

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮑鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峰, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翔, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	《环境科学》征订启事 (1890)
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价

谢文平, 王少冰, 朱新平*, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡

(中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广州 510380)

摘要: 为了解珠江下游出海河道沉积物中重金属含量及各污染物的潜在生态危害程度, 用电感耦合等离子质谱法和原子荧光法测定了 21 个样点沉积物中 13 种元素的总量, 及对底泥中主要重金属污染状况和潜在生态风险进行了评价. 结果表明, 珠江下游河道总 Fe、总 Mn 含量分别为 $41\,658.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1\,104.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 微量元素 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Cd、Sb、Pb 和 Hg 的平均值分别为 86.62、18.18、54.10、80.20、543.60、119.55、4.28、10.60、20.26、104.58 和 $0.520\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 地积累指数评价结果显示, 表层沉积物重金属污染程度顺序为: $\text{Cd} > \text{As} \approx \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Pb} \approx \text{Cu} \approx \text{Cr}$, 潜在生态风险程度大小顺序: $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr}$, Cd 是该水域污染和潜在生态风险最大的元素, 单项潜在生态风险与区域综合潜在生态风险一致. 珠江下游河道底泥 Cd、Hg 和 Pb 污染受输入影响北江大于西江和东江. 聚类分析结果表明, 研究站位潜在生态风险可分 5 类, 基本反映了站位分布及沉积物环境污染变化特征. 总体而言, 重金属污染和生态风险程度较高的江段有陈村-沙湾段、陈村-顺德港段及外海-虎跳门段, 北江及相关河道污染程度和潜在生态风险指数高于区域其他江段.

关键词: 珠江; ICP-MS; 地积累指数; 潜在生态风险指数; 聚类分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1808-08

Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River

XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, CHEN Kun-ci, PAN De-bo, HONG Xiao-you, YIN Yi

(Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China)

Abstract: In order to investigate the heavy metal concentrations and their potential ecological risks in surface sediments of lower reaches and estuary of Pearl River, 21 bottom sediment samples were collected from lower reaches and estuary of Pearl River. Total contents of Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sb, Pb and Hg in these samples were measured by the inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and the atomic fluorescence spectrometry (AFS) and using the index of geoaccumulation and the potential ecological risk index to evaluate the pollution degree of heavy metals in the sediments. Results indicated that the concentration of total Fe and total Mn were $41\,658.73$ and $1\,104.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively and toxic trace metals, such as Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sb, Pb and Hg were 86.62, 18.18, 54.10, 80.20, 543.60, 119.55, 4.28, 10.60, 20.26, 104.58 and $0.520\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The descending order of pollution degree of various metals is: $\text{Cd} > \text{As} \approx \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Pb} \approx \text{Cu} \approx \text{Cr}$, while the single potential ecological risk followed the order: $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr}$. The pollution extent and potential ecological risk of Cd were the most serious among all heavy metals. The distribution pattern of Cd individual potential ecological risk indices is exactly the same as that of general potential ecological risk indices for all heavy metals. Clustering analysis indicates that the sampling stations may be classified into five groups which basically reflected the characteristics of the heavy metal contamination and sedimentation environments along the different river reaches in lower reaches and estuary of Pearl River. In general, the serious heavy metal pollution and the high potential ecological risk existed in three river reaches: Chengcun-Shawan, Chengcun-Shundegang and Waihai-Hutiaomen. The pollution degree and potential ecological risk are higher in related river reaches of Beijiang than that in other lower reaches and estuary of Pearl River.

Key words: Pearl River; ICP-MS; index of geoaccumulation; potential ecological risk; cluster analysis

珠江口是我国三大出海口之一, 北江、西江和东江在珠江三洲交汇后形成河网后经八大出海口汇入南海, 珠江口及其相关水网是南海北部陆源物质主要受纳水体及输入通道, 同时也是珠江鱼类洄游通道及南方主要渔业产区^[1,2]. 近年来随该地区经济快速增长, 工业废水和生活污水大量排放, 研究显示珠江河网区域微量元素残留呈现升高的趋势, 重金属直接或间接造成该水域污染时有发生^[3,4]. 河口水域是陆地径流与海水的交汇区域, 同时是陆源污染物输入海洋的主要通道, 每年由陆地向海洋输送

物质中 80% 以上由河口输入, 其中包括 90% 以上 Ag、Co、Cr 及 50% Cd、Cu、Hg^[5]. 河口水域水的存留时间短, 水中污染物含量易受潮汐、盐度变化等多种因素影响, 物理、化学和生物作用较海洋更为激烈, 具有动态和多变的特点, 而沉积物中污染物经长期积累污染物浓度相对较稳定^[6]. 作为污染物的汇和

收稿日期: 2011-08-31; 修订日期: 2011-10-28

基金项目: 广东省科技厅农业攻关子项目(2006B20701001)

作者简介: 谢文平(1971~), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为环境与质量安全, E-mail: xwp7118@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhuxinping_1964@yahoo.com.cn

