

文章编号: 1000-582X(2013)05-086-08

## 三峡库区次级河流梁滩河 重金属污染特征分析及风险评价

高俊敏<sup>1</sup>, 张 科<sup>1</sup>, 周 彬<sup>1</sup>, 金 芬<sup>2</sup>, 郭劲松<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 中国农业科学院 农业质量标准与检测技术研究所农产品质量与食品安全重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 于 2010 年 12 月在梁滩河中上游采集地表水样, 分别用原子吸收法(AAS)和电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)测定水样中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Fe、Mn 和 Mg 8 种金属元素的含量, 分析了 8 种重金属的污染特征, 对其可能引起的健康风险进行了评价。结果表明: 梁滩河水体中重金属元素的含量因采样断面的不同而相差悬殊, Ni、Pb、Fe 和 Mn 4 种金属元素的平均质量浓度均远高于 GB3838—2002 III 类功能区的浓度限值, 断面超标率分别为 100%、87.5%、50% 和 43.75%。空间分布和相关性分析显示梁滩河水中的 Fe 和 Mn 可能具有相同的污染源。健康风险评价结果表明, Pb 是梁滩河水中引起人体特别是孩子非致癌风险的最重要的污染物, 其次是 Cr, 然后分别是 Mn、Ni、Cu、Fe 和 Zn。

**关键词:** 重金属; 空间分布; 风险评价; 梁滩河; 特征分析

**中图分类号:** X824TH814

**文献标志码:** A

## Characteristic analysis and risk assessment of heavy metal pollution in Liangtan river, a tributary of Three Gorges Reservoir area

GAO Junmin<sup>1</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>, ZHOU Bin<sup>1</sup>, JIN Fen<sup>2</sup>, GUO Jingsong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400045, China; 2. Key Lab of Agro-product Quality and Safety, Institute of Quality Standards & Testing Technology for Agro-products, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Surface water samples are collected throughout the upstream Liangtan River in December, 2010. The concentrations of Cu, Zn, Ni, Pb, Cr and Fe, Mn, Mg are determined using atomic absorption spectrometry (AAS) and inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES) respectively for the contamination characteristics analysis and preliminary risk assessment. The results demonstrate that concentrations of 8 heavy metals show significant differences in different sampling sections of the river. The average concentration of Ni, Pb, Fe and Mn are much higher than the limits value of GB 3838—2002 III functional area and their section of over standard are 100%, 87.5%, 50% and 43.75%, respectively. Spatial distribution and correlation analysis reveal that Fe and Mn in river may have the same pollution sources. Preliminary health risk assessment results indicate that Pb is the most important pollutant leading to non-carcinogenic concerns in particular for children, and the next is Cr. Mn, Ni, Cu, Fe and Zn in

**收稿日期:** 2012-12-01

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目(21107147); 中央高校基本科研业务费(CDJZR10 21 00 10)

**作者简介:** 高俊敏(1972-), 女, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事环境中有毒物质的监测及风险评价研究, (E-mail) gaojunmin@cqu.edu.cn.

sequence.

**Key words:** heavy metals; spatial distribution; risk assessment; Liangtan river; characteristic analysis

梁滩河是三峡水库库尾流域面积最大的一条主要次级河流,是三峡库区快速城镇化引起河流污染变迁的一个缩影。作为嘉陵江流域的一条重要支流,梁滩河是重庆市主城区内17条次级河流中最长的一条次级河流,河流全长88 km,流域面积510.1 km<sup>2</sup>,跨三区流经15个乡镇,在重庆都市区的次级河流中非常具有代表性。

作为三峡库区上游的回水区,梁滩河水质的好坏,会对三峡水库的水质产生长远的影响。但是,近年来,由于生活污水和工业废水排放等原因,梁滩河的水质受到严重污染,成为重庆市辖区内所有河流中污染最为严重的河流之一。梁滩河水质多年来一直为劣五类水质,且有更加恶化的倾向。这不仅影响到流域内工农业生产的发展,而且极大地制约着重庆市西部生态农业基地的建设,威胁着下游几十万人的饮用水健康。梁滩河的水质恶化问题已引起国家有关部门和社会各届的高度关注,是国家环境保护部重点关注的次级河流。虽然国家投入了大量财力和物力对其进行整改,但是目前该河水质仍未得到有效改善[1]。

