

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0595

周军, 高凤杰, 张宝杰, 等. 2014. 松花江表层沉积物有毒重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 环境科学学报, 34(10): 2701-2708

Zhou J, Gao F J, Zhang B J, et al. 2014. Assessment on the potential biological toxicity risk of toxic heavy metals in the surficial sediments of Songhua River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(10): 2701-2708

松花江表层沉积物有毒重金属污染的潜在生物毒性风险评价

周军^{1,2}, 高凤杰^{1,*}, 张宝杰², 马彪²

1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030

2. 黑龙江省环境保护科学研究院, 哈尔滨 150056

收稿日期: 2013-12-10

修回日期: 2014-01-10

录用日期: 2014-01-21

摘要: 采用地累积指数模型(I_{geo})及一致性沉积物质量基准(CBSQGs)对第二松花江、松花江干流以及 4 条代表性支流 12 个断面表层沉积物 Hg、Cd、Cr、As 和 Pb 5 种有毒重金属的污染特征及其潜在生物毒性风险进行深入探讨。研究表明: ①松花江表层沉积物中 5 种重金属含量平均值由大到小顺序为 Cr>Pb>As>Cd>Hg; 除 Hg 外, 其余 4 种重金属均表现为一定的富集现象, 但富集系数不超过 1.2; ②地累积指数表明松花江表层沉积物中 5 种有毒重金属污染较轻, 基本属于无污染或无污染-轻污染状态, 只有 Cr 和 As 在 10 号断面达到了轻污染程度; ③重金属之间 Pearson 相关系数表明 Cr 和 As(0.896)、Cr 和 Pb(0.708)呈极显著相关, As 和 Pb 呈显著相关(0.639), 揭示 Cr、As 和 Pb 极可能具有相似的来源; ④各断面毒性单位和 $\Sigma TUs < 1.8$, 不同重金属毒性效应顺序为 Cr>Cd>Pb>As>Hg。

关键词: 有毒重金属; 一致性沉积物质量基准(CBSQGs); Pearson 相关系数; 风险评价; 松花江

文章编号: 0253-2468(2014)10-2701-08

中图分类号: X820.4

文献标识码: A

Assessment on the potential biological toxicity risk of toxic heavy metals in the surficial sediments of Songhua River

ZHOU Jun^{1,2}, GAO Fengjie^{1,*}, ZHANG Baojie², MA Biao²

1. School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030

2. Heilongjiang Research Academy of Environmental Protection, Harbin 150056

Received 10 December 2013;

received in revised form 10 January 2014;

accepted 21 January 2014

Abstract: This study aims to discuss the pollution characteristics and potential biological toxicity risk of Hg, Cd, Cr, As and Pb in the surficial sediments of 12 sections in the Second Songhua River, Songhua River and the other four representative tributaries using the Geo-cumulative index model (I_{geo}) and the Consensus-Based Sediment Quality Guidelines (CBSQGs). The results show that: ① average concentrations for heavy metals decrease by the order of Cr>Pb>As>Cd>Hg; and the heavy metals enrich for a certain extent except for Hg while the enrichment coefficient is not larger than 1.2; ② the I_{geo} reveals slight heavy metals pollution which demonstrates no pollution or no-to-light pollution, while the slight pollution by Cr and As only appears in the section of No. 10. ③ Significant correlations are examined between Cr and As, Cr and Pb, As and Pb with a Pearson correlation coefficient of 0.896, 0.708, 0.639, respectively. This correlations reveal that Cr, As and Pb probably have similar sources. ④ the ΣTUs of each section is lower than 1.8 and its order for different heavy metals from high to low is Cr>Cd>Pb>As>Hg.

Keywords: toxic heavy metal; Consensus-Based Sediment Quality Guidelines (CBSQGs); Pearson correlation coefficient; risk assessment; Songhua River

1 引言(Introduction)

沉积物是水生生态系统的重要组成部分, 它不

仅是致污物的集散地, 也是环境演变的产物, 承载着重要的环境演变信息, 因此沉积物环境质量好坏攸关整个水生生态系统的健康与可持续发展(吴斌

基金项目: 环保公益性行业科研专项(No.2010467038)

Supported by the Special Fund for Environmental Research in the Public Interest (No.2010467038)

作者简介: 周军(1980—), 男, 博士生, E-mail: zhoujunhky@126.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: gaojiecumt@126.com

Biography: ZHOU Jun(1980—), male, Ph.D. candidate, E-mail: zhoujunhky@126.com; * Corresponding author, E-mail: gaojiecumt@126.com

