

## 贵州重点地区土壤和水体中汞的生态风险\*

李强<sup>1,2</sup> 张瑞卿<sup>3</sup> 郭飞<sup>2</sup> 莫测辉<sup>1</sup> 廖海清<sup>2\*\*</sup>

(<sup>1</sup>暨南大学环境工程系, 广州 510632; <sup>2</sup>中国环境科学研究院, 北京 100012; <sup>3</sup>中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

**摘要** 分析了贵州省土壤和地表水体中汞含量空间分布状况,分别采用地累积指数法和潜在生态危害指数法评价了土壤中的汞污染程度和潜在生态风险;采用单因子法表征了水体总汞污染程度,应用安全阈值法对水体活性汞和甲基汞进行生态风险评价。结果表明:贵州省汞矿区及涉汞行业毗邻区域土壤中总汞污染程度较高,涉汞区 23 个点位中严重污染、重污染和偏重污染水平分别占 78.26%、13.04% 和 8.70%,且均为极度生态危害。非涉汞区除青山坡土壤中汞的生态风险极强外,其他区域土壤中汞的污染程度不高,生态风险属于可接受水平。贵州省汞开采与冶炼、铅锌冶炼、有机化工等行业已造成毗邻水体出现较严重的汞污染,且污染范围有扩大和延伸的趋势,但对水生生物有直接影响的活性汞和甲基汞的生态风险较小。

**关键词** 汞; 生态风险评价; 地累积指数; 潜在生态危害指数; 安全阈值

**中图分类号** X820.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)8-2140-08

**Ecological risk assessment of mercury in soils and waters in Guizhou Province of South-west China.** LI Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Rui-qing<sup>3</sup>, GUO Fei<sup>2</sup>, MO Ce-hui<sup>1</sup>, LIAO Hai-qing<sup>2\*\*</sup>

(<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; <sup>2</sup>Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; <sup>3</sup>Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8): 2140-2147.

**Abstract:** This paper analyzed the spatial distribution of mercury (Hg) in the soils and surface waters in Guizhou Province. The geo-accumulation index and potential ecological risk index were applied to assess the pollution degree and the ecological risk of total mercury (THg) in soils, and the single factor method and safety threshold method were employed to evaluate the THg pollution degree and the ecological risks of reactive mercury (RHg) and methylmercury (MeHg) in surface waters, respectively. The results showed that in the soils close to mercury-related mines and factories, there was a higher THg pollution. Of the 23 soil samples from the mercury-related mines and factories, the extreme, severe, and moderately severe THg pollution occupied 78.26%, 13.04%, and 8.70% of the total samples, respectively. Meanwhile, the potential ecological risk of THg in the soils was extremely high. In the other areas, soil THg pollution was moderate, and the potential ecological risk was acceptable. The THg pollution in the surface waters close to mercury mines, lead-zinc mines, and organic chemistry factories was serious, but the ecological risk to aquatic organisms was negligible due to the low concentrations of RHg and MeHg.

**Key words:** Hg; ecological risk assessment; geo-accumulation index; potential ecological risk index; safety threshold.

贵州省处于中国西南部的低温成矿域,矿产资

源非常丰富,汞矿储量和产量均居全国首位。贵州省具有近千年的汞开采和冶炼历史,由于采矿和冶炼工艺简单,环境治理措施落后,已造成大量冶炼矿渣直接暴露于地表土壤中,成为矿区土壤汞含量的

\* 国家水体污染控制与治理重大专项(2010ZX07212-007-001)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: liaohq@craes.org.cn

收稿日期: 2013-01-24 接受日期: 2013-04-27

主要来源,雨水对矿渣的淋滤作用也造成了周围土壤和水体汞含量的增加。研究表明,万山汞矿开采和冶炼废水中的汞含量范围为  $8 \sim 4900 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 矿区土壤汞含量为  $24.31 \sim 347.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,高出全国土壤平均汞含量  $2 \sim 3$  个数量级(谭红等,1997;丁振华等,2004)。此外,铅锌冶炼和有机化工等行业,以及燃煤等因素亦造成汞排放量增加(瞿丽雅,1999;Feng *et al.*, 2004)。

汞的熔点较低,在环境中的迁移性、生物富集性较强。矿区气态汞的无序运移及干湿沉降导致汞污染范围扩大,汞污染防治工作难度增加。目前,贵州省已开展大量土壤和水体中汞形态分布与污染特征的研究工作(白薇扬等,2006;Jiang *et al.*, 2006;Qiu *et al.*, 2006),基本阐明了贵州省汞矿区和非矿区土壤和水体中汞的污染状况和分布特征。但土壤和水体中汞生态风险的研究较少,且缺乏系统性,难以揭示土壤和水体中汞对生态环境的危害程度。从贵州省全局出发,开展土壤和水体中汞的生态风险研究,将有利于进一步认识贵州省汞矿区和非矿区汞的污染状况和危害程度。

