

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20111008002

王晨, 曾祥英, 于志强, 等. 湘江衡阳段沉积物中铊等重金属的污染特征及其生态风险评估[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(1): 16-22

Wang C, Zeng X Y, Yu Z Q, et al. Distribution and risk assessment of thallium and other metals in sediments from Hengyang Section of Xiangjiang River [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(1): 16-22 (in Chinese)

湘江衡阳段沉积物中铊等重金属的污染特征及其生态风险评估

王晨^{1,2}, 曾祥英^{1,*}, 于志强¹, 盛国英¹, 傅家谟¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室 广东省环境资源利用与保护重点实验室 广州 510640

2. 中国科学院大学 北京 100049

摘要: 湘江是我国重金属污染最重的河流之一。为了更全面地了解湘江衡阳段表层沉积物重金属污染现状及其潜在生态风险, 在前期相关研究基础上, 分析了重金属 Tl 及其他 4 种重金属(Mn、Co、Ni 和 V)的含量水平和分布特征, 并采用地累积指数法和潜在生态风险指数法对沉积物中重金属污染现状和潜在生态风险进行了评价。结果表明, 湘江衡阳段表层沉积物中 Tl 和 Mn 有一定程度的累积和污染, 其含量分别为 0.12 ~ 2.09 mg·kg⁻¹ 和 234 ~ 4 580 mg·kg⁻¹。由于 Tl 具有较强的毒性响应, 其潜在生态风险不容忽视。综合前期相关研究结果, 研究区域中 10 种重金属总潜在生态风险指数(RI)为 27.8 ~ 6 266, 约 70% 采样点具有重度生态风险, 其主要风险来源于 Cd 和 Tl。

关键词: 湘江衡阳段; 沉积物; 铊; 地累积指数法; 潜在生态风险指数法

文章编号: 1673-5897(2013)1-16-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Distribution and Risk Assessment of Thallium and Other Metals in Sediments from Hengyang Section of Xiangjiang River

Wang Chen^{1,2}, Zeng Xiangying^{1,*}, Yu Zhiqiang¹, Sheng Guoying¹, Fu Jiemo¹

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Provincial Key Laboratory of Utilization and Protection of Environmental Resource, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Received 8 October 2011 accepted 22 February 2012

Abstract: Xiangjiang River is one of the highly heavy-metal polluted rivers in China. To obtain comprehensive evaluation about the pollution status of heavy metals and their potential ecological risks, the levels and distribution of thallium (Tl) and four other heavy metals (Mn, Co, Ni and V) in surface sediments from Hengyang section of Xiangjiang River were analyzed based on our previous study. The potential ecological risks of these heavy metals were calculated using index of geoaccumulation (I_{geo}) as well as Hakanson potential ecological risk index (RI). Results indicated that surface sediments from Hengyang Section of Xiangjiang River were polluted by Tl and Mn to some extent, with concentrations

收稿日期: 2011-10-08 录用日期: 2012-02-22

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX07528-002-04)

作者简介: 王晨(1987-), 男, 硕士, 研究方向为生态风险评估, E-mail: zjuhawang@163.com;

* 通讯作者(Corresponding author) E-mail: zengxy@gig.ac.cn

ranging from $0.12 \sim 2.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $234 \sim 4\,580 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Much more attention should be paid to the ecological risk from Tl due to its high toxicity. Combined with our previous study, the total RI values of 10 heavy metals in the studied area varied from 27.8 ~ 6 266, among which about 70% sampling sites exhibited high ecological risk. The ecological risk was mainly caused by Cd and Tl.