源,沉积物重金属污染分析,在水环境重金属污染评估中占重要位置^[7~9].研究表明排入水体的重金属能通过各种途径逐步沉积至底泥中,由于底泥有极强的富集作用,较水体能更好地体现河段污染的规律性^[10,11].开展对沉积物中污染物分析评价较水质分析而言更具代表性,分析测试也更为可靠^[12].鉴于沉积物和生物体对重金属元素有强富集作用,对环境和人们健康产生现实和潜在风险^[13],本研究开展对珠江口及下游河网段底泥主要元素的含量调查,并采用地积指数法、潜在生态风险指数和聚类分析等方法评价比较不同河道重金属污染现状、生态风险及沿程污染输入及变化规律,以期为全面了解污染现状及变化趋势,为该水域污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样时间于2008年1月及2008年7月.采样点如图1所示,实验共设21个采样点,分为河网和河口样点,河网设13个采样点,分别为广利(N1)、金利(N2)、三水(N3)、高明(N4)、九江(N5)、小塘(N6)、西樵(N7)、陈村(N8)、榕桂(N9)、沙湾(N10)、顺德港(N11)、小榄(N12)、外海(N13),河口设8个采样点分别为虎门(S1)、蕉门(S2)、洪奇门(S3)、横门(S4)、磨刀门(S5)、鸡啼门(S6)、虎跳门(S7)和崖门(S8).采用抓斗式采泥器采集表层沉积物样品置于玻璃器皿.用塑料勺取中央未受干扰的表层0~2 cm泥样于聚乙烯袋,0~4℃下保存.

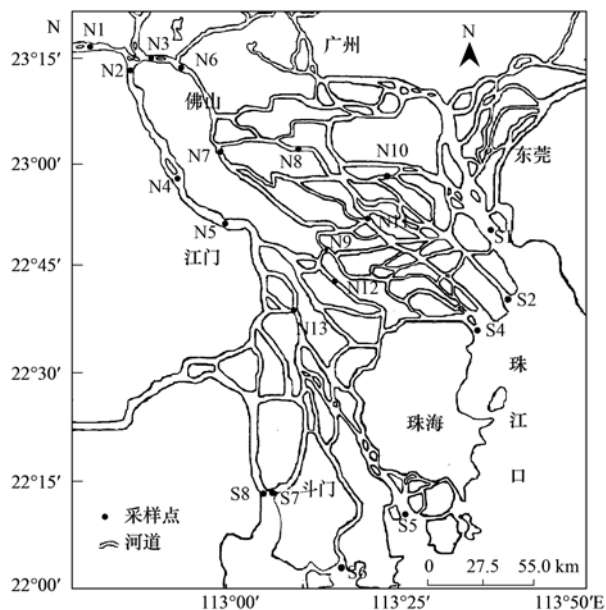


图1 珠江出海口及下游河段采样点分布示意

Fig. 1 Study area map with sample locations in lower reaches and estuary of Pearl River

1.2 样品处理

底泥经自然风干,去除砂砾、石块、草等异物,在烘箱内,于105℃下烘干至恒重,玛瑙研钵研磨后过200目筛后,在干燥器中存放备用.

1.3 分析方法

聚乙烯和玻璃容器在14%的硝酸中浸泡24 h以上,并用去离子水冲洗低温烘干.试剂所用酸为优级纯度外,其余为分析纯.样品经处理后采用 HNO_3 - HF - HClO_4 高温消解,Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Cd、Sb和Pb用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Agilent 7500),Hg用原子荧光光度计(AFS-930北京吉天仪器有限公司)测定.

1.4 质量控制

分析中用3个平行样和环境标准样品(ESS-4)分别控制样品分析的精确性和准确性,重金属元素平行样的相对误差<10%,标准物重金属回收率在95%~120%之间.仪器最低检出限Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Cd、Sb、Pb和Hg分别为 32.60×10^{-3} 、 20.13×10^{-3} 、 1598×10^{-3} 、 2.67×10^{-3} 、 13.43×10^{-3} 、 83.6×10^{-3} 、 192.5×10^{-3} 、 4.04×10^{-3} 、 94.94×10^{-3} 、 5.444×10^{-3} 、 5.834×10^{-3} 、 13.21×10^{-3} 和 $500 \times 10^{-3} \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.5 评价方法

1.5.1 污染程度评价方法

采用德国学者Müller提出的地积累指数法^[14~17].其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [c_i / (1.5 \times B_i)]$$

式中, I_{geo} 为地积累指数, c_i 为沉积物中某一重金属的实测值; B_i 为所测重金属地球化学背景值,采用广东省土壤背景值Cu为 $12.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Zn为 $42.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Ni为 $11.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cr为 $40.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Pb为 $32.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cd为 $0.026 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、As为 $7.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Hg为 $0.041 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[18].根据 I_{geo} 数值将重金属污染程度共分7个等级,如表1所示^[19,20].