生态风险评价是指生态系统受一个或多个胁迫

因素影响后,对不利的生态后果出现的可能性进行评估(Hope, 2006)。汞在土壤和水体中的迁移性和生物累积性较强,易于通过食物链危害生物体乃至人类健康,其生态风险应加倍关注。因此,本研究将系统地分析贵州省土壤和水体中汞的暴露水平,并结合数学模型,研究贵州省矿区和非矿区土壤和水体中汞的污染程度和生态风险,以期揭示贵州省汞污染的高风险区域,为贵州省各级政府制定汞污染防治政策提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据收集

**1.1.1 土壤和水体暴露数据的筛选** 数据的选取要求样品的采集、保存和分析符合我国相关标准,或为美国 EPA 推荐的标准方法,具有详细的试验方法质量保证/质量控制(QA/QC)。采集的水样包括过滤水样和未过滤水样,总汞和活性汞测定使用未过滤水样,甲基汞测定使用过滤水样。通过筛选,共收集了贵州省土壤总汞含量和地表水体总汞、活性汞及甲基汞含量的数据,包括土壤数据 28 组(表 1)和水体数据 19 组(表 2)。

表 1 贵州省土壤总汞含量统计数据

Table 1 Summaries of THg concentrations in soils of Guizhou Province

土壤点	类型	土壤总汞含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			数据源
		范围	均值	标准差	
务川矿区旱田	矿区	8.7 ~ 84	36	29	仇广乐等 2006
务川矿区稻田	矿区	1.1 ~ 317	49	109	仇广乐等 2006
务川矿区菜地	矿区	0.33 ~ 24	7.2	8.0	仇广乐等 2006
远离务川旱田	矿区	0.81 ~ 10	3.3	3.5	仇广乐等 2006
铜仁矿区	矿区	0.7 ~ 47	6.7	-	Li <i>et al.</i> , 2008
万山矿区旱田	矿区	-	447	-	仇广乐等 2006
万山矿区稻田	矿区	1.1 ~ 790	196	278	仇广乐等 2006
万山矿区菜地	矿区	163 ~ 744	453	410	仇广乐等 2006
万山矿区河滩土	矿区	0.16 ~ 389	40.94	76.64	戴智慧等 2011
万山矿区灌木土	矿区	0.09 ~ 312	13.24	53.57	戴智慧等 2011
万山矿区林地土	矿区	0.05 ~ 229	12.12	51.59	戴智慧等 2011
万山大水溪稻田	矿区	9 ~ 222	76	-	包正锋等 2011
万山大水溪山谷稻田	矿区	-	215.2	-	王少锋等 2006
万山四坑尾矿	矿区	-	78.8	-	王少锋等 2006
滥木厂旱田	矿区	121 ~ 456	237	190	仇广乐等 2006
滥木厂菜地	矿区	0.41 ~ 610	215	172	仇广乐等 2006
滥木厂稻田	矿区	5.6 ~ 70	31	35	仇广乐等 2006
滥木厂自然土	矿区	0.41 ~ 25	8.97	7.26	Qiu <i>et al.</i> , 2006
远离万山旱田	矿区	1.1 ~ 5.1	3.1	2.8	仇广乐等 2006
远离滥木厂旱田	矿区	3.7 ~ 9.6	7.3	3.1	仇广乐等 2006
有机化工厂	涉汞区	-	289	2.8	Milena <i>et al.</i> , 2003
烂泥沟金矿区	涉汞区	1.6 ~ 37	17	-	Wang & Zhang 2009
水银洞金矿区	涉汞区	-	7	-	Wang & Zhang 2009
青山坡	非涉汞区	-	38	-	张维等 2000
花桥	非涉汞区	-	0.25	0.04	Milena <i>et al.</i> , 2003
清镇发电厂	非涉汞区	-	0.27	-	Milena <i>et al.</i> , 2003
威宁县居民区	非涉汞区	0.062 ~ 0.096	0.076	-	Li <i>et al.</i> , 2008
赫章县农作区	非涉汞区	0.14 ~ 0.86	0.38	0.16	Feng <i>et al.</i> , 2006

表2 贵州省地表水体汞含量统计数据 ( $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Table 2 Summaries of Hg concentrations in surface waters of Guizhou Province

