DOI:10.15928/j.1674-3075.202109150324

三峡库区及上游表层沉积物重金属形态特征及其生态风险

董 纯,杨 志,朱其广,唐会元,李嗣新,陈小娟

(水利部中国科学院水工程生态研究所,水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室,湖北 武汉 430079)

摘要:研究三峡库区及上游表层沉积物中重金属形态特征及其潜在生态风险,为制定库区及上游重金属污染防治措施提供基础资料。2020年11月,在三峡库区上游合江江段和江津江段以及库区巴南江段和长寿江段采集21个沉积物样品,通过连续提取法对重金属Cu、Pb、Cr、Cd、As、Hg总量及形态特征进行分析。结果显示:三峡库区及上游研究江段沉积物重金属平均含量Cr > Pb > Cu >As > Cd > Hg,其中Cu、Pb和Cd的含量高于长江流域沉积物重金属背景值,库区长寿江段重金属含量最高;重金属形态占比具有明显差异,研究江段Pb的铁锰结合态占比高达34.99%~43.17%,Cd的离子交换态含量最高,其在合江、江津、巴南和长寿江段沉积物重金属形态总和中的占比分别为17.41%、16.65%、20.56%和18.88%,而As、Hg、Cu和Cr的残渣态含量较高,其中Hg和Cr的残渣态占比分别超过了80%和88%;研究江段沉积物中重金属污染负荷指数PLI值和潜在生态风险指数RI值分别为0.90~1.61和112.49~245.03,其中库区长寿和巴南江段指数值较高。综合结果表明,三峡库区长寿和巴南江段沉积物重金属污染较严重,总体处于中等污染水平,Cd和Pb是主要贡献者,其中Cd具有较大的生物可利用性和潜在生态风险。

关键词:重金属;形态;生态风险;表层沉积物;三峡水库

中图分类号:X53,X826 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2022)01-0016-08

重金属是一类易积累、毒性大、不可降解的元素型污染物(赵宽等,2021;王林泉等,2017),具有致畸性、致癌性和致死性(Vareda et al,2019; Sfakianakis et al,2015)。近年来,随着工农业快速发展和人类活动不断增加,越来越多的重金属排入河流,导致水生态系统生物多样性降低、珍稀物种消失以及疾病发生率增加(Ma et al, 2016; Bravo et al, 2014)。因此,水环境重金属污染受到学者的广泛关注。沉积物是重金属的载体和蓄积库,其重金属含量往往较水体高3~6个数量级(林祖亨和梁舜华, 1995),且当外界环境条件适宜时,沉积物中的重金属重新释放进入水体,将造成二次污染。

三峡水库位于长江流域腹心地带,其生态环境的发育演化更是直接关系到库区和中下游水生态安全。三峡大坝建成前,相比于全国土壤背景值,库区重金属含量已处于偏高水平,农业、矿业、航运、捕捞等人为活动向库区排入了大量重金属(Bing et al, 2016; Ma et al, 2016)。并且,随着水库的蓄水运行,库区变成了一个人造湖泊,水流减缓、水体滞留时间延长、水体自净能力削弱(Tang et al, 2016; Wei et al, 2016),均导致库区重金属污染日趋严重。Gao等(2015a;2015b)研究发现三峡水库蓄水后沉积物中重金属含量呈增加趋势,Sang等(2019)也发现随着蓄水时间的延长,库区重金属Hg、Cd、Pb、Cu、Zn、Fe含量均呈上升趋势。三峡水库周期性调度运行,库区氧化还原电位、pH、水温、流速和溶解氧等发生改变,重金属赋存形态如Fe/Mn氧化物、金属硫化物和金属碳酸盐等的形成或溶解对这些环境因子的变化非常敏感。而重金属的可移动性、生物可利用性以及潜在环境危害主要取决于其赋存形态的丰度和活性(曾晓舵等, 2019; Nedrich et al, 2017)。李佳璐等(2016)发现丹江口水库高水位时,由于Fe/Mn氧化物的还原,Pb从该结合态中被释放,导致库区Pb含量升高。因此,研究三峡库区重金属形态特征对理解重金属生态风险具有重要意义。而目前三峡库区重金属污染研究主要集中于时空分布和生物体富集(李嗣新等, 2016),对沉积物中重金属形态特征研究较为缺乏。为此,本研究以三峡库区及上游表层沉积物为研究对象,分析库区及上游典型江段沉积物中重金属形态特征及其潜在生态风险,为制定库区及上游重金属污染防治措施提供基础资料。