1.5.2 潜在生态风险评价方法

采用Hakanson提出的潜在生态危害指数法评价^[21,22],计算公式如下,单一污染元素的潜在生态风险计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times c_s^i / c_n^i$$

式中, E_r^i 为单一污染元素的潜在生态风险指数; T_r^i 为单个污染元素的毒性响应参数; c_s^i 为沉积物中污染元素的实测浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c_n^i 为沉积物中重金属元素的背景值含量,采用工业化以前沉积物中重

表 1 地积累指数与底泥污染程度评价

Table 1 Index geoaccumulation and contamination grade assessment of heavy metal in sediments							
I_{geo}	≤ 0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	> 5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无 ~ 中	中	中 ~ 强	强	强 ~ 极强	极强

金属的最高背景值. Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As 和 Hg 的生物毒性系数 (T_r^i) 分别为 5、1、2、5、30、10 和 40^[23~25]. 多种污染元素的综合评价方法公式为:

$$RI = \sum E_r^i$$

式中, RI 为多项金属的综合潜在生态风险指数, 为单项潜在生态风险指数 (E_r^i) 之合. 重金属单项潜在生态风险指数 (E_r^i)、综合潜在生态风险指数 (RI) 和潜在生态风险等级如表 2 所示^[23~26].

表 2 生态风险评价指数与分级标准

Table 2 Ecological risk index and classification of risk intensity			
E_r^i	单项污染物生态风险等级	RI	综合潜在生态风险等级
$E_r^i < 40$	低风险	RI < 150	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	较高风险	$300 \leq RI < 600$	重
$160 \leq E_r^i < 320$	高风险	RI ≥ 600	严重
$E_r^i \geq 320$	很高风险		

2 结果与讨论

2.1 珠江出海口底泥重金属含量总体状况描述

珠江下游河网及出海口表层底泥主要元素含量统计见表 3. 大量元素 Fe 和 Mn 含量分别为

41 658. 73和1 104. 73 mg·kg⁻¹, 在表层沉积物中所占比例分别为 4. 17% 和 0. 11%, 总 Fe 含量高于北方河流如黑龙江 3. 19 g·kg⁻¹、黄河 2. 56 g·kg⁻¹, 略低于与闽江 (4. 56 g·kg⁻¹) 和长江 (4. 69 g·kg⁻¹), 与陈静生等报道的珠江所测值相近^[27], 微量元素

表 3 珠江下游河段表层沉积物各重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 3 Heavy metal contents in surface sediments of in Pearl River estuary/mg·kg ⁻¹													
采样地点	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb	Hg
虎门	46. 88	378. 82	28 007. 5	7. 175	25. 94	42. 80	335. 13	33. 83	3. 189	1. 75	2. 38	44. 14	0. 126
蕉门	68. 28	597. 88	27 333. 3	13. 56	36. 18	41. 70	270. 76	31. 59	2. 07	3. 55	11. 80	35. 11	0. 16
洪沥门	79. 86	983. 250	43 507. 5	19. 07	71. 85	62. 95	753. 51	133. 73	4. 315	4. 94	10. 38	64. 82	0. 274
横门	56. 91	736. 00	44 005	15. 46	97. 85	64. 85	618. 37	107. 15	3. 674	2. 69	8. 36	53. 40	0. 075
磨刀门	59. 5	1 090	39 960	16. 10	44. 85	69. 95	613. 25	133. 1	4. 018	7. 44	17. 100	101. 70	0. 223
鸡啼门	55. 9	1 039	41 325	16. 91	51. 08	96. 25	524. 75	30. 2	5. 295	7. 81	9. 80	62. 65	0. 036
虎跳门	89. 46	1 871. 5	49 800	37. 97	70	86. 90	640. 65	103. 5	7. 840	15. 81	37. 95	75. 55	0. 229
崖门	67. 31	1 102	47 215	19. 44	59. 45	76. 25	668. 28	114. 65	4. 2105	3. 58	10. 905	67. 45	0. 373
河口均值	65. 51	974. 81	40 144. 16	18. 21	57. 15	67. 71	553. 09	85. 97	4. 33	5. 95	13. 58	63. 10	0. 187
广利	49. 63	954. 12	33 024	14. 19	10. 36	29. 27	520. 73	85. 4	2. 83	1. 35	5. 717	57. 22	0. 045
金利	47. 19	366. 35	37 401	5. 71	15. 10	22. 42	636. 15	49. 9	4. 88	0. 87	10. 881	81. 85	0. 078
陈村	207. 85	2 208. 50	54 825	43. 03	90. 63	195. 60	781. 88	176. 25	8. 93	17. 67	45	82. 85	0. 063
沙湾	125. 32	1 164. 52	36 167	16. 62	63. 00	100. 36	530. 36	216. 19	3. 68	9. 38	26. 88	138. 33	2. 43
顺德港	130. 48	1 730. 25	78 350	27. 55	69. 25	177. 73	809. 63	1429. 25	6. 31	36. 23	36. 2	457. 50	2. 318
高明	46. 88	786. 00	279 25	12. 4	35. 25	34. 68	441. 25	67. 38	2. 61	3. 59	12. 2	60. 78	0. 06
三水	130. 53	1 597	47 394	21. 4	68. 56	99. 54	524. 63	59. 61	4. 3	26. 07	24. 18	135. 51	2. 53
小塘	87. 69	1 312. 31	39 507	17. 81	60. 25	75. 49	409. 73	36. 55	2. 82	14. 14	16. 34	112. 18	0. 244
西樵	77. 53	401. 52	33 512. 12	7. 08	27. 30	46. 62	274. 85	37. 59	2. 47	14. 32	12. 633	67. 06	0. 476
九江	124. 44	1 216. 59	40 750	16. 4	52. 59	62. 27	441. 13	128. 16	3. 45	6. 29	10. 52	77. 73	0. 848
外海	77. 41	1 269	50 825	15. 05	60. 30	71. 33	796. 37	116. 48	4. 71	32. 14	24. 88	234. 33	0. 078
小榄	52. 5	996. 75	33 750	10. 95	42. 23	52. 35	308. 75	177. 23	1. 9	2. 35	42. 9	72. 63	0. 081
榕桂	137. 41	1 398. 00	40 250	28	84. 05	174. 93	515. 38	242. 75	6. 4	10. 57	48. 35	113. 45	0. 171
河网均值	99. 60	1 184. 68	42 590. 78	18. 17	52. 22	87. 89	537. 76	140. 21	4. 25	13. 46	24. 36	130. 11	0. 725
区域均值	86. 62	1 104. 73	41 658. 73	18. 18	54. 10	80. 20	543. 60	119. 55	4. 28	10. 60	20. 26	104. 58	0. 520

Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 的平均值分别为 86.62、54.10、80.20、543.60、119.55、10.60、104.58 和 0.520 mg·kg⁻¹。主要有害重金属元素 Cd、Pb、Hg、As,在河网平均含量高于河口,这可能与河口受到潮汐、盐度和氧化还原电位变化影响,河口重金属向可交换态和自由态转换较快有关。对上游采样点数据分析发现,在北江汇入样点三水、小塘测得 Cd、Pb 和 Hg 浓度高于区域均值,说明河网区域 Cd、Pb 和 Hg 受上游输入影响。北江上游地区铅锌矿采冶发达,易造成 Cd、Zn、Pb 元素等污染^[28],并向下游江段输送。

沉积物中元素的浓度主要取决于自然沉积物母质含量,但同时又受人为活动影响,其影响程度取决于输入水体污染物的数量^[9]。不同元素矩阵分析在一定程度上能反映元素的矿物来源、存在形式和污染状况,沉积物元素含量的矩阵分析见表 4,在 13 种元素中 Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Se 元素间相关性,除 Fe-Cr 为显著外($P < 0.05$)其余都为极显著($P < 0.01$),说明这些元素来源相同,在沉积物中有相同或相似的存在形式,主要为次生的黏土矿物,通过共沉淀或吸附积累在沉积物中^[29~31]。Zn、As、Cd、Sb、Pb 和 Hg 与其它元素相互之间相关系数较低,可能与沉积环境变化和污染影响有关。

2.2 珠江下游河段污染程度评价

对水体沉积物中重金属评价方法,目前在国内外,较广泛应用的为德国学者 Müller 提出的地积累指数法,该方法能较直观地反映外源重金属污染级别综合考虑了沉积物重金属元素地球化学背景值和人为污染因素,数据具有较高的可比性^[14~17]。分析了珠江下游河段 8 种主要重金属元素地积累指数,结果见表 5,珠江下游出海河段底泥重金属的污染

程度由强至弱依次为: Cd > As > Zn > Hg > Pb ≈ Cu ≈ Cr。

Cd 是珠江出海河段污染最主要元素,区域地积累指数为 7.41,污染程度极强;河口污染程度由东向西呈污染升高的趋势。其中东四口门(虎门、蕉门、洪沥门、横门)地积累指数为 5.49~6.11 低于西四口门(磨刀门、鸡啼门、虎跳门、崖门)6.58~8.22;河网段污染程度大于出海口,污染程度最高站位为顺德港、外海地积累指数为 9.86 和 9.69,污染程度极强。

As 污染程度仅次于 Cd,区域地积累指数为 3.07,污染程度为强,污染程度达强以上的站位达 54.5%,最高的样点为顺德港,污染地积累指数级数为 5.29,污染程度达极强,河口地积累指数均值为 2.72,低于河网 3.29,上游站位金利、广利、三水、小塘,污染程度在中-强以下。

Zn 污染程度为中-强,不同站位污染指数 2.08~3.66 之间,污染程度变化较小。

Hg 污染程度为中,但个别样点污染水平较高,沙湾、顺德港和小塘污染程度极强,呈点污染特征。

Cu、Pb、Cr 的地积累指数在 0~1 之间,即无-中度污染,在所测水域污染程度较低。

2.3 珠江下游河段底泥中重金属的潜在风险评价

采用 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法评价,能综合考虑了重金属毒性、在沉积中的普遍的迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感性,是目前采用较多的方法^[21,22]。珠江下游河段及河口底泥中 7 种重金属的单项潜在生态风险指数和潜在生态风险综合指数见表 6。底泥中区域潜在生态风险综合指数(RI)为 101.48~1 879.54,平均为 592.77,生态风险等级为重。生态等级为严重的样