	水体总汞含量		水体活性汞含量		水体甲基汞含量		数据源
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	
阿哈湖	2.08 ~ 19.14	5.7	0.1 ~ 0.7	0.4	0.04 ~ 0.4	0.19	白薇扬等 2006
红枫湖	2.5 ~ 13.9	6.9	-	-	-	-	He <i>et al.</i> 2008
草海	1.7 ~ 9.0	5.3	-	-	-	-	钱晓莉等 2008
洪家渡水库	0.32 ~ 6.75	1.4	-	-	-	-	姚珩等 2011
乌江渡水库	0.44 ~ 3.13	1.31	0.04 ~ 0.62	0.17	0.03 ~ 1.5	0.12	孟博等 2011
引子渡水库	0.4 ~ 1.37	0.86	0.04 ~ 0.48	0.14	0.03 ~ 0.22	0.08	孟博等 2011
普定水库	1.29 ~ 3.18	1.79	0.09 ~ 0.43	0.19	0.04 ~ 0.1	0.07	刘凯等 2009
东风水库	1.3 ~ 39	9.1	-	-	-	-	Feng <i>et al.</i> 2003
花桥	-	30	-	3.1	-	0.023	Milena <i>et al.</i> 2003
百花湖	20 ~ 336	76	0.5 ~ 4.0	1.6	-	-	Feng <i>et al.</i> 2003
贵阳化工厂附近水体	-	1830	-	-	-	-	Milena <i>et al.</i> 2003
赫章地表水	12 ~ 691	138	199.68	-	-	-	Feng <i>et al.</i> 2004
下溪河	35 ~ 5900	1730	0.6 ~ 40	7.49	0.081 ~ 6.0	0.61	Qiu <i>et al.</i> 2009
敖寨河	34 ~ 870	398	0.69 ~ 3.7	2.09	0.19 ~ 0.51	0.33	Qiu <i>et al.</i> 2009
大水溪	6.8 ~ 68	27.85	-	-	-	-	Lin <i>et al.</i> 1997
高楼坪河	600 ~ 3900	2050	1.6 ~ 320	55.54	0.19 ~ 3.1	0.81	Qiu <i>et al.</i> 2009
黄道河	780 ~ 9300	3727	2.1 ~ 390	64.23	0.31 ~ 0.43	0.35	Qiu <i>et al.</i> 2009
务川矿区水体	43 ~ 2100	620	0.66 ~ 12	7.6	0.11 ~ 5.4	0.42	李平等 2008
滥木厂水体	24.8 ~ 7020	846	1.16 ~ 11.8	3.9	-	-	Qiu <i>et al.</i> 2006

**1.1.2 水生生物毒性数据的筛选** 水生生物毒性数据主要来自美国环保局 ECOTOX 数据库 (<http://www.epa.gov/ecotox/>) 和中国知网 (<http://www.cnki.net/>) ,选择能代表贵州水生生态系统的生物。考虑到汞对水生生物的长期性暴露影响,尽量选择水生生物的慢性毒性数据,缺乏慢性毒性数据时,则用急性慢性比率进行转化(其中活性汞的急性慢性比率为 3.731)。动物急性毒性数据尽量选择暴露时间为 48 ~ 96 h 的  $\text{LC}_{50}$  或  $\text{EC}_{50}$ ,植物或藻类急性毒性数据则选择暴露时间 4 ~ 12 d 的  $\text{LC}_{50}$  或  $\text{EC}_{50}$ ,如果一个物种有多个符合要求的数据,则采用这些数据的几何均值(Wheeler *et al.* 2002)。

## 1.2 风险评估方法

**1.2.1 土壤中汞的生态风险评价方法** 目前,土壤中重金属生态风险评价方法主要有单因子指数法(房世波等 2003)、地累积指数法、潜在生态危害指数法、内梅罗综合污染指数法(郭跃平等 2007)和污染负荷指数法(贾振邦等 1992)等,前 3 种方法常用于评价单一重金属风险。本研究采用地累积指数法和潜在生态危害指数法综合评价贵州省土壤中汞的污染程度。在这 2 种土壤汞污染评价方法中,地累积指数评价和潜在生态风险评价考虑到汞在土壤中的地球化学行为及环境毒性,两者结合应用能较为合理地贵州省土壤中汞污染状况及环境效应

进行系统评估。

(1) 地累积指数法是德国学者 Muller(1969)在评价沉积物中重金属的污染等级时提出的,目前广泛应用于土壤重金属的污染评价,通常将重金属污染程度分为 7 级(表 3)(Forstner *et al.* 1993)。该法以元素的地球化学背景值为参考,可以科学地阐述重金属的污染程度。

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C/(k \times B)] \quad (1)$$

式中:  $C$  为土壤中汞的含量;  $B$  为汞背景值;  $k$  为考虑当地背景值的变动而取的系数,一般为 1.5。

(2) 潜在生态危害指数法是瑞典学者 Hakanson(1980)提出的,该方法综合考虑了重金属的生态效应与环境效应,更客观地反应重金属对土壤的潜在生态风险,在国际上被广泛应用。计算公式为:

$$C_f = C/C_n \quad (2)$$

$$E_r = T_r \times C_f \quad (3)$$

式中:  $C_f$  为汞污染参数;  $C_n$  为参比值,本研究采用贵州土壤背景值  $0.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (何锦林等 1999);  $E_r$  为汞潜在生态风险参数;  $T_r$  为毒性系数,对毒性响应系数作规范处理后定汞的值为 40。汞的潜在生态风险分级见表 4。

**1.2.2 水体汞污染水平及生态风险评价方法** 水体中汞的形态多样,毒性效应也各不相同,为了能综合反映水体中汞的生态风险,本研究对总汞、活性汞

表 3 汞污染的地累积指数级别

Table 3 Level of  $I_{geo}$  for mercury pollution

数值	污染程度
$\leq 0$	无污染
0 ~ 1	轻度污染
1 ~ 2	偏中度污染
2 ~ 3	中度污染
3 ~ 4	偏重污染
4 ~ 5	重污染
>5	严重污染