Keywords: Hengyang Section of Xiangjiang River ; sediment; thallium; index of geoaccumulation; Hakanson potential ecological risk index

铊(Tl)是英国科学家 Crookes 于 1861 年发现的一种白色、重而柔软的金属,具有较好的延展性,在国防、航天和通讯等领域有广泛的应用。一般而言, Tl 在环境介质中的含量很低,世界范围土壤中 Tl 的含量约为 $0.11 \sim 0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

Tl 属于剧毒高危重金属,可以通过食物链富集并最终进入人体,在人体中富集,损害中枢神经系统、肝和肾等内脏器官,甚至引起死亡;人体经口暴露时,其毒性较 Pb、Cd 和 Hg 强;对植物而言, Tl 也是有毒元素。有研究显示, Tl 能完全抑制莠苣和荞麦种子的生长。因此,美国环保局已经将 Tl 列入优控污染物清单。随着含 Tl 矿石的开采以及冶炼,大量的含 Tl 工业废水和废弃物进入环境中,严重污染了周边环境。结合 Tl 的地球化学特性可以推测,含 Tl 矿石的开采以及冶炼是环境中 Tl 污染的一个重要来源^[2-5]。目前,针对矿区的矿石、尾矿渣以及表层土壤中 Tl 分布的研究比较多^[4-8],但针对水体以及水体沉积物中 Tl 污染的研究则相对较少^[9-11]。

湘江是长江的重要支流,长期受到沿江矿区和金属冶炼厂重金属污染的影响,关于湘江沉积物中 Cd、Cr 和 Pb 等重金属污染的相关研究较多^[12-16]。在我们前期相关研究中也发现,湘江(衡阳段)沉积物几种重金属(Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb)污染较重,呈现出以 Cd 污染为主的多种重金属复合污染特征^[17]。截止目前,关于湘江沉积物中 Tl 污染及其相关风险评估的研究尚未见报道。选取湘江衡阳段作为研究区域,采用 ICP-MS 测定了沉积物中 Tl 的含量,然后应用地累积指数法和潜在生态风险指数法,对该区域的沉积物中 Tl 污染程度和潜在生态风险程度进行了初步评价;同时还报道了该区域中其余几种重金属(V、Co、Mn 和 Ni)的浓度水平、分布特征及初步污染评价。结合前期相关研究结果^[17],综合评价了湘江衡阳段沉积物中 10 种重金属(Cd、Cr、Cu、Zn、Pb、Tl、V、Co、Mn 和 Ni)复合污染状态下的潜在生态风险。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 仪器与试剂

实验用水由 Milli-Q 高纯水发生器制得($> 18.2 \text{ M} \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)。HCl 在由优级纯 HCl(广州东红试剂厂)等温吸收纯化得到。HNO₃由优级纯 HNO₃(广州东红试剂厂)经石英蒸馏器亚沸蒸馏得到。沉积物标准物质 GBW07129、GBW07309、GBW07103、GBW07104、GBW07105 和 GBW07123 购自于国家地质实验测试中心。

1.2 样品采集、预处理及定性定量分析

2010 年 4 月,根据设定的 25 个监测断面,采集了沉积物样品 26 个,采样点示意图见图 1。沉积物样品经冷冻干燥,用玛瑙研钵研磨达到测试要求。所有化学处理过程均在中国科学院广州地球化学研究所同位素超净化学实验室(100 级)进行。沉积物中重金属的定性定量分析参照刘颖等^[18]的方法,使用 P-E Elan 6000 型 ICP-MS 质谱仪(美国 Perkin Elmer 公司)完成定性定量分析。5 种重金属 V、Co、Mn、Ni 和 Tl 的检测限分别为 0.011 、 0.022 、 0.008 、 0.016 和 $0.001 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,目标化合物回收率在 90% ~ 110% 之间。

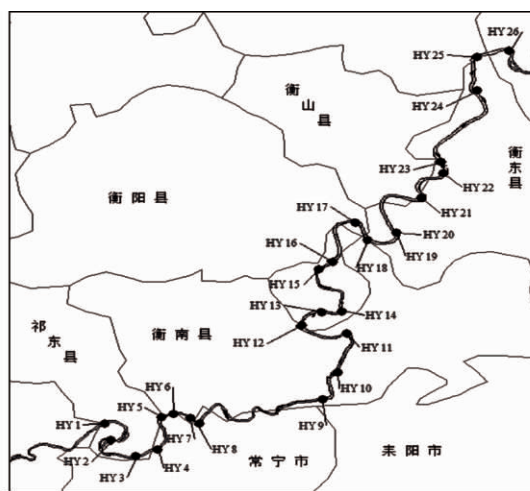


图 1 湘江衡阳段沉积物采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites of sediments in Hengyang Section of Xiangjiang River