收稿日期:2021-09-15

基金项目:国家自然科学基金(51779158)。

作者简介:董纯,1986年生,女,助理研究员,主要从事水生态和鱼类保护研究。E-mail: dongc1314@163.com

通信作者:陈小娟,1981年生,女,研究员,主要从事水生态保护和修复研究。E-mail: chenxiaojuan@mail.ihe.ac.cn

1　材料与方法

1.1　研究江段与样品采集

2020 年 11 月选取库区上游合江江段(HJ)、江津江段(JJ)以及库区巴南江段(BN)和长寿江段(CS)作为研究江段(图 1)。鉴于所处环境、人群活动、水文条件等因素可能会对沉积物中重金属含量产生影响,为此在每个研究江段设置 3 个采样点,在每个采样点的左、右岸各采集样品,采样江段重金属含量为采样点平均值。使用彼得森采集器采集 0~5 cm 表层沉积物 200 g 装入聚乙烯塑料袋中,阴暗处保存,待运回实验室后进行预处理和重金属含量和形态分析。由于江津和巴南部分采样点的左岸和右岸不方便到达,未取样。共采集 21 个样品。

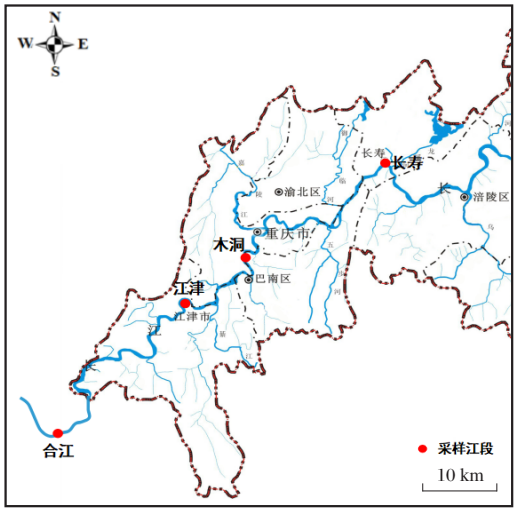


图 1　样品采样江段

Fig.1　Map of sampling sections

1.2　样品分析

1.2.1　重金属含量分析　将沉积物在室温下风干至恒重,剔除动植物残体、塑料等杂物,然后使用玛瑙研钵将样品研磨成均匀的颗粒,过 100 目孔径筛获得样品粉末。称取 0.1000 g 试样,经 HNO_3–$HClO_4$–HF 消解后,采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP–MS)测定 Cu、Pb、Cr、Cd 含量;称取 0.5000 g 试样,经王水消解后,采用原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectrometry, AFS)测定 As 和 Hg 含量。每个样品采用国家一级标准物质(GBW07441、GBW07442、GBW07443)、平行样和空白样进行质量控制。

1.2.2　重金属形态分析　采用 DD 2005–03 推荐的连续提取法获得各形态重金属清液。称取上述样品粉末 2.5000 g 于 250 mL 聚乙烯烧杯中,加蒸馏水 25 mL,超声提取 30 min,离心分离,清液即为水溶态;向残渣中加入 25 mL 氯化镁溶液,摇匀,超声提取 30 min,离心分离,清液即为离子交换态;向残渣中加入 25 mL 醋酸钠溶液,摇匀,超声提取 60 min,离心分离,清液即为碳酸盐结合态;向残渣中加入 50 mL 焦磷酸钠溶液,摇匀,超声提取 40 min,放置 2 h 后离心分离,清液即为弱有机结合态;向残渣中加入 50 mL 盐酸羟胺溶液,摇匀,超声提取 60 min,离心分离,清液即为铁锰结合态;向残渣中加入 3 mL 硝酸溶液、5 mL 双氧水,摇匀,83℃水浴恒温 1.5 h,加 2.5 mL 醋酸铵–硝酸混合液,定容至 25 mL,放置 10 h 后离心分离,清液即为强有机结合态;最后向残渣中加入消解液消化,即为残渣态。

各形态重金属含量测定方法同上,并计算各形态重金属含量占比。

1.3　重金属生态风险评价

1.3.1　改良危险系数法　改良危险系数(mHQ)是一种评估重金属对水环境和生物体危害程度的新指标,通过沉积物重金属阈值效应水平(threshold effect level, TEL)、可能效应水平(probable effects level, PEL)和严重效应水平(severe effect level, SEL)(MacDonald et al,2000)评估重金属污染风险。其计算公式如下:

$$\mathrm{mHQ}=\left[C_i\left(\frac{1}{\mathrm{TEL}_i}+\frac{1}{\mathrm{PEL}_i}+\frac{1}{\mathrm{SEL}_i}\right)\right]^{1/2} \qquad ①$$