等,2011).在沉积物众多的污染物中,重金属为非降解性污染物,由于其持久性和高毒性而对水生态系统构成严重的环境危害,其生态毒性风险是近年来重点关注的问题(范文宏等,2006;朱程等,2010;战玉柱等,2011).国外对水体沉积物污染及环境评价的系统研究开始于20世纪80年代,并在沉积物环境质量基准(Sediment Quality Guidelines, SQGs)的建立、沉积物毒性识别和污染物生物有效性及其影响因素研究等方面取得了较大进展(Chapman, 1989; Burton, 2002),如北美、欧洲、澳大利亚、新西兰等地区利用生物效应数据库法(Biological Effect Database for Sediments, BEDS)(Long & MacDonald, 1993)、平衡分配法(Equilibrium Partitioning approach, EqP)(US EPA, 1990)、筛选水平浓度法(Screening Level Concentration, SLC)(Neff *et al.*, 1986)、表观效应阈值法(Apparent Effect Threshold, AET)(Barrick *et al.*, 1989)、沉积物质量三元法(Sediment Quality Triad approach, SQT)(Canfield *et al.*, 1996)等方法建立了十多种数值型沉积物质量基准,我国学者也借鉴国外相关方法,建立了长江(方涛和徐小清,2007)、黄河(霍文毅等,1997)、太湖和辽河(邓保乐等,2011)以及湘江(蒋博峰等,2013)等沉积物质量基准.由于不同基准之间的毒性预测能力差别不大(Wenning and Ingersoll, 2002),且每一种基准都有其特有的保护对象、程度以及适用范围,加之致污物的生物有效性、致污物之间的复合作用、基准的生态相关性以及沉积物化学与生物效应之间的复杂关系,因此,迄今也没有提出能得到广泛认可的沉积物环境质量基准(Smith *et al.*, 1996).一致性沉积物质量基准(Consensus-Based Sediment Quality Guidelines, CBSQGs)以毒性效应预测准确度高、普适性强等优点近几年来逐渐发展成为主要的沉积物质量评价工具之一.它通过筛选几种具有相似评价目标的单个SQGs,取其几何平均值来获得相应致污物的效应浓度,既解决了选择取舍的难题,简化了评价过程,又提高了毒性预测能力,而且更真实地反映了致污物生物效应(Baudo, 2008);此外,CBSQGs作为一种证据权重(Weight of Evidence, WOE)的方法,还增强了其与实际生物效应的相关性(WDNR, 2003).研究表明CBSQGs在金属污染沉积物的环境质量评价中具有较高的可靠性(Swartz, 1999; MacDonald *et al.*, 2000).

松花江是我国七大江河水系之一,是中俄界河

黑龙江的最重要的支流,对界河黑龙江的水质影响很大.松花江历史上曾出现过重金属严重污染的现象.国家“六五”、“七五”和“八五”期间,黑龙江省环科院、中科院长春地理所等科研院所对松花江进行过流域元素背景值调查研究,对汞等重金属的污染状况进行了较全面的研究,在研究基础上制定了我国甲基汞的水环境质量标准(刘永懋等,1998);“十五”和“十一五”期间,吉林和黑龙江两省严格落实松花江流域水污染防治规划,沿江重金属工业污染源已得到有效治理,期间国内学者对松花江部分江段重金属污染进行研究(冯丹和白羽军,2003;刘宝林等,2009;陆继龙等,2009),但对全江系统调查与研究较少.近年来,随着松花江流域新一轮经济的快速发展,特别是国家振兴东北老工业基地和确保粮食安全战略规划提出,经济快速发展和高强度人类活动引起的水污染、大气污染等问题可将重金属元素通过降雨、地表径流进入松花江水体,并且沿江人类活动(如采沙或工程建设)加大对江水的扰动,部分江段沉积物中的重金属重新释放,可能成为水体的二次污染源.因此,进行松花江全江段重金属污染特征研究十分必要.国家对河流重金属污染问题高度重视,《重金属污染综合防治“十二五”规划》首次提出了重金属总量控制的目标,主要有Hg、Cd、Cr、Pb和类金属As.基于以上考虑,本文以松花江全江段为研究对象,研究沉积物中重金属Hg、Cd、Cr、As和Pb的沿江分布规律、可能的污染来源及其潜在生态危害等级,以期对松花江水体环境保护及重金属污染的修复提供重要科学依据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 样品采集与预处理

2011年5月在松花江干流及代表性支流共布设了12个监测断面(图1).

