

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于δ¹³C观测的大气 CO₂ 来源解析 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N₂H₄ 下 SBR 中硝化微生物特性 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究

卓海华^{1,2}, 孙志伟¹, 谭凌智¹, 吴云丽¹, 兰静^{1*}

(1. 长江流域水环境监测中心, 武汉 430010; 2. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要: 三峡工程建设以来, 三峡水库干支流水文形势已发生了重大变化, 造成水体悬浮物沉降条件改变, 可能导致库区表层沉积物性状发生变化。通过对 2000~2015 年三峡水库干流江津至坝址段和嘉陵江、御临河、乌江、小江、大宁河、香溪河等主要支流表层沉积物中重金属污染物含量水平、时空变化及潜在生态风险变化趋势分析, 结果表明, 三峡库区在 2000~2015 年长江干流沉积物中铜、铅、锰、砷、汞元素各断面含量平均值区间分别为 46.5~85.7、43.8~65.1、784.2~910.6、8.44~11.91、0.193~0.236 mg·kg⁻¹; 支流沉积物中铜、铅、锰、砷、汞元素含量平均值区间分别为 16.5~85.6、25.8~74.8、573.7~996.3、6.96~13.31、0.160~0.232 mg·kg⁻¹。三峡水库干流局部河段左右岸表层沉积物中重金属含量存在较明显差异; 铜、铅、锰、砷、汞元素在表层沉积物中含量变化趋势各异, 不同水期干支流表层沉积物中重金属含量存在一定程度波动, 其中汞元素变化最为明显。不同元素在不同断面随时间变化趋势不完全一致。库区沉积物中铜、铅、锰、砷等元素含量呈现显著的正相关, 但砷与其他元素相关性低; 汞元素与其他重金属之间无明显相关性。地累积指数法评价表明, 三峡库区表层沉积物重金属总体处于较低富集水平, 但汞元素污染值得注意; 长江干流及除乌江外主要支流大部分时段表层沉积物重金属潜在生态风险指数变化较小, 只在部分时段出现升高的情形; 乌江表层沉积物重金属潜在生态风险指数 2008 年前处于相对较高水平, 但 2008 年后下降并趋于稳定。

关键词: 表层沉积物; 重金属; 时空变化; 生态风险; 趋势

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4633-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605001

Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area

ZHUO Hai-hua^{1,2}, SUN Zhi-wei¹, TAN Ling-zhi¹, WU Yun-li¹, LAN Jing^{1*}

(1. Yangtze Valley Water Environment Monitoring Center, Wuhan 430010, China; 2. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: With the construction progress of the Three Gorges Project, the hydrological situation of Three Gorges Reservoir changes greatly, which causes the changes of suspended solids precipitation conditions and surface sediment traits. This research analyzed the temporal and spatial variation of the heavy metal pollution in the surface sediment and the potential ecological risk trends during the years from 2000 to 2015 in the trunk stream of the Yangtze River from Jiangjin to the Three Gorges Dam area and some major tributaries, such as Jialing River, Yulin River, Wujiang River, Xiaojiang River, Xiangxi River. The results showed that the average content ranges of heavy metals (including Cu, Pb, Mn, As, Hg etc.) in surface sediments at the main stream monitoring sections during the study period were 46.5-85.7 mg·kg⁻¹ (Cu), 43.8-65.1 mg·kg⁻¹ (Pb), 784.2-910.6 mg·kg⁻¹ (Mn), 8.44-11.91 mg·kg⁻¹ (As), 0.193-0.236 mg·kg⁻¹ (Hg) respectively; The average content ranges of the heavy metals in surface sediments at the main stream monitoring sections during the study period were 16.5-85.6 mg·kg⁻¹ (Cu), 25.8-74.8 mg·kg⁻¹ (Pb), 573.7-996.3 mg·kg⁻¹ (Mn), 6.96-13.31 mg·kg⁻¹ (As), 0.160-0.232 mg·kg⁻¹ (Hg) respectively. The results also showed that there were obvious differences of the heavy metals content in some areas between the left and right bank of the trunk stream of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir area. The results also showed that the concentration variation trends of the heavy metals were different in the surface sediments, such as Cu, Pb, Mn, As and Hg. The content of Hg was the most influenced element by the water period effect. The concentration variation trends of these elements were different at different monitoring sections during the construction and water harvesting progress of the Three Gorges project. The contents of Cu, Pb, Mn and As in sediment from the Three Gorges Reservoir area showed strong positive correlations between each other. But there was a low correlation between the content of As and those of other elements. There was no significant correlation between the content of Hg and those of other heavy metal elements. According to the

收稿日期: 2016-05-01; 修订日期: 2016-07-11

基金项目: 国务院三峡工程建设委员会办公室三峡水库运行维护管理资金项目 (JJ2015-008); 水资源高效开发利用重点专项 (2016YFC0402207)

作者简介: 卓海华(1978~), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为流域水环境监测评价, E-mail: harderjoe@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: 89073107@qq.com

geoaccumulation index analytical method, the contents of the heavy metals in surface sediments in the Three Gorges Reservoir area were generally at low enrichment level. But the pollution caused by Hg should be paid attention. The change of potential ecological risk index was small in the main stream and the major tributaries of the Yangtze River (except Wujiang River) in most of the time. It should also be noted that the change of potential ecological risk index fluctuated obviously at a high level before the year of 2008, and then the change fluctuations trends descended with time and tended to be stable.

Key words: surface sediment; heavy metal; temporal and spatial variation; ecological risks; trends

沉积物是水体重金属重要归宿和主要储存场所,也是潜在污染受体和污染源^[1]. 在一定条件下,沉积物和水体中重金属发生迁移和转化,水体重金属污染物随着悬浮物沉降进入沉积物,而沉积物在水体扰动、氧化还原条件变化等条件下向水中释放重金属. 因此,对沉积物中重金属污染状况进行研究是分析水体重金属污染重要途径. 目前,已经有较多针对沉积物中重金属含量分布及潜在生态风险研究^[2~6].

三峡工程自 1994 年正式动工兴建至 2009 年竣工,水库经历了 2003 年 135 m 高程蓄水、2006 年 156 m 高程蓄水、2008 年和 2009 年的 172 m 高程试验性蓄水,至 2010 年成功蓄水至 175 m 高程. 从天然状态至 175 m 蓄水,随着水库运行和调度方式变化,库区水文情势发生重大变化,水体中悬浮物沉降条件也发生改变,表层沉积物性状可能发生改变. 有研究人员对三峡库区水质、消落带、土壤及局部河段及支流沉积物金属含量及潜在生态风险进行了相关分析^[7~16],但难以揭示三峡工程建设、运行期的水质及沉积物时空变化趋势和潜在生态风险变化.

本研究系统对 2000~2015 年(三峡水库蓄水前至三峡工程蓄水运行过程)三峡水库干流江津至三峡坝址段和嘉陵江、御临河、乌江、小江、大宁河、香溪河等主要支流表层沉积物中铜、铅、锰、砷、汞等重金属元素含量时空变化情况及潜在生态风险变化趋势进行分析,以期对三峡水库水环境变迁研究、三峡库区水污染防治等提供基础数据和科学依据.