表 4 潜在生态危害系数( Hakanson 1980)

Table 4 Grade of potential ecological risk

数值	污染程度
<40	轻度
40 ~ 80	中度
80 ~ 160	重度
160 ~ 320	很强
$\geq 320$	极强

和甲基汞分别进行评价。水体中总汞可反映其污染程度,对水生生物有直接危害的活性汞和甲基汞可反映水体中不同形态汞生态风险。

本研究采用单项污染指数法评价水体中总汞的污染程度(常青山等 2007) 此法操作简便,可直观表征总汞的污染水平;同时采用概率法中的安全阈值法(MOS)来评价水体中活性汞和甲基汞的生态风险,该法从生物多样性的角度出发,选择不同的物种来表示群落水平上的生物效应,能综合考虑污染物对环境中的多数生物的毒性效应(Solomon *et al.*, 1996)。

#### (1) 水体总汞污染评价

采用单因子法对水体中总汞进行污染评价。

$$F = C/C_0 \quad (4)$$

式中  $F$ 、 $C$ 、 $C_0$  分别为汞污染指数、水体的汞含量和汞在水体的背景值。

总汞评价标准:  $F > 1$  轻污染;  $F \geq 10$  中度污染;  $F \geq 100$  重度污染。由于贵州地表水体中引子渡水库的总汞含量最低,人为影响最小,平均为  $0.86 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  (孟博等 2011),在全球天然水体总汞背景值范围内,可作为贵州地表水体的总汞背景值。

#### (2) 活性汞和甲基汞的生态风险评价

使用安全阈值法对水体中活性汞和甲基汞进行生态风险评价。安全阈值法是物种敏感度分布曲线上 10% 处的浓度与环境暴露浓度累积分布曲线上 90% 处的浓度之间的比值(Solomon *et al.*, 1996),可量化暴露分布和毒性分布的重叠程度。若比值  $< 1$ ,

表示对水生生物具有潜在风险;若比值  $> 1$ ,则表示没风险。

对暴露数据和毒性数据采用 Shapiro-Wilk 法进行正态分布检验。按照浓度值大小对物种毒性数据进行排序,计算每个物种的累积概率(Hall *et al.*, 1998):

$$P = i / (n + 1) \quad (5)$$

式中  $P$  为累积概率,  $i$  为物种从小到大排列的秩,  $n$  为样本数。将该累积概率和对数转化后的毒性浓度值拟合构建物种敏感度分布曲线,得到保护 90% 的水生生物的毒性阈值(Solomon *et al.*, 1996)。暴露数据的累积概率分布参照公式(5)计算,通过暴露数据拟合的曲线计算累积概率为 90% 对应的暴露浓度,该浓度可以作为生态风险评价中暴露浓度参考值(Solomon *et al.*, 1996)。本研究使用 Origin 8.0 对暴露数据和毒性数据进行曲线拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤汞的生态风险评价

应用地累积指数和潜在生态风险危害指数法综合评价了贵州省汞矿区、其他涉汞区和典型非涉汞区土壤中汞的污染水平及潜在生态风险,各采样点土壤中汞的地累积指数及潜在生态风险指数如图 1 和图 2 所示。

由图 1 可知,汞矿区土壤存在不同程度的汞污染,且大多污染严重。不同类型土壤的总汞污染程度有明显的差异,这可能与土壤的 pH 值和有机质含量有关(李平等 2008)。务川矿区稻田总汞污染程度高于菜地和旱田,滥木厂矿区旱田和菜地总汞污染程度却要高于稻田,万山矿区旱田和菜地总汞污染程度也高于稻田、河滩土壤及灌木丛土壤。贵州省有机化工厂及 2 个典型金矿土壤中汞的污染程度也较高,尤其是有机化工厂土壤总汞的地累积指数达 10.23,与万山、务川和滥木厂等矿区的最高值持平。非涉汞区土壤中汞污染程度普遍不高,仅百花湖上游青山坡汞污染比较严重,青山坡农田一般用贵州有机化工厂的废水浇灌,所以出现汞污染程度较高的现象(张维 2000)。贵州省汞矿区及涉汞行业毗邻区域土壤中总汞污染程度较高,涉汞区 23 个点位中严重污染、重污染和偏重污染水平分别占 78.26%、13.04% 和 8.70%。非涉汞区污染程度普遍不高,但是要关注汞矿区汞通过大气和水体迁移对非涉汞区域造成的二次污染。

