

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0524

王馨慧,单保庆,唐文忠,等.2016.典型城市河流表层沉积物中汞污染特征与生态风险[J].环境科学学报,36(4):1153-1159

Wang X H, Shan B Q, Tang W Z, et al. 2016. Pollution characteristics and ecological risk of mercury in the surface sediment of a typical urban river[J].

Acta Scientiae Circumstantiae, 36(4):1153-1159

## 典型城市河流表层沉积物中汞污染特征与生态风险

王馨慧<sup>1,2</sup>,单保庆<sup>2</sup>,唐文忠<sup>2,\*</sup>,张文强<sup>2</sup>,杨柳<sup>1</sup>

1. 中国矿业大学(北京),北京 100083

2. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085

收稿日期:2015-05-27

修回日期:2015-06-18

录用日期:2015-06-18

**摘要:**以北京市凉水河为研究对象,研究了典型城市河流表层沉积物中汞污染特征与生态风险.采用王水水浴消解法和 BCR 三步提取法分析沉积物中汞总量及其赋存形态特征,并利用潜在生态风险指数法和风险评估指数法评价汞的生态风险.结果表明,凉水河表层沉积物中总汞含量范围是 0.018~3.48 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值是 0.974 mg·kg<sup>-1</sup>,多数样点高于北京市土壤背景值;表层沉积物中汞主要以残渣态(B4 态)存在,平均含量为 0.841 mg·kg<sup>-1</sup>,各形态汞所占比例顺序为:残渣态(B4 态)>可氧化态(B3 态)>可还原态(B2 态)>弱酸可溶解态(B1 态),其中生物有效态汞占总汞的比例为 23.21%.基于汞总量的潜在生态风险评价可知,凉水河各个河段表层沉积物中汞的潜在生态风险程度都处于很高水平( $E_i$  平均值为 565);但基于汞形态的生态风险评价可知,汞的生态风险都处于较低水平(B1 所占比例平均值为 4.80%).

**关键词:**凉水河;汞;赋存形态;风险评价

文章编号:0253-2468(2016)04-1153-07

中图分类号:X522

文献标识码:A

## Pollution characteristics and ecological risk of mercury in the surface sediment of a typical urban river

WANG Xinhui<sup>1,2</sup>, SHAN Baoqing<sup>2</sup>, TANG Wenzhong<sup>2,\*</sup>, ZHANG Wenqiang<sup>2</sup>, YANG Liu<sup>1</sup>

1. China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083

2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

Received 27 May 2015;

received in revised form 18 June 2015;

accepted 18 June 2015

**Abstract:** The pollution characteristics and ecological risk of mercury (Hg) in the surface sediments of Liangshui River System (LRS), Beijing were investigated by using the methods including BCR three-step sequential extraction procedure and potential ecological risk index (RI), risk assessment code (RAC). The results show that total Hg contents in the surface sediments ranged from 0.018 mg·kg<sup>-1</sup> to 3.48 mg·kg<sup>-1</sup>, with an average of 0.974 mg·kg<sup>-1</sup>, and most of them were higher than the soil background value. In terms of speciation, Hg mainly existed in B4 (average content 0.841 mg·kg<sup>-1</sup>), and the contents of the four forms were in the following sequence: B4>B3>B2>B1. In addition, the percentage of biological available Hg was 23.21%. The  $E_i$  of Hg in the surface sediments of LRS were in high level (RI=565 on average), however, according to the classification of RAC, the risk of Hg was low in the studied sediments.

**Keywords:** Liangshui River; Hg; Speciation; risk assessment

### 1 引言(Introduction)

随着经济发展,重金属污染成为许多国家的环境危机之一(Gao and Chen, 2012; Adamo et al., 2005).沉积物是河流重金属污染物的聚集地,也是

水生物栖息地的重要组成部分.重金属残留在沉积物中,可能积聚在微生物、水生动植物体内,进而进入人类食物链,导致健康问题(Varol and Şen, 2012).当水体环境发生改变时,沉积物中的重金属可能会再次释放到水体中,成为潜在的污染源,威

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2012ZX07203-006);国家自然科学基金资助项目(No.21107126)