1 材料与方法

1.1 监测对象选取

根据三峡蓄水水文规律,选取三峡库区干流江津至三峡大坝江段的朱沱、铜罐驿、寸滩、清溪场、沱口、官渡口和三峡水库坝下南津关等 7 个断面及嘉陵江北碛和临江门、御临河河口、乌江武隆、小江河口、大宁河河口、香溪河河口等 6 条主要支流的 7 个断面沉积物进行分析. 其中,朱沱断面位于

水库上游,基本不受三峡蓄水后回水影响;寸滩断面在三峡水库蓄水至 172 m 高程以上时会受到回水影响;清溪场断面当水库蓄水至 156 m 高程后会受到影响;而沱口和官渡口断面则均会受蓄水影响.

在监测过程中,监测断面位置始终保持一致. 参照《水环境监测规范》(SL 219)对采样工作的要求,在三峡水库长江干、支流每个断面设置 2~3 条垂线采用船载抓斗式沉积物采样器分别采集表层沉积物(0~20 cm). 样品采集后用聚乙烯样品盒封装、标记、冷冻后带回实验室待进一步处理. 三峡水库研究区域断面布设见图 1.

1.2 监测时段及样品检测

选取 2000~2015 年的 1 月和 7 月沉积物样品检测结果进行分析,其中 1 月代表枯水期,7 月代表丰水期. 三峡水库蓄水前,水库水流基本保持在自然状态;水库蓄水后,朱沱断面处自然状态;下游干支流河段会不同程度受到蓄水影响,一般 1 月水库处于高水位运行,水流较缓;7 月处于防洪限制水位运行,水流速度较快.

样品解冻后沥去水份,除去砾石、植物等杂物,在室温条件下风干. 风干后的样品用行星式粉碎机进行粉碎,过 100 目的筛子后装袋备用. 因水流条件及河床变化等因素,部分点位采集不到沉积物样品或采集上来的沉积物样品全部为沙砾,分析过程中排除上述因素的影响. 采用 HCl-HNO₃-HClO₄-HF 消解法消解后,铜、铅、锰等元素采用火焰原子吸收分光光度法进行分析,汞、砷等元素采用原子荧光光度法进行分析.

为保证检测质量,所有样品均由同一个实验室完成. 每批次样品均采用相同的分析程序分析空白样品、平行样品以及沉积物标准物质(GSD 系列标准物质,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所),确保测定结果在标样保证值范围之内.

1.3 重金属污染与潜在生态风险评价方法

重金属元素具有不能降解、易积累、毒性大的特性,且有通过食物链危害人类健康的潜在危险. 评价沉积物重金属对环境污染和生态危害程度方法很多,主要有地累积指数法(index of

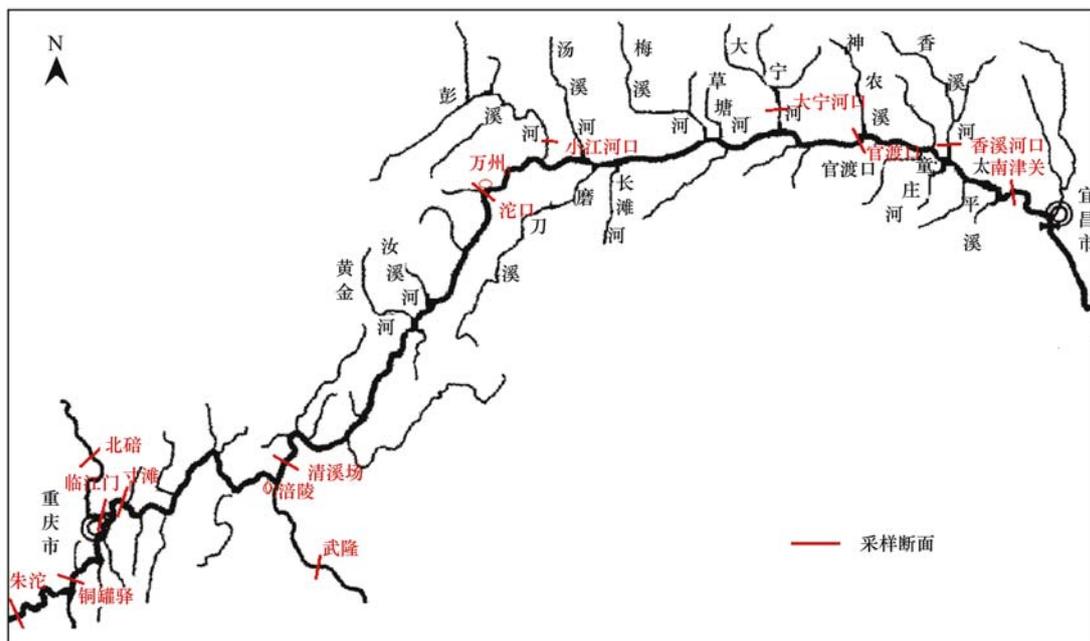


图1 三峡库区研究断面位置示意

Fig. 1 Sampling sites of Three Gorges Reservoir

geoaccumulation, I_{geo})^[17]、脸谱图法^[18]、生态危害指数法、污染负荷指数法^[19]以及回归过量分析法^[20]等。目前应用较为广泛的主要是地累积指数法和潜在生态风险指数法^[21~30]。由于参考值选取可能影响评价结果^[31],本文引入地累积指数(I_{geo})和潜在生态风险指数重点关注表层沉积物中重金属富集程度和潜在生态风险变化趋势。

(1) 重金属富集程度分析

地累积指数法利用某种重金属的总含量与地球化学背景值的关系来确定重金属污染程度,其特点是能较直观反映外源重金属在沉积物中的富集程度。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \times B_n)]$$

式中, C_i 是元素 n 在沉积物中的含量, B_n 为沉积物中该元素地球化学背景值。为更好地反映三峡库区重金属污染状况,本研究以长江水系沉积物背景值^[32]作为参比值; k 为考虑各地岩石差异可能引起背景值的变动而取的系数(一般取值为1.5), I_{geo} 值为地累积指数,并根据 I_{geo} 值将重金属污染程度分为7级(0~6级)^[33]。 I_{geo} 值与污染程度的对应关系见表1。

(2) 潜在生态风险评价方法

采用 Hakanson 建立的生态风险指数法对三峡库区表层沉积物潜在风险进行分析,具体计算公式为:

表1 地累积指数与污染强度分级

Table 1 The I_{geo} and classification of pollution degree		
I_{geo}	级别	污染程度
<0	0	无污染
0~1	1	无污染至中度污染
1~2	2	中度污染
2~3	3	中度污染至强度污染
3~4	4	强污染
4~5	5	强度污染至极强污染
>5	6	极强污染

$$RI = \sum E_i = \sum T_i (C_{is} / C_{in})$$

式中, C_{is} 为表层沉积物中重金属 i 的实测含量; C_{in} 为重金属 i 的参比值; T_i 为重金属 i 的毒性系数(铜、铅、锰、砷、汞的毒性响应参数分别为5、5、1、10、40)^[34]; E_i 为重金属 i 的潜在生态危害系数,RI为多重重金属潜在生态风险危害指数。沉积物污染状况背景值选取直接影响评价结果,以及 Hakanson 建立潜在生态风险指数法是基于 Zn、Cr、Cu、Pb、As、Cd、Hg、PCB 等8种污染物^[35]进行的,为避免评价结果与实际产生偏差,研究过程以工业化前沉积物最高背景值^[35]为参比值,且仅分析潜在生态风险变化趋势。

1.4 数据处理

数据经过检查、剔除异常值等处理后,采用 Microsoft Office Excel 2010 进行统计处理和分析。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属含量特征

