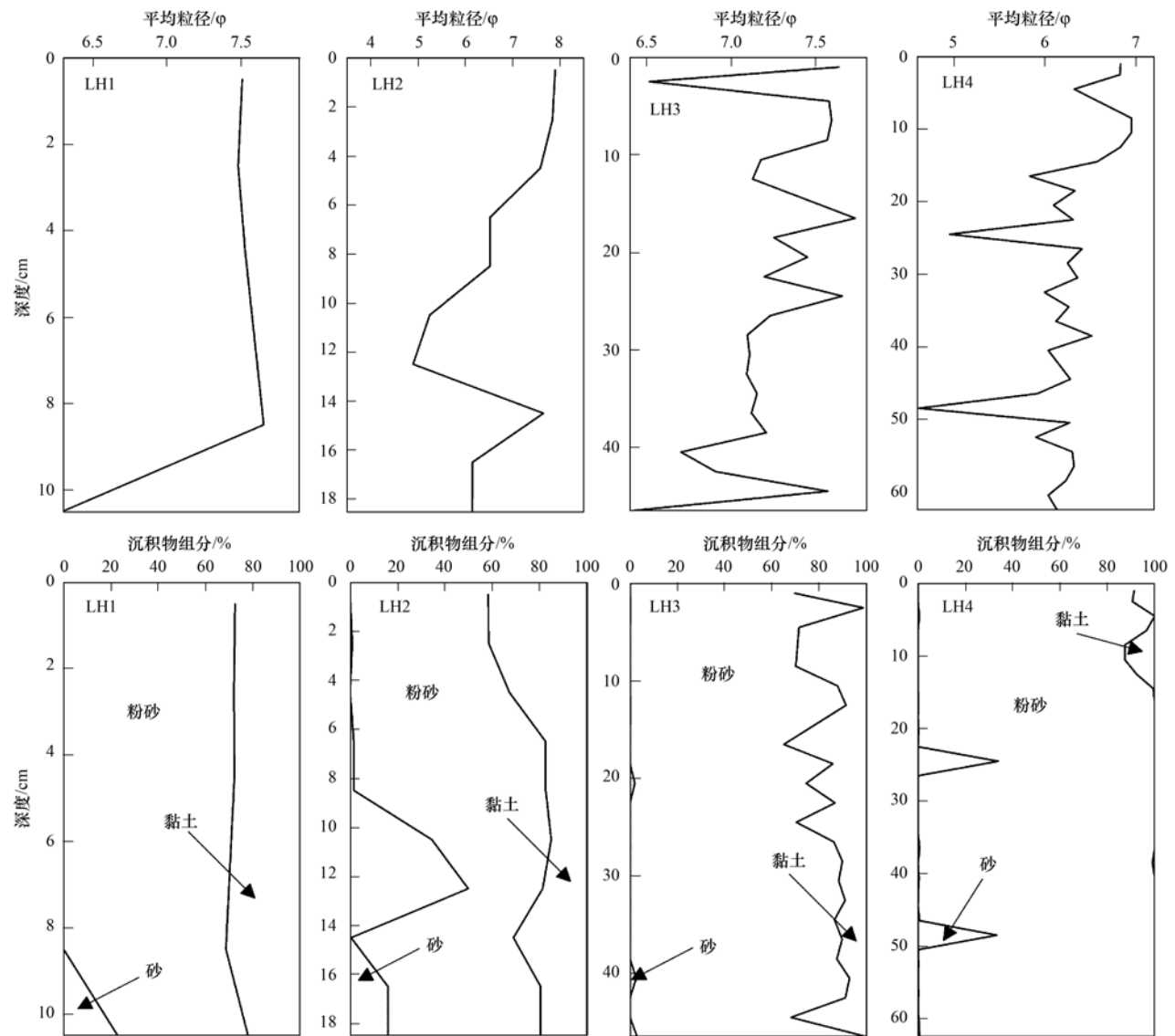


图2 海州湾潮滩沉积物柱样沉积物平均粒径和沉积物组分剖面

Fig. 2 Profiles of mean grain size and sediment components in sediment cores from tidal flat in Haizhou Bay

表1 海州湾潮滩表层和柱样中重金属含量与背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Comparisons of concentrations of heavy metals in surface and core samples in tidal flat from Haizhou Bay with background values/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn
表层样	LH1	1.89	129.18	51.07	1 841.84	50.41	322.76
	LH2	0.90	70.10	24.20	1 268.59	35.08	225
	LH3	1.45	84.63	32.04	1 455.72	48.81	396.97
	LH4	1.57	103.58	33.82	1 411.27	118.82	472.75
沉积物柱样平均值	LH1	1.55	107	34.6	1 327	35.4	254
	LH2	0.83	73.66	23.17	1 177	32.9	224.06
	LH3	1.08	80	28.8	1 260	39.4	284
	LH4	0.93	75.4	27.5	1 246	73	286
江苏省滨海土壤的背景值 ^[27]		0.365	60.28	15.84	—	24.7	64.68
黄海表层沉积物的背景值 ^[28]		0.088	64	18	570	22	67
1986年江苏潮滩重金属调查值 ^[29]		— ¹⁾	—	30	—	25	80
全球工业化前最高背景值 ^[30]		1.0	90	50	—	70	175