式①中,mHQ 为改良危险系数,C_i 为沉积物样品重金属的实测含量,TEL_i、PEL_i、SEL_i 分别为第 i 种重金属的阈值效应水平、可能效应水平和严重效应水平。该方法重金属生态风险等级分为 8 级(MacDonald et al, 2000):mHQ<0.5 表示没有受到污染,0.5≤mHQ<1.0 表示低水平污染,1.0≤mHQ<1.5 表示轻微污染,1.5≤mHQ<2.0 表示中等污染,2.0≤mHQ<2.5 表示强污染,2.5≤mHQ<3.0 表示很强污染,3.0≤mHQ<3.5 表示严重污染,mHQ≥3.5 表示极严重污染。

1.3.2　污染负荷指数法　污染负荷指数(PLI)是单因子污染系数(CF)乘积的 n 次方根,n 是测量重金属的个数(Suresh et al, 2011)。

$$\mathrm{PLI}=(\mathrm{CF}_1\times\mathrm{CF}_2\times\mathrm{CF}_3\times\cdots\mathrm{CF}_n)^{1/n} \qquad ②$$

$$\mathrm{CF}=C_0^i/C_n^i \qquad ③$$

式中,PLI 为污染负荷指数,CF 为单因子污染系数,C_0^i 为某重金属实测含量,C_n^i 为长江流域该重金属的背景值(赵一阳和鄢明才, 1992)。污染程度分 4 级:PLI=0 表示该采样区域没有受重金属污染,1≤PLI<2 表示中等污

染，2≤PLI<3表示强污染，PLI≥3表示极强污染。

CF值反映一段时间内某一特定重金属在沉积物中的富集情况，污染水平分为4个等级（Islam et al, 2015）：CF<1表示轻微污染，1≤CF<3表示中等污染，3≤CF<6表示强污染，CF≥6表示极强污染。

1.3.3 潜在生态风险指数法 潜在生态风险指数法（RI）考虑了重金属的生物毒性效应，引入了毒性响应系数（T_r），可定量计算每种重金属的潜在危害程度。E_r^i<40表示轻微污染，40≤E_r^i<80表示中等污染，80≤E_r^i<160表示强污染，160≤E_r^i<320表示很强污染，E_r^i≥320表示极强污染（赵宽等, 2021）。

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i \times C_0^i / C_n^i \qquad ④$$

式中，E_r^i为第i种重金属的潜在生态风险指数；T_r^i为第i种重金属的毒性响应系数，其中Cu=Pb=5、Cr=2、Cd=30、As=10、Hg=80。RI为沉积物中所测多种重金属的潜在生态风险指数，污染分为4个等级（赵宽等, 2021），RI<150表示轻微污染，150≤RI<300表示中等污染，300≤RI<600表示强污染，RI≥600表示很强污染。

1.3.4 次生相与原生相比值法 基于形态学的次生相与原生相比值法(RSP)考虑了不同形态重金属的生物毒性和可利用性的差异，更能反映和评价沉积物中重金属的来源和污染程度。污染水平分为4个等级（王林泉等, 2017）：RSP<1表示无污染，1≤RSP<2表示轻微污染，2≤RSP<3表示中等污染，RSP≥3表示强污染。

$$RSP = M_{sec}^i / M_{prim}^i \qquad ⑤$$

式中，M_{sec}^i是沉积物中第i种重金属的次生相含量，即形态分析中除残渣态的含量；M_{prim}^i是沉积物中第i种重金属的原生相含量，即形态分析中残渣态的含量（陈静生等, 1996）。

2 结果与分析

2.1 沉积物重金属含量

合江、江津、巴南和长寿4个江段的沉积物重金属平均含量Cr > Pb > Cu >As > Cd > Hg（表1）。其中，长寿江段重金属As和Hg的含量显著高于合江江段和江津江段（P<0.05），其他重金属含量在巴南和长寿江段也表现较高，但在不同江段之间没有显著差异。其中，4个研究江段沉积物Cu、Pb和Cd的含量均高于长江流域沉积物重金属背景值（赵一阳和鄢明才, 1992），分别是背景值的1.11~1.34倍、1.36~2.44倍和1.60~3.20倍；长寿江段重金属As（10.97 mg/kg）和Cr（86.87 mg/kg）以及巴南（0.12 mg/kg）和长寿（0.16 mg/kg）江段的Hg含量也高于长江流域沉积物背景值。另外，长寿江段的Hg、Pb、Cd和Cr含量均超过三峡库区沉积物重金属背景值（王健康等, 2012）。可见，库区长寿和巴南江段重金属污染较严重。

表1 采样江段沉积物重金属含量（干重） mg/kg

Tab.1 Heavy metal concentrations (dry weight) in sediment of sampling sections

采样江段	As	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr
合江	5.74±0.64^a	0.07±0.02^a	42.45±5.65	45.63±8.02	0.67±0.16	78.79±6.44
江津	4.68±0.35^a	0.06±0.01^a	38.92±1.02	36.86±5.13	0.40±0.07	71.01±3.42
巴南	9.29±0.48^b	0.12±0.01^{ab}	41.23±2.87	49.81±8.54	0.71±0.09	78.64±4.48
长寿	10.97±0.67^b	0.16±0.01^b	46.99±1.81	65.79±7.97	0.80±0.07	86.87±2.96
长江沉积物背景值	9.6	0.08	35	27	0.25	82
三峡库区沉积物背景值	18.07	0.109	76.03	59.40	0.75	86.31

注：同列数值小写字母不同表示差异显著（P<0.05）。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate a significant difference between sampling sections P<0.05.