2.1.1 重金属含量分析

2000~2015年干支流表层沉积物中铜、铅、锰、砷、汞等元素含量统计见表2。从中可知,干流沉积物中铜元素含量平均值46.5~85.7 mg·kg⁻¹,铅元素含量平均值在43.8~65.1 mg·kg⁻¹,锰元素含量平均值784.2~910.6 mg·kg⁻¹,砷元素含量平均值8.44~11.91 mg·kg⁻¹,汞元素含量平均值0.193~0.236 mg·kg⁻¹;支流沉积物中铜元素含量平均值

16.5~85.6 mg·kg⁻¹,铅元素含量平均值25.8~74.8 mg·kg⁻¹,锰元素含量平均值573.7~996.3 mg·kg⁻¹,砷元素含量平均值6.96~13.31 mg·kg⁻¹,汞元素含量平均值0.160~0.232 mg·kg⁻¹。

长江干流表层沉积物中铜、铅、锰、砷、汞等元素含量平均值显著高于长江水系河流沉积物元素背景值和三峡库区土壤背景值,支流中铜、铅、锰、汞等元素及乌江、御临河、大宁河和香溪河中的砷元素呈现出类似特征,嘉陵江和小江表层沉积物中砷元素含量平均值与长江水系河流沉积物元素背景值和三峡库区土壤背景值^[36]基本相当。

表2 2000年至2015年期间三峡库区沉积物重金属含量统计分析¹⁾/mg·kg⁻¹

断面	铜				铅				锰	
	范围	平均值	中位值	CV	范围	平均值	中位值	CV	范围	平均值
朱沱	38.7~187.9	85.7	74.2	0.516	27.7~193.8	65.1	50.4	0.611	458.5~1301.8	824.6
铜罐驿	30.7~146.8	72.5	66.0	0.451	18.0~165.2	56.0	47.8	0.623	557.6~1230.8	879.9
寸滩	19.6~212.2	69.4	52.7	0.631	5.2~120.3	51.9	45.4	0.553	503.3~1297.0	804.1
清溪场	13.0~230.1	58.7	45.1	0.760	10.7~145.1	46.1	33.6	0.666	353.0~1238.5	826.3
沱口	6.1~145.6	46.5	42.0	0.641	8.3~125.6	43.8	34.7	0.660	376.1~1450.2	804.8
官渡口	32.1~127.7	71.0	70.2	0.346	23.9~132.1	63.5	57.6	0.309	523.5~1379	910.6
南津关	21.2~101.7	55.5	52.0	0.380	14.1~108.8	47.6	45.2	0.418	423.0~1047.0	784.2
北碚	7.3~92.8	24.9	16.5	0.863	3.0~80.5	25.8	21.0	0.640	334.4~1069.5	573.7
临江门	12.1~71.6	30.4	27.5	0.418	10.1~74.3	37.4	33.6	0.521	341.3~1545.1	671.3
武隆	15.7~49.5	25.0	25.0	0.264	15.6~77.5	39.0	34.8	0.410	548.9~1262.5	854.5
御临河	17.3~131.6	36.8	30.6	0.609	16.9~120.4	43.0	37.1	0.551	448.7~1206.8	804.5
小江	10.1~43.3	23.5	21.0	0.383	7.2~83.5	26.8	44.7	0.631	430.5~934.3	669.1
大宁河	16.4~79.2	34.5	32.1	0.391	7.2~80.0	25.8	22.1	0.678	467.9~886.3	674.6
香溪河	32.8~166.3	85.6	79.2	0.405	24.6~179.1	74.8	75.8	0.430	481.8~1478.8	996.3
水系沉积物背景值	2.53~166.2	22.0			2.20~566.8	21.99			42.0~3830	580.0
工业化以前沉积物的最高背景值		50				70				
三峡库区土壤背景值		24.69	24.82			24.11	23.98			

断面	锰		砷		汞					
	中位值	CV	范围	平均值	中位值	CV	范围	平均值	中位值	CV
朱沱	784.4	0.244	4.71~21.47	9.24	8.74	0.343	0.053~1.147	0.209	0.132	1.110
铜罐驿	887.4	0.189	3.92~18.96	9.38	8.53	0.368	0.006~0.773	0.203	0.145	0.966
寸滩	765.5	0.246	2.38~20.05	8.44	8.23	0.410	0.003~1.389	0.225	0.142	1.298
清溪场	821.1	0.233	3.21~16.84	8.69	7.85	0.381	0.006~0.847	0.206	0.159	0.869
沱口	764.1	0.274	2.53~59.90	11.91	9.17	0.929	0.035~1.319	0.236	0.150	1.085
官渡口	906.2	0.194	1.81~19.93	11.14	10.97	0.367	0.032~0.756	0.193	0.167	0.896
南津关	808.6	0.189	4.55~22.64	11.00	10.87	0.391	0.017~0.923	0.235	0.177	0.889
北碚	563.8	0.321	1.03~18.20	6.96	6.69	0.510	0.003~0.927	0.169	0.127	1.095
临江门	626.9	0.363	2.63~14.87	7.53	7.21	0.425	0.003~1.092	0.232	0.135	1.056
武隆	847.3	0.233	3.44~20.41	11.15	10.66	0.385	0.066~2.336	0.495	0.352	0.927
御临河	804.6	0.232	2.7~37.15	9.01	8.27	0.714	0.022~1.16	0.231	0.168	1.000
小江	902.0	0.167	2.88~14.73	7.37	8.56	0.471	0.023~0.305	0.160	0.139	0.544
大宁河	660.8	0.182	4.65~16.25	9.45	6.02	0.325	0.044~1.09	0.198	0.161	1.035
香溪河	961.7	0.220	4.11~20.87	13.31	13.80	0.343	0.003~0.833	0.225	0.190	0.729
水系沉积物背景值			1.23~405.6	7.83			0.003~1.400	0.035		
工业化以前沉积物的最高背景值			15				0.25			
三峡库区土壤背景值			6.45	5.59			0.051	0.045		

1) CV: 变异系数,无量纲

2.1.2 重金属含量空间变化

(1) 断面不均衡性分析

为研究长江干流同一断面不同采样垂线沉积物中重金属含量特征,以 2000~2015 年同期左、右垂线沉积物中重金属含量比值为研究对象. 图 2 为重金属元素在不同断面统计结果. 长江干流三峡大坝上游的朱沱、铜罐驿、寸滩以及三峡大坝坝下的南津关断面左右垂线 5 种重金属含量比值中位值均大于 1,且南津关铜、铅左右岸比值差异显著;沱口、官渡口基本上在 1 附近波动,清溪场断面则均小于 1.