1) 表示文献中没有相关数据

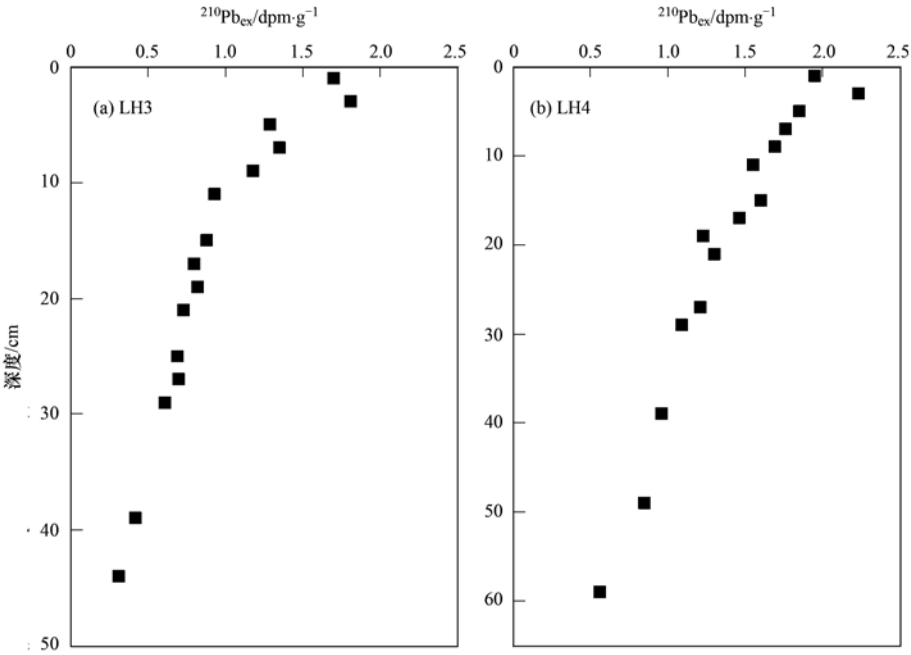


图 3 柱样 LH3 和 LH4 中²¹⁰Pb_{ex}剖面

Fig. 3 Profiles of ²¹⁰Pb_{ex} activities in sediment cores LH3 and LH4

表 2 海州湾潮滩沉积物中重金属含量与平均粒径及各重金属元素间的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 2 Pearson correlation coefficients between contents of heavy metals and mean grain size in tidal flat sediment from Haizhou Bay

	平均粒径	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn
平均粒径	1						
Cd	0.15	1					
Cr	0.21	0.68 *	1				
Cu	0.32	0.67 *	0.75 *	1			
Mn	0.222	0.56 *	0.65 *	0.81 *	1		
Pb	-0.12	0.46 *	0.36 *	0.40 *	0.34 *	1	
Zn	-0.20	0.61 *	0.41 *	0.46 *	0.42 *	0.52 *	1

1) * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关

分析得知,柱样 LH1 的元素 Cd、Cr 和 Cu 剖面没有呈现明显的变化趋势,整体上在一定范围内波动;而其他元素表现出从柱样底部到表层波动上升的趋势.柱样 LH2 中除了元素 Al 以外,其他重金属元素均表现出从下向上波动上升的变化趋势,并且在表层以下深度处出现最大值.柱样 LH3 中元素 Al 从柱样底部向上在一定范围内波动变化;而元素 Cd、Cu 和 Cr 呈现出从柱样底部向上先增加到最大值,再减小的趋势,最大值分别出现在深度 2.5、8.5 和 8.5 cm 处;而元素 Mn、Pb 和 Zn 从底部向上表现出先增加、再减小、再增加的变化趋势,最大值分别出现在深度 8.5、24.5 和 20.5 cm 处.柱样 LH4 中除元素 Al 之外,元素 Cd、Cu、Cr、Mn、Pb 和 Zn 剖面表现出从柱样底部向上先增加到最大值,再减小的趋势,最大值分别出现在深度 4.5、12.5、12.5、

12.5、4.5 和 4.5 cm 处.总体而言,重金属元素剖面变化基本相同,由柱样底部向上波动上升到达最大值,但是最大值不在表层,而均出现在表层以下.

3.3 海州湾潮滩重金属富集系数垂向变化

海洋沉积物物质来源发生改变时常使得其组分的含量产生变化.为消除物源的影响,区别自然和人类来源的物质,通常方法就是采用参考元素,如 Ti、Al 和 Fe 等^[31~33].Al、Fe 和 Ti 被认为主要来自土壤母质或基岩的铝硅酸盐^[33],这些物质在沉积物中的含量与矿物组成有显著的关联,且受人为活动影响较小,其变化受控于自然物质来源的差异.并且 Al 是黏土矿物中的主要成分,其含量与沉积物中黏土含量直接相关^[34],因此柱样中元素 Al 的波动变化可能主要与沉积物物源、黏土含量等因素有关.通过与沉积物中相应元素的背景值比较,可以