采样点采用选择性布设和对照点布设原则,选择性布设采样点主要选在河流交汇处、厂矿企业的排污口和可能的污染源下游,对照点选择远离重金属污染源的河流源头区域.用抓斗式采样器采集底泥,去除植物残体、瓦砾及较大砾石,放入聚乙烯自封袋密封后,带回实验室.室温下自然风干,均匀混合研磨后过100目尼龙筛,样品放入500 mL棕色广口瓶中,密封保存备用.采用微波消解法处理土壤样品:称取0.3 g(精确到0.0001 g)土样于消解罐中,加入5 mL高纯HNO₃和1 mL高纯HF,然后加盖置

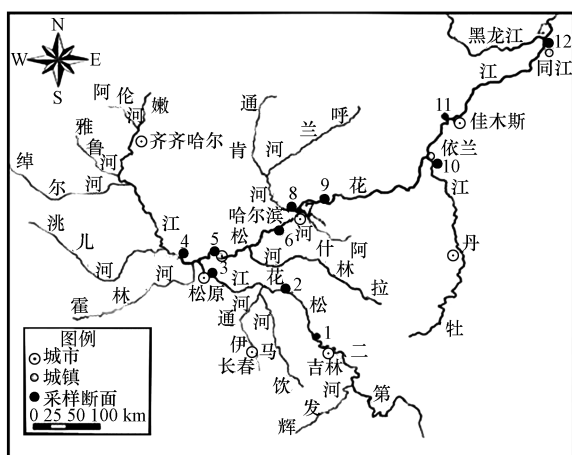


图1 松花江表层沉积物重金属监测断面示意图

Fig.1 Sampling Sections in surficial sediments of Songhua River

于电热板上,于 120 °C 加热,待有机物反应完全,无气泡产生后取出(30 min 左右).此时土样还未溶解完全,待消解罐稍冷却后,盖上密封盖并旋紧,放入微波消解系统中,仪器型号为 SW-2.消解程序分为 2 步:加热至 120 °C 保持 5 min,加热至 180 °C 保持 20 min.消解完毕,将消解罐取出后置于 135 °C 加热板上赶酸,内容物是透明液体,待体积减少到一半时停止加热(30 min 左右),取出冷却后用 2% HNO₃ 溶液清洗内壁,移至 50 mL PE 瓶中,并用 2% HNO₃ 溶液定容至 25 mL,待上机测定.用 ICP-MS 进行样品测定,仪器型号为 PerkinElmer 300X.采用国家标准河流沉积物样品(GB W08301)进行实验质量控制,误差控制在 10% 以内.用 SPSS 17.0 和 Origin 8.0 对数据进行分析处理.

2.2 重金属污染特征评价方法

采用地累积指数进行沉积物重金属污染评价.地累积指数(geo-accumulation index, I_{geo})是德国海德堡大学沉积物研究所的科学家 Müller 于 1969 年提出的一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标(Müller, 1969),该方法综合考虑了人为活动对环境的影响,也考虑了由于自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素,被广泛用于研究现代沉积物中重金属污染的评价(Azmat Zahra *et al.*, 2014; Asma Binta Hasan *et al.*, 2013; 胡国成等, 2011).计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{k B_n} \quad (1)$$

式中, C_n 是元素 n 在小于 2 μm 沉积物中的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_n 为粘质沉积岩(即普通岩)中该元素

的地球化学背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); k 是考虑了各地岩石差异可能会引起的变动而取的系数(取值为 1.5, 无量纲).1981 年, Müller (1981) 将这一指标划分为 6 个等级 ($I_{geo} \leq 0$, 无污染; $0 < I_{geo} \leq 1$, 无污染到轻污染; $1 < I_{geo} \leq 2$, 轻污染; $2 < I_{geo} \leq 3$, 轻污染到重污染; $3 < I_{geo} \leq 4$, 重污染; $4 < I_{geo} \leq 5$, 重污染到高度污染; $I_{geo} > 5$ 高度污染).

在 Müller 的地累积指数法中,采用作为沉积物世界性标准的页岩(相当于 $< 2 \mu\text{m}$ 的粘土沉积物)的平均组成作为参比值,但目前在我国研究河流颗粒物时,大部分筛选粒径 $< 63 \mu\text{m}$ 或 $< 50 \mu\text{m}$ 的样品进行研究,这样,以粒径 $< 2 \mu\text{m}$ 的页岩组成作为参比值将使得计算出的重金属污染水平等级降低(霍文毅等, 1997).滕彦国等(2002)采用国内外文献中常用的几种(全球平均页岩、砂岩、粘土、整个陆壳及中国陆壳)地球化学背景值研究了四川攀枝花地区昔格达组地层上部 Zn 的污染特征,结果表明 Zn 的地累积指数差异较大.研究指出沉积物的粒度大小、物质组成、矿物组成都会对地累积指数结果准确性造成影响.因此,在研究某地区沉积物中重金属的地累积指数时,应以该区沉积物自身背景值作为计算地累积指数的地球化学背景值,以保证计算的地累积指数符合该区的实际,并以此保证所进行的重金属污染分析准确.余中盛等(1992)对松花江沉积物中重金属元素背景值进行了研究,但由于当时采用的实验方法和仪器设备与现在相比差距较大,并且采集的表层沉积物类别多样.为保证背景值和样品表层沉积物类别、实验和分析方法一致,2011 年 5 月课题组分别在第二松花江源头长白山天池、嫩江源头甘河、拉林河源头凤凰山、牡丹江源头敦化市上游采集了 23 个天然河流底泥样品,进行了重金属背景值含量的测定.