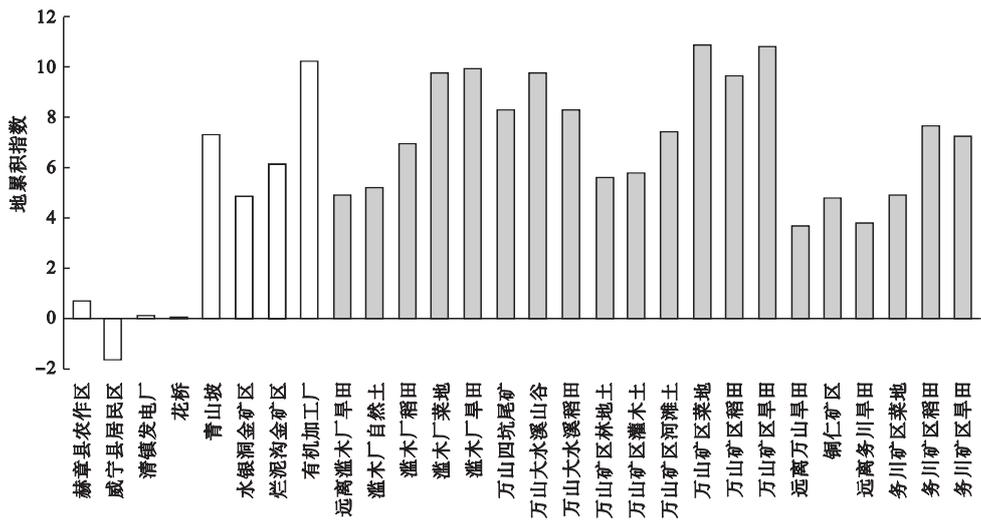


图1 贵州省土壤中汞的地累积指数值

Fig.1 Geo-accumulation index of Hg in soils of Guizhou Province

灰色柱条、斜杠柱条和白色柱条分别指示汞矿区、其他涉汞区和其他非涉汞区,下同。

为了定量评价贵州省土壤中汞的环境效应,应用潜在生态危害指数法评价汞的潜在生态风险(图2)。结果表明,贵州省土壤中汞的潜在风险程度较高,涉汞区土壤中汞生态风险均为极强生态危害,且潜在生态危害系数远大于极强生态危害限值320(Hakanson,1980)。非涉汞区汞的生态风险存在一定差别,青山坡土壤中汞的生态风险极强;赫章县农作区可能受当地铅锌冶炼的影响,汞生态风险稍偏高;威宁、清镇和花桥等非涉汞区域土壤中汞的生态风险不高,属于可接受水平。

地累积指数法和潜在生态危害指数法结果基本

相符,贵州省涉汞区域土壤污染非常严重,且均具极强的潜在生态危害。尽管贵州省大部分汞矿和化工厂已停产多年,涉汞企业三废排放造成周边土壤污染,对周边生态系统的危害一直存在(Feng et al.,2006)。远离矿区的土壤中汞污染水平及潜在生态风险偏高,表明土壤中汞的迁移转化过程已导致污染面积扩大。

由于数据收集的有限性,本研究仅对土壤中总汞的生态风险进行评价,未涉及不同形态汞对环境造成的生态风险。由于不同形态的汞生物有效性和环境毒性迥异(李永华等,2005),所以在评价土壤