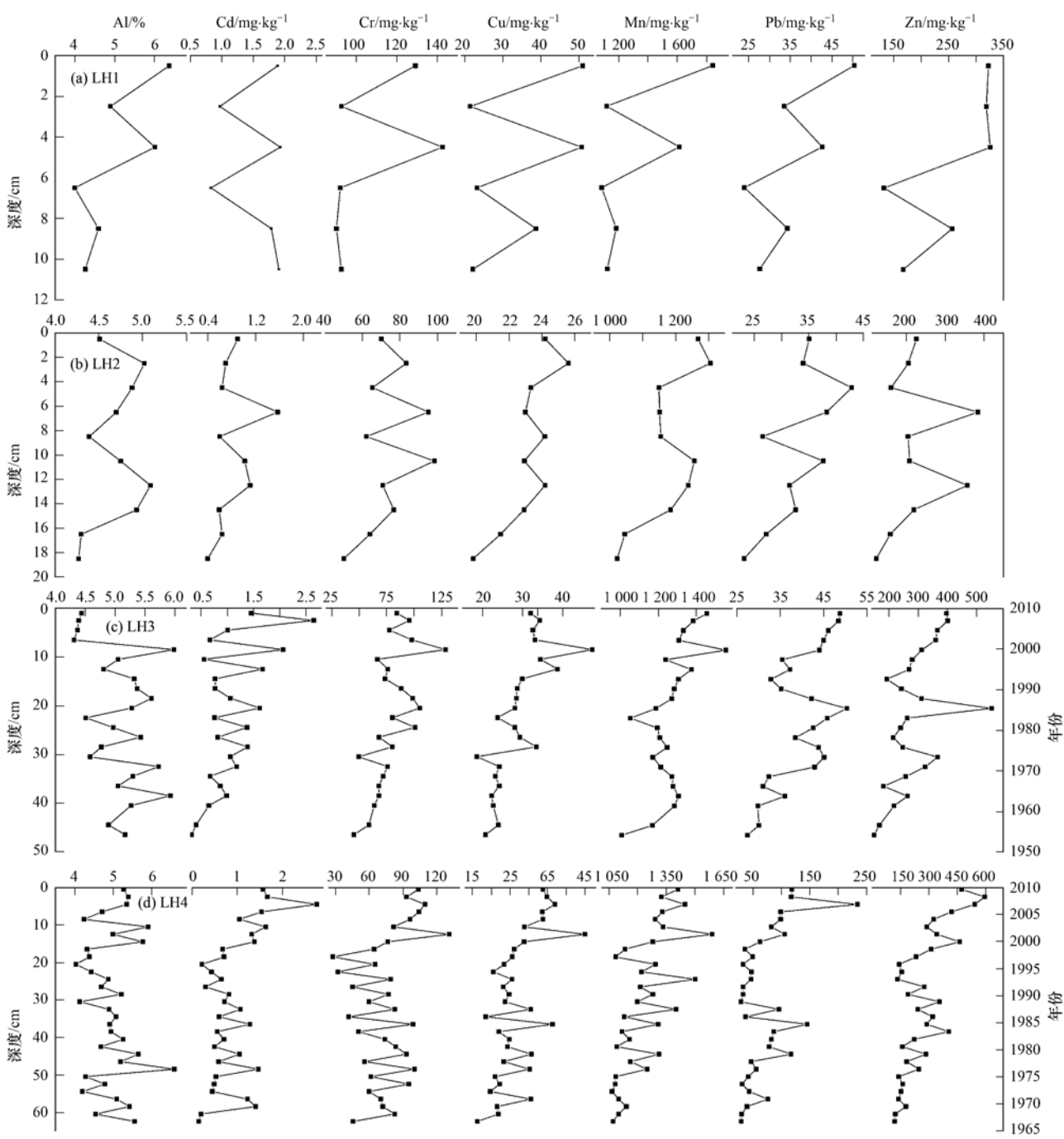


图4 海州湾潮滩沉积物柱样中各种元素剖面

Fig. 4 Profiles of elements in sediment cores from tidal flat in Haizhou Bay

鉴别沉积物重金属富集程度,从而获取沉积物中重金属的自然和人为来源的相对贡献率. 富集系数(EF)可以用来反映沉积物重金属污染程度^[35]. 前人研究表明,在潮滩元素的研究中选用Li或Al作为标准化元素均比较适宜^[36]. 因此,本研究使用Al元素作为粒度的代用指标可较好地重金属进行标准化,以消除粒度的影响. 计算公式如下:

$$EF = (M_0/Al_0)/(M_B/Al_B)$$

式中,EF为富集因子, M_0 为实测沉积物重金属含

量, M_B 为该区域这种重金属背景值, Al_0 为实测沉积物中Al的含量, Al_B 表示该区域Al的背景值. 关于重金属污染评价的参考值,目前国内外还没有统一,主要是根据不同的研究区域采取不同的参考标准. 本研究中元素Cd、Cr、Cu、Pb和Zn选取江苏省滨海土壤的背景值作为评价背景值,而元素Mn选取黄海表层沉积物化学元素含量为评价背景值. 从表2分析得知,海州湾潮滩表层和柱样中重金属元素含量均高于江苏省滨海土壤背景值以及黄海表

层沉积物元素含量,并且与1986年江苏潮滩重金属调查值对比得知,海州湾潮滩沉积物中重金属Cu与其接近,其它重金属均高于1986年的调查值,表明海州湾潮滩沉积物已明显受到重金属污染,并且

呈现不同程度的富集. 同时与全球现代工业化前沉积物重金属的最高背景值比较,海州湾潮滩沉积物中重金属污染尚处于良好的水平.