2.3 重金属潜在生物毒性风险评价方法

采用一致性沉积物质量基准(Consensus-Based Sediment Quality Guidelines, CBSQGs)来评价沉积物中重金属元素的生物毒性风险.对于每一种致污物, CBSQGs 包括两个阈值,即阈值效应浓度(Threshold Effect Concentration, TEC)与可能效应浓度(Probable Effect Concentration, PEC),前者表示低于该阈值时,有害生物效应发生的可能性较小,而后者则表示高于 PEC 时,有害生物效应发生的可能性较大.一致性沉积物质量基准最早应用于淡水生态系统的沉积物环境质量评价,由于其可靠性在世界

各地得以推广应用,适用对象范围也从淡水沉积物扩大到河口、海湾等半咸水、咸水沉积物(吴斌等, 2011).本文5种有毒重金属的CBSQGs值列于表1.

表1 5种有毒重金属CBSQGs值
Table 1 CBSQGs of 5 toxic heavy metals

CBSQGs 值	Hg	Cd	Cr	As	Pb
TEC	0.18	0.99	43.40	9.79	35.80
PEC	1.06	4.98	111.00	33.00	128.0

注:数据来源于 MacDonald 等(2000).

Pedersen 等(1998)将沉积物重金属质量基准法进一步发展为毒性单位评价法.毒性单位(Toxic

Units, TU)定义为毒性物质化学浓度与其对应的PEC值之比,以便对各种重金属元素的毒性进行标准化,从而比较其相对毒性效应.各样点潜在急性毒性用5种重金属的毒性单位总和(\sum TUs)来表征.

3 结果分析(Results and analysis)

3.1 松花江表层沉积物有毒重金属的分布及污染水平

松花江表层沉积物中5种有毒重金属污染浓度见表2,地累积指数 I_{geo} 以及污染分级情况见表3.

表2 松花江表层沉积物中有毒重金属污染特征

Table 2 Toxic heavy metal pollution characteristics in surficial sediments of Songhua River

重金属	重金属含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		富集系数 C_f	超背景值点位数	CBSQGs	
	背景值	平均值			TEC	PEC
Hg	0.07	0.18	0.82	4	0.08	1.06
Cd	1.09	1.26	1.16	9	0.99	4.98
Cr	32.15	38.52	1.20	8	43.40	111.00
As	5.89	6.75	1.15	8	9.79	33.00
Pb	28.62	29.61	1.03	6	35.80	128.00

注:富集系数 C_f 为平均值/背景值.

由表2可以看出,松花江表层沉积物中5种有毒重金属含量平均值由大到小顺序为Cr($38.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>Pb($29.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>As($6.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>Cd($1.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>Hg($0.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其中Cr和Pb的含量明显高于其它重金属.沿江超过背景值的断面个数分别为Hg 4个、Cd 9个、Cr 8个、As 8个

和Pb 6个.由富集系数 C_f 可以看出,除Hg富集系数小于1外,其它4种重金属均大于1,但整体上不超过2,说明松花江曾经非常严重的Hg污染已得到有效治理,其它重金属有一定富集但污染水平较低.

由表3可以看出,整体上松花江5种有毒重金属污染较轻,基本属于无污染或无污染-轻污染状

表3 松花江表层沉积物有毒重金属污染地累积指数 I_{geo} 及污染等级

Table 3 Geo-accumulation index (I_{geo}) and its contamination level of toxic heavy metal in surficial sediments of Songhua River

采样点编号	Hg		Cd		Cr		As		Pb	
	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级
1	0.58	1	0.72	1	-0.19	0	0.17	1	0.17	1
2	0.32	1	0.48	1	0.41	1	0.06	1	0.08	1
3	-0.42	0	0.40	1	0.43	1	0.02	1	-0.03	0
4	-2.00	0	0.37	1	-0.33	0	-0.83	0	-0.02	0
5	-0.42	0	-0.14	0	-0.64	0	-0.64	0	-0.50	0
6	-2.00	0	0.04	1	0.16	1	0.16	1	-0.07	0
7	0.81	1	-0.15	0	0.64	1	0.39	1	0.39	1
8	-1.00	0	0.09	1	0.21	1	0.17	1	0.13	1
9	-0.19	0	0.30	1	-0.04	0	-0.22	0	-0.07	0
10	0.32	1	0.10	1	1.03	2	1.35	2	0.25	1
11	-2.00	0	0.20	1	0.55	1	0.61	1	0.23	1
12	-1.00	0	-0.15	0	0.11	1	-0.20	0	-0.17	0