Supported by the National Water Pollution Control Program of China (No. 2012ZX07203-006) and the National Natural Science Foundation of China (No. 21107126)

作者简介:王馨慧(1990—),女,E-mail: xhwangandy@sina.com; \* 通讯作者(责任作者),E-mail: wztang@rcees.ac.cn

Biography: WANG Xinhui (1990—), female, E-mail: xhwangandy@sina.com; \* Corresponding author, E-mail: wztang@rcees.ac.cn

胁水生态系统健康 (Mdegela *et al.*, 2009). 因此, 加强对水体沉积物中重金属污染的研究十分必要 (Singh *et al.*, 2005b; Zhang *et al.*, 2010; Sundaray *et al.*, 2011).

汞一直是世界持续研究的热点问题 (Jagtap and Maher, 2015; Greenfield *et al.*, 2001). 汞的危害极大且行为特殊, 是唯一以气态单质形式存在于环境中并参与全球循环的重金属元素, 它具有非常复杂的生物化学循环和极强的生物累积性 (Shoham-Frider *et al.*, 2007). 汞是环境中毒性最强的重金属元素之一, 常温常压下呈液态, 易挥发 (Chakraborty *et al.*, 2014). 汞积累在沉积物中, 通过食物链进入鱼类或其他水生生物体内, 并且可以通过生物放大作用威胁生态环境和人类健康 (Greenfield *et al.*, 2001). 20世纪50年代日本爆发的水俣病引起各领域科学家对汞污染的高度重视, 自此汞污染一直备受关注 (Chakraborty *et al.*, 2014; 牛凌燕和曾英, 2008). 随着重工业的发展, 排入水体的汞含量不断增加, 以城市污水为主要补给水源的城市河流也受到严重污染.

凉水河位于北京市南郊, 是北京市区南部、南郊及东南郊的主要排水河道, 主要以污水处理厂出水为补给水源, 是典型的非常规水源补给城市河流 (唐文忠等, 2015). 近年来随着城市化的飞速发展, 排入凉水河的污染物增多. 因此, 本文开展了对凉水河表层沉积物中汞总量的研究, 但重金属总量并不能完全反应其生态危害性, 只能在一定程度上反应沉积物的污染程度 (Singh *et al.*, 2005a). 为此, 本文参考欧共体标准署提出的三步连续提取法 (简称BCR法) 进行改进来研究沉积物中汞赋存形态. 目前, 国际上已有对BCR改进后进行沉积物中汞形态的研究报道 (Chakraborty *et al.*, 2014), 国内部分学者在进行重金属赋存形态研究时一般采用BCR方法 (陈春霄等, 2011; 唐文忠等, 2015; 王海等, 2002; 袁浩等, 2008).

沉积物重金属的污染评价通常有以下几种: 潜在生态风险指数法 (Potential ecological risk index)、地质累积指数法 (Index of geoaccumulation)、沉积物富集系数法 (Sediments enrichment factor)、污染负荷指数法 (Pollution load index) 等. 这几种方法经国内外学者验证认为可行并能有效地评价重金属的污染程度 (林春野等, 2007). 国内使用频率最高的评价方法是潜在生态风险指数法 (黄莹等, 2015; 林承

奇等, 2014; 贾英等, 2013; 王立硕, 2015). 对于沉积物重金属形态的评价一般采用风险评估指数法 (Risk assessment code, RAC) (唐文忠, 2015; 李珊珊等, 2013). 本文采用潜在生态风险指数法和RAC评价法对凉水河表层沉积物中的汞的污染情况进行评价. 两种评价方法相结合, 能很好地展现凉水河汞污染现状并为制定合理的防治措施提供一定的科学依据.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 研究区域及样品采集

本文选取凉水河干流及其主要支流为研究对象. 凉水河位于北京市南郊, 隶属北运河水系, 是北京市区的主要排水河道之一. 凉水河全长53 km, 流域面积约815 km<sup>2</sup>, 属于大陆性季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 年均降雨量约为590 mm. 凉水河是典型的非常规水源补给城市河流, 主要以污水处理厂出水为补给水源 (毕见霖等, 2014). 随着城市经济的飞速发展, 生产、生活污水不断排入水体, 污水中的重金属大部分通过各种物理化学作用迅速转移到沉积物中 (陈春霄等, 2011), 由于重金属难以降解, 其在沉积物中富集对人体和环境造成了严重的威胁.