图5表示了海州湾潮滩沉积物柱样中重金属元

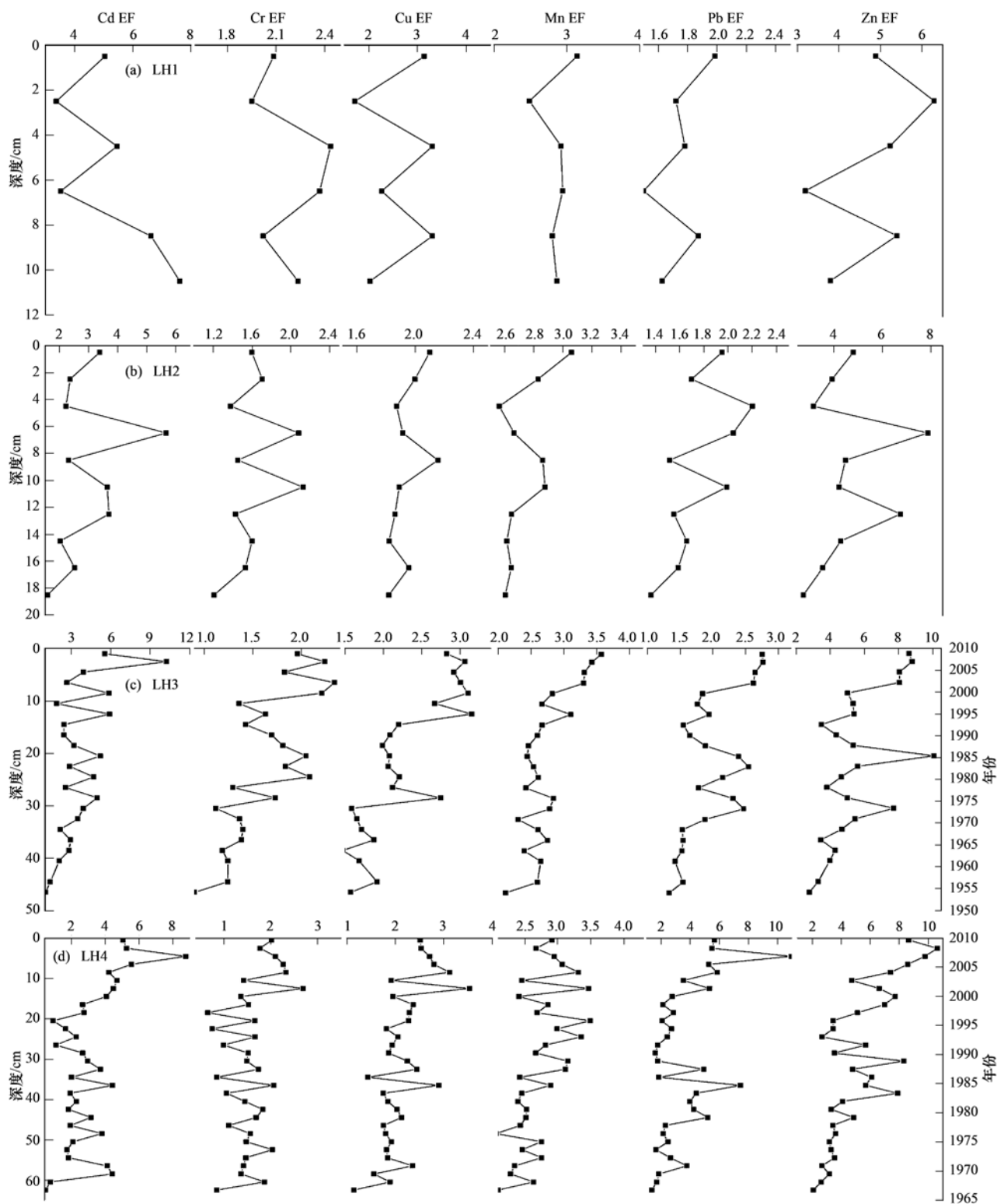


图5 海州湾潮滩沉积物柱样中重金属元素富集系数的剖面

Fig. 5 Profiles of enrichment factors of heavy metals in sediment cores from tidal flat in Haizhou Bay

素富集系数的剖面变化,分析得知元素 Cr 和 Cu 的富集系数在 1.5 ~ 2.3 之间,说明元素 Cr 和 Cu 在潮滩沉积物中呈现出弱富集程度,存在一定的人为污染来源的输入. 元素 Cd、Mn、Pb 和 Zn 的富集系数在 2.8 ~ 11.5 之间,富集系数最高的是元素 Zn,其范围在 2.1 ~ 11.5 之间,属于强富集,这说明潮滩沉积物中人为来源的元素 Cd、Mn、Pb 和 Zn 占到显著比例. 柱样 LH1 中的元素 Cd 富集系数总体呈现出从柱样底部向上递减的趋势;元素 Cr、Cu 和 Mn 的富集系数在剖面中表现出在一定范围内波动,并没有明显的变化趋势;元素 Pb 和 Zn 的富集系数总体呈现出从底部向上增加的趋势. 柱样 LH2 中元素 Cu 和 Mn 的富集系数表现出从底部向表层增加的趋势;元素 Cd、Cr、Pb 和 Zn 的富集系数在底部至深度 6.5 cm 之间呈现增加的趋势,并且其富集系数的最大值分别出现在深度 6.5、6.5、4.5 和 6.5 cm 处,在深度 6.5 cm 至表层之间其富集系数表现出先减小后增加的趋势. 柱样 LH3 中元素 Cd、Cr、Cu 和 Mn 的富集系数总体呈现出从底部至表层增加的趋势;元素 Pb 和 Mn 的富集系数呈现出阶段性变化,从底部至深度 20 cm 之间富集系数呈现出增加的趋势,而从深度 20 ~ 14.5 cm 之间富集系数逐渐减小,从深度 14.5 cm 处至表层富集系数又逐渐增