表 4 珠江下游河段沉积物元素含量的相关矩阵¹⁾

	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Sb	Pb	Hg
Cr	1	0.777	<u>0.540</u>	0.775	0.626	0.842	0.352	0.518	0.640	<u>0.539</u>	0.648	0.353	<u>0.460</u>
Mn		1	0.708	0.917	0.668	0.793	<u>0.554</u>	0.524	0.742	0.628	0.722	0.434	0.330
Fe			1	0.636	0.583	0.705	0.772	0.701	0.678	0.770	<u>0.469</u>	0.800	0.431
Co				1	0.709	0.806	<u>0.547</u>	<u>0.463</u>	0.856	<u>0.458</u>	0.687	0.258	0.146
Ni					1	0.717	0.516	<u>0.453</u>	0.576	0.404	<u>0.522</u>	0.256	0.224
Cu						1	<u>0.486</u>	0.700	0.764	0.588	0.743	<u>0.528</u>	0.358
Zn							1	<u>0.488</u>	0.706	<u>0.469</u>	0.265	<u>0.503</u>	0.137
As								1	0.420	<u>0.472</u>	0.64	0.763	<u>0.48</u>
Se									1	<u>0.460</u>	0.593	0.313	0.066
Cd										1	<u>0.486</u>	0.816	0.527
Sb											1	0.399	0.214
Pb												1	0.587
Hg													1

1) 黑体数字代表在 $\alpha = 0.05$ 水平下不显著,下划线代表在 $\alpha = 0.05$ 水平下显著,其余代表在 $\alpha = 0.01$ 水平下显著

表 5 珠江出海口表层沉积物地积累指数及重金属污染程度评价

Table 5 Index of geoaccumulation and contamination grade assessment of heavy metal in Pearl River estuary														
站位	Cr		Zn		Cu		Pb		Cd		As		Hg	
	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级
虎门	-0.39	0	2.39	3	-0.50	0	-0.12	0	5.49	6	1.63	1	1.03	2
蕉门	0.15	1	2.08	3	-0.54	0	-0.45	0	6.51	6	1.53	1	1.38	2
洪沥门	0.38	1	3.56	4	0.06	1	0.43	1	6.98	6	3.61	4	2.16	3
横门	-0.11	0	3.27	4	0.10	1	0.15	1	6.11	6	3.29	4	0.29	1
磨刀门	-0.04	0	3.26	4	0.21	1	1.08	2	7.58	6	3.60	4	1.86	2
鸡啼门	-0.13	0	3.03	4	0.67	1	0.38	1	7.65	6	1.46	1	-0.77	0
虎跳门	0.54	1	3.32	4	0.52	1	0.65	1	8.66	6	3.24	4	1.90	2
崖门	0.13	1	3.38	4	0.33	1	0.49	1	6.52	6	3.39	4	2.60	3
河口均值	0.06	1	3.04	4	0.11	1	0.33	1	6.94	6	2.72	3	1.31	2
金利	-0.37	0	3.31	4	-1.43	0	0.77	1	4.48	5	2.19	3	0.34	1
广利	-0.30	0	3.02	4	-0.79	0	0.25	1	5.11	5	2.96	3	-0.45	0
顺德港	1.09	2	3.66	4	1.55	2	3.25	4	9.86	6	5.29	6	5.24	6
陈村	1.76	2	3.61	4	1.69	2	0.79	1	8.82	6	4.01	5	0.03	1
沙湾	1.04	2	3.05	4	0.73	1	1.53	2	7.91	6	4.30	5	5.30	6
高明	-0.39	0	2.78	3	-0.80	0	0.34	1	6.52	6	2.62	3	-0.04	0
小塘	0.52	1	2.68	3	0.32	1	1.22	2	8.50	6	1.74	2	1.99	2
三水	1.09	1	3.03	4	0.72	1	1.50	2	9.38	6	2.44	3	5.36	6
西樵	0.34	1	2.10	3	-0.38	0	0.48	1	8.52	6	1.78	2	2.95	3
九江	1.02	1	2.78	3	0.04	1	0.70	1	7.33	6	3.55	4	3.79	4
外海	0.34	1	3.64	4	0.24	1	2.29	3	9.69	6	3.41	4	0.34	1
小榄	-0.22	0	2.27	2	-0.21	0	0.60	1	5.91	6	4.02	5	0.40	1
榕桂	1.16	1	3.01	4	1.53	1	1.24	2	8.08	6	4.47	5	1.48	2
河网均值	0.54	1	2.99	3	0.25	1	1.15	2	7.70	6	3.29	4	2.06	3
区域均值	0.36	1	3.01	4	0.19	1	0.84	1	7.41	6	3.07	4	1.77	2