在各种废水和固体废物排入河流的过程中,重金属也随之进入了水体,并转移至各种环境介质中。重金属元素是一类毒性大、蓄积性强的慢性污染物,可以从水相转移到固相并逐年累积,在一定的条件下又重新释放出来,成为二次污染源。在水环境中,重金属不易降解且毒性大,绝大部分迁移至底泥中,具有极强的累积作用。一旦通过食物链进入人体内,就会危害人类健康。20世纪以来,随着全球工业化的发展,许多国家相继出现了因开矿和工业排污造成的河流重金属累积和超标问题,对河流生态系统产生了较大影响,并通过食物链威胁到人类健康[2-5]。

目前对于城镇化过程中三峡库区次级河流重金属复合污染的研究比较有限[5-9],且主要集中在土壤和沉积物中重金属的研究上,如肖尚斌等[6]对库区香溪河库湾沉积物重金属污染特征进行了分析,张雷等[7]对三峡水库入库河流大宁河土壤重金属分

布特征进行了研究。也有部分学者对梁滩河的重金属污染情况进行了研究,如闵真真等[8]对梁滩河白市驿支流底泥中的Cu、Zn、Cr、Ni、Pb和As等6种重金属元素污染进行了调查和评价,袁红等[9]对梁滩河下游支流中的重金属Hg、Cr、As、Zn和Pb进行了研究。但是,无论是对库区其他支流还是梁滩河,重金属污染研究仅限于常见的几种重金属元素,且只进行过生态风险评价。目前还未见有对城镇化比较集中的梁滩河中上游河水中重金属分布特征及其可能引起的健康风险进行研究的文献。鉴于梁滩河在三峡库区次级河流中特别是重庆都市区的重要地位及其虽经多次治理仍然污染严重的事实,有必要对梁滩河流域的重金属污染进行全面的监测和风险评价,以了解城镇化对库区次级河流重金属分布的影响及其引起的环境风险,为库区次级河流重金属污染研究提供原始数据,也可以为三峡库区的水质改善提供支持,为梁滩河流域的综合治理提供科学依据。笔者对梁滩河流域中上游河水中的Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Fe、Mn和Mg 8种重金属元素的含量进行了测定,并对其污染特征和可能引起的健康风险进行了分析。

## 1 材料和方法

### 1.1 样品采集与预处理

通过对梁滩河中上游的实地考察,主流上选取了廖家沟水库、驿云路、白市驿镇、天赐温泉、含谷镇、双巷子、西永镇、西永工业园、三圣宫村、团结村、土主镇、盘龙湾和五一村13个采样点(即图1上1~13点),支流上选取曾家镇、龚家坝和陈家桥镇3个采样点(即图1上14~16点)。于2010年12月10日,用预先洗净的聚乙烯采样瓶在各采样点直接采集表层水(距表面20 cm处),用盐酸酸化后在4℃时保存待用。根据《水和废水监测分析方法》第4版中的规定[10],水样中Cr的消解体系为硝酸-氟酸-过氧化氢消解体系,其他金属元素均为硝酸-氟酸-高氯酸消解体系。