态,只有 Cr 和 As 在 10 号断面达到了轻度污染程度.Hg 在第二松花江的 1 号和 2 号断面以及干流的 7 号和 10 号断面污染等级为 1,这与断面分布直接相关.1 号断面位于历史上吉化公司废水排污口附近,在 20 世纪七八十年代哨口附近哈达湾右岸中总 Hg 含量曾达到 $39.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (刘永懋等,1998);7 号和 10 号断面处于城市排污口附近,随着快速城市化进程及流域工农经济发展,各种重金属排污量大,导致其污染程度高.Cd、Cr、As 和 Pb 在各个水系一半以上断面等级为 1,这与 5 种重金属富集状态分析结果相一致.

3.2 重金属污染来源解析

相关分析可以揭示河流中不同重金属之间的来源关系,若重金属元素之间存在相关关系,说明它们可能有相似的来源,若不存在相关关系则表明来源不同(张凤英等,2010).运用 SPSS 软件求出 12 个采样点中的 5 种重金属浓度间的 Pearson 相关系数矩阵见表 4,聚类分析结果见图 2.

表 4 表层沉积物重金属含量相关分析

Table 4 Correlation analysis of heavy metal content in surficial sediments

采样点	Hg	Cd	Cr	As	Pb
Hg	1				
Cd	0.221	1			
Cr	0.340	-0.166	1		
As	0.326	-0.093	0.896**	1	
Pb	0.492	0.175	0.708**	0.639*	1
背景值	Hg	Cd	Cr	As	Pb
Hg	1				
Cd	0.553	1			
Cr	0.513	-0.216	1		
As	0.475	-0.110	0.811*	1	
Pb	0.683	0.295	0.732	0.833*	1

注: * 显著相关($p < 0.05$), ** 极显著相关($p < 0.01$).

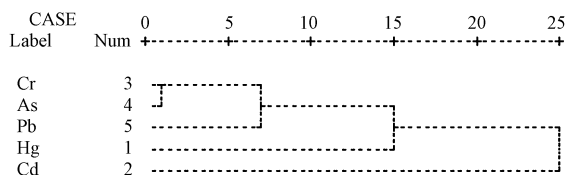


图 2 松花江表层沉积物重金属聚类分析结果

Fig.2 The Cluster analysis of heavy metal content in surficial sediments

由表 4 可得,5 种重金属背景值之间的相关系

数大多大于采样点,说明松花江 5 种重金属污染都一定程度受人为干扰的影响.其中,As 和 Cr、Pb 和 Cr 之间由背景值的显著相关和较高程度相关转变到采样点的极显著相关,说明 Cr、As 和 Pb 极可能具有相似的自然源及人工源;而其它重金属含量之间的相关性都比较弱,说明松花江流域重金属元素来源不同.图 2 的聚类分析结果进一步证实表 4 结论.根据工业过程中可能释放的化学元素可知,多数工业活动在引起 Cd 污染的同时,都会引起 Cr 污染,而仅有化石燃料燃烧(发电)、核反应堆、半导体、超导等几种工业过程中直接或间接排放物会造成 Cd 污染,而不会产生 Cr.此外,Cd 一般可作为使用农药和化肥等农业活动的标识元素 (Pedersen *et al.*, 1998),从而推断 Cd 主要来源于电力能源及农业生产.Hg 浓度峰值主要出现在城市排污口附近,根据表 4 和图 2 推断其主要来源于化工行业.As 峰值在 10 号断面,推断其主要来源于农业生产(赵维梅,2010),Cr 除农业源外则主要来源于冶炼业、制药、造纸等行业,Pb 与 Cr 和 As 同源,另一大来源则是交通运输中含铅石油的燃烧.

3.3 有毒重金属污染生物毒性风险评价

根据表 2 数据,得到各断面 5 种有毒重金属与各自对应 TEC 和 PEC 浓度的关系(图 3),据前文 2.3 节内容得到各断面有毒重金属生物毒性单位总和($\sum \text{TUs}$)(图 4).