2.2 沉积物重金属形态分布

采用连续提取法对重金属形态进行分析，采样江段沉积物不同重金属形态特征百分比见图2，4个研究江段沉积物中每种重金属的形态占比趋势一致。As主要以残渣态（65.26%~72.25%）、有机结合态（12.90%~19.12%）和铁锰结合态（10.52%~12.74%）存在，Hg主要以残渣态（81.25%~82.43%）和有机结合态（16.74%~25.12%）存在，Cu主要以残渣态（46.10%~55.85%）、铁锰结合态（19.30%~23.41%）和有机结合态（14.57%~20.41%）存在，Pb主要以铁锰结合态（34.99%~43.17%）、残渣态（27.23%~39.06%）和碳酸盐结合态（10.81%~14.36%）存在，Cd主要以碳酸盐结合态（33.06%~36.55%）和离子交换态（16.65%~20.56%）存在，Cr主要以残渣态（88.78%~91.80%）存在。

2.3 沉积物单一重金属生态风险

研究江段沉积物中单一重金属生态风险评价结果见图3。

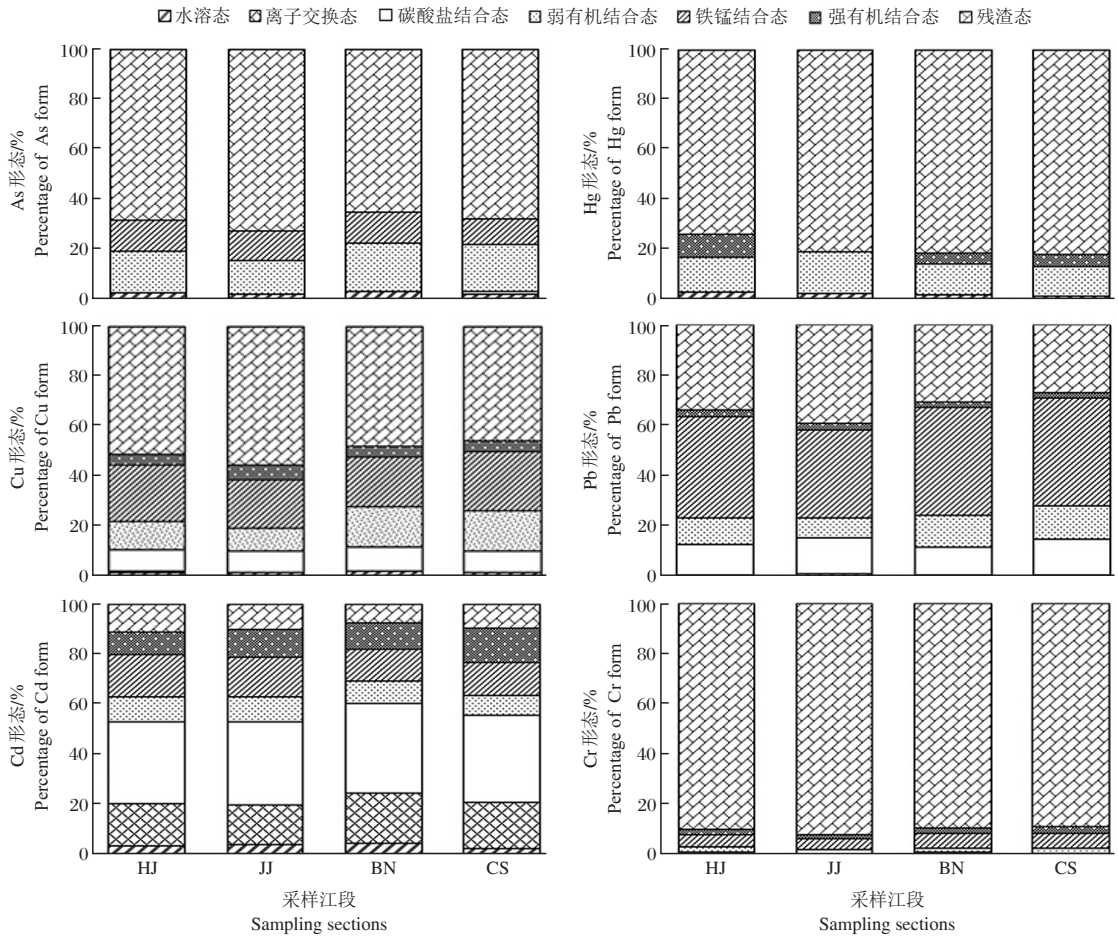


图2　沉积物重金属形态分布特征

Fig.2　Distribution characteristics of heavy metal forms in sediments

改良危险系数mHQ值见图3a。mHQ值Cr>Pb>As>Cu>Cd>Hg,平均值分别为1.92、1.43、1.39、1.32、1.06、0.80。Cr为中等污染,Hg为低水平污染,其他重金属为轻微污染。

单因子污染系数见图3b。CF值Cd>Pb>Cu>Hg>Cr>As,平均值分别为2.33、1.81、1.20、1.01、0.96、0.80。Cd、Pb、Cu和Hg为中等污染,Cr和As为轻微污染。

潜在生态风险指数见图3c。E值Hg>Cd>Pb>As>Cu>Cr,平均值分别为80.55、69.87、9.05、8.01、5.98、1.92。Hg为强污染,Cd为中等污染,其他重金属为轻微污染。

次生相与原生相的比值见图3d。RSP值Cd>Pb>Cu>As>Hg>Cr,平均值分别为9.59、2.11、0.99、0.47、0.26、0.11。Cd为强污染,Pb为中等污染,其他重金属为无污染。

2.4　沉积物重金属总体生态风险

利用污染负荷指数法和潜在生态风险指数法评估6种重金属共同作用下沉积物的总体毒性状态结果见图4。合江、江津、巴南和长寿江段沉积物中重金属PLI值分别为1.07、0.90、1.35和1.61,巴南、长寿和合江江段沉积物属于中等重金属污染,且库区长寿和巴南江段重金属污染水平高于库区上游合江和江津江段(图4a)。合江、江津、巴南和长寿江段沉积物中重金属RI值分别为144.64、112.49、199.36和245.03,巴南和长寿江段沉积物属于中等重金属污染,合江和江津江段属于轻微重金属污染(图4b)。综合结果可知,研究江段沉积物重金属处于中等污染水平,且库区长寿和巴南江段重金属污染水平高于上游合江和江津江段。

3　讨论

3.1　沉积物重金属含量特征

三峡库区及上游研究江段沉积物重金属平均含量Cr>Pb>Cu>As>Cd>Hg,与长江流域沉积物和全球页岩重金属的含量模式(周怀东等, 2008)一致。其中,沉积物Cu、Pb和Cd的含量均高于长江流域沉积物重金属背景值,尤其是重金属Cd含量是背景值的1.60~3.20倍;长寿江段重金属As和Cr以及巴南和长寿江段Hg的含量高于长江流域沉积物背景值,长寿江