基于凉水河水系空间分布情况和污染源位置, 选取凉水河干流上游、下游及主要支流为研究区域, 共设置20个采样点 (干流10个、支流10个) (图1). 具体分布如下: 1~3号采样点位于干流上游, 4~10号采样点位于干流下游, 11~20号采样点位于支流. 样品于2014年7月进行采集, 用抓斗式采样器平行3次采集河流表层0~10 cm的沉积物样品, 装入自封袋并置于车载冰箱中在4℃下保存. 带回实验室后, 将样品充分混匀、冷冻干燥、过100目尼龙筛, 然后置于自封袋中密封保存待测.

### 2.2 试验方法

凉水河表层沉积物中总汞含量的测定采用中华人民共和国国家标准 GB/T 22105.1—2008 即土壤质量-总汞测定-原子荧光法 (王水水浴消解-原子荧光法), 汞赋存形态参考BCR法以及汞总量测定方法测定. BCR三步提取法: 弱酸可溶解态 (B1态), 即可交换态及碳酸盐结合态; 可还原态 (B2态), 即Fe/Mn氧化物结合态; 可氧化态 (B3态), 即有机物及硫化物结合态; 残渣态 (B4态), 即结合在硅铝酸盐矿物晶格中的重金属. 测定凉水河表层沉积物中

汞赋存形态,即 B1 态、B2 态和 B3 态采用 BCR 提取法测定, B4 态采用与总量相同的方法测定。

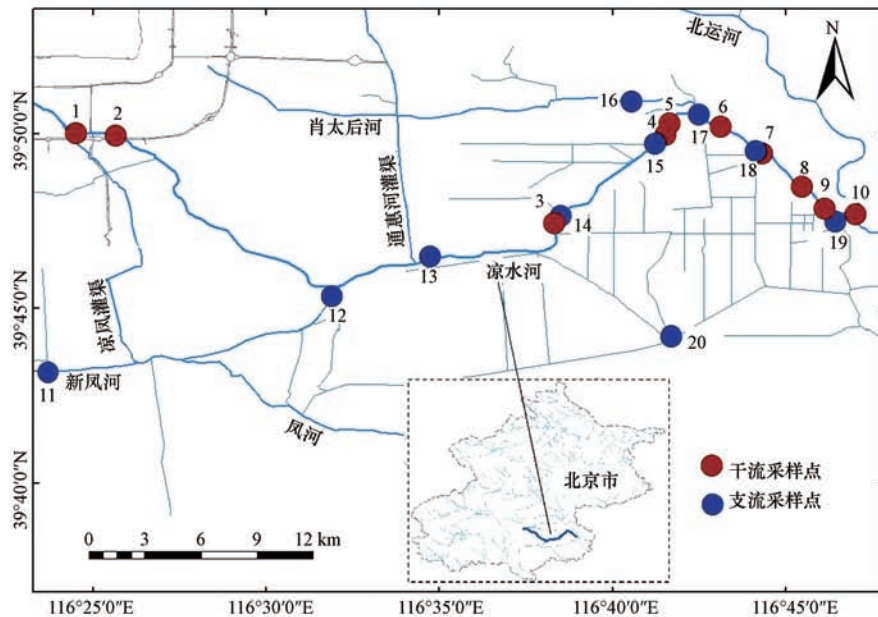


图 1 凉水河采样点示意图

Fig.1 Sampling sites in Liangshui River System

采用瑞利 AF-610 型原子荧光光度计测定所有提取液中的汞总量和各形态汞含量。在实验过程中, 每批样品均同步分析空白、沉积物标准物质 (GBW07304a) 及重金属顺序提取形态标准物质 (GBW07438), 以减少误差并控制回收率。汞总量的回收率控制在 90%~117% 之间; 汞形态分析的每一步中, 标准物质的回收率都在参考值的 81%~110% 之间; 且将 BCR 提取的汞元素不同形态含量加和与汞总量相比, 得到的回收率介于 85%~105% 之间。