表 6 珠江下游河段底泥中重金属污染潜在风险评价

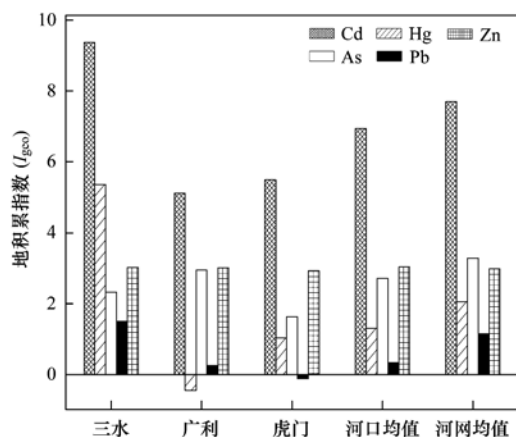
Table 6 Evaluation on potential risk index of heavy metal in the sediments of lower reaches and estuary of Pearl River									
采样点位置	E_r^i							RI	综合潜在生态 风险等级
	Cr	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg		
虎门	1.56	4.19	7.13	8.83	105.00	22.55	20.16	169.42	中等
蕉门	2.28	3.38	6.95	7.02	213.00	21.06	25.60	279.29	中等
洪沥门	2.66	9.42	10.49	12.96	296.40	89.15	43.84	464.92	重
横门	1.90	7.73	10.81	10.68	161.40	71.43	12.00	275.95	中等
磨刀门	1.98	7.67	11.66	20.34	446.40	88.73	35.68	612.46	严重
鸡啼门	1.86	6.56	16.04	12.53	468.60	20.13	5.76	531.48	重
虎跳门	2.98	8.01	14.48	15.11	948.60	69	36.64	1 094.82	严重
崖门	2.24	8.35	12.71	13.49	214.80	76.43	59.68	387.7	重
河口均值	2.18	6.91	11.28	12.62	356.78	57.31	29.92	489.76	重
广利	1.65	6.51	5.85	11.44	40.50	56.94	7.20	130.09	低
金利	1.57	7.95	3.74	16.37	26.10	33.27	12.48	101.48	低
顺德港	4.35	10.12	29.62	91.50	1 086.90	286.17	370.88	1 879.54	严重
陈村	6.93	9.77	32.60	16.57	530.10	117.50	10.08	723.55	严重
沙湾	4.18	6.63	16.73	27.67	281.40	144.13	388.8	869.54	严重
高明	1.56	5.52	5.78	12.16	107.70	44.92	9.60	187.24	中等
三水	4.35	6.56	16.59	27.10	782.10	39.74	404.8	1 281.24	严重
小塘	2.92	5.12	12.58	22.44	424.20	24.37	39.04	530.67	重
西樵	2.58	3.44	7.77	13.41	429.60	25.06	76.16	558.02	重
九江	4.15	5.51	10.38	15.55	188.70	85.44	135.68	445.41	重
外海	2.58	9.95	11.89	46.87	964.20	77.653	12.48	1 125.62	严重
小榄	1.75	3.86	8.725	14.53	70.50	118.15	12.96	230.475	中等
榕桂	4.580	6.44	29.16	22.69	317.10	161.83	27.36	569.16	重
河网均值	3.32	6.72	14.72	26.02	403.78	93.47	115.96	664.00	严重
区域均值	2.89	6.79	13.4	20.92	385.87	79.70	83.18	592.77	重

点为 6 个, 达所测样点的 28.57%, 生态等级为重的样点为 8 个, 达所测样点的 38.10%。

河网生态风险综合指数 (RI) 均值为 664.00, 高于河口 489.76, 其中顺德港和外海生态风险综合指数最高分别为 1 879.54 和 1 281.24。河口潜在生态风险综合指数由低至高排列顺序为: 虎门 < 蕉门 < 横门 < 洪沥门 < 崖门 < 鸡啼门 < 磨刀门 < 虎跳门。Cd 的单项污染物生态风险指数 E_r^i 为 26.10 ~ 1 086.90, 区域均值为 385.87 ($E_r^i \geq 320$), 单项污染物生态风险等级为很高风险, 对区域综合潜在生态风险指数 RI 的贡献率为 65.10%, 是造成重金属污染潜在生态风险最主要因子, 其余对污染潜在生态风险影响较大的因子还有 Hg 和 As, 单项污染物生态风险指数 E_r^i 分别为 12.48 ~ 404.8 和 21.06 ~ 286.17, 除个别站位较高风险外, 其余大部分站位在中等生态风险以下。所测 7 种重金属的单项潜在生态风险指数均值排列顺序为: Cd > Hg > As > Pb > Cu > Zn > Cr。Zn 潜在生态风险指数排序低于污染地积累指数, 这与其较低生物毒性系数有关。