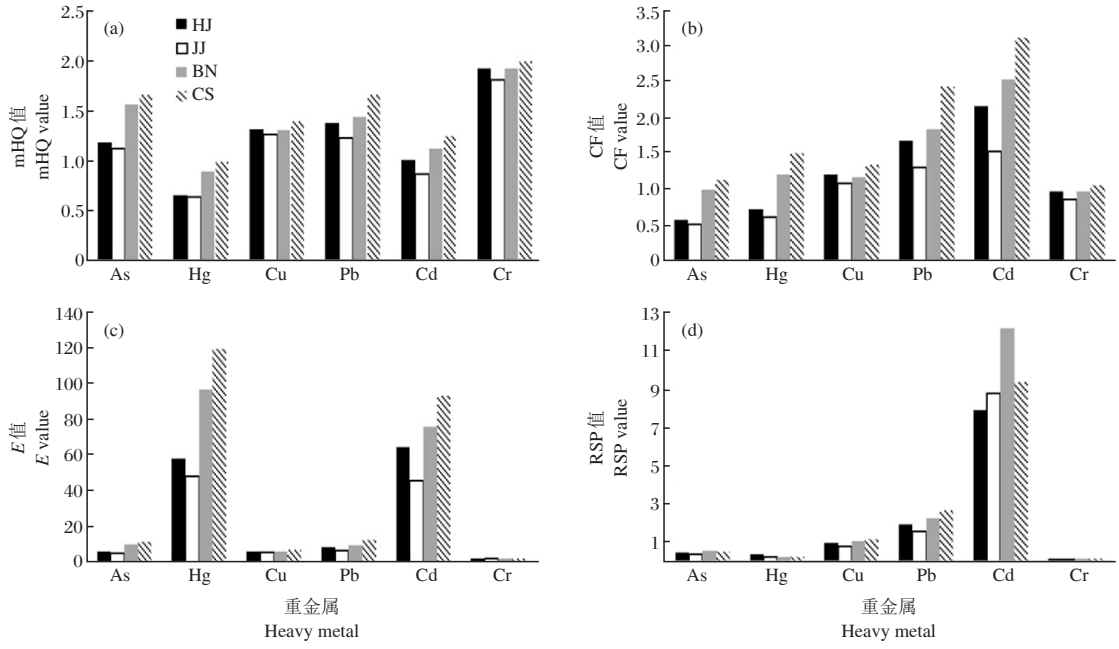


图3 采样江段沉积物单一重金属生态风险评价

Fig.3 Ecological risk assessment of the single heavy metal in sediments

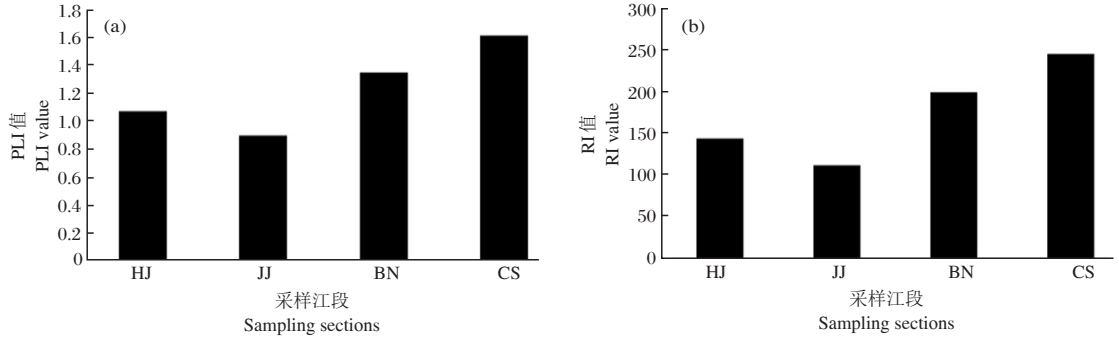


图4 沉积物重金属总体生态风险评价

Fig.4 Comprehensive ecological risk assessment of heavy metals in sediments

段的Hg、Pb、Cd和Cr含量均超过三峡库区沉积物重金属背景值。其中Cd是采样江段主要的污染物。张伟杰等(2018)和Xu等(2011)也发现三峡库区重金属Cd污染最严重,这可能与沿江城市工业聚集、公路交通繁忙、废水废气排放等有关。

3.2 沉积物重金属空间分布特征

研究江段沉积物重金属空间分布具有一定的差异性,表现出从库区上游江段到库区下游江段含量升高的趋势,尤其是库区长寿江段重金属As和Hg的含量显著高于上游合江江段和江津江段。Gao等(2016)也得到了相同的重金属分布模式,这与研究江段的环境条件是密不可分的。三峡水库建设运行后,长江上游600余km的自然河段变为水库,库区江段由原有激流生境转变为流水、缓流水以及静水区梯次排列的复杂生境,每种生境的流速、透明度、pH、有机物、颗粒大小等存在着差异。如上游粗颗粒物多,下游细颗粒物多,而细颗粒可吸附更多的重金属(Shi et al, 2018)。根据之前的监测发现,下游长寿江段的流速显著低于其他江段,低流速和延长的滞留时间可为颗粒沉降提供稳定的水动力条件(Yao et al, 2016)。同时,沿江城市向水体排放很多的生活和工业垃圾,其随着雨水冲刷,从上游迁移至下游江段(Islam et al, 2015)。因此,库区长寿江段沉积物中重金属含量相对较高。