由图 3 可以看出,整体上松花江各断面 5 种有毒重金属浓度均不超过对应的 PEC 浓度,表明重金属有害生物效应发生的可能性不大.Hg 在各个断面均小于 TEC;Cd 在 7 号和 12 号断面小于 TEC,其余断面均处于 TEC 与 PEC 之间;Cr 在 7 号、10 号和 11 号断面处于 TEC 和 PEC 之间外,其余各断面均小于 TEC;As 除在 10 号和 11 号断面处于 TEC 与 PEC 之间外,其余各断面均小于 TEC;Pb 除 7 号断面处于 TEC 和 PEC 之间外,其余各断面均小于 TEC.

由图 4 可以看出,整体上各样点 $\sum \text{TUs} < 1.8$,各断面毒性单位和大小顺序为:10 号 > 7 号 > 11 号 > 2 号 > 1 号 > 3 号 > 8 号 > 9 号 > 6 号 > 12 号 > 4 号 > 5 号,这与前文 I_{geo} 分析结论相一致;就单一重金属而言,Cr 的毒性效应较大,除 1、4 和 5 号断面外,其余各断面均为最大;Cd 的毒性效应在 1 号断面最大,在 2、3、4、5、6 和 9 号断面处于次大位置;Hg 的毒性效应在全江各断面均处于最低水平;As 与 Pb 相比较,

除 10 号和 11 号断面 Pb 的毒性效应比 As 小外,其余各断面均比 As 大.由此可知,松花江表层沉积物 5

种有毒重金属毒性效应排序为 Cr>Cd>Pb>As>Hg.