结果表明沱口、官渡口等断面横向差异较小,

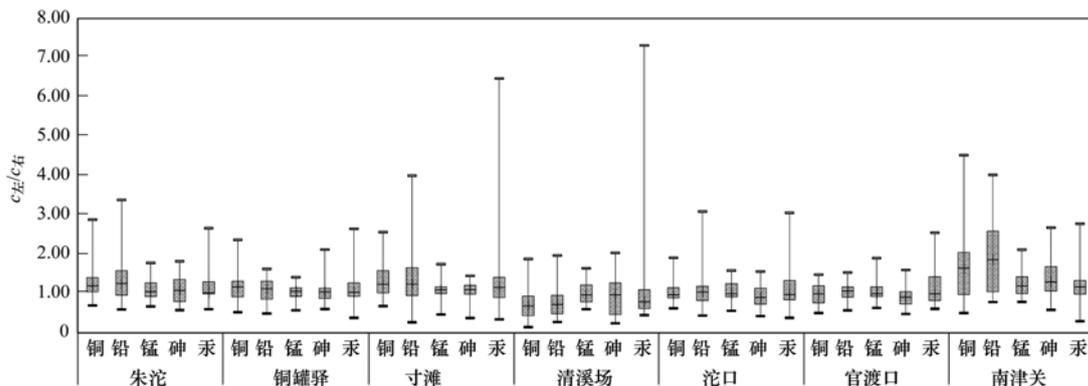


图 2 干流断面不同取样位置重金属含量分布

Fig. 2 Heavy metal content distribution at different sample collection sections on the main stream of the Yangtze River

(2) 沿程不均衡性分析

长江干支流各断面表层沉积物重金属含量多年均值见图 3. 不同重金属沿程变化呈现出较明显差异. 铜、铅在长江干流自朱沱至沱口呈下降趋势,但在官渡口断面升高,在三峡大坝后又降低;锰在沱口之前总体呈下降趋势,其后变化趋势和铜铅类似;砷在朱沱至清溪场总体变化不大,在清溪场之后呈上升趋势,在三峡大坝后降低;汞则自朱沱至南津关沿程高低交替出现,且变化幅度越来越大.

香溪河铜、铅、锰、砷等四元素明显高于其他支流,特别是铜、铅;嘉陵江、御临河、乌江、小江和大宁河等支流河口断面沉积物中铜、铅、锰、砷等元素含量大体相当. 乌江武隆断面汞元素明显高于其他支流.

长江干流断面沉积物中铜、铅含量明显高于嘉陵江、御临河、乌江、小江和大宁河等支流,香溪河河口铜、铅含量与官渡口基本相当. 干流中砷元素含量总体上高于支流,汞元素除乌江外干支流基本相当,乌江武隆断面沉积物中汞元素含量远高于干支流其他断面. 重金属元素在干支流中含量水平差异性较大. 从长期看,不能认为靠近大坝断面表层

而朱沱、铜罐驿、寸滩、清溪场和南津关等断面存在一定差异,且寸滩、南津关差异更为明显. 总体上来讲,朱沱、铜罐驿、寸滩和南津关左岸重金属含量高于右岸,清溪场右岸高于左岸. 结合断面所处位置分析,沱口、官渡口等断面远离三峡库区主要城镇或位于主要城镇上游,而朱沱、铜罐驿断面附近左岸分别为朱沱镇和铜罐驿镇,寸滩上游左岸为重庆市主城区、清溪场上游右岸为涪陵主城区且有乌江汇入,南津关距离上游三峡大坝施工区不远,断面左右岸沉积物重金属含量差异可能和沿岸人群生产、生活以及大坝施工活动存在一定相关性.

沉积物中重金属元素含量大于支流,也不能认为下游库区沉积物中重金属浓度“高于上游”^[10]. 干支流表层沉积物中重金属元素含量水平与所处环境背景、人群活动、水文条件、气候变化等因素有关.

2.1.3 沉积物重金属含量时间变化

(1) 不同水期重金属含量变化

三峡水库是一个河道型水库,水体流态受水库调度、水文条件等因素影响. 2003 年前,三峡库区河道基本处于自然状态. 自 2003 年后三峡水库 1 月处于较高水位运行,库内流速较缓,水体中悬浮物沉降条件较好,蓄清作用明显; 7 月水库处于低水位运行,库内流速较快,悬浮物沉降条件较差. 流速变化除直接影响水体沉积物沉降条件外,对河床冲刷程度也不一样. 2000~2015 年同年度 1 月和 7 月表层沉积物中重金属含量比值见图 4,可见不同水期干支流沉积物中重金属含量存在一定程度差异,汞受水期影响最明显(离散度较大);干流的朱沱和沱口、支流的小江河口断面 1 月沉积物中重金属含量大部分年份低于 7 月.

(2) 不同蓄水期重金属含量变化

将 2000~2015 年三峡库区表层沉积物中重金

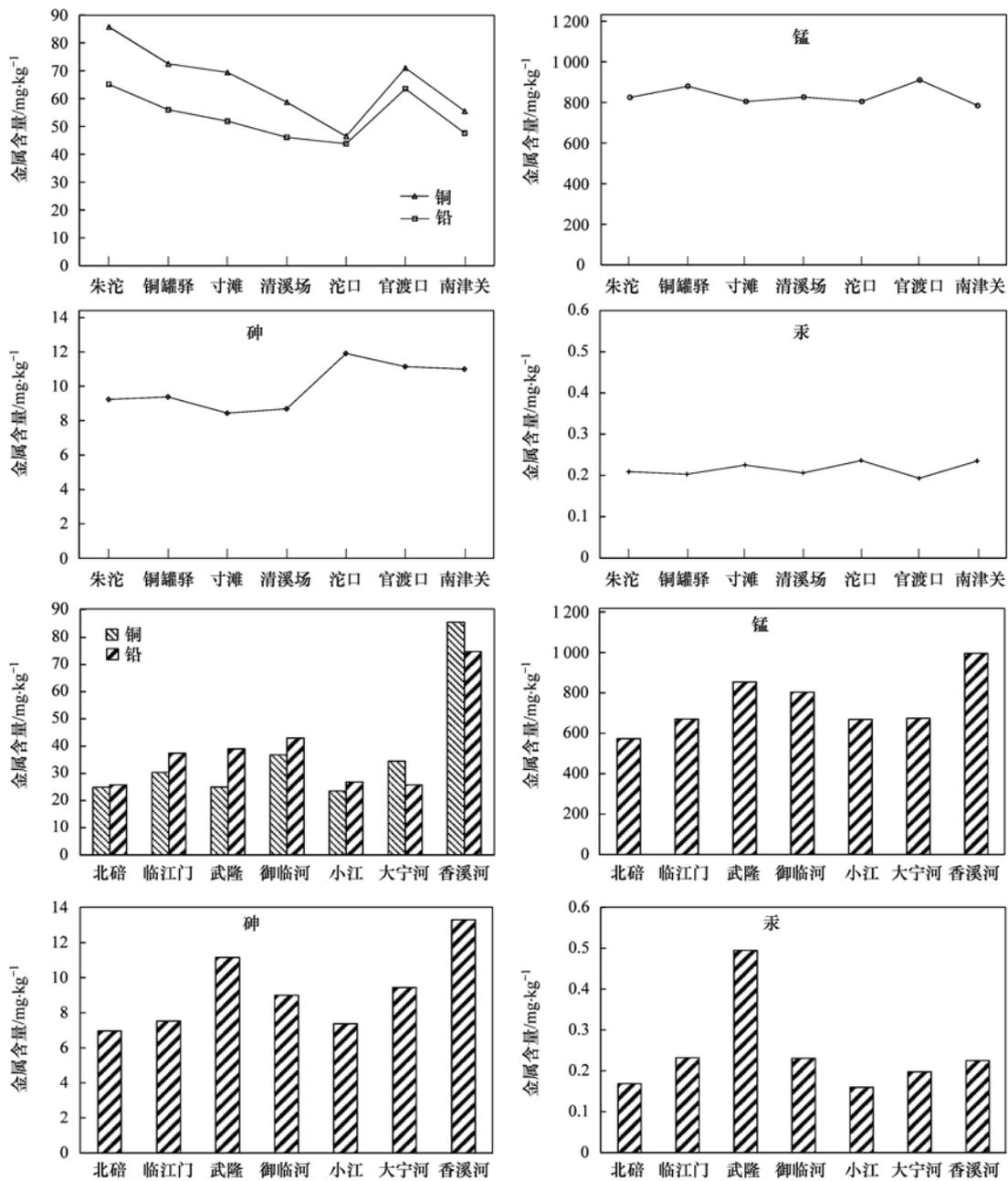


图3 三峡水库干支流沉积物重金属含量分布

Fig. 3 Heavy metal content distribution in sediments on the main stream and tributaries of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir area