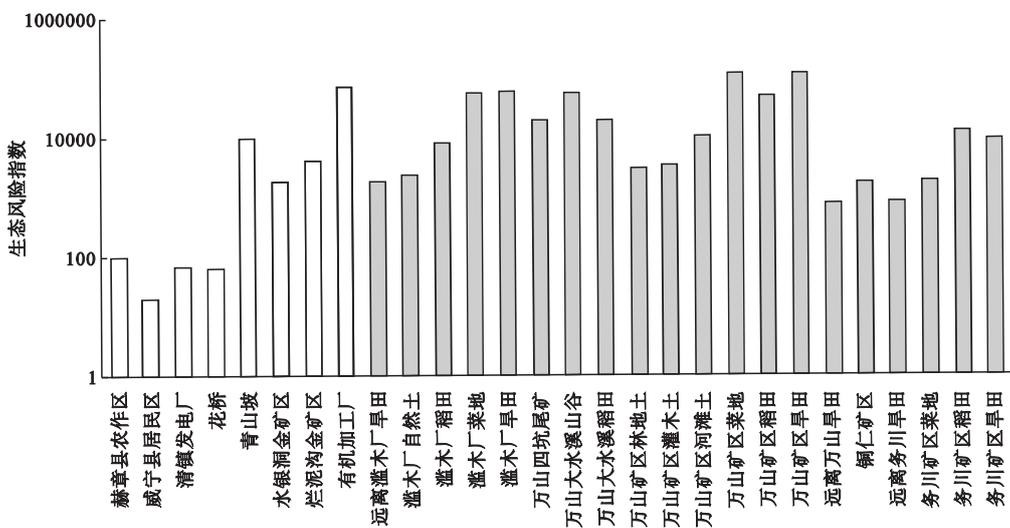


图2 贵州省土壤中汞的潜在生态风险值

Fig.2 Ecological risk index of Hg in soils of Guizhou Province

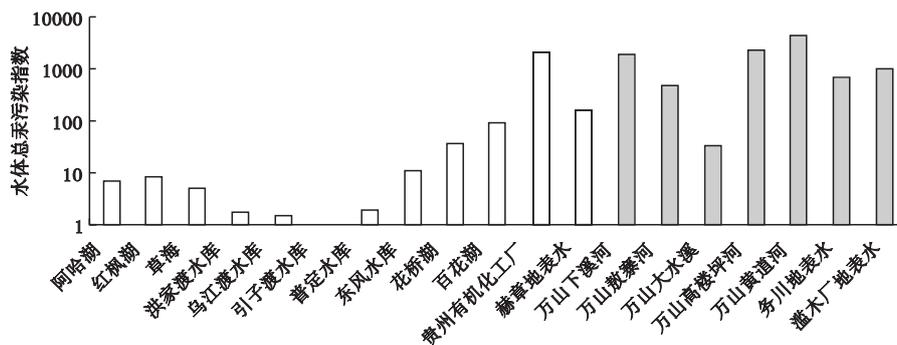


图3 贵州省水体中总汞污染指数  
 Fig.3 Pollution index of Hg in water bodies of Guizhou Province  
 灰色柱条、斜杠柱条和白色柱条分别指示汞矿区、其他涉汞区和典型非涉汞区。

汞的生态风险上存在一定的局限性。不同区域不同类型的土壤中,汞的形态差异较为复杂,通常矿区土壤中的汞以残渣态为主,可能来源于矿山活动中产生的冶炼炉渣,在正常条件下不易释放,不易被植物吸收,对食物链影响较小(冯新斌等,1996; Higuera *et al.* 2003),研究土壤中汞的赋存形态有助于更为准确地评价其生态风险。

2.2 水体汞的生态风险评价

2.2.1 水体总汞污染等级 应用单因子法计算得出水体中总汞污染指数(图3)。汞矿区的汞开采、冶炼等生产活动对周边地表水影响较大,毗邻水体基本为重度污染,仅万山矿区大水溪水体中总汞为中度污染水平。其他行业区域(斜纹柱)为重度污染,如有机化工厂附近水域和赫章地表水体,主要原因是有机化工厂和赫章地区土法炼锌厂汞排放(张维 2000; Feng *et al.* 2004)。非涉汞区地表水体多为轻污染,但位于贵州有机化工厂下游的花桥和百

表5 活性汞和甲基汞的暴露浓度和毒性数据  
 Table 5 Exposure concentrations and toxicities of RHg and MeHg

汞	指标	生物物种数	浓度范围 (ng · L <sup>-1</sup> )	平均值 (ng · L <sup>-1</sup> )	分布类型
活性汞	暴露浓度	-	0.04 ~ 390	14.74	对数正态
	毒性数据	58	187.6 ~ 9392105	1338161.2	对数正态
甲基汞	暴露浓度	-	0.023 ~ 6	0.67098	对数正态
	毒性数据	17	83.2 ~ 1000000	15103.58	对数正态

表6 贵州省水体中活性汞和甲基汞的生态风险  
 Table 6 Ecological risk of RHg and MeHg in water-bodies of Guizhou Province

汞	90% 对应的暴露浓度 (ng · L <sup>-1</sup> )	10% 对应的毒性数据 (ng · L <sup>-1</sup> )	安全 阈值
活性汞	19	2688	141
甲基汞	1.6	369	231

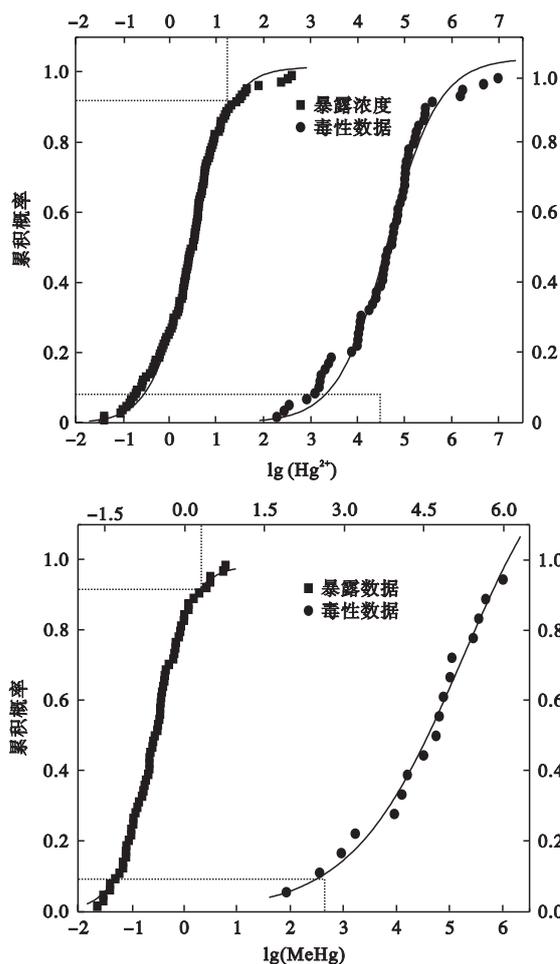


图4 活性汞和甲基汞暴露浓度和慢性毒性数据累积分布  
 Fig.4 Cumulative distribution curves of exposure concentrations and chronic toxicity for RHg and MeHg