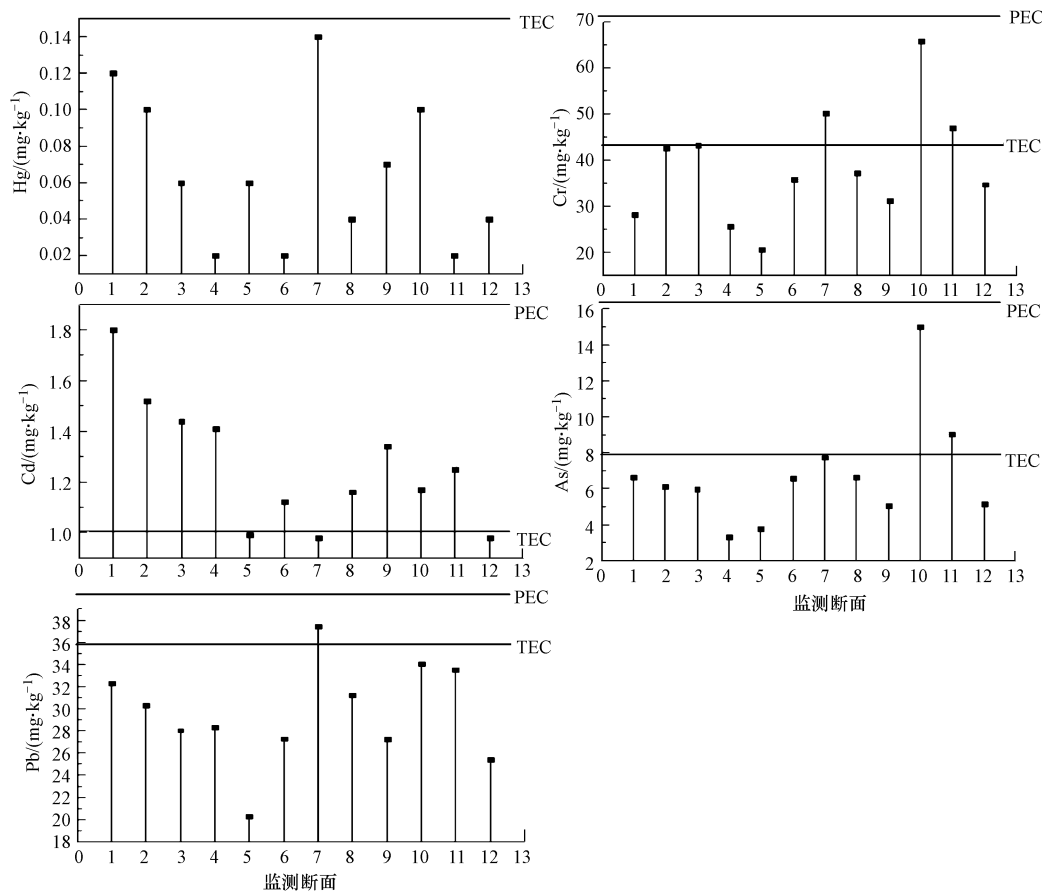


图 3 各断面有毒重金属 TEC 和 PEC 效应

Fig.3 TEC and PEC effects of heavy metals in every section

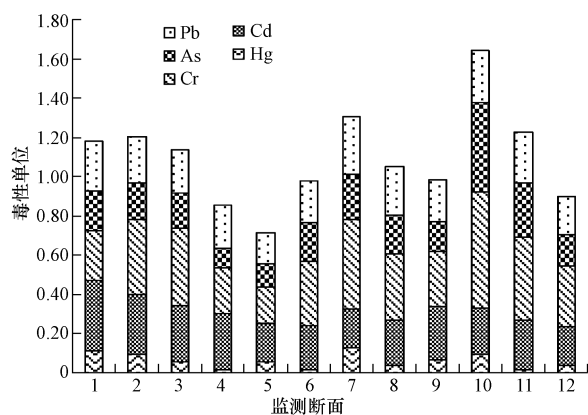


图 4 各断面 5 种有毒重金属毒性单位及毒性单位总和

Fig.4 Toxic Units (TU) and Σ TUs of 5 metals in every section

4 讨论 (Discussion)

朱青青和王中良 (2012) 曾搜集正式发表的不同时期干流沉积物重金属文献 51 篇共 34478 个采

样点数据,对比分析中国七大水系重金属污染特征,得出结论为松花江的重金属生态风险指数位于珠江、海河之后排第三位,其中,Hg 的生态风险等级为极强,Cd 的生态风险等级为强,其它为轻微,究其原因因为历史上松花江 Hg 污染非常严重,松花江干流上游第二松花江严重的化工企业排污使松花江重金属污染一度严重.与之对比,本文 Hg 和 Cd 污染风险已远远降低,这与松花江重金属污染治理及污染企业排污控制有关.冯丹和白羽军 (2003) 对松花江哈尔滨江段 1996—2000 年底质重金属监测数据进行污染分析,得出松花江哈尔滨江段底质的重金属污染总体较轻,干流各断面间差别不大,阿什河口内污染要明显重于干流,这与本文研究结论有相似之处,原因是阿什河流域城市化发展快,流域环境污染压力过高,重金属排污量大.总言之,松花江流域通过有效治理工业污染源的重金属排放以及大力实施让松花江休养生息的政策措施,松花江水

环境质量得到显著改善。

5 结论 (Conclusion)

1) 5 种有毒重金属浓度平均值由大到小顺序为 Cr>Pb>As>Cd>Hg。除 Hg 外,其余 4 种重金属均表现为一定的富集现象,但富集系数最高为 1.2。地累积指数表明整体上松花江各类重金属污染较轻,基本属于无污染或无污染-轻污染状态,只有 Cr 和 As 在 10 号断面达到了轻度污染程度。

2) 重金属之间 Pearson 相关系数表明 Cr 和 As、Cr 和 Pb 之间极显著相关,As 和 Pb 之间显著相关,表明 Cr、As 和 Pb 极可能具有相似的来源;结合聚类分析推断表明 Cd 主要来源于电力能源及农业生产,Hg 主要来源于化工行业,As 主要来源于农业生产,Cr 除农业源外则主要来源于冶炼、制药、造纸等行业,Pb 与 Cr 和 As 同源,另一大来源则是交通运输中含铅石油的燃烧。

3) 沉积物中重金属的生物毒性效应较低 ($\sum TU_s < 1.8$),各断面毒性单位和大小顺序为:10 号>7 号>11 号>2 号>1 号>3 号>8 号>9 号>6 号>12 号>4 号>5 号;重金属毒性效应顺序为 Cr>Cd>Pb>As>Hg。

责任作者简介:高凤杰(1981—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为资源环境遥感.E-mail: gaofiejiecum@126.com.

参考文献 (References):