### 2.3 风险评价方法

本研究采用两种风险评价方法, 即基于总量的生态风险评价-潜在生态风险指数法和基于形态的生态风险评价-风险评估指数法 (RAC)。潜在生态风险指数法是瑞典科学家 Hankanson 提出的, 该方法考虑了沉积物中重金属浓度、污染物种类、重金属毒性和水体对重金属污染的敏感性 4 个影响因素, 是评价沉积物重金属潜在生态危害的常用方法。该方法以沉积物中第  $i$  种重金属生态风险系数 ( $E_i$ ) 来评估单一重金属的生态风险, 并用多种重金属潜在生态风险指数 (RI) 来评估沉积物重金属整体表现出的生态风险。本文研究汞的污染, 属于单一重金属生态风险评价, 通过计算生态风险系数 ( $E_i$ ) 来评估, 计算公式参见文献 (Hankanson, 1980)。其中汞的背景值参考北京市土壤重金属背景值 (国家环境保

护局和中国环境监测总站, 1990), 即汞的背景值为  $0.069 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 毒性响应系数为 40 (Hankanson, 1980)。RAC 评价法是以有效态为基础对沉积物重金属的生态风险进行评价, 其将可交换态及碳酸盐结合态 (B1 态) 视为有效态部分, 并根据其占重金属总量的比例来评价沉积物中重金属的风险程度 (Sundaray *et al.*, 2011)。潜在生态风险评价和 RAC 评价的生态风险评价等级划分如表 1 所示。

表 1 生态风险评价等级划分

Table 1 The classification of ecological risk assessment grades

$E_i$	潜在生态风险评价		RAC 风险评价	
	潜在生态风险程度	B1 态所占比例	风险程度	
$E_i < 40$	低	$B1 < 1\%$	无	
$40 \leq E_i < 80$	中等	$1\% \leq B1 \leq 10\%$	低	
$80 \leq E_i < 160$	较高	$11\% \leq B1 \leq 30\%$	中等	
$160 \leq E_i < 320$	高	$31\% \leq B1 \leq 50\%$	高	
$E_i \geq 320$	很高	$B1 > 50\%$	很高	

## 3 结果与分析 (Results and discussion)

### 3.1 凉水河表层沉积物中汞总量及其赋存形态

凉水河表层沉积物中汞总量及各形态汞含量如表 2 所示, 以汞的 4 种赋存形态总和为预测总量, 通过计算各形态占预测总量的百分比, 得到表层沉



积物中各形态汞含量比例图(图2).从表2可以看出,凉水河表层沉积物中总汞含量均值为  $0.974 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远远超出北京市土壤重金属汞背景值  $0.069 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .凉水河表层沉积物中汞含量的空间分布有明显差异,干流上游表层沉积物中汞含量较高,其均值为  $1.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;干流下游表层沉积物中汞含量较低,其均值为  $0.860 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;支流表层沉积物中汞含量最低,其均值为  $0.787 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .从凉水河表层沉积物中汞含量空间分布情况来看,凉水河干流污染更为严重.参考北京市土壤重金属汞背景值,除11号样点和13号样点外,其他样点均在不同程度上超过背景值.

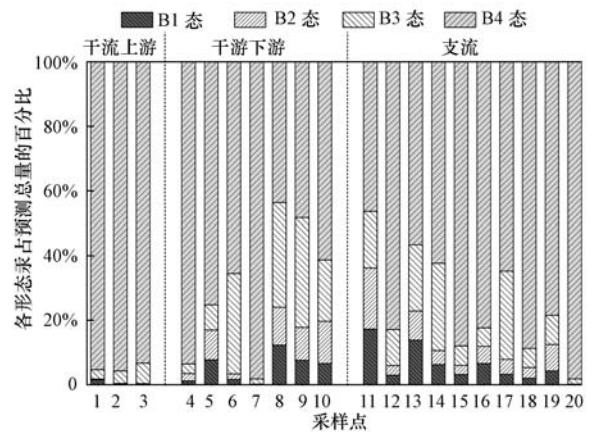


图2 表层沉积物中各形态汞比例分布

Fig.2 The proportional distribution of different Hg forms in the surface sediment