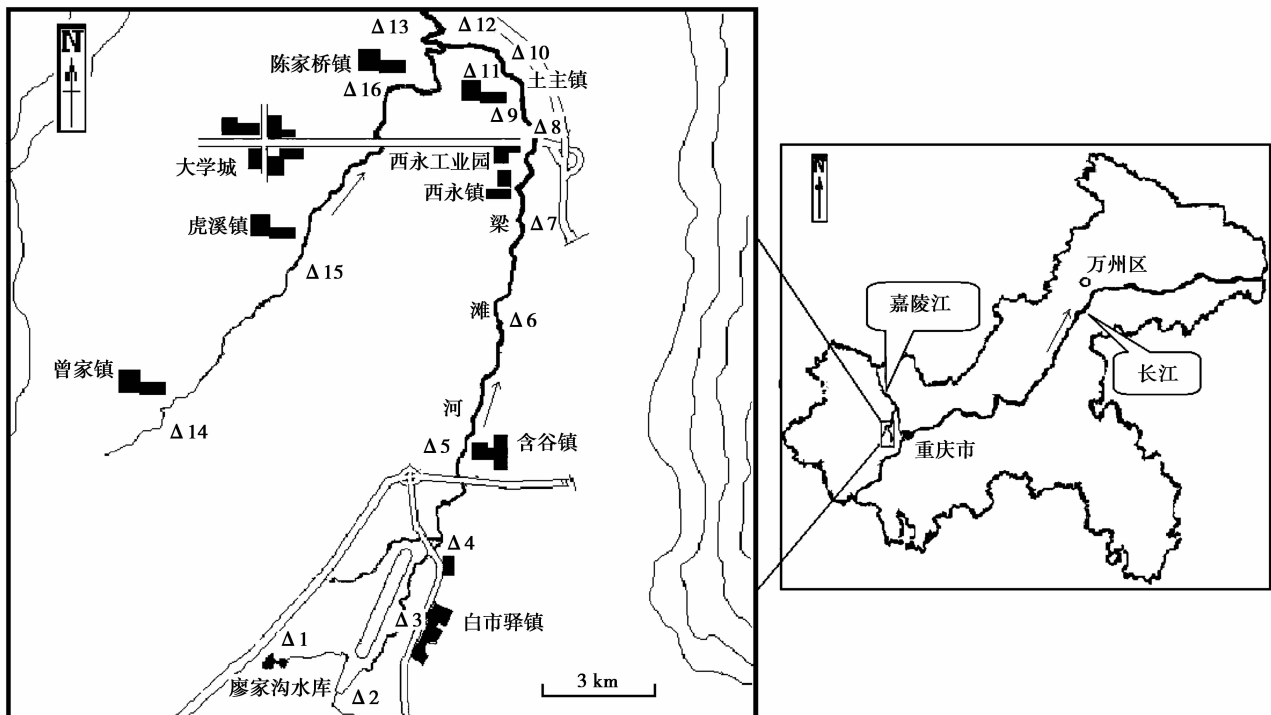


图 1 梁滩河重金属采样点分布

## 1.2 样品测定方法

水样经过消解预处理以后, Cu、Zn、Ni、Pb 和 Cr 5 种元素采用 180-80 日立偏振赛曼原子吸收光谱仪进行测定, Fe、Mn 和 Mg 3 种元素采用美国 PerkinElmer 公司的电感耦合等离子体发射光谱仪进行测定。Cu、Mn、Mg、Zn、Fe、Cr、Ni 和 Pb 8 种元素在水样中的平均回收率 ( $n=6$ ) 分别为 110%、103%、93%、90%、105%、110%、90% 和 100%, 均达到了分析方法的要求。每次测定时均做平行样和空白样, 所有样品重金属测定值的平均值与空白值之差, 即为实测值。

## 2 结果与分析

### 2.1 梁滩河水重金属的污染状况

表 1 为梁滩河流域中上游 16 个采样点水样

中重金属质量浓度分布的统计结果。笔者采用《地表水环境质量标准》GB 3838—2002 的 III 类标准对梁滩河水重金属的污染情况进行讨论。从表 1 可以看出, 16 个采样点水样中 Cu 和 Zn 的质量浓度均远低于 GB3838—2002 的 III 类功能区标准值, 但是 Ni 的质量浓度均超过了标准值, Pb、Fe 和 Mn 的断面超标率分别为 87.5%、50% 和 43.75%。虽测定的是总铬, 但只有采样点 8 和 9 即西永工业园和三圣宫村总铬质量浓度高于 Cr(VI) 标准值, 驿云路略高于标准值, 其他采样点质量浓度均低于标准值。由此可知, 单从重金属污染来看, 梁滩河的水质已不能满足 GB 3838—2002 III 类功能区要求。

表 1 梁滩河河水中重金属含量的统计结果

统计项目	重金属含量							
	Zn	Cu	Pb	Ni	Cr	Fe	Mn	Mg
最大值	368	190	480	310	90	932	564	23 990
最小值	13	96	12	69	5	107	18	7 366
中位值	74	130	168.5	145.5	32	311	285	17 740

ug/L

续表 1

统计项目	重金属含量							
	Zn	Cu	Pb	Ni	Cr	Fe	Mn	Mg
平均值	98	136	205	151	38	372	250	17 820
标准偏差	0.092	0.025	0.140	0.064	0.022	0.251	0.200	4.120
变异系数/%	93.19	18.29	68.11	42.61	57.84	67.38	80.09	23.11
<sup>a</sup> 标准浓度	1 000	1 000	50	20	<sup>b</sup> 50	300	100	
超标率/%	0	0	87.5	100	18.75	50	43.75	
长江(均值) <sup>[6]</sup>	9.4	10.7	55.1	13.4	20.9	239.8	5.4	
长江(最大值) <sup>[6]</sup>	11.6	12.3	734	24.3	24.3	350.5	8.8	
汉江(均值) <sup>[7]</sup>	cNo	7.76	7.37	1.15	5.89	40.66	42.2	
<sup>c</sup> CMC,急性 <sup>[9]</sup>	120	13	65	470	16	NV		
<sup>c</sup> CCC,慢性 <sup>[9]</sup>	120	9	2.5	52	11	1 000		
<sup>d</sup> 中国	1 000	1 000	10	20	50	300	100	
<sup>e</sup> 德国	5 000	3 000	40	50	50	200	50	50 000
<sup>f</sup> 法国	5 000	1 000	50	50	50	200	50	50 000
WHO <sup>[9]</sup>		2 000	10	70	50	300	400	