- Barrick R C, Beller H R, Becker D S, *et al.* 1989. Use of the Apparent Effects Threshold (AET) approach in classifying contaminated sediments [A] // Contaminated marine sediments assessment and remediation [C]. Washington DC: National Academy Press. 421-437
- Baudo R. 2008. The bioassaybased approach in sediment quality assessment [J]. *Ann Ist Super Sanita*, 44(3): 233-238
- Burton G A Jr. 2002. Sediment quality criteria in use around the world [J]. *The Japanese Society of Limnology*, 3: 65-75
- Canfield T J, Dwyer F J, Fairchild J F, *et al.* 1996. Assessing contamination in Great Lakes sediments using benthic invertebrate communities and the sediment quality triad approach [J]. *Journal Great Lakes Research*, 22(3): 565-583
- Chapman P M. 1989. Current approaches to developing sediment quality criteria [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 8(7): 589-599
- 邓保乐, 祝凌燕, 刘慢, 等. 2011. 太湖和辽河沉积物重金属质量基准及生态风险评估 [J]. *环境科学研究*, 24(1): 34-42
- 范文宏, 张博, 陈静生, 等. 2006. 锦州湾沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价 [J]. *环境科学学报*, 26(6): 289-297
- 方涛, 徐小清. 2007. 应用平衡分配法建立长江水系沉积物金属相对质量基准 [J]. *长江流域资源与环境*, 16(4): 525-531
- 冯丹, 白羽军. 2003. 松花江哈尔滨江段底质重金属污染状况调查研究 [J]. *黑龙江环境通报*, 27(3): 86-87, 110
- Hasan A B, Kabir S, Selim Reza A H M, *et al.* 2013. Enrichment factor and geo-accumulation index of trace metals in sediments of the ship breaking area of Sitakund Upazilla (Bhatiary-Kumira), Chittagong, Bangladesh [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 125: 130-137
- 胡国成, 许振成, 赵学敏, 等. 2011. 高州水库表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价 [J]. *环境科学研究*, 24(8): 949-957
- 霍文毅, 黄凤茹, 陈静生, 等. 1997. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究 [J]. *地理科学*, 17(1): 81-86
- 蒋博峰, 桑磊鑫, 孙卫玲, 等. 2013. 湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用 [J]. *环境科学*, 34(1): 98-107
- 刘宝林, 高阳, 唐艳茹. 2009. 松花江吉林江段地表水重金属污染特征的调查与评价 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 32(3): 433-435
- 刘永懋, 王稔华, 翟平阳. 1998. 中国松花江甲基汞污染防治与标准研究 [M]. 北京: 科学出版社
- Long E R, MacDonald D D. 1993. National status and trends program approach [A] // Baker B, Kravitz M, eds. *Sediment Classification Methods Compendium*. Sediment Oversight Technical Committee [C]. Washington DC: US EPA
- 陆继龙, 郝立波, 赵玉岩, 等. 2009. 第二松花江中下游水体重金属特征及潜在生态风险 [J]. *环境科学与技术*, 32(5): 168-172
- Müller G. 1969. Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 2(3): 108-118
- Müller G. 1981. Die schwermetall belastung der sedimentendes Neckars und Seiner Nebenflüsse [J]. *Chemiker-Zeitung*, 6: 157-164
- MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. *Arch Environmental Toxicology*, 39(1): 20-31
- Neff J M, Bean D J, Cornaby B W, *et al.* 1986. Sediment quality criteria methodology validation: calculation of screening level concentration from field data [R]. Battelle Washington Environmental Program Office for US EPA
- Pedersen F, Bjørnstad E, Andersen H V. 1998. Characterization of sediments from Copenhagen harbour by use of biotests [J]. *Water Science and Technology*, 37(6/7): 233-241
- 余中盛, 王晓君, 刘玉青, 等. 1992. 松花江水系沉积物中重金属元素背景值 [A]. // 区域环境研究文集 [C]. 北京: 北京科学技术出版社. 67-74
- Smith S L, MacDonald D D, Keenleyside K A, *et al.* 1996. A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 22(3): 624-638
- Swartz R C. 1999. Consensus sediment quality guidelines for PAH mixtures [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18(4): 780-787
- US EPA. 1990. Evaluation of the Equilibrium Partitioning (EqP) approach for assessing sediment quality [R]. Report of the Sediment

- Criteria Subcommittee of the Ecological Process and Effects Committee. Washington DC
- WDNR (Wisconsin Department of Natural Resources). 2003. Consensus-Based Sediment Quality Guidelines Recommendations for use & Application Interim Guidelines [R]. Madison
- Wenning R J, Ingersoll C G. 2002. Use of sediment quality guidelines (SQGs) and related tools for the assessment of contaminated sediments. Summary from a SETAC Pellston Workshop [M]. Pensacola, Florida; SETAC Press
- 吴斌, 宋金明, 李学刚, 等. 2011. 一致性沉积物质量基准(CBSQGs)及其在近海沉积物环境质量评价中的应用[J]. 环境化学, 30(11): 1949-1956
- Zahra A, Hashmi M Z, Malik R N, *et al.* 2014. Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah-Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan[J]. Science of the Total Environment, 470-471: 925-933
- 战玉柱, 姜霞, 陈春霄, 等. 2011. 太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价[J]. 环境科学研究, 24(4): 363-370
- 张凤英, 阎百兴, 潘月鹏, 等. 2010. 松花江沉积物重金属时空变化与来源分析[J]. 云南农业大学学报, 25(5): 670-675
- 赵维梅. 2010. 环境中砷的来源及影响[J]. 科技资讯, (8): 146
- 朱程, 马陶武, 周科, 等. 2010. 湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险[J]. 生态学报, 30(15): 3982-3993
- 朱青青, 王中良. 2012. 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, 40(3): 305-314
- 滕彦国, 虞先国, 倪师军, 等. 2002. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染: 选择地球化学背景的影响[J]. 环境科学与技术, 25(2): 7-9