1.3 沉积物中重金属污染现状评价和潜在生态风险评估

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法(index of geoaccumulation, I_{geo})是德国科学家 Müller 提出的研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标^[19],其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (KB_n)]$$

其中 C_n 是元素 n 在沉积物中的实测含量, B_n 为该元素的地球化学背景值。从公式可以看出,地累积指数除了取决于样品的实测含量,还受所选择的地球化学背景值的影响。为此,滕彦国等^[20]开展了深入的对比分析,发现地累积指数对所选择的地球化学背景值较为敏感。为真实反映沉积物的污染状况,需要采用与该沉积物有直接关系的地球化学背景值^[20]。在本研究中,为了更真实反映湘江沉积物中重金属的污染现状,采用当地洞庭湖水系沉积物的元素背景作为参照值^[21-22];考虑到湘江流域各地沉积物有机物含量、粒度等的差异可能会引起背景值的变动, K 取值为 1.5。

1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(RI)可以定量评估单一污染物的污染程度(单因子污染风险程度),也可以综合评估多种污染物复合污染所致的潜在生态危害^[23]。其计算公式如下:

$$RI = \sum_i E_r^i = \sum_i T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i}$$

式中, T_r^i 为第 i 种重金属毒性响应系数,目前关于 T_r 毒性效应的研究较少,借鉴高博的研究^[24]将 T_r 的毒性响应系数定义为 40; C^i 为表层沉积物第 i 种重金属的实测值; C_n^i 为第 i 种重金属的背景参照值,为了能够真实评估湘江重金属污染所致的潜在生态风险,采用洞庭湖水系沉积物的元素背景值来作为参照值^[21-22]; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害程度。

2 结果(Results)

2.1 湘江衡阳段沉积物中 TI 等重金属含量分布

表 1 给出了湘江表层沉积物中 5 种重金属的含量分布。表中同时列出了洞庭湖水系^[21]、长江^[25]和北江^[10]沉积物中部分重金属的均值。从表中可以看出,湘江衡阳段沉积物中 TI 含量在 0.12 ~ 2.09 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围,均值为 1.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,含量水平与珠江水系北江沉积物中含量水平大致相当,但高于中国大陆沉积物中 TI 的丰度(0.55 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),也显著高于德国明斯特地区(0.01 ~ 0.10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和绍尔兰特地区

(0.01 ~ 0.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、以及加拿大沉积物中 TI 的平均含量(约为 0.35 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[26]。此外,湘江衡阳段沉积物中 Mn 的含量(234 ~ 4 580 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 2 501 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于长江(均值 753 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和北江(均值 860 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的水平,远远超过 1986 年洞庭湖水系沉积物的平均水平(450 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[21]; V 的含量几乎二倍于北江水平,Co 和 Ni 的含量稍稍高出 1986 年洞庭湖水系沉积物的平均水平^[21],与长江和北江的含量大致相当^[9-10]。

表 1 湘江衡阳段沉积物重金属浓度

Table 1 Concentrations of heavy metals in sediments from Hengyang Section of Xiangjiang River