说明:<sup>a</sup>标准浓度表示地表水环境质量标准(GB 3838—2002)Ⅲ类水域的标准值;<sup>b</sup>50表示为Cr(VI)的标准值;<sup>c</sup>表示保护水生生物的淡水质量标准;<sup>d</sup>中国表示GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》;<sup>e</sup>德国表示德国生活饮用水水质标准(BGBl. I, S. 2613, 1990);<sup>f</sup>法国表示法国生活饮用水水质标准(89—3)。

与长江南京段相比,梁滩河水样中的 Zn、Mn、Fe、Cr、Ni 和 Cu 6 种金属元素无论是平均质量浓度还是最大质量浓度均远高于长江南京段水样中的质量浓度,而 Pb 的平均质量浓度也远高于长江水样中的平均质量浓度<sup>[11]</sup>。与长江支流汉江水样相比,梁滩河水样中 Pb、Mn、Fe、Cr、Ni 和 Cu 6 种金属元素的平均质量浓度也远高于汉江水样中这几种金属元素的平均质量浓度<sup>[12]</sup>。此外,从所测的 8 种重金属元素的平均质量浓度来看,梁滩河水样中 Ni、Pb、Fe 和 Mn 4 种金属元素的平均质量浓度均远远高于 GB 3838—2002 Ⅲ类功能区的浓度限值,也高于中国、德国和法国的饮用水质量标准限值,但是只有 Ni、Pb 和 Fe 3 种金属元素的平均质量浓度高于 WHO 的饮用水质量标准限值<sup>[13]</sup>。与美国 EPA 2008 关于保护水生生物的淡水质量标准中优先有毒物质如 Cr、Cu、Pb、Ni 等金属元素的浓度限值相比,梁滩河水样中 Cr、Cu、Pb 的平均质量浓度均超过了标准中引起急性毒性的最大允许浓度(CMC),

而 Ni 的平均质量浓度超过了引起慢性毒性的浓度限值(CCC)<sup>[14]</sup>。

## 2.2 梁滩河中上游河水中重金属的空间分布

图 2 是梁滩河流域中上游 16 个采样点河水中重金属含量的沿程分布图。从图 2 可以看出,梁滩河中上游河水中 Fe 和 Mn 的质量浓度变化趋势基本一致,上游和支流质量浓度低,而中间处质量浓度高,最大质量浓度分别出现在采样点 5 和采样点 7。Mg 和 Cu 2 种金属元素的质量浓度沿程变化起伏不大,最大质量浓度均出现在采样点 13。Pb 的质量浓度有沿程升高的趋势,上游质量浓度低,越往下走质量浓度越高,最大质量浓度出现在支流的采样点 14。Zn 的质量浓度分布存在两个波峰,分别在上游 2、3、4、5 和中游 8、9、10、11 处,最大质量浓度和 Fe 一样也出现在采样点 5,但支流质量浓度较低。Ni 的最大质量浓度出现在采样点 11,其附近有一个明显的波峰。Cr 的质量浓度分布没有明显的规律,采样点 8 的质量浓度最高。