加. 柱样 LH4 中元素富集系数剖面变化趋势基本一致,柱样底部的元素富集系数最小,从底部向上总体呈现波动增加的趋势,并在深度 10 cm 左右富集系数达到最大值,而富集系数随后向表层递减.

3.4 海州湾潮滩重金属通量变化与人类活动的关系

为了揭示人为活动输入的重金属通量历史,本研究采用沉积物重金属通量 (total flux, TF) 扣除自然来源的重金属通量的方法得到人为活动带来的重金属的通量 (anthropogenic flux, AF)^[37]. 具体计算公式:

$$TF = SR \times \rho \times C$$

$$AF = TF \times (1 - 1/EF)$$

式中,SR 为沉积速率; ρ 为沉积物干密度; C 为沉积物柱样中某一深度的某种重金属的含量; EF 为相对应的重金属富集系数.

从图 6 中可以看出,柱样 LH4 的通量高于柱样 LH3,这和柱样 LH4 高沉积通量和高重金属含量有关. 并且重金属 Cd 的人为来源的重金属通量最小,平均值仅为 $0.63 \mu\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 重金属 Cr、Cu 和 Pb 的人为来源的重金属通量比重金属 Cd 的大,平均值分别为 26.6、13.96 和 $39.43 \mu\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 重金属 Mn 和 Zn 的通量最大,分别为 747.39 和 $240.24 \mu\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 总体上,柱样中人为活动带

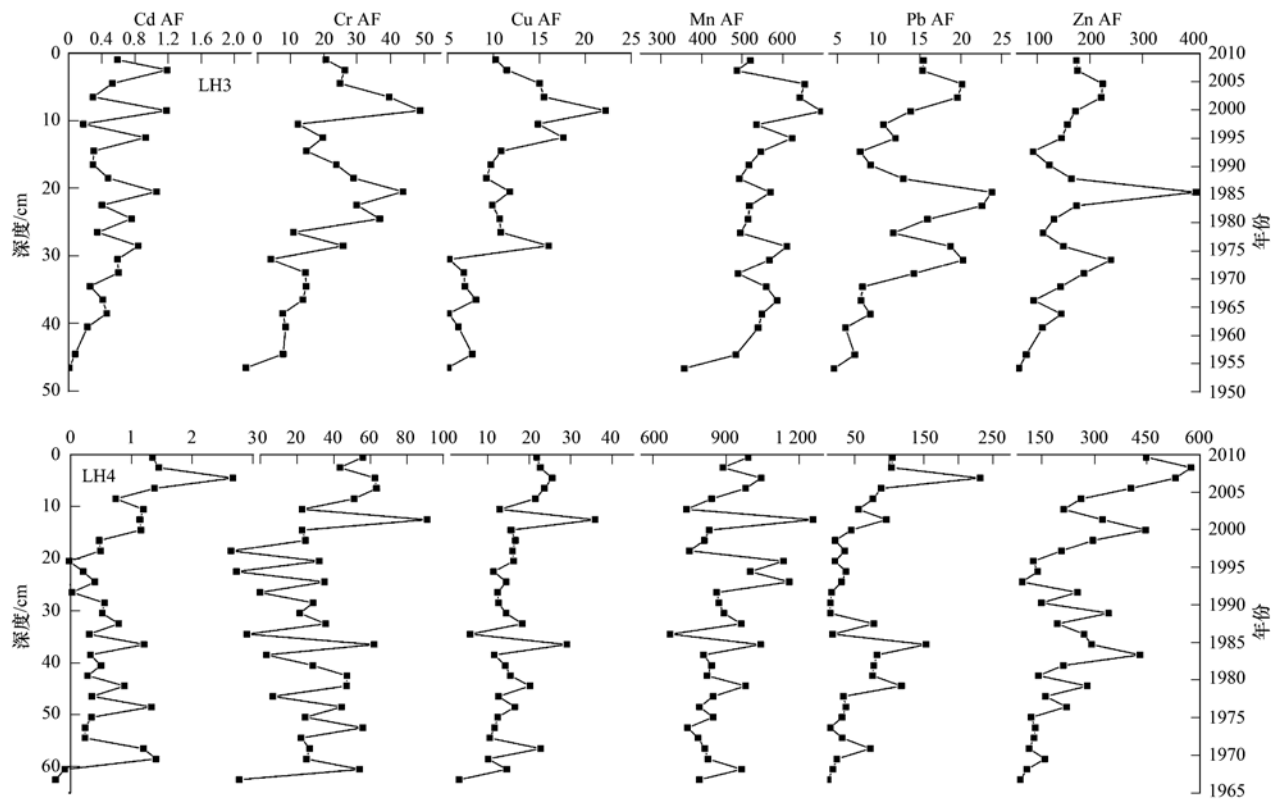


图 6 海州湾潮滩沉积物柱样 LH3 和 LH4 中人为来源重金属通量剖面

Fig. 6 Changes of anthropogenic flux of heavy metals in sediment cores LH3 and LH4 from tidal flat in Haizhou Bay

