

贵州典型城市河流表层沉积物汞生态风险研究

王青峰^{1,2*} 樊磊磊¹ 王丹¹ 彭惠惠¹ 李仲根^{1,2}

(1. 遵义师范学院 资源与环境学院, 贵州 遵义 563008; 2. 中国科学院 地球化学研究所环境地球化学
国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要: 遵义湘江河是流经遵义市主城区的典型城市河流, 为评价遵义湘江河的汞污染状况, 系统采集河流表层底泥并进行分析。结果表明: 沉积物汞含量为 0.131~3.132 mg/kg, 平均汞含量为 1.049 mg/kg, 河水和沉积物汞含量上游低于下游, 汞含量与流经市区距离呈显著正相关。沉积物的甲基汞含量为 2.1~31.4 ng/g, 占总汞的比例为 1.11%~1.87%, 略高于其他地区。汞的 BCR 形态分析表明, 沉积物中的汞主要以残渣态为主。生态风险分析表明, 湘江河属于轻度污染但存在较大的潜在生态风险。

关键词: 遵义湘江河; 沉积物; 汞含量; 污染评价

DOI: 10.13205/j.hjgc.202008041

ECOLOGICAL RISK OF MERCURY IN SURFACE SEDIMENTS OF TYPICAL URBAN STREAM IN GUIZHOU PROVINCE

WANG Qing-feng^{1,2*}, FAN Lei-lei¹, WANG Dan¹, PENG Hui-hui¹, LI Zhong-gen^{1,2}

(1. Department of Resources and Environment, Zunyi Normal University, Zunyi 563008, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: Xiangjiang River is a typical urban stream flowing through the main urban area of Zunyi. To evaluate the pollution characteristics and ecological risk of mercury of Zunyi Xiangjiang River, the surface sediments system were collected and analyzed. The results showed that the mercury content of surface sediments was ranged in 0.131~3.132 ng/g and the mercury content in downstream of both river water and sediments was much higher than upstream, and was positively correlated with the distance passed through urban areas. The methyl mercury concentration of surface sediments was ranged in 2.1~31.4 ng/g and accounted for 1.11%~1.87% of the total mercury. Furthermore, the results of BCR three-step sequential extraction procedure showed that the mercury in the sediment was mainly in the form of residue. The risk assessment indicated that the Xiangjiang River was mildly polluted while it had considerable potential ecological risk.

Keywords: Xiangjiang River in Zunyi; sediments; mercury content; pollution assessment

0 引言

汞具有很强的毒性、迁移性和生物富集性, 是危害极大的金属^[1,2]。汞排放进入自然环境中会在微生物的作用下转化成毒性极大的甲基汞^[3]。汞进入人体会蓄积于细胞和脑室, 导致中枢神经中毒及脏器损伤^[4]。近年来, 随着经济社会活动不断加剧, 我国城市水体重金属污染问题凸显, 严重影响城市居民

的正常生活及生命健康^[5]。

贵州省位于全球汞矿带上, 是我国重要的汞矿产地, 其境内有万山汞矿、务川汞矿和滥木厂汞矿等, 相较于其他省份, 贵州省内河流有更大的汞污染风险^[6,7]。湘江河位于贵州东北部的遵义市, 是长江支流乌江左岸的较大支流。主源喇叭河发源于贵州省遵义市红花岗区西北娄山山脉金顶山南麓, 流经遵义

收稿日期: 2019-06-23

基金项目: 贵州省科技厅基础研究计划项目([2017]1200); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2016]252); 贵州省教育厅贵州省黔北土壤资源与环境特色重点实验室项目(黔教合 KY 字[2017]010)。

* 第一作者、通信作者: 王青峰(1988-) , 男, 博士, 主要研究方向为重金属污染控制。457892463@qq.com

市主城区,最后注入乌江^[8,9]。湘江河是一条典型的城市河流,大量的生活污水、生活垃圾和工业废水被排入城市河流中,导致越来越多的城市河流遭到严重污染,水中溶解氧严重不足,自净功能逐渐丧失,水质逐步恶化,出现不同程度的发黑发臭现象。据历史监测数据表明,湘江河的水质方面,在遵义城区段污染较为严重,主要表现为包含汞在内的重金属^[8]。