属含量相关性分析结果见表3。表层沉积物中铜、铅、锰、砷呈现显著的正相关性,但汞与其他元素相关性低,说明三峡库区沉积物中铜、铅、锰、砷元素具有相似的来源或产生了复合污染。

以2000年作为三峡工程截流前代表年,2004年作为135 m 高程蓄水完成代表年,2007 年代表156 m 高程蓄水完成代表年,2009 年代表172 m 高程蓄水完成代表年,2012 年和2015 年分别代表175 m 高程蓄水完成代表年和三峡工程正式蓄水运行代表年。不同蓄水时段表层沉积物重金属含量分布分

析结果见图5。不同元素在不同断面变化趋势并不完全一致,长江干流自朱沱至坝下的南津关铜、铅、锰等整体上先升高后降低,支流大体上也呈现类似规律;汞、砷无明显变化趋势。结合蓄水影响区域和表层沉积物中浓度变化趋势,说明蓄水不是导致库区干支流表层沉积物重金属含量水平变化的主要原因。

2.2 三峡库区沉积物重金属污染评价

2.2.1 沉积物中重金属富集程度分析

按照地累积指数法对三峡水库沉积物污染进行

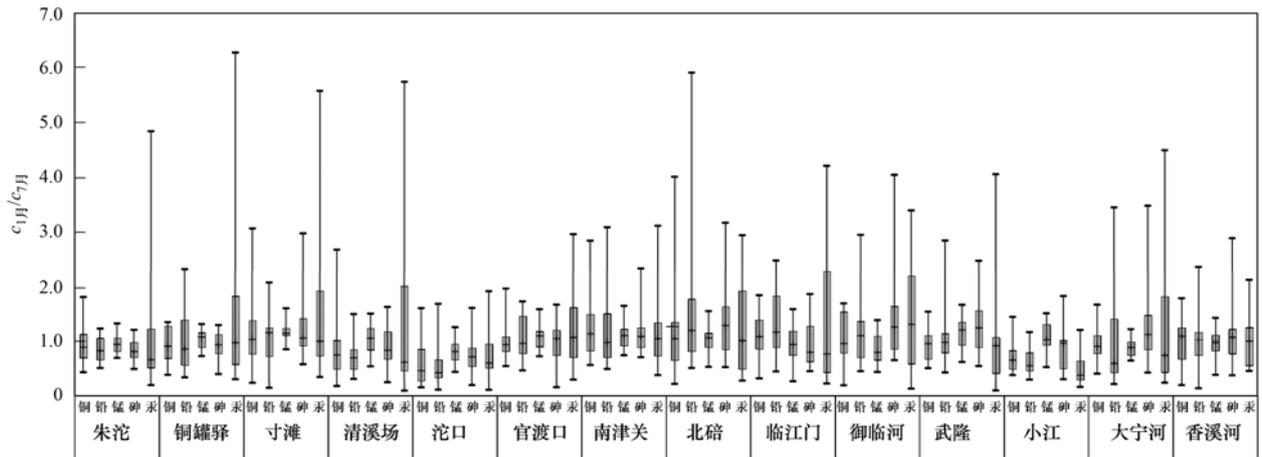


图4 三峡库区干支流不同水期表层沉积物重金属含量分布

Fig. 4 Heavy metal content distribution in surface sediments on the main stream and tributaries of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir area in different water periods

表3 三峡库区沉积物中重金属相关性¹⁾

Table 3 Correlation of the heavy metal contents in sediment in the Three Gorges Reservoir area

		铜	铅	锰	砷	汞
铜	Pearson 相关性	1.000	0.781 **	0.558 **	0.207 **	-0.097
	显著性 (双尾)		0.000	0.000	0.003	0.170
铅	Pearson 相关性	0.781 **	1.000	0.654 **	0.156 *	0.008
	显著性 (双尾)	0.000		0.000	0.026	0.908
锰	Pearson 相关性	0.558 **	0.654 **	1.000	0.311 **	0.068
	显著性 (双尾)	0.000	0.000		0.000	0.335
砷	Pearson 相关性	0.207 **	0.156 *	0.311 **	1.000	0.354 **
	显著性 (双尾)	0.003	0.026	0.000		0.000
汞	Pearson 相关性	-0.097	0.008	0.068	0.354 **	1.000
	显著性 (双尾)	0.170	0.908	0.335	0.000	

1) ** 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的, * 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的

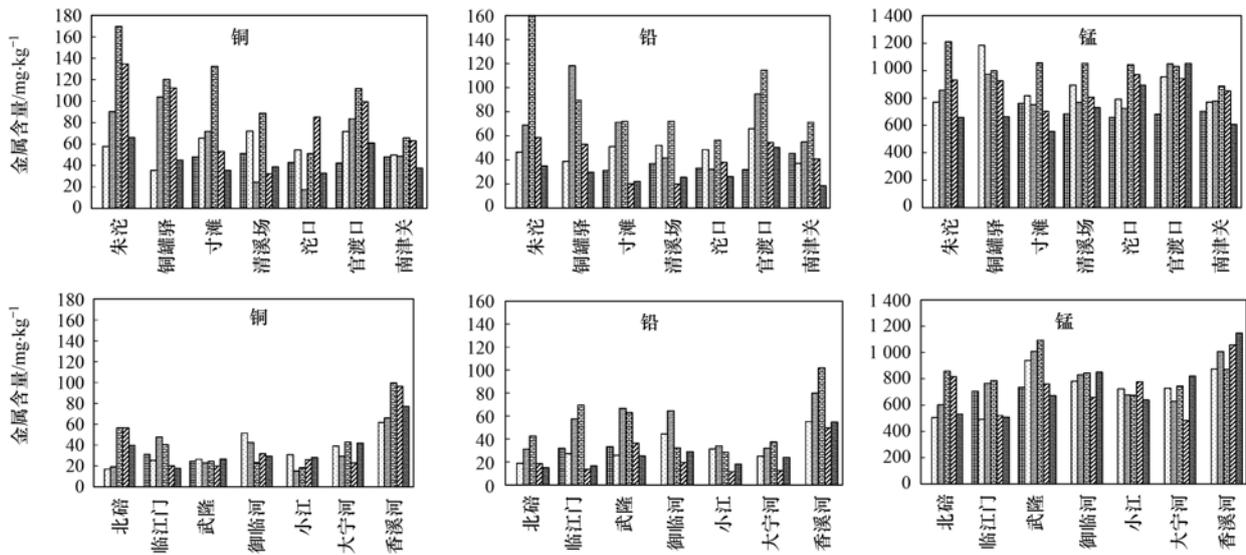
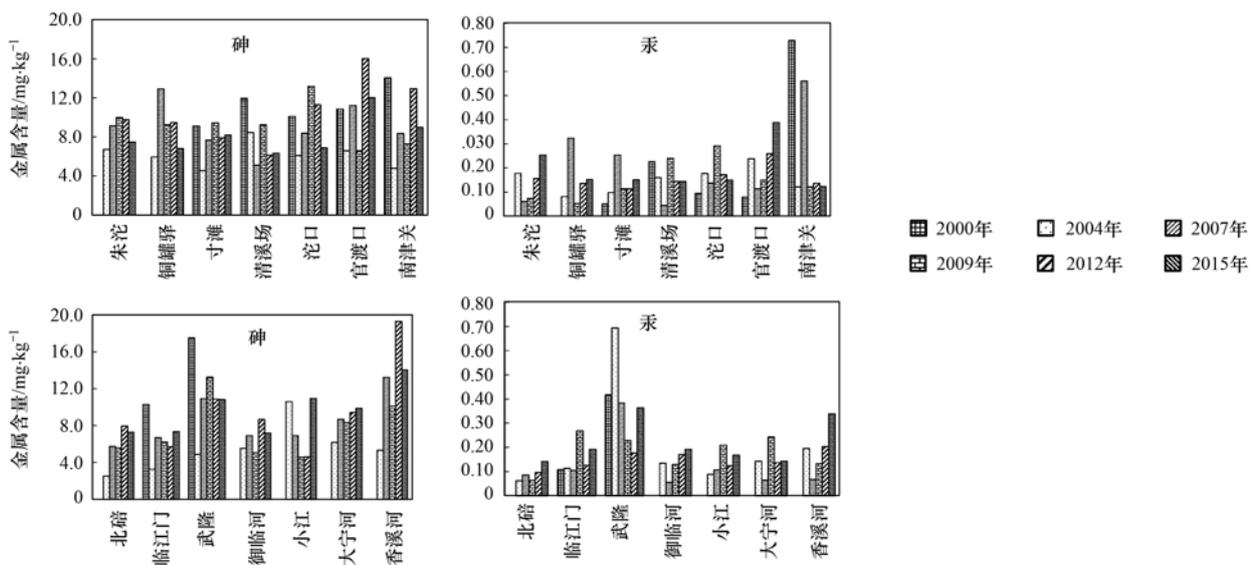