3.3 沉积物重金属形态分布特征

重金属的生物毒性和潜在环境危害不仅与它们的含量相关,更大程度上还取决于其赋存形态(曾晓舵等, 2019; Farkas et al, 2007)。不同重金属形态百

分比之间具有明显差异。本研究江段Pb的铁锰结合态占比最高,可以达到34.99%~43.17%,与其他研究结果类似,如三峡库区支流香溪河沉积物中铁锰结合态的Pb占14.3%~51.3%(王林泉等, 2017),长江流域沉积物中Pb的铁锰结合态占比高达64%(周怀东等, 2008)。当氧化还原电位发生变化时,氧化物结合的Pb被释放出来而对环境产生潜在危害(Wei et al, 2016)。Cu主要以有机结合态存在,且库区巴南和长寿江段的占比(20.21%)显著高于上游合江江段(14.11%)和江津江段(14.30%),说明库区长寿和巴南江段Cu更易与沉积物中的烷烃和腐殖酸等有机质结合形成络合物或螯合物(王图锦等, 2012)。Cd的离子交换态占比最高,在合江、江津、巴南和长寿江段沉积物重金属形态总和中的占比分别为17.41%、16.65%、20.56%和18.88%,而可交换态组分中的重金属与沉积物结合最弱,通常被用于评价沉积物重金属生物有效性的大小。因此,研究江段重金属Cd深受人为活动的影响,其流动性和生物可利用性最大,对环境造成的风险最高,尤其是在库区长寿和巴南江段。另外,沉积物中As、Hg和Cr的残渣态占比较高,其中Hg和Cr的残渣态占比更是分别超过了80%和88%。已有研究发现沉积物残渣态中的重金属主要是岩石输入,其存在于矿物晶格中,只有经过风化作用才能将其释放,所以残渣态重金属一般不具有生物可利用性(孔明等, 2015)。为此,在库区及上游研究江段沉积物中Cr最稳定,其生态风险最低。