汞可以在水体、大气和土壤三相之间以各种形态进行交换,而河流沉积物主要由比表面积较大的泥沙、黏土、有机质等各种矿物组成,是水体重金属的一个主要蓄积库^[10]。河流底泥中的汞元素,主要来源于大气沉降、自然侵蚀以及污水排放。通过对河流底泥中重金属含量的研究,可以比较清楚地了解河流水体环境的污染物状况^[11,12]。近十几年来,湘江河流经遵义城区段进行了一系列的治理,流经城区段水质有明显的改善。本研究通过系统采集湘江河流经遵义城区段的河流底泥测定其汞含量并对汞的生态风险进行评估,以期了解河流汞污染的状况,为湘江河污染情况提供基础材料和对湘江河进行污染防治提供参考。

1 材料与方法

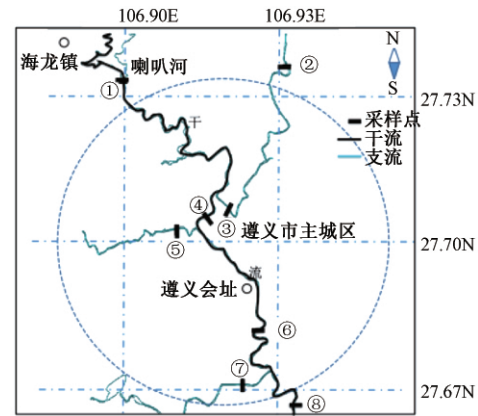
1.1 研究区域及样品采集

选取湘江河流经遵义城区段为研究对象,研究区域位于中亚热带高原湿润季风区,年降水量为1000~1300 mm,变化范围为700~1500 mm。年降水量各地、各时段分布不均。湘江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。

采样点基于湘江河水系空间分布情况和污染源位置,如图1所示。选取湘江河流经遵义城区段干流上游、下游及主要支流为研究区域,共设置8个采样点,其中采样点1号、4号、6号和8号位于湘江河干流上,采样点2号、3号、5号和7号位于支流。沉积物样品于2017年1月一次采集完成,沉积物采集使用不锈钢抓斗式采样器,采用多点混合法采集表层(0~10 cm)沉积物,装入聚乙烯塑料袋中并置于装有冰块的保温箱中(约4℃)保存。在实验室剔除其中的石块等杂质,将样品混匀、冷冻干燥,研磨并过100目筛保存待测。

1.2 实验方法

沉积物汞含量通过LUMEX RA 915 M测汞仪测量^[13]。沉积物甲基汞采用萃取-乙基化结合GC-CVAFS法进行测定^[14]。土壤有机质含量按



注:①—⑧为采样点。

图1 研究区域和采样点

Figure 1 Map of the study areas and sampling sites

GB 9834—88《土壤有机质测定》推荐方法测量^[15]。汞赋存形态参考BCR三步提取法^[16,17]:即弱酸可溶解态、可还原态、可氧化态和残渣态。汞生态风险评估法采用与王馨慧^[18]等相同的评价方法:风险评估指数法(risk assessment code, RAC)方法^[19]和Hakanson^[20]提出的潜在生态风险指数法(the potential ecological risk index, RI)^[21]。BCR法提取的弱酸可溶解态(B_1)是有生物效态,其在总汞中的比例可直接反映汞的生态风险。RI法的计算式如下:

$$E_r^i = C_f^i \times T_f^i \quad (1)$$

其中: $C_f^i = C^i / C_n^i$

式中: E_r^i 为某一金属的潜在风险系数; C_f^i 为某一金属的毒性相应因子; T_f^i 为金属的潜在危害系数; C^i 为实测值; C_n^i 为沉积物中相应污染物的背景值。由于贵州土壤以黄壤居多,有关资料表明,黄壤平均汞含量为0.262 mg/kg^[22],本文采用此数据为参考值,金属 T_f^i 取40。RAC法和RI法生态风险评估划分如表1所示。

表1 生态风险评估等级划分^[18]

RAC 风险评估		RI 潜在生态风险评估法	
B_1 占比	风险程度	E_r^i	潜在生态风险程度
$B_1 < 1\%$	无	$B_1 < 40$	低
$1\% \leq B_1 \leq 10\%$	低	$40 \leq B_1 < 80$	中等
$11\% \leq B_1 \leq 30\%$	中等	$80 \leq B_1 < 160$	较高
$31\% \leq B_1 \leq 50\%$	高	$160 \leq B_1 < 320$	高
$B_1 > 50\%$	很高	$B_1 \geq 320$	很高