2.4 珠江下游河段沉积物重金属污染评价结果比较与分析

2.4.1 珠江下游河段沉积物重金属污染输入分析



珠江河网主要由西江、北江和东江交汇后分流形成, 选择珠江河网主要干流汇入样点对沉积物重金属污染程度及潜在生态风险进行分析比较有利于了解污染输入来源。三水 (北江)、广利 (西江)、虎门 (东江) 河网及河口底泥污染程度及潜在生态风险比较见图 2。Cd、Hg 和 Pb 在底泥污染程度及潜在生态风险比较, 三水 (北江) 污染指数高于河网均值, 而广利 (西江) 和虎门 (东江) 污染指数均低于河网, 其排列顺序为: 三水 (北江) > 河网均值 > 广利 (西江) > 河口均值 > 虎门 (东江), 以许振成等采用地积指数法对北江干流评价 Cd、Hg 和 Pb, 评价指数分别为 8.3、3.4 和 1.8, 均高于河网指数 7.70、2.06 和 1.15^[11], 说明珠江下游河道底泥 Cd、Hg 和 Pb 污染主要受北江输入影响, 西江和东江对该区域影响较小。北江上游粤北地区拥有丰富的矿产资源, 有色冶金企业较多, 废水排放造成重金属污染时有发生, 由于北江是粤北地区污染物主要受纳水体, 重金属污染水平较高, 如 2006 年底韶关冶炼厂重金属废水排放曾造成北江 Cd 流域性污染, 因此北江重金属污染输入是造成河网区北江相关河道沉积物 Cd、Hg 和 Pb 等污染程度和潜在生态风险较高的原因之一。

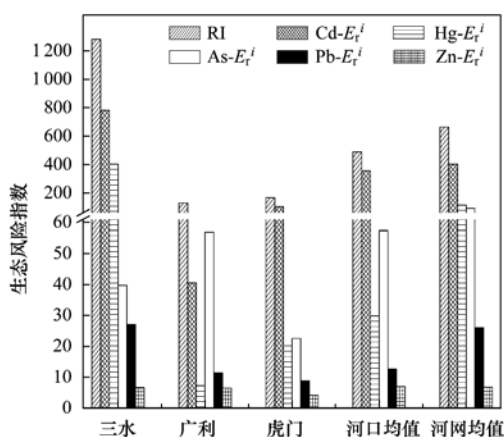


图 2 珠江下游河道不同采样点底泥重金属污染程度及潜在生态风险比较

Fig. 2 Comparison of extent and potential ecological risk of heavy metals contamination of the sediments in different sampling sites of lower reaches and estuary of Pearl River

2.4.2 珠江下游河段重金属污染潜在生态风险聚类分析

利用 SPSS Statistics 对所测水域 21 个站位潜在生态风险进行聚类分析, 比较不同江段及河口的变化规律, 系统聚类分析采用欧式距离, 组间联接的方法得到聚类树状图 (图 3)。结果表明, 研究区站位可分 5 类, 第一类包括广利、金利、高明、九江、榕桂、小榄、虎门、洪沥门、蕉门、横门、崖门共 11 个站位, 第

二类包括小塘、西樵、陈村、磨刀门、鸡啼门。第三类为沙湾, 第四类为虎跳门和外海, 第五类为三水和顺德港。通过沿程分析发现不同站位聚类图距离基本与其不同河段的沿程分布相一致, 基本体现了沉积环境和沿程污染特征。西江干流及相关支流站位主要包括在第一类中, 上游段广利-金利综合潜在生态风险指数 (RI) 101.48 ~ 130.09, 潜在生态风险为低; 中游段高明-九江-榕桂处潜在生态风险为由中

逐步变为强,受北江支流输入影响,沿程污染潜在风险指数有所提高.总体而言该江段沉积物潜在生态风险聚类分析距离较近,体现了沉积环境和元素分布特征相对稳定,沿程没有明显的重金属污染源.下游外海-虎跳门出海河道属聚类分析第四类,生态风险指数在1 125.62 ~ 1 094.82,污染程度严重,系统聚类分析与上游站位距离较远,分析该江段可能存在严重而且持续的污染.北江相关江段,上游站位三水属第五类,由于受北江污染输入及西江汇合影响潜在生态风险极高.小塘-西樵-陈村段属聚类分析第二类,生态风险指数在530.6 ~ 723.55之间,潜在生态风险指数为强,该江段污染程度有逐步升高趋势,但没有强的持续污染源,而下游分支段陈村-沙湾段,聚类分析由第二类过度到第三类,潜在风险指数也由强过渡到严重,陈村-顺德港由聚类分析的第二类升至第五类,生态风险指数由530.6升至1 879.54,聚类分析距离较远,该江段有强污染源.8个出海口,由于受上游不同江段水流混合及潮汐影响,沉积环境受理化影响复杂,聚类分析站位较分散没有体现明显的分布特征,站位主要包含于第一和第二站位中.

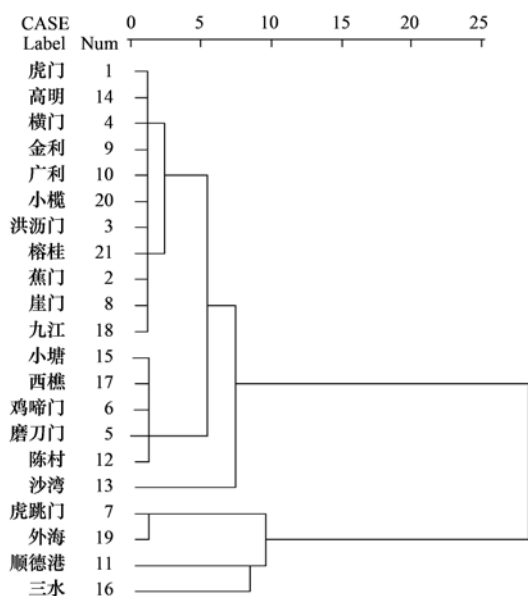


图3 珠江下游河段站位聚类图

Fig. 3 Cluster of sampling stations in the lower reaches and estuary of Pearl River

3 结论

(1)珠江下游出海河段表层沉积物重金属污染程度顺序依次为: $Cd > As \approx Zn > Hg > Pb \approx Cu \approx Cr$, Cd 污染程度为极强污染, As 、 Zn 为强污染, Hg 为中等, Pb 、 Cu 和 Cr 污染程度较低.