图5 不同蓄水时段表层沉积物重金属含量分布

Fig. 5 Heavy metal content distribution in surface sediment at different water harvesting stages



续图 5

计算,并按照污染强度分级对断面进行统计,统计结果见表 4. 干流沉积物中铜和铅地累积指数(I_{geo})主要分布在 1~2 级,锰和砷地累积指数(I_{geo})主要分布在 0~1 级,表明铜、铅、锰、砷主要处于无污染至中度污染水平;汞地累积指数(I_{geo})主要分布在 1~3 级,处于无污染至强度污染. 支流沉积物中铜、铅、

锰、砷等地累积指数(I_{geo})主要分布在 0~1 级,处于无污染至中度污染水平;汞地累积指数(I_{geo})主要分布在 1~3 级,但个别断面出现 6 级,表明其总体处于无污染至强度污染,个别点位处于强污染水平. 评价结果表明三峡库区表层沉积物中铜、铅、锰、砷富集程度总体较低,但局部汞污染值得引起注意.

表 4 地累积指数分级结果分布/%

Table 4 Hierarchical results of I_{geo} distribution/%

重金属 断面	铜				铅				锰				砷				汞						
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	0	1	0	1	2	3	0	1	2	3	4	5	6
朱沱	39.3	42.9	17.9	7.1	57.1	28.6	7.1		64.3	35.7	89.3	10.7					39.3	32.1	17.9	7.1	3.6		
铜罐驿	3.7	48.1	37.0	11.1	25.9	51.9	14.8	7.4	44.4	55.6	74.1	25.9					14.8	22.2	33.4	14.8	14.8		
寸滩	12.9	51.6	25.8	9.7	25.8	48.4	25.8		74.2	25.8	80.6	19.4					12.9	25.8	32.3	19.4	3.2	6.4	
清溪场	25.0	46.9	21.9	6.3	46.9	37.5	12.5	3.1	59.4	40.6	81.3	18.8					6.3	28.1	37.5	18.8	6.3	3.0	
沱口	34.4	43.8	18.8	3.1	46.9	34.4	18.8		78.1	21.9	65.6	28.1	3.1	3.1			3.1	21.9	37.5	25.0	9.4	3.1	
官渡口	3.1	37.5	59.4		15.6	46.9	34.4	3.1	37.5	62.5	62.5	37.5					3.0	18.8	46.9	25.0	6.3		
南津关	16.1	54.8	29.0		19.4	67.7	12.9		61.3	38.7	61.3	38.7					3.2	16.1	42.0	25.8	9.7	3.2	
干流小计	16.2	47.0	31.9	4.9	30.3	47.6	20.0	2.2	59.5	40.5	70.8	28.1	0.5	0.5			7.0	22.2	38.4	21.6	8.1	2.7	
北碚	82.1	10.7	7.1		75.0	21.4	3.6		92.9	7.1	92.9	7.1					25.0	17.9	35.7	10.7	7.1	3.6	
临江门	71.0	25.8	3.2		48.4	41.9	9.7		87.1	12.9	90.3	9.7					12.9	19.4	35.5	16.1	12.9	3.2	
武隆	93.8	6.2			46.9	46.9	6.3		53.1	46.9	56.3	43.8					3.1	21.9	37.5	21.9	12.5	3.1	
御临河	62.5	33.3	4.2		41.7	45.8	12.5		70.8	29.2	91.7	4.2	4.2				8.3	12.5	45.9	20.8	8.3	4.2	
小江	83.3	16.7			70.8	25.0	4.2		95.8	4.2	83.3	16.7					16.7	12.5	33.3	37.5			
大宁河	54.2	41.7	4.2		75.0	20.8	4.2		95.8	4.2	70.8	29.2					8.3	20.8	45.9	20.8		4.2	
香溪河	4.2	25.0	58.3	12.5	8.3	29.2	58.3	4.2	16.7	83.3	29.2	70.8					8.3	8.3	41.7	37.5	4.2		
支流小计	66.3	21.9	10.2	1.6	52.4	33.7	13.4	0.5	73.3	26.7	73.8	25.7	0.5				11.2	13.4	36.4	25.7	8.6	4.2	0.5
总计	41.4	34.4	21.0	3.2	41.4	40.6	16.7	1.3	66.4	33.6	72.3	26.9	0.5	0.3			9.1	17.7	37.4	23.7	8.3	3.5	0.3

2.2.2 沉积物重金属潜在生态风险评价

采用工业化以前全球沉积物重金属的最高背景值为参比值,按照沉积物重金属污染潜在生态风险指数计算公式进行计算生态风险指数(RI),其变化趋势见图 6. 可以看出,长江干流大部分时段潜在生

态风险指数变化较小(在 45 上下波动),仅 2006 年至 2008 年和 2011 年出现升高. 嘉陵江、御临河、小江、大宁河、香溪河等支流大部分时段潜在生态风险指数变化较小(在 40 上下波动),仅 2006 年出现升高情形;乌江在 2008 年之前处在较高水平,但