采样点	V	Mn	Co	Ni	TI
HY1	93.6	2 037	16.3	53.3	0.99
HY2	124	4 352	16.4	61.6	1.03
HY3	80.9	1 687	12.5	36.6	0.97
HY4	122	2 790	17.4	59.6	1.00
HY5	122	2 544	16.6	54.0	1.06
HY6	167	4 002	18.7	86.2	0.95
HY7	181	4 049	21.5	75.7	1.12
HY8	2.91	234	1.34	0.61	0.12
HY9	119	3 034	22.8	70.1	2.09
HY10	89.4	1 291	14.3	39.2	1.08
HY11	51.0	1 970	14.7	31.6	1.63
HY12	89.3	1 751	14.7	34.3	1.24
HY13	100	2 298	16.6	41.1	1.54
HY14	104	1 549	13.0	35.1	1.20
HY15	174	4 580	21.7	83.2	1.33
HY16	92.4	1 654	21.8	32.8	1.10
HY17	98.0	1 830	15.2	37.7	1.20
HY18	192	3 946	23.8	73.6	1.37
HY19	151	1 862	21.5	65.4	1.37
HY20	108	1 850	16.1	39.6	1.55
HY21	164	2 812	21.8	64.7	1.48
HY22	184	3 558	23.9	76.5	1.41
HY23	166	4 182	21.6	71.0	1.55
HY24	74.9	2 511	22.9	53.2	1.30
HY25	87.3	1 392	15.4	36.0	1.20
HY26	72.3	1 260	13.6	30.2	1.14
均值	116	2 501	17.5	51.6	1.23
洞庭湖水系	-	450	10.3	21.2	-
长江	-	753	14.2	33.9	-
北江	61.8	860	9.90	38.6	1.67

从空间分布上来看,本研究中的 5 种重金属最低含量均出现在 HY8 采样点,最高值分布则略有不同,如 TI 的最高值(2.09 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)位于 HY9 采样点, V 的最高值(192 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)出现在 HY18 采样点, Mn 的最高值(4 580 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)位于 HY15 采样点。同时研究也发现,除 HY8 采样点外,研究区域中 Co 和 Ni 的分布没有显著区别。总体来说,位于衡南县的 HY9 采样点,几种重金属含量均较高,该采样点地处某大型矿业集团的排污口下游,企业富含重金属

的工业废水是沉积物中重金属污染的重要来源^[17,27]。而 HY8 采样点位于近尾州大坝的下游,由于大坝蓄水,大量泥沙颗粒物沉淀于坝前,大坝下游沉积物很少,所采集的样品主要为砂质。课题组前期研究中也发现,该采样点样品中 Cd、Cr 等重金属含量也均显著低于其余采样点^[17]。

2.2 湘江衡阳段重金属污染程度及潜在生态风险

2.2.1 地累积指数法评价结果

表 2 中列出了研究区域中 5 种重金属的地累积指数。参照国内沉积物重金属污染等级分类标准^[28]对 V 而言, HY8 和 HY11($I_{geo} < 0$)无污染,其余采样点面临轻度($0 < I_{geo} < 1$)或偏中度污染($1 < I_{geo} < 2$)研究区域中 Co 属于轻度污染甚至无污染; HY8、HY11 和 HY26 无 Ni 污染,约 35% 采样点面临偏中度 Ni 污染,其余采样点为轻度 Ni 污染;对 Mn 而言, HY8 无污染, HY10 和 HY26 为轻度污染,其余各采样点达到了偏中度甚至中度污染($2 < I_{geo} < 3$);对于 Tl 而言, HY8 未受到 Tl 的污染, HY9 则达到偏中度污染,其余各采样点均属于轻度污染。

表 2 湘江衡阳段沉积物中 5 种重金属 I_{geo} 值
Table 2 I_{geo} of five heavy metals in sediments from Hengyang Section of Xiangjiang River

采样点	V	Mn	Co	Ni	Tl
HY1	0.57	1.59	0.08	0.74	0.14
HY2	0.98	2.69	0.08	0.95	0.19
HY3	0.36	1.32	- 0.30	0.20	0.12
HY4	0.95	2.05	0.17	0.91	0.15
HY5	0.95	1.91	0.11	0.76	0.24
HY6	1.41	2.57	0.27	1.44	0.08
HY7	1.52	2.58	0.48	1.25	0.39
HY8	- 4.44	- 1.53	- 3.53	- 5.70	- 2.91
HY9	0.97	2.17	0.56	1.14	1.22
HY10	0.50	0.94	- 0.12	0.30	0.26
HY11	- 0.31	1.54	- 0.07	- 0.01	0.86
HY12	0.50	1.38	- 0.07	0.11	0.46
HY13	0.67	1.77	0.10	0.37	0.77
HY14	0.73	1.20	- 0.25	0.14	0.42
HY15	1.47	2.76	0.49	1.39	0.56
HY16	0.55	1.29	0.50	0.04	0.29
HY17	0.64	1.44	- 0.02	0.25	0.42
HY18	1.61	2.55	0.06	1.21	0.61
HY19	1.26	1.46	0.47	1.04	0.61
HY20	0.77	1.46	0.06	0.32	0.78
HY21	1.38	2.06	0.05	1.02	0.72
HY22	1.55	2.40	0.63	1.27	0.65
HY23	1.39	2.63	0.48	1.16	0.78
HY24	0.25	1.90	0.57	0.74	0.53
HY25	0.47	1.04	0.00	0.18	0.42
HY26	0.20	0.90	- 0.18	- 0.08	0.34