2 结果与分析

2.1 底泥汞浓度分析

河流沉积物汞含量分析(表2)表明,湘江河表层沉积物中汞含量存在明显的空间分布差异,沉积物汞

含量下游远高于上游。上游采样点 1 号为背景点,其汞含量仅为 0.187 mg/kg,而下游干流采样点 6 号汞含量可高达 3.132 mg/kg,支流的汞含量为 0.156~1.543 mg/kg(采样点 1 号、2 号、5 号和 7 号),河流平均汞含量为 1.049 mg/kg,远高于贵州土壤背景值 0.262 mg/kg^[22]。从湘江河表层沉积物中汞含量空间分布情况来看,湘江河干流污染更为严重。参考贵州省土壤重金属汞背景值,除采样点 1 号外,其他样点均不同程度超过背景值,超标率高达 87.5%。对沉积物的甲基汞含量测试表明,甲基汞含量为 2.1~31.4 ng/g,占总汞的比例为 1.11%~1.87%,平均占比为 1.37%。高于 Benoit^[23]的研究结论(甲基汞在总汞中占比为 0.1~0.5%)与乌江流域东风水库^[22]甲基汞在总汞中占比相当,其可能原因是由于湘江河是城市河流,河水中 COD 含量高,河水恶臭,含氧量低,厌氧微生物大量繁殖导致汞的甲基化程度较高^[24]。

表 2 湘江河表层沉积物汞含量

Table 2 Mercury content in surface sediment of Xiangjiang River

采样点	汞浓度范围/ (mg/kg)	平均汞浓度/ (mg/kg)	甲基汞含量 范围/(ng/g)	平均甲基汞 含量/(ng/g)
1	0.131~0.327	0.187	2.1~4.7	3.5
2	0.156~0.432	0.294	3.2~5.9	4.9
3	0.563~1.329	0.940	7.3~17.6	14.7
4	0.464~2.734	1.539	6.3~26.4	17.3
5	0.271~1.543	0.827	6.3~28.4	11.9
6	0.543~3.132	1.735	14.6~25.7	19.6
7	0.631~1.223	0.932	3.7~16.9	10.6
8	0.537~2.937	1.937	9.7~31.4	23.7

湘江河是一条流经遵义市主城区的河流,河流大量接纳城市污水处理厂出水和未经处理的生活污水。为进一步了解湘江河表层沉积物中汞污染水平,与其他河流进行对比(表 2),湘江河表沉积物汞含量远低于污染严重的辽宁葫芦岛市河流、沈阳细河及古巴 Sagua 河等重金属污染严重的河流,高于国内外的其他较为清洁河流如松花江、长江、珠江口及波罗的海近海沉积物汞含量,其汞含量平均值略高于北京市城市河流凉水河。这表明湘江河受到了一定程度的汞污染。

2.2 底泥汞赋存形态分析

河流沉积物总汞含量仅反映河流的污染程度,其生物有效性主要取决于汞的赋存形态。其中,弱酸可溶解态是有效态,可还原态和可氧化态是潜在有效态,二者共称为生物有效态;而残渣基本不被生物利用,将其称为不可利用态^[32]。生物有效态在一定条

表 3 不同河流沉积物汞含量

Table 3 Comparison of Hg content in sediments of different rivers

地区	河流	底泥汞浓度/ (mg/kg)	文献
中国辽宁省葫芦岛市	五里河	0.03700~16.07 平均值 9.241	[25]
	茨山河	0.3440~132.5 平均值 52.45	
	连山河	0.2150~19.55 平均值 5.126	
中国北京市	凉水河	0.018~3.48 平均值 0.974	[18]
中国辽宁沈阳	细河	2.60~11.30 平均 7.77	[26]
中国黑龙江省	松花江	0.029~1.317 平均值 0.183	[27]
北欧	南波罗的海	0.0058~0.225 平均值 0.102	[28]
古巴	Sagua 河	0.165~97	[29]
中国	长江	0.001~0.092 平均值 0.046±0.017	[30]
中国	珠江口	0.0015~0.201 平均值 0.0544	[31]