表2 表层沉积物中各形态汞含量

Table 2 Different forms of Hg in the surface sediment

河段号	序号	汞元素各形态含量/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )					汞总量	生物有效态的百分比
		B1 态	B2 态	B3 态	B4 态	生物效态汞		
干流中上游	1	0.030	0.002	0.054	1.78	0.086	2.07	4.19%
	2	0.003	0.002	0.064	1.57	0.070	1.64	4.26%
	3	0.003	0.002	0.107	1.57	0.113	1.88	5.98%
干流下游	4	0.011	0.021	0.029	0.891	0.061	0.975	6.26%
	5	0.019	0.022	0.019	0.184	0.060	0.263	22.96%
	6	0.015	0.016	0.290	0.610	0.321	1.00	32.02%
	7	0.003	0.003	0.054	3.27	0.060	3.34	1.80%
	8	0.020	0.019	0.051	0.070	0.090	0.152	58.92%
	9	0.016	0.022	0.074	0.105	0.113	0.254	44.37%
	10	0.003	0.005	0.007	0.024	0.015	0.039	38.67%
支流	11	0.003	0.003	0.003	0.008	0.010	0.018	54.83%
	12	0.024	0.024	0.093	0.683	0.141	0.830	17.01%
	13	0.027	0.018	0.041	0.112	0.086	0.204	42.09%
	14	0.028	0.020	0.123	0.284	0.171	0.455	37.62%
	15	0.023	0.021	0.045	0.658	0.090	0.754	11.89%
	16	0.030	0.024	0.026	0.374	0.080	0.472	16.94%
	17	0.018	0.026	0.153	0.362	0.197	0.631	31.17%
	18	0.013	0.023	0.040	0.604	0.077	0.692	11.06%
	19	0.013	0.025	0.028	0.242	0.066	0.326	20.34%
	20	0.004	0.002	0.057	3.42	0.063	3.48	1.79%
平均值		0.015	0.015	0.068	0.841	0.098	0.974	23.21%
最大值		0.030	0.026	0.290	3.42	0.321	3.48	58.92%
最小值		0.003	0.002	0.003	0.008	0.010	0.018	1.79%

为进一步了解凉水河表层沉积物中汞污染水平,表3列举了国内外某些城市河流表层沉积物中汞含量情况.由表3可知,凉水河表层沉积物中汞

量比国外一些城市河流高,与国内城市河流相比,其处于中间状态.其中采样点1、2、3、7和20中的汞总量远远高于中山城市河流的汞含量,甚至是中山

城市河流表层沉积物中汞含量最高值的 6 倍,可能是因为这 5 个采样点附近有工厂排出污水对凉水河造成了严重的点源污染(毕见霖等,2014;唐文忠等,2015).而凉水河表层沉积物中汞含量总体水平上较高,可能是由于凉水河是典型的非常规水源补给城市河流,其接纳污水处理厂出水和未经处理的生活污水造成的(王玉红,2008).

表 3 不同城市河流表层沉积物中汞含量对比

Table 3 Comparison of Hg content in stream sediments in different city

河流	区域	汞含量/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	参考文献
凉水河	中国北京	范围	0.02~3.48
		平均值	0.97
细河	中国沈阳	范围	2.60~11.30
		平均值	7.77
城市河流 Urban rivers	中国中山	范围	0.05~0.55
	Morogoro, Tanzania	范围	0.04~0.20
		平均值	0.10
Nandira River	Angul, India	范围	0.18~2.01
		平均值	0.78
Brahmani River	Angul, India	范围	0.06~0.44
		平均值	0.15

由图 2 可知,凉水河表层沉积物中各形态汞含量存在差异,在凉水河干流上游、干流下游及支流表层沉积物中均以 B4 态为主要赋存形态,其中 B4 态所占比例均值分别为 94.81%、69.41%和 74.89%,平均百分比为 75.96%;B3 态所占比例均值分别为 4.40%、18.40%和 13.20%,平均百分比为 13.70%.总体来看,在凉水河干流上游、干流下游及支流表层沉积物中,汞各形态所占比例大小顺序均为 B4>B3>B2>B1.凉水河表层沉积物中汞主要以 B4 态存在,表明凉水河表层沉积物中汞的生物可利用性低.