结合前期相关研究结果,以重金属 I_{geo} 均值排序,湘江衡阳段沉积物中 10 种重金属污染程度从大

到小依次为: Cd > Zn > Mn > Cu > V > Ni > Tl > Pb > Co > Cr。

2.2.2 潜在生态风险指数法评价结果

目前根据 E_i 值和 RI 值划分风险等级尚无统一标准,同时由于所研究风险污染物种类和数量的不同,不同研究选取的划分标准也不尽相同^[24,29-31]。本研究采用 Hakanson 的评价指标和分类标准^[23],评价沉积物中重金属的潜在生态风险。表 3 中列出了 Tl 等 5 种重金属的 E_i 值,从表中可以看出,除了 Tl 具有较高的 E_i 值(8.00 ~ 139),其余 4 种重金属的 E_i 值均较小。表 3 中同时列入了文献报道的 5 种重金属(Cd、Cr、Pb、Cu 和 Zn)的潜在生态风险指数值(RI^*)^[17],以及所有 10 种重金属复合污染的总潜在生态风险指数(RI),其范围为 27.8 ~ 6 266。研究结果显示, HY8 采样点生态风险等级较低(RI 值 27.8),上游 8 个采样点中部分采样点(HY1、HY2、

表 3 湘江衡阳段沉积物 5 种重金属潜在生态危害评价结果
Table 3 Potential ecological risk assessment results of five heavy metals in sediments from Hengyang Section of Xiangjiang River

采样点	RI^*	E_i					RI
		Tl	Mn	Co	Ni	V	
HY1	200	66.0	4.53	7.92	12.6	4.46	295
HY2	183	68.7	9.67	7.96	14.5	5.94	290
HY3	189	64.7	3.75	6.07	8.62	3.85	276
HY4	266	66.7	6.20	8.43	14.1	5.79	367
HY5	226	70.7	5.65	8.07	12.7	5.79	329
HY6	129	63.3	8.89	9.07	20.3	7.95	238
HY7	270	78.7	9.00	10.4	17.8	8.60	394
HY8	18.4	8.00	0.52	0.65	0.14	0.14	27.8
HY9	6 087	139	6.74	11.1	16.5	5.66	6 266
HY10	146	72.0	2.87	6.92	9.24	4.26	241
HY11	755	109	4.38	7.15	7.46	2.43	886
HY12	520	82.7	3.89	7.16	8.09	4.25	626
HY13	867	103	5.11	8.05	9.70	4.79	998
HY14	867	80.0	3.44	6.32	8.28	4.97	970
HY15	647	88.7	10.2	10.6	19.6	8.29	784
HY16	246	73.3	3.68	10.6	7.74	4.40	345
HY17	481	80.0	4.07	7.37	8.90	4.67	586
HY18	874	91.3	8.77	11.6	17.4	9.13	1 012
HY19	2 224	91.3	4.14	10.4	15.4	7.21	2 348
HY20	3 685	103	4.11	7.82	9.34	5.13	3 815
HY21	2 350	98.7	6.25	10.6	15.2	7.83	2 488
HY22	1 548	94.0	7.91	11.6	18.0	8.77	1 688
HY23	1 166	103	9.29	10.5	16.8	7.88	1 313
HY24	1 046	86.7	5.58	11.1	12.5	3.57	1 165
HY25	1 163	80.0	3.09	7.48	8.50	4.16	1 266
HY26	715	76.0	2.80	6.60	7.12	3.44	811
均值	1 033	82.2	5.56	8.52	12.2	5.51	1 147