件下,可再次释放出来,造成水体环境二次污染。如图 2 所示,沉积物的汞形态主要以残渣态为主,残渣态的比例为 61.9%~92.9%,其中干流上游采样点(1 号、2 号)残渣态的比例高于下游采样点(4 号、6 号和 8 号)且有从上游到下游逐渐降低的趋势,采样点 8 号的残渣态比例最低为 61.9%,支流汞残渣态除背景点 2 号残渣态比例在 91.8% 之外,其余采样点 3 号、5 号和 7 号残渣态比例分别为 72.7%、68.9% 和 67.3%,变化较小。这表明遵义市湘江河表层沉积物中汞可能主要来源于地壳物质风化为主。此外,干流采样点 1 号生物可利用态仅为 7.1%,而采样点 4 号、6 号和 8 号则分别为 30.8%、32.1% 和 38.1%,这表明沉积物汞的生物可利用态含量由干流上游至下游呈逐渐增加趋势,这可能是因为城市污水不断排入水体,导致湘江河水体自净能力下降、水质下降,输入的汞不断以生物有效态沉积至河底。

此外,为考察河流流经城市对河流表层沉积物总汞及有效态汞含量的影响,流经城区长度与沉积物汞浓度及河水汞浓度的关系,选取干流采样点 1 号作为起始点,采样点 4 号、6 号和 8 号汞浓度平均值考察距离的影响,结果如图 3 所示。可知:沉积物中总汞及有效态汞含量随着流经主城区距离的增加而增加,呈显著正相关($R^2 \approx 0.827$ 和 0.882)。这表明城市

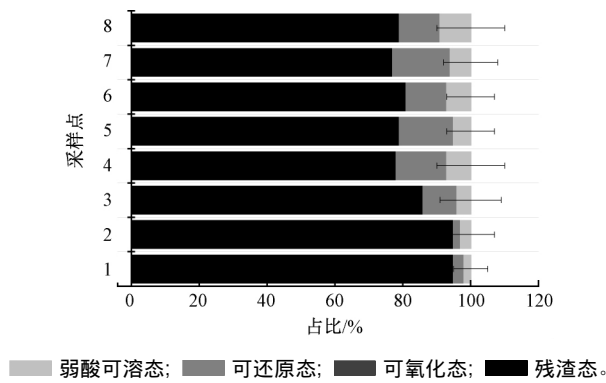


图2 各采样点沉积物形态分布

Figure 2 The proportional distribution of different Hg forms in the surface sediments

持续地向河流输入汞并沉积进入河流表层底泥中,使得沉积物中的总汞及生物有效态汞含量同时增加。为控制水体的汞污染情况,需要加强污染源的排查,切断城市点源或面源对河流持续的汞输入。

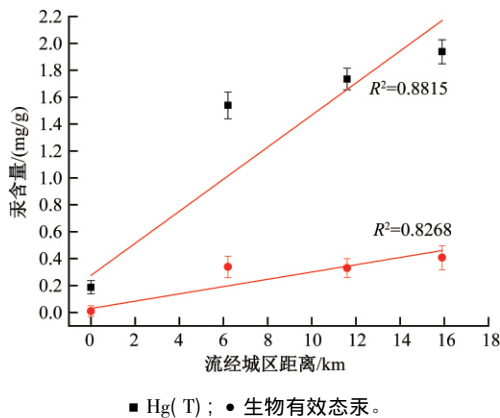


图3 流经城市河流长度与沉积物汞浓度、生物有效态汞浓度之间的关系

Figure 3 The relationship between total mercury and bioactive mercury content in the main stream and the length of the river flowing through the city

2.3 底泥中有机物含量与汞的相关性研究

有机物是河流沉积物的重要组成部分,沉积物中有机质容易与金属离子形成简单络合物及混合配位络合物,有机质含量是沉积物汞含量的关键因素^[19]。Lindberg 等^[33,34]研究表明,有机物中的还原性硫基团可以和汞牢固结合从而蓄积汞。沉积物含量与总汞和生物有效态汞含量的相关性如图4所示。可知:总汞含量及生物有效态汞含量与有机质含量具有较好相关性,有机质汞含量与生物有效态汞含量相关性 ($R^2=0.7542$) 高于总汞 ($R^2=0.6723$)。这表明沉积物中的汞与有机物密切相关,特别是生物有效态汞。