重金属中 B1 态是有效态,B2 态和 B3 态是潜在有效态,共称为生物有效态;而 B4 态基本不被生物利用,将其称为不可利用态(Adamo *et al.*, 2005).沉积物中生物有效态汞在外界环境发生改变时可能会再次释放出来(王亚平等,2012;王海等,2002),造成水体环境二次污染,可见生物有效态是衡量沉积物中重金属污染的重要因素.由表 2 可知,凉水河表层沉积物中生物有效态汞占有一定的比例,其范围为 1.79%~58.92%,平均比例为 23.21%.凉水河干流上游表层沉积物中生物有效态汞所占比例较低,其平均比例为 4.81%;干流下游表层沉积物中生物有效态汞所占比例最高,其平均比例为

29.28%;支流表层沉积物中生物有效态汞所占比例较高,其平均比例为 24.47%.凉水河表层沉积物中生物有效态汞主要以 B3 态形式存在,尤其在干流下游和支流表层沉积物中,采样点 6、8、9、14、17 的 B3 态比例高达 27%以上.可能是因为城市污水不断排入水体,导致凉水河出现水体自净能力下降、水质下降,水体变黑变臭,富营养化严重(蒋林林和吴佩琦,2010),致使水体呈厌氧状态.当水体处于强氧化条件下时,B3 态的重金属将产生活性(王海等,2002).

### 3.2 基于表层沉积物中汞总量的潜在生态风险评价

根据潜在生态风险评价法分析凉水河表层沉积物中汞的潜在风险情况(图 3),并参考生态风险等级划分表分析凉水河表层沉积物中汞总量的潜在风险程度.由图可知,凉水河干流上游表层沉积物中汞的  $E_i$  范围为 951~1197,平均值为 1080,潜在生态风险程度很高;干流下游表层沉积物中汞的  $E_i$  范围为 23~1934,平均值为 499,潜在生态风险程度很高;支流表层沉积物中汞的  $E_i$  范围为 10~2019,平均值为 456,潜在生态风险程度很高.除个别点(采样点 10 和 11)处于低潜在生态风险水平外,整体来看凉水河各个河段表层沉积物中汞的潜在生态风险程度都处于很高的水平.

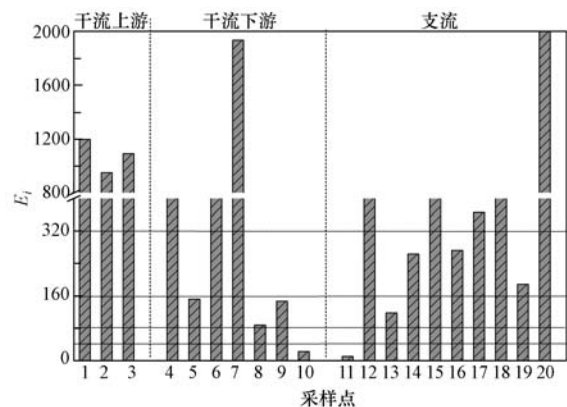


图 3 表层沉积物中汞的潜在生态风险指数

Fig.3 The potential ecological risk index of Hg in surface sediments

### 3.3 基于表层沉积物中汞形态的生态风险评价

基于总量的潜在生态风险评价反映了凉水河表层沉积物中汞污染的潜在影响,并不能直接反映其当前影响.B1 态的重金属在中性或者弱酸性条件下就可以释放,且易于被生物吸收利用,毒性最强(王亚平等,2012).根据 RAC 风险评估指数法,以凉

河水表层沉积物中汞的 B1 态占汞总量的百分比为基础,评价凉水河表层沉积物汞的风险程度,结果如图 4 所示.在空间分布上,各个河段表层沉积物中汞的 B1 态占汞总量的比例均值均在 18% 以下;其中干流上游表层沉积物中汞的 B1 态占汞总量的比例范围为 0.16% ~ 1.44%,均值为 0.60%,无生态风险;干流下游表层沉积物中汞的 B1 态占汞总量的比例范围为 0.09% ~ 12.81%,均值为 5.11%,低生态风险;支流表层沉积物中汞的 B1 态占汞总量的比例范围为 0.11% ~ 17.64%,均值为 5.84%,低生态风险.除采样点 8、11、13 处于 10% ~ 18% 之间,呈中度风险外,其余采样点所占比例均在 10% 以下呈低风险或无风险状态.由数据分析可知,65% 的采样点处于低风险状态,20% 的采样点处于无风险状态,15% 的采样点处于中度风险状态,整体来看凉水河各个河段表层沉积物中汞的生态风险都处于较低水平.