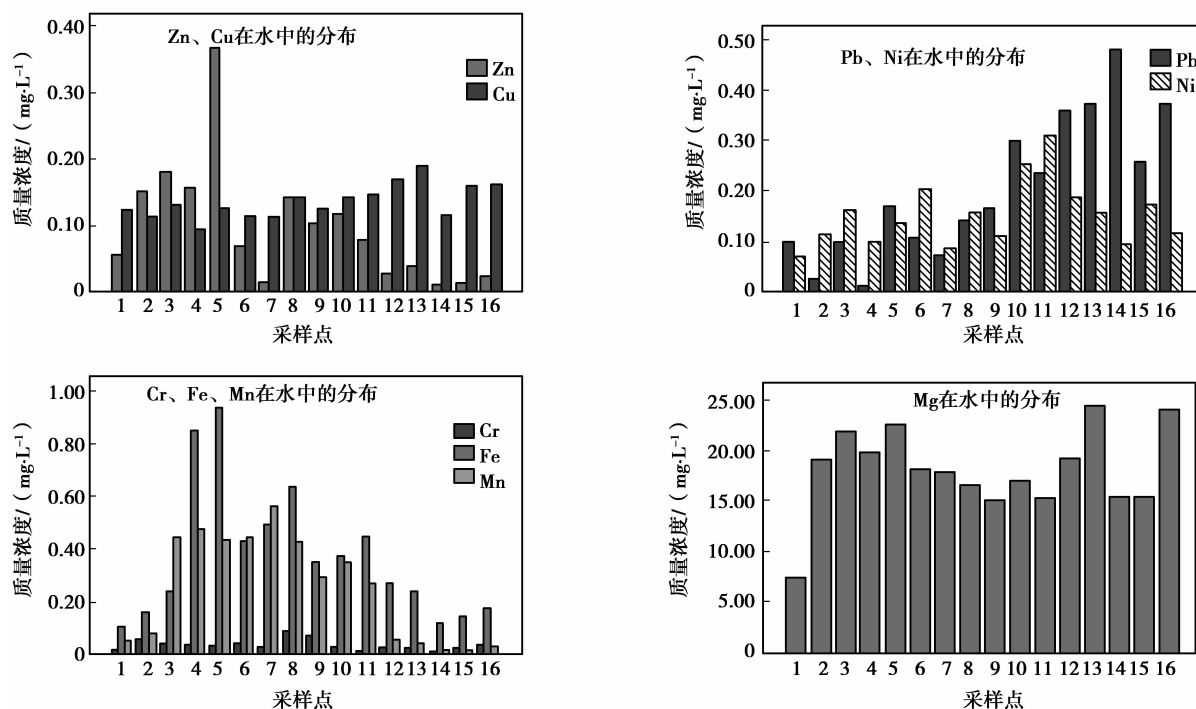


图 2 梁滩河中上游水中重金属的空间分布

调查表明,本论文的研究区域也就是梁滩河的中上游段,不规则地分布着很多小型的废旧塑料加工厂、电镀厂和畜禽养殖场,它们向梁滩河中排放的大量污水中便含有各种重金属元素。不同金属元素具有相似的空间分布规律,说明它们有可能来自于同一污染源。

### 2.3 重金属含量间的相关性分析

同一河流中,重金属的质量浓度不尽相同,若金属元素之间存在相关关系,说明它们的来源可能是相似的,若不存在相关关系,则来源可能是不同的<sup>[15-16]</sup>。

采用 SPSS17.0 对梁滩河水环境中的重金属进行两两相关分析,结果见表 2。从表 2 可以看出,Fe

和 Mn 之间具有较好的正相关关系,此外,Fe 和 Zn 之间及 Pb 和 Cu 之间也具有一定的正相关关系,这说明 Fe 和 Mn 的来源可能相同,Fe 和 Zn 及 Pb 和 Cu 的来源也可能有一定的相似之处。Mn 和 Cu、Pb 及 Cr 与 Cu、Pb、Ni 之间呈负相关关系,说明它们的来源可能不同。这与前面各金属元素的空间分布规律基本吻合。但是,梁滩河流域重金属的污染源较多,要想准确地判定各种重金属的污染来源,除了前面进行的梁滩河流域重金属含量的空间分布和重金属元素间的相关性分析以外,还需要进一步深入研究梁滩河流域污染源的分布规律、不同污染源中各种污染物的成分和浓度分布规律,以及污染物在当地环境中的迁移规律等。

表 2 梁滩河水中重金属相关系数

元素	相关系数							
	Zn	Cu	Pb	Ni	Cr	Fe	Mn	Mg
Zn	1							
Cu	-0.309	1						
Pb	-0.434	0.651**	1					
Ni	0.011	0.385	0.221	1				
Cr	0.299	-0.084	-0.421	-0.119	1			
Fe	0.681**	-0.348	-0.415	0.074	0.261	1		
Mn	0.493	-0.523	-0.614	0.109	0.336	0.755**	1	
Mg	0.287	0.309	0.165	0.059	0.149	0.257	0.131	1