花湖水体中总汞的污染较高。结果表明:贵州省汞开采与冶炼、铅锌冶炼、有机化工等行业已造成毗邻水体出现较严重的汞污染,且污染范围有扩大和延伸的趋势。

2.2.2 活性汞和甲基汞的生态风险评价 从保护

水生生物的角度出发,研究了贵州水体中不同汞形态对水生生物的生态风险。研究发现,水体中活性汞与甲基汞的暴露浓度和毒性数据均符合对数正态分布(表5)。将活性汞与甲基汞的暴露浓度和毒性数据拟合(图4),可以直观地看出其重叠程度。通过拟合公式,计算出物种敏感度分布曲线上10%处的活性汞和甲基汞浓度与环境暴露浓度累积分布曲线上90%处的活性汞和甲基汞浓度(表6)。经计算,可知活性汞与甲基汞的安全阈值分别为141和231,均远>1,且暴露浓度超过影响10%的水生生物的概率分别为0和1.6%,说明贵州省地表水的活性汞和甲基汞含量不存在明显的生态风险。

结合贵州省水体总汞和不同形态汞的结果来看,尽管贵州地表水体总汞的污染多为严重污染,但是对于水生生物的生态风险较小。其主要原因是水体中汞源于含汞废弃物的排放,含汞废弃物中汞主要以颗粒态形式存在,而活性汞和甲基汞的浓度较低,所以对于水生生物的生态风险较小。本研究只反映了现有数据条件下的结果,为得到更可靠的生态风险评价结果,还需要进一步考虑暴露和效应分析的影响因素及生物在生态系统中的功能等。

### 3 结论

采用地累积指数法和潜在生态风险指数法研究表明,贵州省涉汞区域土壤汞污染较为严重,均具极强的潜在生态危害。远离矿区的土壤中总汞的污染水平及生态风险偏高,表明土壤中汞的迁移转化过程已导致污染面积扩大。由于已发表数据的局限,本文汞的风险评价是基于土壤中总汞数据,其结果在准确性上尚存在不足之处,开展土壤中汞赋存形态的研究有助于提高汞生态风险评价的准确性。

单因子法的评价结果表明涉汞区水体中汞的污染水平均非常高,而应用安全阈值法的结果指示所有水体中汞的潜在生态风险不大,造成这种差异的原因是水体中汞的赋存形态主要是颗粒态,活性汞和甲基汞浓度不高。本研究表明,安全阈值法是以生物有效性较高的活性汞和甲基汞为评价对象,可以更准确地指示水体中汞的生态风险。

#### 参考文献

白薇扬,冯新斌,孙力,等. 2006. 贵阳市阿哈湖水体和沉积物间隙水中汞的含量和形态分布初步研究. 环境科学学报, **26**(1): 91-98.  
包正铎,王建旭,冯新斌,等. 2011. 贵州万山汞矿区污染

土壤中汞的形态分布特征. 生态学杂志, **30**(5): 907-913.  
常青山,马祥庆,王志勇. 2007. 南方重金属矿区重金属的污染特征及评价. 长江流域资源与环境, **16**(3): 395-399.  
仇广乐,冯新斌,王少锋,等. 2006. 贵州汞矿区不同位置土壤中总汞和甲基汞污染特征的研究. 环境化学, **27**(3): 550-555.  
戴智慧,冯新斌,李平,等. 2011. 贵州万山汞矿区自然土壤汞污染特征. 生态学杂志, **30**(5): 902-906.  
丁振华,王文华,瞿丽雅,等. 2004. 贵州万山汞矿区汞的环境污染及对生态系统的影响. 环境科学, **25**(1): 111-114.  
房世波,潘剑君,杨武年,等. 2003. 南京市土壤重金属污染调查评价. 城市环境与城市生态, **16**(8): 4-6.  
冯新斌,陈业材,朱卫国. 1996. 土壤中汞存在形式的研究. 矿物学报, **16**(2): 218-222.  
郭跃昆,吴国爱,付杨荣,等. 2007. 海南省胡椒种植基地土壤中重金属元素污染评价. 地质科技情报, **26**(4): 91-96.  
何锦林,谭红,赵亚民,等. 1999. 贵州梵净山自然保护区大气汞的沉降. 环境科学学报, **19**(2): 164-169.  
贾振邦,周华,张宝权,等. 1992. 应用污染负荷指数法评价太子河(本溪市区段)沉积物中重金属污染. 环境科技, **12**(6): 55-61.  
瞿丽雅. 1999. 贵州有机化工厂的汞污染及对环境的影响. 贵州师范大学学报, **17**(3): 25-29.  
李平,冯新斌,仇广乐. 2008. 贵州省务川汞矿区汞污染的初步研究. 环境化学, **27**(1): 96-99.  
李永华,王五一,杨林生,等. 2005. 湘西多金属矿区汞铅污染土壤的环境质量. 环境科学, **26**(5): 187-191.  
刘凯,杨芳,冯新斌,等. 2009. 贵州省普定水库水体及沉积物孔隙水中汞的含量和形态分布初步研究. 矿物岩石地球化学通报, **28**(3): 239-247.  
孟博,冯新斌,陈春宵,等. 2011. 乌江流域不同营养水平水库水体中汞的含量和形态分布. 生态学杂志, **30**(5): 951-960.  
钱晓莉,冯新斌,闭向阳,等. 2008. 贵州省草海表层水体和沉积物间隙水中汞的含量和形态分布初步研究. 湖泊科学, **20**(5): 563-570.  
谭红,何锦林,奥利瓦,等. 1997. 贵州汞冶炼与散布. 贵州科学, **15**(2): 112-117.  
王少锋,冯新斌,仇广乐,等. 2006. 万山汞矿区地表与大气界面间汞交换通量研究. 环境科学, **27**(8): 1487-1493.  
姚珩,冯新斌,仇广乐,等. 2011. 贵州洪家渡水库水体不同形态汞的分布特征. 生态学杂志, **30**(5): 961-968.  
张维. 2000. 百花湖流域的汞污染及其对策. 贵州环保科技, **6**(3): 23-28.  
Feng XB, Li GH, Qiu GL. 2004. A preliminary study on mercury contamination to the environment from artisanal zinc smelting using indigenous methods in Hezhang country, Guizhou, China. Part 1. Mercury emission from zinc smel-