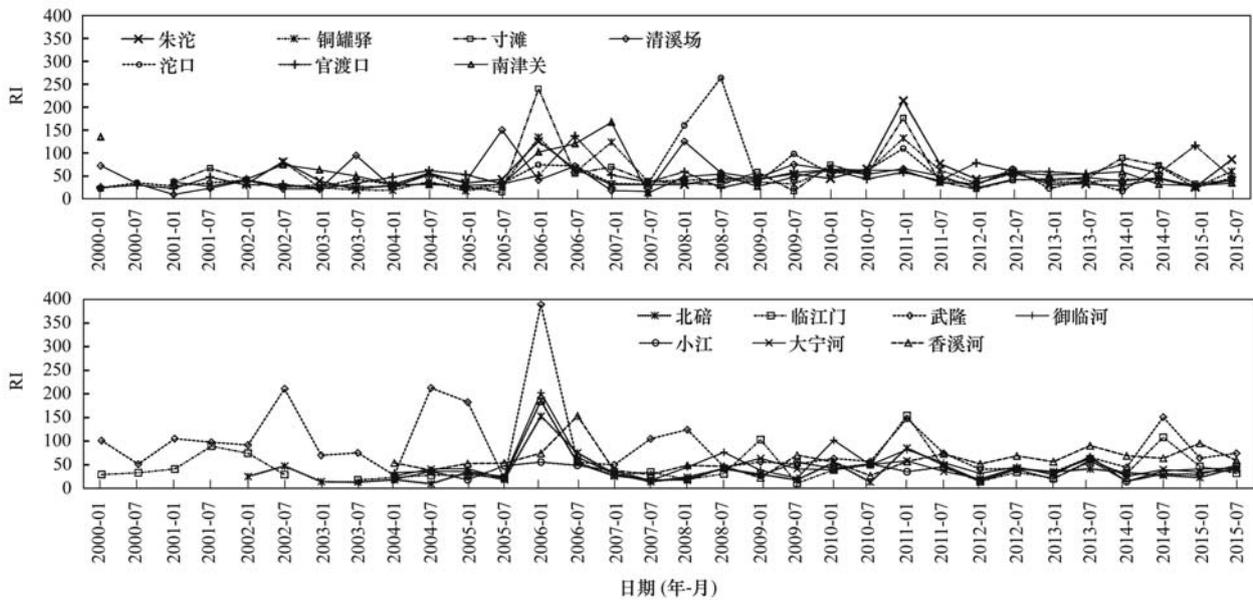


图6 三峡库区沉积物重金属元素潜在生态风险指数趋势

Fig. 6 Trends of potential ecological risk index for heavy metals in sediment of the Three Gorges Reservoir area

之后有所下降并趋于稳定。

3 结论

(1) 三峡库区在 2000 ~ 2015 年长江干流沉积物中铜、铅、锰、砷、汞元素各断面含量平均值区间分别为 46.5 ~ 85.7、43.8 ~ 65.1、784.2 ~ 910.6、8.44 ~ 11.91、0.193 ~ 0.236 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；支流沉积物中铜、铅、锰、砷、汞元素含量平均值区间分别为 16.5 ~ 85.6、25.8 ~ 74.8、573.7 ~ 996.3、6.96 ~ 13.31、0.160 ~ 0.232 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。长江干流表层沉积物中铜、铅、锰、砷、汞等含量显著高于长江水系河流沉积物和三峡库区土壤的元素背景值，支流中铜、铅、锰、汞及乌江、御临河、大宁河和香溪河中砷呈现类似特征，嘉陵江和小江砷含量与三峡库区土壤背景值基本相当。

(2) 局部河段左右岸沉积物中重金属含量存在较明显差异，如朱沱、铜罐驿、寸滩、南津关、清溪场断面。不同水期干支流沉积物中重金属含量存在一定程度波动，汞受水期影响较明显。随着三峡水库建设进程和蓄水，不同元素在不同断面变化趋势不完全一致，长江干流铜、铅、锰等元素随着蓄水进程整体上呈现出先升高后降低，支流大体上也呈现类似规律；汞、砷在干支流均呈现出无明显变化趋势。

(3) 铜、铅、锰、砷、汞在干支流表层沉积物中含量变化趋势各异；干流断面沉积物中铜、铅含量

明显高于嘉陵江、御临河、乌江、小江和大宁河等主要支流，香溪河河口铜、铅含量与官渡口基本相当；干流中砷含量总体高于支流；汞除乌江外干支流基本相当，其在乌江武隆断面含量远高于干支流其他断面。

(4) 三峡库区沉积物中铜、铅、锰、砷等含量呈现显著正相关性，但砷与其他元素相关性低。干流表层沉积物中铜、铅、锰、砷主要处于无污染至中度污染水平；汞处于无污染至强度污染。支流沉积物中铜、铅、锰、砷等处于无污染至中度污染水平；汞处于无污染至强度污染，个别点位处于强污染水平，值得引起注意。长江干流大部分时段潜在生态风险指数变化较小。嘉陵江、御临河、小江、大宁河、香溪河等 5 条支流大部分时段潜在生态风险指数变化较小；乌江在 2008 年之前处在相对较高水平，但 2008 年之后下降并趋于稳定。

参考文献:

- [1] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 305-313.
Zhu Q Q, Wang Z L. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of the main river systems in China[J]. Earth and Environment, 2012, 40(3): 305-313.
- [2] 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 珠江(广州河段)表层沉积物中重金属的分布特征及相关性研究[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 954-959.
Niu H Y, Wu Q H, Chen X G. Distribution characteristics and correlations of heavy metals in the surface sediments in Guangzhou section of the Pearl River [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(5): 954-959.