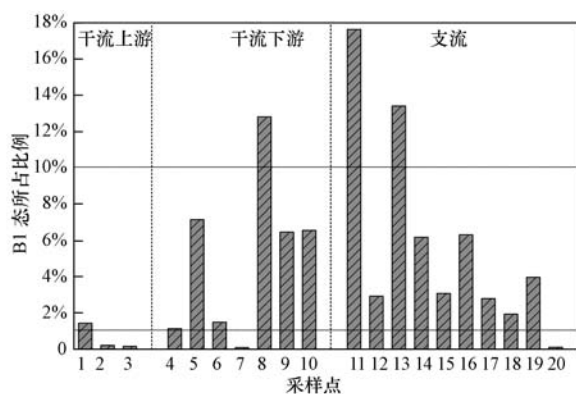


图 4 表层沉积物中 B1 态汞占总量比例

Fig.4 The percentage of B1 state mercury in surface sediment

潜在生态风险系数法反映了沉积物重金属对水生态系统可能产生的风险程度,而 RAC 风险评价法反映了重金属对水生态系统健康的直接危害.本文研究中,采用基于总量的潜在生态风险系数法反映出凉水河表层沉积物受汞的污染较为严重,外源输入的汞均会显示对沉积物造成污染,但并非进入沉积物中所有形态的汞都会对水生态系统健康造成危害.因此,本文又开展了沉积物中汞赋存形态的研究,并进行 RAC 评价.研究发现:凉水河表层沉积物中汞的主要赋存形态是 B4 态(图 2),该形态非常稳定,对水生态系统健康的危害极小,可认为是安全的(Adamo *et al.*, 2005; 王亚平等, 2012; 王海等, 2002);故以 B1 态汞为基础 RAC 评价结果显示凉水河表层沉积物中的汞对水生态系统的危害较小.以上两种评价方法的角度不同,结论可以互补,建议

在以后的研究中结合利用将会得到更为真实的结果.

#### 4 结论 (Conclusions)

1) 凉水河表层沉积物中汞平均含量为  $0.974 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 主要以 B4 态为主,汞各形态含量所占比例大小顺序为  $B4 > B3 > B2 > B1$ .

2) 基于凉水河表层沉积物中汞总量的潜在生态风险评价可知,凉水河各个河段表层沉积物都受到了不同程度的汞污染,但汞的主要赋存形态是稳定的 B4 态,并不对水生态系统健康造成危害.基于汞形态的 RAC 评价结果显示,各个河段表层沉积物中汞的生态风险均处于较低水平.

**责任作者简介:**唐文忠,男,博士,中国科学院生态环境研究中心副研究员,主要从事河流污染生态学研究, E-mail: wztang@rcees.ac.cn.

#### 参考文献 (References):

- Adamo P, Arienzo M, Imperato M, *et al.* 2005. Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port[J]. *Chemosphere*, 61(6): 800-809
- 毕见霖, 王立硕, 王馨慧, 等. 2014. 非规水源补给城市河流富营养化时空变化规律及风险研究[J]. *环境科学学报*, 35(6): 1703-1709
- Cai J N, Cao Y Z, Tan H J, *et al.* 2011. Fractionation and ecological risk of metals in urbanriver sediments in Zhongshan City, Pearl River Delta[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 13: 2450-2456
- Chakraborty P, Babu P V R, Vudamala K, *et al.* 2014. Mercury speciation in coastal sediments from the central east coast of India by modified BCR method[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 81(1): 282-288
- 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 2011. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. *中国环境科学*, 31(11): 1842-1848
- Gao X L, Chen C T A. 2012. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. *Water Research*, 46(6): 1901-1911
- Greenfield B K, Hrabik T R, Harvey C J, *et al.* 2001. Predicting mercury levels in yellow perch: use of water chemistry, trophic ecology, and spatial traits[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(7): 1419-1429
- 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社
- Hankanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 14(8): 975-1001
- 黄莹, 李永霞, 高甫威, 等. 2015. 小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价[J]. *环境科学*, 36(6): 2046-2053