说明: \*\*  $P < 0.01$ 。

## 2.4 重金属污染的健康风险评价

人体暴露于痕量金属元素的3种主要途径是:直接经口摄入、经嘴或鼻子吸入、皮肤吸收。对于水中的痕量金属元素,经口摄入和皮肤吸收起了最重要的作用<sup>[17-19]</sup>。这两种暴露途径的暴露量可分别通过如下公式进行计算<sup>[19-20]</sup>:

$$ADD_{\text{ingestion}} = \frac{CW \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT(365\text{days/year})}, \quad (1)$$

$$ADD_{\text{dermal}} = \frac{DA_{\text{event}} \times EV \times EF \times ED \times SA}{BW \times AT(365\text{days/year})}, \quad (2)$$

$$DA_{\text{event}} = K_p \times C_w \times t_{\text{event}}, \quad (3)$$

式中:  $ADD_{\text{ingestion}}$  和  $ADD_{\text{dermal}}$  分别为平均每天经口摄入和皮肤吸收的剂量,  $\text{mg}/\text{kg}/\text{d}$ ;  $BW$  为体质量,  $\text{kg}$ , 考虑到亚洲人和西方人的差异, 本文成年人体质量取  $60 \text{ kg}$ ;  $C_w$  为水中痕量金属的平均质量浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $EF$  为暴露频率,  $\text{d}/\text{a}$ ;  $ED$  为暴露持续时间,  $\text{a}$ ;  $IR$  为摄入速率,  $\text{L}/\text{d}$ ;  $AT$  为暴露的平均时间,  $\text{a}$ ;  $DA_{\text{event}}$  为每次事件吸收的剂量,  $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{event})$ ;  $EV$  为每天发生事件数,  $\text{events}/\text{d}$ ;  $SA$  为暴露的皮肤面积,  $\text{cm}^2$ ;  $K_p$  为水中皮肤的渗透系数,  $\text{cm}/\text{h}$ ;  $C_w$  为

水中金属的平均质量浓度,  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ;  $t_{\text{event}}$  为每次事件持续的时间,  $\text{h}/\text{event}$ 。本文中的事件仅指淋浴, 除部分  $RfD_{\text{ingestion}}$  和  $RfD_{\text{dermal}}$  值来源于文献[9]外, 其他参数来源于文献[17]和[19]。

风险特征通过致癌风险和非致癌风险进行量化, 可能的非致癌风险通过风险商来反映。风险商的大小用每种暴露途径吸收的污染物质与相应的参考剂量的比值来估计, 如方程(4)所示。

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}. \quad (4)$$

如果  $HQ > 1$ , 则需要对该种暴露途径引起的非致癌风险的影响进行关注。为了评价不止一种暴露途径引起的总的风险, 引入风险指数  $HI$ 。  $HI$  为不同途径的风险之和,  $HI > 1$ , 表明可能会对人体健康产生影响或需要进一步进行研究<sup>[20]</sup>。

所测金属元素均属于非致癌物质, 所以在此仅作非致癌风险评价。由于目前  $Mg$  元素的相关参数不全, 所以未对其进行风险评价。表3分别为成人和孩子经口摄入和皮肤吸收2种途径算出来的风险值。

表3 梁滩河水中每种金属元素的参考剂量和风险商

元素	$RfD_{\text{ingestion}} /$ ( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$RfD_{\text{dermal}} /$ ( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$HQ_{\text{ingestion}}$		$HQ_{\text{dermal}}$		$HI = \sum HQ_s$	
			成人	孩子	成人	孩子	成人	孩子
Zn	300	60	$3.81 \times 10^{-3}$	$4.88 \times 10^{-3}$	$5.97 \times 10^{-5}$	$1.51 \times 10^{-4}$	$3.87 \times 10^{-3}$	$5.03 \times 10^{-3}$
Cu	40	12	$3.97 \times 10^{-2}$	$5.08 \times 10^{-2}$	$6.90 \times 10^{-4}$	$1.75 \times 10^{-3}$	$4.04 \times 10^{-2}$	$5.25 \times 10^{-2}$
Pb	1.4	0.42	1.71	2.19	$2.97 \times 10^{-3}$	$7.52 \times 10^{-3}$	1.71	2.19
Ni	20	5.4	$8.81 \times 10^{-2}$	$1.13 \times 10^{-1}$	$3.41 \times 10^{-4}$	$8.61 \times 10^{-4}$	$8.84 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-1}$
Cr	3	0.015	$1.48 \times 10^{-1}$	$1.89 \times 10^{-1}$	$3.09 \times 10^{-1}$	$7.80 \times 10^{-1}$	$4.56 \times 10^{-1}$	$9.69 \times 10^{-1}$
Fe	300	45	$1.45 \times 10^{-2}$	$1.85 \times 10^{-2}$	$5.03 \times 10^{-4}$	$1.27 \times 10^{-3}$	$1.50 \times 10^{-2}$	$1.98 \times 10^{-2}$
Mn	20	0.8	$1.46 \times 10^{-1}$	$1.87 \times 10^{-1}$	$1.90 \times 10^{-2}$	$4.81 \times 10^{-2}$	$1.65 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-1}$