3.4　沉积物重金属生态风险评估

污染负荷指数法和潜在生态风险指数法可以为库区居民和管理者提供有关研究江段重金属污染总体状况的相关信息。从图4的PLI值和RI值可知,本研究江段沉积物重金属属于中等污染水平,表现为长寿>巴南>合江>江津,与沉积物重金属含量水平和形态分布趋势一致,均表现为库区长寿和巴南江段污染最严重,这主要是As、Hg、Cu、Pb、Cr和Cd共同作用的结果。4种生态风险评价方法对重金属污染程度的划分存有差异,发生差别的主要原因可能在于重金属的背景值、毒性系数和形态占比不同。综合4种方法,重金属Cd和Pb为中等污染,As、Cr和Cu为轻微污染,而对Hg的污染程度评价差别很大,从无污染到强污染,其中次生相与原生相比值法说明Hg大部分为残渣态,对环境和生物毒性小,为无污染水平,但潜在生态风险指数法显示其为强污染,这可能主要是因为重金属Hg的毒性系数很大,是其他重金属的2.67~40倍。综上,本研究江段沉积物受Cd和Pb的污染最严重,并且Cd在研究江段具有较高的生物有效性和较大的潜在生态风险。因此,为了库区及上游水环境和生物健康保护,需要加强关注三峡库区及上游重金属Cd的迁移转化以及对水生生物的毒性效应。

参考文献

陈静生, 王飞越, 程成旗, 等, 1996. 中国东部主要河流颗粒物的元素组成[J]. 北京大学学报(自然科学版), 32(2): 206−214.

孔明, 董增林, 晁建颖, 等, 2015. 巢湖表层沉积物重金属生物有效性与生态风险评价[J]. 中国环境科学, 35(4): 1223−1229.

李佳璐, 姜霞, 王书航, 等, 2016. 丹江口水库沉积物重金属形态分布特征及其迁移能力[J]. 中国环境科学, (4): 1207−1217.

李嗣新, 胡菊香, 池仕运, 等, 2016. 汞在新建水库食物网中生物累积与风险评价研究进展[J]. 生态学报, 36(5): 1233−1243.

林祖亨, 梁舜华, 1995. 珠江河口的现代沉积环境与底质重金属的含量分布[J]. 海洋通报, (4): 43−49.

王林泉, 罗玉红, 戴泽龙, 等, 2017. 香溪河沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 36(8): 1610−1617.

王图锦, 杨清伟, 潘瑾, 等, 2012. 三峡库区消落带沉积物重金属形态分布特征[J]. 环境与健康杂志, 29(10): 905−909.

王健康, 高博, 周怀东, 等, 2012. 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价[J]. 环境科学, 33(5): 1693−1699.

曾晓舵, 王向琴, 涂新红, 等, 2019. 农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J]. 生态环境学报, 28(9): 1900−1906.

张伟杰, 徐建新, 2018. 三峡库区干流沉积物重金属质量分数及污染评价[J]. 灌溉排水学报, 37(5): 99−105.

赵一阳, 鄢明才, 1992. 黄河、长江、中国浅海沉积物化学元素丰度比较[J]. 科学通报, 37(13): 1202−1204.

赵宽, 万昕, 郭展翅, 等, 2021. 安庆湿地湖滨带土壤重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. 水生态学杂志, 42(4): 67−75.

周怀东, 袁浩, 王雨春, 等, 2008. 长江水系沉积物中重金属的赋存形态[J]. 环境化学, 27(4): 515−519.

Bing H, Zhou J, Wu Y, et al, 2016. Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Pollution, 214: 485−496.

Bravo A G, Cosio C, Amouroux D, et al, 2014. Extremely elevated methyl mercury levels in water, sediment and organisms in a Romanian reservoir affected by release of mercury

from a chlor-alkali plant[J]. Water Research, 49: 391-405.