来的重金属通量呈现出由底至表增加的趋势,但是也表现出了分段变化特征. 具体来说,人为来源的重金属通量从 20 世纪 50~80 年代中期呈现出上升趋势,而从 80 年代末到 90 年代中期人为活动带来的重金属通量出现下降,从 90 年代中期到 2005 年左右又出现上升趋势,但是自 2005 年以来重金属通量均有所下降. 前人研究表明,由于污水排放量的增加和氧化还原边界层重金属元素易富集,临洪河口柱样中的重金属元素在深度 30~40 cm(约 1995 年)有向表层增加的趋势,并且从河口及近岸海域的柱状样重金属剖面的总体趋势上看,重金属浓度出现两个高峰期,分别是 50~60 年代和 90 年代^[11,14]. 与这些研究者的结果类似的是,潮滩沉积物柱样也揭示最近几十年来的重金属 Cd、Cr、Cu、Mn、Pb 和 Zn 的不断富集,并且在 2000 年左右重金属富集达到最高值. 前人研究中所获得的沉积物柱样绝大多数集中于临洪河口地区,研究结果表明大多数重金属元素为轻度污染或无污染,但是本研究区域在远离临洪河口以南的海州湾潮滩,本研究结果表明海州湾潮滩沉积物中除了重金属 Cr 和 Cu 表现为弱富集外,其他重金属元素均表现为强富集,并且人为来源的重金属通量较高. 造成这一差异的主要原因可能是由于潮滩的纳污、累积效应、海州湾水动力环境以及拦海工程西大堤的建设导致的. 由于临洪河是主要的排污口,河流入海受涨落潮流的影响,海州湾西部存在从北向南的沿岸流^[38],并且受地转偏向力影响临洪河入海水流南偏,这种水动力环境使得入海水流迅速向南扩散,并且随着远离河口水动力环境变弱,泥沙逐渐沉积下来^[17,22]. 所以虽然入海河流带来了大量的重金属污染物质,但是由于河口区较强的水动力环境的影响水体中大多数重金属元素并没有在河口区沉积,而是被水流向南输送,在水动力环境弱的滨岸潮滩带沉积下来,这样使得潮滩带的沉积物中重金属富集程度高于河口区. 同时潮滩是海陆之间的重要界面,自然风化形成的和人类活动输入的重金属通过悬浮泥沙的吸附和搬运积累于沿岸滩地,使潮滩成为重金属的重要归宿之一^[1]. 因此正是由于潮滩的纳污、累积效应,使得海州湾潮滩沉积物中的重金属表现出高富集现象. 并且 1994 年西大堤骨架工程建成后,将连云港西口封闭,使得海州湾沉积动力环境明显减弱,有利于泥沙沉积,潮滩淤涨速率加快^[39]. 研究表明,从 1994~2005 年海州湾南岸的潮滩向海淤涨 4 km 多^[26],因此西大堤的建设对海州湾潮滩重金

属富集产生重要影响.

从重金属富集系数和重金属通量来看,自 20 世纪 50 年代以来人类活动对海州湾潮滩沉积物造成了显著的重金属污染(图 5 和图 6),这与连云港的社会、经济发展有密切关系. 连云港是我国首批沿海 14 个开放城市之一,工业门类比较齐全,形成了以食品加工、化工、制药、纺织、机械、建材等行业为主的工业体系. 建国初期,全市工农业产值仅 1.84 亿元,其中农业总产值占 74%,因此在 20 世纪 50~60 年代海州湾潮滩重金属富集系数较小,人为输入的重金属通量小. 随着社会、经济的发展,连云港工业总产值逐年增加,但是增长缓慢,到 1980 年工业总产值仅为 15.96 亿元(图 7),因此这段时间海州湾潮滩沉积物中重金属逐渐累积,人为污染活动输入的重金属通量也逐渐增加. 虽然 20 世纪 80 年代连云港被定为沿海开放城市,但是其经济发展水平相对滞后,因此人类活动释放到环境中的重金属通量呈现相对下降的趋势. 从 20 世纪 90 年代中期开始,连云港社会、经济迅速发展,2001 年工业总产值高达 577.47 亿元,并且废水排放量成倍增长(图 7),同时由于西大堤建成,海州湾水动力条件发生变化,使得吸附重金属元素的泥沙更容易在潮滩上沉积下来. 工业快速发展,使得释放到环境中的重金属不断增加,这与海州湾潮滩沉积物柱样的人为污染重金属通量研究结果具有较好的一致性. 而从 2005 年以来连云港经济加快发展,国民生产总值加速攀升,新型工业化、城市化进程加快,产业结构得到了逐步调整和优化,同时政府切实履行监管职能,环境保护力度不断加大,环境质量实现了明显改善^[41],这可能使得海州湾潮滩沉积物柱样中人为来源的重金属通量减少. 另外,我国从 20 世纪 90 年