从表3可以看出, 除  $Pb$  和  $Cr$  以外,  $Zn$ 、 $Cu$ 、 $Ni$ 、 $Fe$  和  $Mn$  5种元素的  $HI$  值均小于1, 表明这5种元素可能引起的人体非致癌的健康风险较小。但是, 无论是成人还是孩子,  $Cr$  的  $HI$  均接近于1,  $Pb$  的  $HI$  均大于1, 表明  $Cr$  和  $Pb$  这2种金属元素可能会引起较大的健康风险, 需要立即引起关注。从以上风险评价的结果可以看出, 在所评价的7种元素中,  $Pb$  是梁滩河水中最重要污染物, 其次是  $Cr$ , 然后分别是  $Mn$ 、 $Ni$ 、 $Cu$ 、 $Fe$  和  $Zn$ 。

但是, 风险评价中存在许多不确定性。方法上

的不确定性如不同年龄不同性别的个体暴露条件的差异, 水中污染物浓度的变化, 每天用水量的变化等都是不确定的。此外, 由于中国目前在暴露参数方面还没有一套标准或手册可供参考, 因此在风险评估参数选择的过程中除了参考中国学者的文献资料[11-12]外, 大部分暴露参数均直接从文献[17]和[20]中引进, 它们可能并不完全适合于中国人。因此, 笔者只得出了初步的风险评价结果, 更准确的关于梁滩河水中痕量金属元素的风险评估及对评估结果的误差分析还需要进一步进行深入研究。

### 3 结 论

1) 梁滩河水体中重金属元素的含量因采样断面的不同而相差悬殊, 重金属质量浓度远高于长江及其支流汉江中相应金属的质量浓度, 梁滩河水质不满足 GB3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类功能区和 GB5749—2006《生活饮用水卫生标准》的要求。

2) 梁滩河水体中重金属的空间分布和相关性分析显示梁滩河水体中的 Fe 和 Mn 可能具有相同的污染源。

3) 健康风险评价结果表明, 无论是成人还是孩子, Pb 的 HI 均大于 1, Pb 是梁滩河水体中引起人体特别是孩子非致癌风险的最重要的污染物, 然后分别是 Cr、Mn、Ni、Cu、Fe 和 Zn。