Farkas A, Erratico C, Vigano L, 2007. Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po[J]. Chemosphere, 68(4): 761-768.

Gao B, Zhou H, Yu Y, et al, 2015a. Occurrence, distribution, and risk assessment of the metals in sediments and fish from the largest reservoir in China[J]. RSC Advances, 5: 60322-60329.

Gao L, Gao B, Wei X, et al, 2015b. Assessment of metal toxicity and development of sediment quality guidelines using the equilibrium partitioning model for the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 22: 17577-17585.

Gao Q, Li Y, Cheng Q, et al, 2016. Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013 [J]. Water Research, 92: 262-274.

Islam M S, Ahmed M K, Raknuzzaman M, et al, 2015. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country[J]. Ecological Indicators, 48: 282-291.

Macdonald D D, Ingersoll C G, Berger T A, 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 39(1): 20-31.

Ma Y, Qin Y, Zheng B, et al, 2016. Three Gorges Reservoir: metal pollution in surface water and suspended particulate matter on different reservoir operation periods[J]. Environmental Earth Sciences, 75: 1413.

Nedrich S M, Burton G A, 2017. Indirect effects of climate change on zinc cycling in sediments: the role of changing water levels[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 36: 2456-2464.

Sang C, Zheng Y, Zhou Q, et al, 2019. Effects of water impoundment and water-level manipulation on the bioaccumulation pattern, trophic transfer and health risk of heavy metals in the food web of Three Gorges Reservoir (China) [J]. Chemosphere, 232: 403-414.

Sfakianakis D G, Renieri E, Kentouri M, et al, 2015. Effect of heavy metals on fish larvae deformities: A review[J]. Environmental Research, 137: 246-255.

Suresh G, Ramasamy V, Meenakshisundaram V, et al, 2011. Influence of mineralogical and heavy metal composition onnatural radionuclide contents in the river sediments[J]. Applied Radiation and Isotopes, 69(10): 1466-1474.

Tang Q, Bao Y, He X, et al, 2016. Flow regulation manipulates contemporary seasonal sedimentary dynamics in the reservoir fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of The Total Environment, 548-549: 410-420.

Vareda J P, Valente A J, Durães L, 2019. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review[J]. Journal of Environmental Management, 246: 101-118.

Wei X, Han L, Gao B, et al, 2016. Distribution, bioavailability, and potential risk assessment of the metals in tributary sediments of Three Gorges Reservoir: the impact of water impoundment[J]. Ecological Indicators, 61: 667-675.

Xu Y, Zhang M, Wang L, et al, 2011. Changes in water types under the regulated mode of water level in Three Gorges Reservoir, China[J]. Quaternary International, 244: 272-279.

（责任编辑 张俊友）

Fraction Characteristics and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Three Gorges Reservoir and the Upper Reaches

DONG Chun, YANG Zhi, ZHU Qi-guang, TANG Hui-yuan, LI Si-xin, CHEN Xiao-juan

(Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources & Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R. China)

Abstract: The characteristics and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments from the Three Gorges Reservoir area and the upper reaches were studied, aiming to provide basic data for the prevention and control of heavy metal pollution in the reservoir area. In November 2020, 21 sediment samples were collected from the Hejiang and Jiangjin sections in the upper reaches, Banan and Changshou sections in the Three Gorges Reservoir area. The total concentrations and fractions of Cu, Pb, Cr, Cd, As and Hg were analyzed by using continuous extraction method. Results show that the average concentration of heavy metals in sediments were in the order of Cr>Pb>Cu>As>Cd>Hg, and the levels of Cu, Pb and Cd were higher than the background values of the Yangtze River basin. Heavy metals presented obvious spatial distribution differences, and were higher in Changshou section compared with other sections. The fraction of each form varied significantly among the heavy metals. The proportion of Fe-Mn oxide fraction of Pb was as high as 34.99%-43.17%. Cd had the highest percentage of the exchangeable fraction, accounting for 17.41%, 16.65%, 20.56% and 18.88% in the sediments of Hejiang, Jiangjin, Banan and Changshou sections, respectively. The residual fractions of As, Hg, Cu and Cr were relatively high and the residual fraction percentages of Hg and Cr exceeded 80% and 88%, respectively. Ecological risk assessment results show that the pollution load index (PLI) and the potential ecological risk index (RI) values were 0.90-1.61 and 112.49-245.03, respectively, and the index value in the Changshou and Banan sections was higher. The comprehensive evaluation show that the heavy metal pollution was serious in the sediment of Changshou and Banan sections in the Three Gorges Reservoir area and at a moderate pollution level. Cd and Pb were the primary heavy metal pollutants, and Cd was more bioavailable and posed larger potential ecological risk.

Key words: heavy metal; fraction; ecological risk; surface sediment; Three Gorges Reservoir