注: RI^* 为 5 种重金属(Cd、Cr、Pb、Cu 和 Zn)的潜在生态风险指数;RI 指文中 10 种重金属的潜在生态风险指数。

HY3和HY6)具有“中度”生态风险(RI值 <300),其余采样点面临“重度”生态风险($300 < \text{RI值} < 600$);而下游18个采样点中HY10(RI值241)具有“中度”生态风险, HY16(RI值345)和HY17(RI值586)具有“重度”生态风险,其余采样点全部为“极高”生态风险(RI值 >600)。从单一重金属生态风险看,V、Mn、Co和Ni的 E_i^* 值均远低于40,为“低度”生态风险;HY8(8.00)面临“低度”TI的生态风险,其余部分采样点具有“中度”(80~160)甚至“重度”(80~160)的TI潜在生态危害。

综合前期相关研究结果^[17],依据重金属单因子风险系数均值大小排序,沉积物中10种重金属生态危害程度顺序为 $\text{Cd} > \text{Tl} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Co} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{V} > \text{Cr}$ 。从各重金属 E_i^* 值对总潜在生态风险指数RI的贡献来看,Cd是主要的风险组分,其次为Tl。由于Tl的毒性效应显著,其单因子风险不容忽视(8.00~139)。

3 讨论(Discussion)

地累积指数法和潜在生态风险指数法是目前较为常用的2种沉积物重金属污染现状评价方法。2种评价结果均表明,湘江衡阳段呈现以Cd为主的多种重金属复合污染的特征,其主要污染来源为湘江沿岸矿山开采、冶炼等行业的工业企业排污^[15-16]。

针对沉积物中10种重金属污染,采用2种不同的评价方法得到的评价结果出现一定的差异,这是因为地累积指数受控于沉积物中重金属的实测浓度以及所选择的地球化学背景值,而潜在生态风险指数不仅与沉积物重金属实测浓度和背景值有关,还与各重金属的毒性响应系数紧密相关,如Cd的毒性响应系数30,是Cu和Pb的6倍,是Zn和Mn的30倍,Tl的毒性很强,一般将其毒性响应系数定义为40。相较而言,潜在生态指数法能更真实地反映研究区域水体面临的生态危害。

湘江是我国重金属污染最为严重的河流之一,它是纳污水体,也是沿岸居民的饮用水源以及农业灌溉水源,所以长期以来湘江流域重金属污染十分引人关注。截止目前,关于湘江流域重金属的污染现状研究多集中于Cd等几种典型毒害重金属,关于Tl污染尚未引起大家警惕。地累积指数评价显示湘江衡阳段沉积物Tl富集并不显著,但是由于Tl的毒性效应和生物富集潜能十分显著,其潜在生态风险不容忽视。本研究结果也警示我们,湘江流域Tl的人体健康风险应该引起相关部门的高度关注,

加强含Tl废水废弃物的管理和控制,从源头控制Tl进入环境;同时加强Tl污染高风险区的监测管理和控制,避免重大灾害事故发生。

通讯作者简介:曾祥英(1968—),女,环境科学博士,副研究员,主要研究方向为环境毒害污染物及风险评估,发表学术论文40余篇。

参考文献:

- [1] Frederickson C J, Koh J V, Bush A I. The neurobiology of zinc in health and disease [J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2005, 6(6): 449 - 462
- [2] 孙勇, 范必威. 自然界中铊的分布及对人体健康的影响[J]. *广东微量元素科学*, 2004, 11(11): 8 - 12
Sun Y, Fan B W. The distribution and infection for flesh health of thallium in the nature [J]. *Guangdong Weiliang Yuansu Kexue*, 2004, 11(11): 8 - 12 (in Chinese)
- [3] 颜文, 刘孝义, 龙江平. 铊(Tl)——一个不可忽视的土壤污染元素[J]. *土壤学进展*, 1995, 23(3): 21 - 28
- [4] 刘敬勇, 常向阳, 涂湘林, 等. 广东某硫酸冶炼工业区土壤铊污染及评价[J]. *地质评论*, 2009, 55(2): 242 - 250
Liu J Y, Chang X Y, Tu X L, et al. Pollution investigation and evaluation of thallium in soil around a sulphuric acid plant in Guangdong Province [J]. *Geological Review*, 2009, 55(2): 242 - 250 (in Chinese)
- [5] 刘敬勇, 常向阳, 涂湘林, 等. 广东某含铊硫酸冶炼堆渣场土壤中重金属的污染特征[J]. *中国环境监测*, 2008, 24(2): 74 - 81
Liu J Y, Chang X Y, Tu X L, et al. Pollution character of thallium (Cd, Pb, Zn) in profile of soil within the deposited slag collected from a sulphuric acid plant in Guangdong [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2008, 24(2): 74 - 81 (in Chinese)
- [6] 杨春霞, 陈永亨, 彭平安, 等. 含铊黄铁矿冶炼废渣在自然淋滤过程中铊的迁移与释放[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(2): 99 - 102
Yang C X, Chen Y H, Peng P A, et al. The migration and release behaviors of thallium in the sulfuric acid slag in the process of natural leaching [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(2): 99 - 102 (in Chinese)
- [7] Xiao T F, Guha J, Boyle D, et al. Naturally occurring thallium: A hidden geoenvironmental health hazard? [J]. *Environment International*, 2004, 30(4): 501 - 507
- [8] Zhang Z, Zhang B G, Long J P, et al. Thallium pollution associated with mining of thallium deposits [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 41(1): 75 - 81

- [9] 邓红梅, 陈永亨. 水中铊的污染及其生态效应[J]. 环境化学, 2008, 27(3): 363 – 367
Deng H M, Chen Y H. Thallium pollution and its ecological effect in water [J]. Environmental Chemistry, 2008, 27(3): 363-367 (in Chinese)
- [10] 高博, 孙可, 任明忠, 等. 北江表层沉积物中铊污染的生态风险[J]. 生态环境, 2007, 17(2): 528 – 532
Gao B, Sun K, Ren M Z, et al. Ecological risk assessment of thallium pollution in the surface sediment of Beijiang River [J]. Ecology and Environment, 2007, 17(2): 528 – 532 (in Chinese)
- [11] Liu J, Wang J, Chen Y H, et al. Thallium distribution in sediments from the Pearl River Basin, China [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2010, 38(10): 909 – 915
- [12] 郭朝晖, 朱永官. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 553 – 555
Guo Z H, Zhu Y G. Contamination and available contents of heavy metals in soil in the typical mining and smelting circumjacent districts [J]. Ecology and Environment, 2004, 13(4): 553 – 555 (in Chinese)
- [13] Liu H Y, Probst A, Liao B H. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China) [J]. Science of the Total Environment, 2005, 339(1-3): 153 – 166
- [14] 李军, 刘云国, 许中坚. 湘江长株潭段底泥重金属存在形态及生物有效性[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2009, 24(1): 116 – 121
Li J, Liu Y G, Xu Z J. Heavy metals speciation and its biological availability in sediment patterns of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Section of the Xiangjiang River [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2009, 24(1): 116 – 121 (in Chinese)
- [15] 唐文清, 刘利, 冯泳兰, 等. 河流底泥重金属污染现状分析及评价——以湘江衡阳段为例[J]. 衡阳师范学院学报, 2008, 29(6): 55 – 59
Tang W Q, Liu L, Feng Y L, et al. Analysis and assessment on pollution status of heavy metal in the fluvial sediment—A case study on the Hengyang Section of Xiang River [J]. Journal of Hengyang Normal University, 2008, 29(6): 55 – 59 (in Chinese)
- [16] 邱丽君, 杨喆. 湘江衡阳段底泥重金属沉积现状分析[J]. 科技资讯, 2008(8): 166 – 168
- [17] 王晨, 曾祥英, 于志强, 等. 湘江衡阳段沉积物中重金属污染特征及其初步生态风险评估[J]. 地球环境学报, 2011, 2(2): 22 – 27
Wang C, Zeng X Y, Yu Z Q, et al. The occurrence, distribution and risk assessment of heavy metals in sediments from Xiangjiang River (Hengyang Section) [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 2(2): 22 – 27 (in Chinese)
- [18] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 552 – 558
Liu Y, Liu H C, Li X H. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS [J]. Geochemica, 1996, 25(6): 552 – 558 (in Chinese)
- [19] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108 – 118
- [20] 滕彦国, 虞先国, 倪师军, 等. 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, 2002, 25(2): 7-10
Teng Y G, Tuo X G, Ni S J, et al. Applying geo-accumulation index to assess heavy metal pollution in sediment: Influence of different geochemical background [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(2): 7 – 10 (in Chinese)
- [21] 李健, 曾北危, 姚岳云, 等. 洞庭湖水系水体环境背景值调查研究[J]. 环境科学, 1986, 7(4): 62 – 68
Li J, Zeng B W, Yao Y Y, et al. Studies on environmental background levels in waters of Dongting Lake system [J]. Environmental Science, 1986, 7(4): 62 – 68 (in Chinese)
- [22] 彭渤, 唐晓燕, 余昌训, 等. 湘江入湖河段沉积物重金属污染及其 Pb 同位素地球化学示踪[J]. 地质学报, 2011, 85(2): 282 – 299
Peng B, Tang X Y, Yu C X, et al. Heavy metal contamination of inlet sediments of the Xiangjiang River and Pb isotopic geochemical implication [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(2): 282 – 299 (in Chinese)
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control of sediment [J]. Water Research, 1980, 14 (8): 975 – 1001
- [24] 高博. 典型环境样品中重金属污染及 Cd 和 Pb 同位素示踪的初步研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008: 46
Gao B. Heavy metals pollution in typical environment samples and preliminary study on Cd and Pb isotopic tracing [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008: 46 (in Chinese)
- [25] 沈敏, 于红霞, 邓西海. 长江下游沉积物中重金属污染现状与特征[J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18(5): 15 – 18
Shen M, Yu H X, Deng X H. Heavy metals in surface sediments from lower reach of the Yangtze River [J]. The

- Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2006, 18(5): 15 – 18 (in Chinese)
- [26] Mdaren J W, Beauchemin D, Beaman S S. Application of isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry to be analysis of marine sediments [J]. Analytical Chemistry, 1987, 59(4): 610 – 613
- [27] Wei C Y, Wang C, Yang L S. Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in the soils from mining-smelting activities in Shuikoushan, Hunan Province, China [J]. Journal of Environmental Science, 2009, 21(9): 1230 – 1236
- [28] 姚志刚, 鲍征宇, 高璞. 洞庭湖沉积物重金属环境地球化学[J]. 地球化学, 2006, 35(6): 629 – 638
Yao Z G, Bao Z Y, Gao P. Environmental geochemistry of heavy metals in sediments of Dongting Lake [J]. Geochimica, 2006, 35(6): 629 – 638 (in Chinese)
- [29] 胡朝晖, 张干, 邱耀文, 等. 我国渔港沉积物的重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地球化学, 2010, 39(4): 297 – 304
- Hu Z H, Zhang G, Qiu Y W, et al. Heavy metal pollution and their ecological risk assessment in surface sediments from Chinese coastal fishing harbors [J]. Geochimica, 2010, 39(4): 297 – 304 (in Chinese)
- [30] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 732 – 736
Gong X F, Chen C L, Zhou W B, et al. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake [J]. Environmental Science, 2006, 27(4): 732 – 736 (in Chinese)
- [31] 陈丽莎, 陈志良, 肖举强, 等. 湘江流域长株潭段底泥重金属污染评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4603 – 4605
Chen L S, Chen Z L, Xiao J Q, et al. Investigation on heavy metal pollution of sediments in Xiangjiang River in Changzhutan [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(8): 4603 – 4605 (in Chinese) ◆