- Jagtap R, Maher W. 2015. Measurement of mercury species in sediments and soils by HPLC-ICPMS[J]. *Microchemical Journal*, 121: 65-98
- 贾英, 方明, 吴友军, 等. 2013. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 33(1): 147-153
- 蒋林林, 吴佩琦. 2010. 凉水河人工湿地效益评估[J]. *中国城市经济*, (12): 259-260; 262
- 李珊珊, 单保庆, 张洪. 2013. 滏阳河表层沉积物重金属的赋存形态研究[J]. *环境科学*, 32(11): 2016-2023
- 林承奇, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 2014. 九龙江河口潮间带表层沉积物汞污染分布、赋存形态与生态风险[J]. *生态毒理学报*, 9(5): 901-907
- 林春野, 周豫湘, 呼丽娟, 等. 2007. 松花江水体沉积物汞污染的生态风险[J]. *环境科学学报*, 27(3): 466-473
- Lin C Y, He M C, Liu X T, *et al.* 2013. Contamination and ecological risk assessment of toxic trace elements in the Xi River, an urban river of Shenyang city, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(5): 4321-4332
- Mdegela R H, Braathen M, Pereka A E, *et al.* 2009. Heavy metals and organochlorine residues in water, sediments, and fish in aquatic ecosystems in urban and peri-urban areas in Tanzania[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 203(1/4): 369-379
- 牛凌燕, 曾英. 2008. 土壤中汞赋存形态及迁移转化规律研究进展[J]. *广东微量元素科学*, 15(7): 1-5
- Rath P, Panda U C, Bhatta D, *et al.* 2009. Use of sequential leaching, mineralogy, morphology and multivariate statistical technique for quantifying metal pollution in highly polluted aquatic sediments—A case study: Brahmani and Nandira Rivers, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2/3): 632-644
- Shoham-Frider E, Shelef G, Kress N. 2007. Mercury speciation in sediments at a municipal sewage sludge marine disposal site[J]. *Marine Environmental Research*, 64(5): 601-615
- Singh K P, Mohan D, Singh V K, *et al.* 2005a. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments—a tributary of the Ganges, India[J]. *Journal of Hydrology*, 312(1/4): 14-27
- Singh K P, Malik A, Sinha S, *et al.* 2005b. Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti River (India) using principal component analysis[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 166(1/4): 321-341
- Sundaray S K, Nayak B B, Lin S, *et al.* 2011. Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments—A case study: Mahanadi basin, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2/3): 1837-1846
- 唐文忠, 王立硕, 单保庆, 等. 2015. 典型城市河流(凉水河)表层沉积物中重金属赋存形态特征[J]. *环境科学学报*, 35(12): 3898-3905
- Varol M, Şen B. 2012. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. *CATENA*, 92: 1-10
- 王海, 王春霞, 王子健. 2002. 太湖表层沉积物中重金属的形态分析[J]. *环境化学*, 21(5): 430-435
- 王立硕, 毕见霖, 王馨慧, 等. 2015. 非常规水源补给城市河流表层沉积物重金属污染及风险评价[J]. *环境科学学报*, 35(3): 903-910
- 王亚平, 王岚, 许春雪, 等. 2012. pH对长江下游沉积物中重金属元素Cd、Pb释放行为的影响[J]. *地质通报*, 31(4): 594-600
- 王玉红. 2008. 北京市凉水河污灌区土壤重金属污染研究[D]. 北京: 北京林业大学. 1-2
- 袁浩, 王雨春, 顾尚义, 等. 2008. 黄河水系沉积物重金属赋存形态及污染特征[J]. *生态学杂志*, 27(11): 1966-1971
- Zhang H G, Cui B S, Xiao R, *et al.* 2010. Heavy metals in water, soils and plants in riparian wetlands in the Pearl River Estuary, South China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 1344-1354