(2)单项重金属对珠江下游出海河段潜在生态风险危害程度大小顺序为: $Cd > Hg > As > Cu > Pb > Zn > Cr$, Cd 是最主要的潜在生态风险贡献因子, Hg 和 As 在部分采样点具中等潜在生态风险.

(3)不同江段潜在生态风险聚类分析体现了沉积环境和沿程污染特征,其中陈村-沙湾段、陈村-顺德港段及外海-虎跳门段重金属污染和生态风险程度较高;北江及相关河道 Cd 、 Hg 和 Pb 污染受上游输入影响明显,污染程度高于其他江段.

参考文献:

- [1] 林卫强, 李适宇. 珠江口水环境可持续发展的探讨 [J]. 海洋环境科学, 2002, 21(4): 54-58.
- [2] 王增焕, 林钦, 李纯厚, 等. 珠江口重金属变化特征与生态评价 [J]. 中国水产科学, 2004, 11(3): 214-219.
- [3] 李翠田, 王淑红, 于红兵, 等. 珠江口海域表层沉积物中重金属含量分布特征及其环境质量评价 [J]. 海洋环境科学, 2009, 28(5): 535-538.
- [4] 杨晓云, 温勇, 杜建伟, 等. 沉积物质量基准在生态风险评估方面的应用 [J]. 环境科学与技术, 2009, 36(6): 381-386.
- [5] 张经. 中国主要河口的生物地球化学研究——化学物质的迁移与环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1997: 1-3.
- [6] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评估 [J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 521-525.
- [7] Ankley G T, Lodge K, Call D J, et al. Integrated assessment of contaminated sediments in the lower Fox River and Green Bay, Wisconsin [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1992, 23(1): 46-63.
- [8] El-Nemr A. Assessment of heavy metal pollution in surface muddy sediments of Lake Burullus, southeastern Mediterranean, Egypt [J]. Journal of Aquatic Biology and Fisheries, 2003, 7(4): 67-90.
- [9] 林春野, 何孟常, 李艳霞, 等. 松花江沉积物金属元素含量、污染及地球化学特征 [J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2123-2130.
- [10] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 滇西泔江流域水体中重金属元素的地球化学特征 [J]. 地质通报, 2008, 27(7): 1072-1078.
- [11] 许振成, 杨晓云, 温勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价 [J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3262-3267.
- [12] 马德毅. 海洋沉积物的污染指示作用和监测方法 [J]. 海洋通报, 1993, 12(5): 89-97.
- [13] Jonathan M P, Sarkar S K, Roy P D, et al. Acid leachable trace metals in sediment cores from Sunderban Mangrove Wetland, India: an approach towards regular monitoring [J]. Ecotoxicology, 2010, 19(2): 405-418.
- [14] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geochemical Journal, 1969, 2: 108-118.
- [15] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现

- 状评价 [J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 732-736.
- [16] 万金保, 王建永, 吴丹. 乐安河沉积物重金属污染现状评价 [J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(11): 130-133.
- [17] 张跃军, 孙彬, 赵晓蕾. 乡村内河沉积物中的重金属污染评价及资源化利用 [J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1398-1402.
- [18] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] Förster U, Ahlf W, Calmano W. Sediment quality objectives and criteria development in Germany [J]. Water Science and Technology, 1993, **28**(8): 307-314.
- [20] 宋宪强, 雷恒毅, 余光伟, 等. 重污染感潮河道底泥重金属污染评价及释放规律研究 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(11): 2258-2268.
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [22] 冯慕华, 龙江平, 喻龙, 等. 辽东湾东部浅水区沉积物中重金属潜在生态评价 [J]. 海洋科学, 2003, **27**(3): 52-56.
- [23] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素 [J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1153-1162.
- [24] 汤莉莉, 牛生杰, 徐建强, 等. 外秦淮河疏浚后底泥重金属污染与潜在生态风险评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(2): 112-115.
- [25] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(3): 112-115.
- [26] 邴海健, 吴艳宏, 刘恩峰, 等. 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价 [J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 675-683.
- [27] 陈静生. 河流水质原理及中国河流水质 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 234-237.
- [28] 符志友, 杨元根, 吴丰昌, 等. 铅锌矿区地表环境中重金属元素的时空动态变化及生物有效性探讨 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, **27**(1): 89-97.
- [29] 陈守莉, 王平祖, 秦明周, 等. 太湖流域典型湖泊沉积物中重金属污染的分布特征 [J]. 江苏农业学报, 2007, **23**(2): 128-129.
- [30] 余辉, 张文斌, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价 [J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 437-444.
- [31] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3496-3502.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人