- ting and its influences on the surface waters. *Atmospheric Environment*, **38**: 6223–6230.
- Feng XB, Li GH, Qiu GL. 2006. A preliminary study on mercury contamination to the environment from artisanal zinc smelting using indigenous methods in Hezhang country, Guizhou, China. Part 2. Mercury contaminations to soil and crop. *Science of the Total Environment*, **368**: 47–55.
- Feng XB, Shang LH, Tang SL, et al. 2003. Gaseous mercury exchange rate between air and water over Baihua reservoir, Guizhou, China during cold season. *Journal de Physique IV*, **107**: 451–454.
- Forstner U, Ahlf W, Calmano W. 1993. Sediment quality objectives and criteria development in Germany. *Water Science and Technology*, **28**: 307–314.
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, **14**: 975–1001.
- Hall Jr LW, Scott MC, Killen WD. 1998. Ecological risk assessment of copper and cadmium in surface waters of Chesapeake Bay watershed. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **17**: 1172–1189.
- He TR, Feng XB, Guo YN, et al. 2008. The impact of eutrophication on the biogeochemical cycling of mercury species in a reservoir: A case study from Hongfeng Reservoir, Guizhou, China. *Environmental Pollution*, **154**: 56–67.
- Higuera P, Oyarzun R, Biester H, et al. 2003. A first insight into mercury distribution and speciation in soils from the Almaden mining district, Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, **80**: 95–104.
- Hope BK. 2006. An examination of ecological risk assessment and management practices. *Environment International*, **32**: 983–995.
- Jiang GB, Shi JB, Feng XB. 2006. Mercury pollution in China: An overview of the past and current sources of the toxic metal. *Environmental Science and Technology*, **40**: 3672–3678.
- Li P, Feng XB, Shang LH, et al. 2008. Mercury pollution from artisanal mercury mining in Tongren, Guizhou, China. *Applied Geochemistry*, **23**: 2055–2064.
- Lin YH, Guo MX, Gan WM. 1997. Mercury pollution from small gold mines in China. *Water, Air and Soil Pollution*, **97**: 233–239.
- Milena H, Natasa N, Vesna F, et al. 2003. Total mercury, methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China. *Science of the Total Environment*, **304**: 231–256.
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, **2**: 108–118.
- Qiu GL, Feng XB, Wang SF, et al. 2006. Mercury contaminations from historic mining to water, soil and vegetation in Lanmuchang, Guizhou, southwestern China. *Science of the Total Environment*, **368**: 56–58.
- Qiu GL, Feng XB, Wang SF, et al. 2009. Mercury distribution and speciation in water and fish from abandoned Hg mines in Wanshan, Guizhou province, China. *Science of the Total Environment*, **407**: 5162–5168.
- Solomon KR, Baker DB, Richards RP, et al. 1996. Ecological risk assessment of atrazine in North American surface waters. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **15**: 31–76.
- Wang W, Zhang Z. 2009. Accumulation of mercury in five mosses and their ecological rehabilitation potential from Shuiyindong Gold Deposit in Guizhou, China. 9th International Conference on Mercury as a Global Pollutant. Abstracts, Guiyang.
- Wheeler JR, Grist EPM, Leung KMY, et al. 2002. Species sensitivity distributions: Data and model choice. *Marine Pollution Bulletin*, **45**: 192–202.
- 
- 作者简介 李 强,男,1987年生,硕士研究生。研究方向为贵州汞污染与控制。E-mail: liqiang\_jnu@163.com  
责任编辑 魏中青
-