- [3] 吴光红, 苏睿先, 李万庆, 等. 天津主要水体表层沉积物中重金属污染特征[J]. 中国矿业大学学报, 2008, **37**(2): 259-264.
Wu G H, Su R X, Li W Q, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in surface sediments in Tianjin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, **37**(2): 259-264.
- [4] 董爱国, 翟世奎, Zabel M, 等. 长江口及邻近海域表层沉积物中重金属元素含量分布及其影响因素[J]. 海洋学报, 2009, **31**(6): 54-68.
Dong A G, Zhai S K, Zabel M, *et al.* The distribution of heavy metal contents in surface sediments of the Changjiang Estuary in China and surrounding coastal area [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, **31**(6): 54-68.
- [5] 唐璐璐, 陈志华, 印萍, 等. 涠洲岛潮滩表层沉积物中重金属的空间分布及其环境质量评价[J]. 海洋湖沼通报, 2009, (2): 124-130.
Tang L L, Chen Z H, Yin P, *et al.* Heavy metals' spatial distribution of the intertidal surface sediments in Weizhou Island and its environment quality evaluation [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2009, (2): 124-130.
- [6] 燕婷, 刘恩峰, 张恩楼, 等. 抚仙湖沉积物重金属时空变化与人为污染评价[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 50-58.
Yan T, Liu E F, Zhang E L, *et al.* The spatio-temporal variations of heavy metals in the sediment of Lake Fuxian and the contamination assessment [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(1): 50-58.
- [7] 敖亮, 雷波, 王业春, 等. 三峡库区城镇污染河流沉积物重金属风险评价与来源分析[J]. 北京工业大学学报, 2014, **40**(3): 444-450.
Ao L, Lei B, Wang Y C, *et al.* Heavy metal risk assessment and sources distinguishing in town polluted river sediment at the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, **40**(3): 444-450.
- [8] 李苑劫, 吕平毓. 三峡库区沉积物中重金属元素测定的前处理方法研究[J]. 三峡环境与生态, 2011, **33**(1): 18-20.
Li Y J, Lv P Y. Preliminary treatment method for heavy metal element measuring in Three Gorge Reservoir basin deposition [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2011, **33**(1): 18-20.
- [9] 贾旭威, 王晨, 曾祥英, 等. 三峡沉积物中重金属污染累积及潜在生态风险评估[J]. 地球化学, 2014, **43**(2): 174-179.
Jia X W, Wang C, Zeng X Y, *et al.* The occurrence, accumulation and preliminary risk assessment of heavy metals in sediments from the main tributaries in the Three Gorges Reservoir [J]. Geochimica, 2014, **43**(2): 174-179.
- [10] 王健康, 高博, 周怀东, 等. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评估[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1693-1699.
Wang J K, Gao B, Zhou H D, *et al.* Heavy metals pollution and its potential ecological risk of the sediments in Three Gorges Reservoir during its impounding period [J]. Environmental Science, 2012, **33**(5): 1693-1699.
- [11] 叶琛, 李思悦, 张全发. 三峡库区消落区表层土壤重金属污染评价及源解析[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(1): 146-149.
Ye C, Li S Y, Zhang Q F. Sources and assessment of heavy metal contamination in water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, **19**(1): 146-149.
- [12] 李永峰, 曹政, 刘方婧, 等. 三峡上游河流沉积物中重金属污染生态风险评估[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2012, **28**(5): 527-531.
Li Y F, Cao Z, Liu F J, *et al.* Pollution characteristics and risks of heavy metals of sediments from rivers in upper Three Gorges [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2012, **28**(5): 527-531.
- [13] 李其林, 黄昀, 刘光德, 等. 三峡库区主要土壤类型重金属含量及特征[J]. 土壤学报, 2004, **41**(2): 301-304.
Li Q L, Huang Y, Liu G D, *et al.* The contents and character of heavy metals of main soil types in Three Gorge Reservoir [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, **41**(2): 301-304.
- [14] 王图锦, 胡学斌, 吉芳英, 等. 三峡库区淹没区土壤重金属形态分布及其对水质影响[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(2): 158-164.
Wang T J, Hu X B, Ji F Y, *et al.* Chemical fraction composition characteristics of heavy metals and effects on water quality in submerged soil of Three Gorges Reservoir area [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, **23**(2): 158-164.
- [15] 张晓华, 肖邦定, 陈珠金, 等. 三峡库区香溪河中重金属元素的分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2002, **11**(3): 269-273.
Zhang X H, Xiao B D, Chen Z J, *et al.* Characteristics of the distribution of Cu, Pb, Cd, Cr, Zn in Xiangxi River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, **11**(3): 269-273.
- [16] 刘瑞秋. 三峡大坝截流前后长江中上游江段水化学特性的初步调查[J]. 水生生物学报, 2000, **24**(5): 446-450.
Liu R Q. Preliminary report on physico-chemical properties of main channel and tributaries in upper and middle reaches of the Changjiang River, before and after damming of the Three Gorges Project [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2000, **24**(5): 446-450.
- [17] Chapman P M. Sediment quality assessment: status and outlook [J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1995, **4**(3): 183-194.
- [18] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river [J]. Geological Journal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [19] Chernoff H. The use of faces to represent points in k-dimensional space graphically [J]. Journal of the American Statistical Association, 1973, **68**(342): 361-368.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [21] 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 珠江(广州河段)表层沉积物中重金属的生态风险研究[J]. 水生生物学报, 2008, **32**(6): 802-810.
Niu H Y, Wu Q H, Chen X G. Study on the ecological risk of heavy metals in the surface sediments in Guangzhou section of the Pearl River [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2008, **32**(6): 802-810.
- [22] 王小雷, 杨浩, 顾祝军, 等. 抚仙湖沉积物重金属垂向分布及潜在生态风险评估[J]. 地球与环境, 2014, **42**(6): 764-

772.
Wang X L, Yang H, Gu Z J, *et al.* Vertical distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment cores of Lake Fuxian [J]. *Earth and Environment*, 2014, **42** (6): 764-772.
- [23] 滕德强, 吕颂辉, 郭福星, 等. 长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属分布和潜在生态危害评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, **32**(2): 11-19.
Teng D Q, Lv S H, Guo F X, *et al.* Distribution pattern of heavy metals in surface sediments of the Yangtze Estuary and adjacent areas and its ecological risk [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, **32**(2): 11-19.
- [24] 霍云龙, 陈金民, 林彩, 等. 三沙湾表层沉积物重金属含量分布及生态风险评估[J]. *应用海洋学学报*, 2015, **34**(3): 356-364.
Huo Y L, Chen J M, Lin C, *et al.* Distribution of heavy metal contents in surface sediments of Sansha Bay and ecological risk assessment [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, **34** (3): 356-364.
- [25] 张婧, 王淑秋, 谢琰, 等. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2413-2418.
Zhang J, Wang S Q, Xie Y, *et al.* Distribution and pollution character of heavy metals in the surface sediments of Liao River [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(9): 2413-2418.
- [26] 李晓铭, 赵世民, 王道玮, 等. 滇池表层沉积物中重金属污染特征及评价[J]. *地球与环境*, 2013, **41**(6): 647-655.
Li X M, Zhao S M, Wang D W, *et al.* Study on the pollution characteristics of heavy metals in surface sediments of Dianchi Lake [J]. *Earth and Environment*, 2013, **41**(6): 647-655.
- [27] 张光贵. 洞庭湖表层沉积物中重金属污染特征、来源与生态风险[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(6): 58-64.
Zhang G G. Pollution characteristics, sources and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Dongting Lake [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(6): 58-64.
- [28] 柴小平, 胡宝兰, 魏娜, 等. 杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价[J]. *环境科学学报*, 2015, **35** (12): 3906-3916.
Chai X P, Hu B L, Wei N, *et al.* Distribution, sources and assessment of heavy metals in surface sediments of the Hangzhou Bay and its adjacent areas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3906-3916.
- [29] 秦樊鑫, 李存雄, 张明时, 等. 贵阳阿哈湖表层沉积物中重金属化学形态组成及污染研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, **37**(22): 10644-10647.
Qin F X, Li C X, Zhang M S, *et al.* Study on chemical speciation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Aha Lake in Guiyang [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, **37**(22): 10644-10647.
- [30] 王秋莲, 刘春光, 关玉春, 等. 天津近岸海域表层沉积物中重金属的生态风险评估[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2010, **43**(4): 61-66.
Wang Q L, Liu C G, Guan Y C, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from offshore areas of Tianjin, China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2010, **43**(4): 61-66.
- [31] 沈珍瑶, 牛军峰, 齐珺, 等. 长江中游典型段水体污染特征及生态风险[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. 215-216.
- [32] 张立成, 余中盛, 章申. 水环境化学元素研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 271.
- [33] 武江越, 周俊丽, 刘征涛, 等. 辽河水系沉积物重金属的分布特征及污染评价[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(6N): 268-273.
Wu J Y, Zhou J L, Liu Z T, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in the surface sediments of the Liao River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37** (6N): 268-273.
- [34] 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**(2): 112-115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [35] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评估[J]. *环境科学研究*, 2002, **15**(5): 33-37.
Liu C, Wang Z Y, He Y, *et al.* Evaluation on the potential ecological risk for the river mouths around Bohai Bay [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, **15**(5): 33-37.
- [36] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, **16**(4): 848-852.
Tang J, Zhong Y P, Wang L. Background value of soil heavy metal in the Three Gorges Reservoir district [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, **16**(4): 848-852.

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行