城市向河流输入大量的有机物可能增加河流沉积物的汞污染风险。

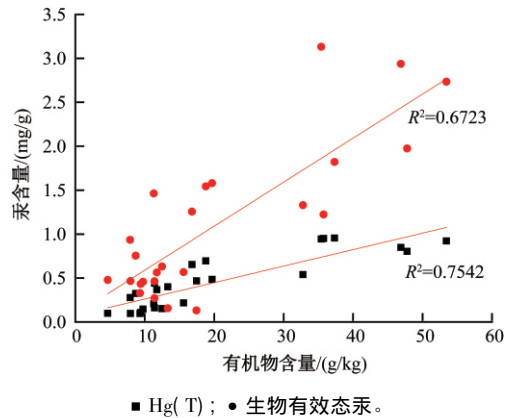


图4 沉积物汞及生物有效态汞浓度与有机物含量之间的关系
Figure 4 The relationship between total mercury and bioactive mercury content and organic matters content in river sediment

2.4 湘江河底泥汞污染评价

基于形态的生态风险评估指数法(RAC)评价结果如表4所示。弱酸可溶解态是有生物效态,其在总汞中的比例可直接反映汞的生态风险。由表4可知:8个采样点的弱酸可溶态(B_1)占比为1%~10%,为低风险。其中,沉积物风险较高的位于河流的干流采样点4号、6号、8号,风险较低的为采样背景点1号和2号。

表4 不同采样点河流沉积物环境风险指数及潜在生态风险程度

Table 4 The risk assessment code and the potential ecological risk indexes in river sediment

采样点	B_1 占比/%	生态风险程度	RI 指数	潜在生态风险程度
1	2.07	低	28.55	低
2	2.93	低	44.89	中等
3	4.09	低	143.51	较高
4	6.97	低	234.96	高
5	4.94	低	126.26	较高
6	7.14	低	264.89	高
7	5.89	低	142.29	较高
8	8.98	低	295.73	高

而汞的潜在生态风险评估(表4)则表明湘江河存在较大的汞生态潜在风险,除采样点1号和2号为中低潜在风险外,其余采样点均为较高或高风险,干流采样点4号、6号和8号均处于高风险状态。其可能原因是采样点1和2远离遵义主城区,采样点1位于喇叭河河口,河水清洁干净,受人为干扰少,采样点2虽同样远离主城区,但周围有大量乡镇居民排污,可能排入一定量的含汞废水,因而其潜在生态风险为中

等。采样点4号、6号和8号位于河流干流,随着流经城区长度的延伸,城市不断地向河流输入汞,并经支流汇入干流,因此位于主城区的支流潜在风险较高,干流潜在风险高。城市持续向河流输入汞,汞以生物有效态沉积在河道中,使得河流底泥中的潜在生态风险增加。

3 结论

1) 遵义湘江河流表层沉积物中(0~10 cm)汞含量为0.187~1.937 mg/g,平均含量为1.0489 mg/g。甲基汞含量为2.1~31.4 ng/g,占总汞的比例为1.11%~1.87%,平均占比为1.37%。

2) 沉积物形态分析表明,汞以残渣态为主,残渣态含量比例为61.9%~92.9%。由于城市的持续输入及汞在底泥中的沉积作用,下游沉积物的汞含量及生物有效态含量均高于上游。