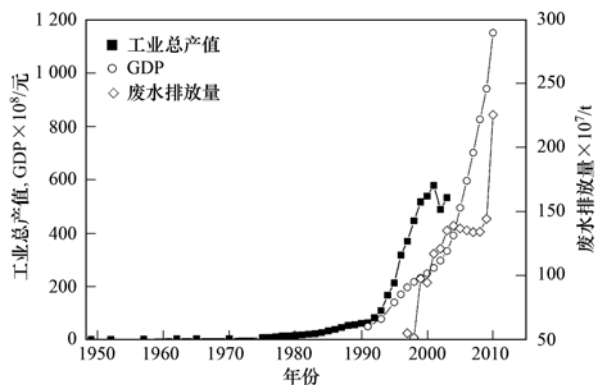


图 7 近 50 年来的连云港 GDP、工业总产值数据和废水排放量^[18,40]

Fig. 7 Data of GDP, GIOV and wastewater emissions in Lianyungang in past 50 years

代开始逐步淘汰含铅汽油,1997 年重点城市实施汽油无铅化,2000 年全国实现汽油无铅化^[42],这也可能使得潮滩沉积物中人为污染的铅含量出现下降。

4 结论

(1)海州湾潮滩沉积物以黏土质粉砂为主,黏土和粉砂含量均表现为由底向表总体增大的趋势,且平均粒径也表现出由底向表变小的变化趋势,并且表层沉积物表现为从岸向海逐渐变粗的变化趋势。

(2)海州湾潮滩表层沉积物中重金属元素含量普遍高于江苏滨海土壤背景值和黄海表层沉积物中的元素含量,说明海州湾潮滩受到一定程度的污染,但其值低于全球现代化前的最高背景值;粒度控制效应不是海州湾潮滩地区重金属分布的最主要影响因素,潮滩沉积物中的重金属元素之间具有良好的相关性,说明这些重金属元素具有来源一致性,且主要来源于工业和农业的污染物排放。

(3)通过对海州湾潮滩沉积物柱样的重金属分析,结合核素²¹⁰Pb 定年,研究发现近 50 年以来,海州湾潮滩明显受到人类活动的影响,从而造成沉积物中重金属 Cd、Cr、Cu、Mn、Pb 和 Zn 不断富集累积,除了重金属 Cr 和 Cu 表现为弱富集外,其他重金属元素均表现为强富集。

(4)总体上人为活动输入的重金属通量呈现出由底至表增加的趋势,但是也具有分段变化特征,并与区域社会、经济发展阶段相吻合。20 世纪 50 年代至 90 年代由于区域社会、经济发展水平相对较低,因此海州湾潮滩沉积物中人为污染活动输入的重金属通量逐渐增加,且重金属富集系数较小,人为输入的重金属通量小。上世纪 90 年代中期至 2005 年,连云港社会、经济快速发展,造成了释放到环境中的重金属持续增加,但是 2005 年以来随着区域产业结构优化调整,环境监管力度加强,潮滩沉积物中人为来源的重金属通量呈现出减少的趋势。

致谢:李君、李炎、闫洪强、韩宇等同学参加野外采样工作和实验分析,淮海工学院化学工程学院史大华副教授和江苏省海洋资源开发研究院王启发副教授协助指导部分实验分析,作者谨致谢忱!

参考文献:

- [1] Williams S C, Simpson H J, Olsen C R, *et al.* Sources of heavy metals in sediments of the Hudson river estuary [J]. *Marine Chemistry*, 1978, **6**(3): 195-213.
- [2] Hartmann P C, Quinn J G, Cairns R W, *et al.* Depositional history of organic contaminants in Narragansett Bay, Rhode Island, USA [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(4): 388-395.
- [3] Cantwell M G, King J W, Burgess R M, *et al.* Reconstruction of contaminant trends in a salt wedge estuary with sediment cores dated using a multiple proxy approach[J]. *Marine Environmental Research*, 2007, **64**(2): 225-246.
- [4] Çador I C, Carlos V, Fernando C. Accumulation of Zn, Pb, Cu, Cr and Ni in sediments between roots of the Tagus Estuary salt marshes, Portugal[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1996, **42**(3): 393-403.
- [5] Benoit G, Wang E X, Nieder W C, *et al.* Sources and history of heavy metal contamination and sediment deposition in Tivoli South Bay, Hudson River, New York[J]. *Estuaries and Coasts*, 1999, **22**(2): 167-178.
- [6] Tam N F Y, Wong Y S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps [J]. *Environmental Pollution*, 2000, **110**(2): 195-205.
- [7] Li Q S, Wu Z F, Chu B, *et al.* Heavy metals in coastal wetland sediments of the Pearl River Estuary, China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **149**(2): 158-164.
- [8] 黄小平,李向东,岳维忠,等. 深圳湾沉积物中重金属污染累积过程[J]. *环境科学*, 2003, **24**(4): 144-149.
- [9] 秦延文,孟伟,郑丙辉,等. 渤海湾天津段潮间带沉积物柱状样重金属污染特征[J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 268-273.
- [10] 王爱军,叶翔,李团结,等. 近百年来珠江口淇澳岛滨海湿地沉积物重金属累积及生态危害评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1306-1314.
- [11] 张存勇,冯秀丽,陈斌林. 海州湾南部近岸柱状沉积物重金属污染[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, **28**(5): 37-43.
- [12] 陈斌林,贺心然,王童远,等. 连云港近岸海域表层沉积物中重金属污染及其潜在生态危害[J]. *海洋环境科学*, 2008, **27**(3): 246-249.
- [13] 李玉,冯志华,李谷祺,等. 连云港近岸海域沉积物中重金属污染源及生态评价[J]. *海洋与湖沼*, 2010, **41**(6): 829-833.
- [14] 刘志勇,潘少明,殷勇,等. 临洪河口现代沉积环境及重金属元素的分布特征[J]. *地球化学*, 2010, **39**(5): 456-468.
- [15] 夏鹏,臧家业,王湘芹. 连云港近岸海域表层沉积物中重金属的地球化学特征及其源解析[J]. *海洋环境科学*, 2011, **30**(4): 520-524.
- [16] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志[M]. (第四分册) 北京: 海洋出版社, 1993. 354-422.
- [17] 吕海滨,周立,汤均博,等. 海州湾西部水动力数值模拟[J]. *淮海工学院学报(自然科学版)*, 2008, **17**(1): 72-75.
- [18] 连云港市环境保护局. 连云港市环境状况公报[R]. 连云港: 2010.1-20.
- [19] 连云港市海洋与渔业局. 2010 年连云港海洋环境质量公报[R]. 连云港: 2010.2-10.
- [20] McManus J. Grain size determination and interpretation[A]. In:

- Tucker M. Techniques in Sedimentology [C]. Oxford: Blackwell, 1988. 63-85.
- [21] Flynn W W. The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1968, **43** (1): 221-227.
- [22] 范恩梅, 陈沈良, 张国安. 连云港近岸海域沉积物特征与沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, **29**(2): 33-40.
- [23] 王娇娇. 连云港市临洪河口至西墅岸滩演变研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2007. 12-14.
- [24] 陈斌林. 连云港近岸海域环境演变及其对策研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006. 63-71.
- [25] Robbins J A. Geochemical and geophysical applications of radioactive lead[A]. In: Nriagu J O. The biogeochemistry of lead in the environment [C]. Amsterdam: Elsevier/North-Holland Biomedical Press, 1978. 285-375.
- [26] 彭俊, 陈沈良. 连云港近岸海域沉积物特征与沉积环境分析[J]. *海洋科学进展*, 2010, **28**(4): 445-454.
- [27] 夏增禄, 李森照, 李延芳. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987. 314-316.
- [28] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007. 96.
- [29] 任美镠, 朱季文, 朱大奎, 等. 江苏省海岸带与海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986. 93-98.
- [30] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1000.
- [31] Silva M A L, Rezende C E. Behavior of selected micro and trace elements and organic matter in sediments of a freshwater system in south-east Brazil[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **292**(1-2): 121-128.
- [32] Roach A C. Assessment of metals in sediments from lake Macquarie, New South Wales, Australia, using normalisation models and sediment quality guidelines [J]. *Marine Environmental Research*, 2005, **59**(5): 453-472.
- [33] Soto-Jimenez, Paez-Osuna F, Ruiz-Fernandez A C. Geochemical evidences of the anthropogenic alteration of trace metal composition of the sediments of Chiricahueto marsh (SE Gulf of California) [J]. *Environment Pollution*, 2003, **125**(3): 423-432.
- [34] 业渝光, 和杰, 刁少波, 等. 现代黄河三角洲 ZK226 孔岩心²¹⁰Pb、Al、Fe、Mn 和 Cu 的地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1991, **11**(4): 25-33.
- [35] Covelli S, Fontolan G. Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines[J]. *Environmental Geology*, 1997, **30**(1-2): 34-45.
- [36] Szefer P, Szefer K, Glasby G P, *et al.* Heavy-metal pollution in surficial sediments from the southern Baltic Sea of Poland[J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 1996, **31**(10): 2723-2754.
- [37] 姚书春, 薛滨. 东太湖钻孔揭示的重金属污染历史[J]. *沉积学报*, 2012, **30**(1): 158-165.
- [38] 王宝灿, 虞志英, 刘苍宇, 等. 海州湾岸滩演变过程和泥沙流动向[J]. *海洋学报*, 1980, **2**(1): 79-95.
- [39] 龚政, 张东生, 陈永平. 陆源污染物对连云港海域环境影响研究[J]. *海洋工程*, 2002, **20**(4): 72-77.
- [40] 江苏省统计局. 江苏统计年鉴[R]. 南京: , 2010. 10-20.
- [41] 刘洪昌, 葛绍勇. 连云港市产业结构调整分析[J]. *宏观经济管理*, 2010, **9**(1): 58-59.
- [42] 王婉, 刘咸德, 赵立蔚, 等. 用同位素方法评估天津市汽油无铅化进程[J]. *中国环境科学*, 2003, **23**(6): 627-630.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuang-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 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

国内外公开发行人