#### 参考文献:

- [1] 吴欢, 敖良根, 李可为, 等. 梁滩河生态系统健康评价研究[J]. 广东水利水电, 2010(12): 6-8.  
WU Huan, AO Lianggen, LI Kewei, et al. Research of the ecosystem health assessment for the Liangtan river[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010(12): 6-8.
- [2] Cheung K C, Wong M H. Risk assessment of heavy metal contamination in shrimp farming in Mai Po Nature Reserve, Hong Kong [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, 28(1): 27-36.
- [3] 王沛芳, 周文明, 王超, 等. 太湖沉积物重金属的形态特征及生态风险评价[J]. 重庆大学学报, 2011, 35(11): 136-143.  
WANG Peifang, ZHOU Wenming, WANG Chao, et al. The distribution characteristics and evaluation of ecological risk of heavy metals in the surface sediment of Taihu Lake[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 35(11): 136-143.
- [4] Liu J, Zhang X H, Tran H, et al. Heavy metal contamination and risk assessment in water, paddy soil, and rice around an electroplating plant [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, 18: 1623-1632.
- [5] 祁俊生, 傅川, 黄秀山, 等. 微量元素在三峡库区水域生态系统中的迁移[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 25(1): 17-20.  
QI Junsheng, FU Chuan, HUANG Xiushan, et al. Transfer of trace elements in water area ecology systems of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(1): 17-20.
- [6] 肖尚斌, 刘德富, 王雨春, 等. 三峡库区香溪河库湾沉积物重金属污染特征[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(8): 983-989.  
XIAO Shangbin, LIU Defu, WANG Yuchun, et al. Characteristics of heavy metal pollution in sediments at the Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(8): 983-989.
- [7] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库入库河流大宁河土壤重金属分布特征[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(4): 81-85, 139.  
ZHANG Lei, QIN Yanwen, ZHENG Binghui, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metal in the soil of backwater reach from input river of Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(4): 81-85, 139.
- [8] 闵真真, 马利民, 宋厚燃. 三峡库区次级支流梁滩河底泥重金属污染调查及评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(3): 155-158.  
MIN Zhenzhen, MA Limin, SONG Houran. Investigation and assessment of soil pollution by heavy metals in fluvial sediment of Liangtan River, branch river of Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(3): 155-158.
- [9] 袁红, 傅瓦利. 城镇化对水体重金属分布影响及生态风险分析[J]. 人民长江, 2009, 40(11): 34-36.  
YUAN Hong, FU Wali. Impact of urbanization on the heavy metal elements distribution in water and ecological risk analysis [J]. Yangtze River, 2009, 40(11): 34-36.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] Wu B, Zhao D Y, Jia H Y, et al. Preliminary risk assessment of trace metal pollution in surface water from Yangtze River in Nanjing section, China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, 82(4): 405-409.
- [12] Li S Y, Zhang Q F. Risk assessment and seasonal variations of dissolved trace elements and heavy metals in the Upper Han River, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1/2/3): 1051-1058.
- [13] WHO. Guidelines for drinking-water quality[M]. 3rd ed. Geneva: World Health Organization, 2008.
- [14] United States Environmental Protection Agency. National recommended water quality criteria[EB/OL]. [2011-06-11]. <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/current/index.cfm>.
- [15] 朱伟, 边博, 阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析[J]. 环境科学, 2007, 28(7):

- 1584-1589.
- ZHU Wei, BIAN Bo, RUAN Aidong. Analysis of sources of heavy metal contamination in road-deposited sediment from Zhenjiang [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2007, 28(7): 1584-1589.
- [16] 李梅英,徐俊荣,刘志兴,等. 新疆巩乃斯河水中微量重金属元素的特征分析[J]. 水资源保护, 2009, 25(5): 44-48.
- LI Meiyong, XU Junrong, LIU Zhixing, et al. Characteristic analysis of trace heavy metal elements of Kunes River[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(5): 44-48.
- [17] Kim E, Little J C, Chiu N. Estimating exposure to chemical contaminants in drinking water [J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(6): 1799-1806.
- [18] De M E, Iribarren I, Chacón E, et al. Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain) [J]. Chemosphere, 2007, 66(3): 505-513.
- [19] Rodriguez-Proteau R, Grant R L. Toxicity evaluation and human health risk assessment of surface and ground water contaminated by recycled hazardous waste materials [J]. Water Pollution: The Handbook of Environment Chemistry, 2005, 2: 133-189.
- [20] US EPA. Risk assessment guidance for superfund (RAGS) volume I: human health evaluation manual (part E, supplemental guidance for dermal risk assessment) interim[EB/OL]. [2011-05-06]. <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/ragse/>.
- (编辑 张 革)

~~~~~

(上接第 74 页)

- [11] Castilla M, Garcia D V L, Lopez M, et al. Dynamic response optimization of quantum series-parallel resonant converters using sliding mode control[C]// Proceedings of the 2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference, June 18-23, 2000, Galway, Ireland. Piscataway: IEEE Press, 2000, 2: 702-707.
- [12] Effler S, Kelly A, Halton M, et al. Digital control law using a novel load current estimator principle for improved transient response[C]// Proceedings of the 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 15-19, 2008, Rhodes, Greece. Piscataway: IEEE Press, 2008: 4585-4589.
- [13] Guang F, Meyer E, Liu Y F. A new digital control algorithm to achieve optimal dynamic performance in DC-to-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1489-1498.
- [14] Meyer E, Zhang Z L, Liu Y F. An optimal control method for buck converters using a practical capacitor charge balance technique [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1802-1812.
- [15] Lukic Z, Blake C, Huerta S C, et al. Universal and fault-tolerant multiphase digital PWM controller IC for high-frequency DC-DC converters[C]// Proceedings of the 2007 Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, February 25-March 1, 2007, Anaheim, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2007: 42-47.
- (编辑 王维朗)