3) 生态风险评估结果表明,湘江河表层沉积物直接生态风险较低,但却存在着较大的潜在风险。

参考文献

- [1] FENG X B, BIGHAM G N. Mercury biogeochemical cycling in mercury contaminated environments [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(2): 153.
- [2] OBRIST D, AGNAN Y, JISKRA M, et al. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution [J]. *Nature*, 2017, 547(7662): 201-204.
- [3] STRAIN J J, YEATES A J, VAN W E, et al. Prenatal exposure to methyl mercury from fish consumption and polyunsaturated fatty acids: associations with child development at 20 mo of age in an observational study in the Republic of Seychelles [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2015, 101(3): 530-537.
- [4] BERNHOFT R A. Mercury toxicity and treatment: a review of the literature [J]. *Journal of Environmental and Public Health*, 2012, (2011-12-22), 2012(2011): 460508.
- [5] 王婧. 沉积物中重金属形态分析的前处理及重金属浸提与固定方法比较[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2018.
- [6] FENG X B, QIU G L. Mercury pollution in Guizhou, Southwestern China: an overview [J]. *Science of The Total Environment*, 2008, 400(1/2/3): 227-237.
- [7] FENG X B, MENG B, YAN H Y, et al. Wet deposition flux of total mercury and methylmercury in Wujiang River Basin [J]. 2018, 21-32.
- [8] 周远德. 遵义地区志[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2001.
- [9] 蔡深文, 刘斌, 高智席, 等. 遵义市湘江河表层沉积物中重金属赋存形态及潜在生态风险 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(3): 562-568.
- [10] DREVNICK P E, ENGSTROM D R, DRISCOLL C T, et al. Spatial and temporal patterns of mercury accumulation in lacustrine sediments across the Laurentian Great Lakes region [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 161: 252-260.
- [11] DIOP C, DEWAELE D, DIOP M, et al. Assessment of contamination, distribution and chemical speciation of trace metals in water column in the Dakar coast and the Saint Louis estuary from Senegal [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86(1/2): 539-546.
- [12] RANDALL P M, CHATTOPADHYAY S. Mercury contaminated sediment sites—An evaluation of remedial options [J]. *Environmental Research*, 2013, 125: 131-149.
- [13] 王翠萍, 闫海鱼, 刘鸿雁, 等. 使用 Lumex 测汞仪快速测定固体样品中总汞的方法 [J]. *地球与环境*, 2010, 38(3): 378-382.
- [14] 何天容, 冯新斌, 戴前进, 等. 萃取-乙基化结合 GC-CVAFS 法测定沉积物及土壤中的甲基汞 [J]. *地球与环境*, 2004, 32(2): 83-86.
- [15] JIN C W, ZHENG S J, HE Y F, et al. Lead contamination in tea garden soils and factors affecting its bioavailability [J]. *Chemosphere*, 2005, 59(8): 1151-1159.
- [16] DAVIDSON C M, THOMAS R P, MCVEY S E, et al. Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1994, 291(3): 277-286.
- [17] 唐文忠, 王立硕, 单保庆, 等. 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*, 2015, 35(12): 3898-3905.
- [18] 王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 等. 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*, 2016, 36(4): 1153-1159.
- [19] SUNDARAY S K, NAYAK B B, LIN S, et al. Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments—A case study: Mahanadi basin, India [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2/3): 1837-1846.
- [20] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [21] KWON Y T, LEE C W. Ecological risk assessment of sediment in wastewater discharging area by means of metal speciation [J]. *Microchemical Journal*, 2001, 70(3): 255-264.
- [22] 潘鲁生, 刘秀伟, 石春梅, 等. 乌江流域东风水库沉积物中汞及甲基汞的时空分布特征 [J]. *地球与环境*, 2012, 40(2): 201-207.
- [23] BENOIT J M, GILMOUR C C, MASON R P, et al. Behavior of mercury in the Patuxent River estuary [J]. *Biogeochemistry*, 1998, 40(2/3): 249-265.
- [24] ULLRICH S M, TANTON T W, ABDRAHITOVA S A. Mercury in the aquatic environment: a review of factors affecting methylation [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2001, 31(3): 241-293.
- [25] 张少庆, 王起超, 赵明宪, 等. 葫芦岛市不同污染源河流汞污染特征研究 [J]. *地球与环境*, 2008, 36(3): 225-230.
- [26] LIN C Y, HE M S, LIU X T, et al. Contamination and ecological risk assessment of toxic trace elements in the Xi River, an urban river of Shenyang city, China [J]. *Environmental Monitoring &*

- Assessment, 2013, 185(5): 4321-4332.
- [27] 覃东立, 姜海峰, 黄晓丽, 等. 松花江沉积物汞的新变化: 分布、演化与现状及潜在生态风险评估, 环境科学学报, 2016, 36(6): 1910-1916.
- [28] BEŁDOWSKI J, MIOTK M, BEŁDOWSKA M, et al. Total, methyl and organic mercury in sediments of the Southern Baltic Sea, Marine Pollution Bulletin, 2014, 87(1/2): 388-395.
- [29] BOLAÑOS-ÁLVAREZ Y, ALONSO-HERNÁNDEZ C M, MORABITO R, et al. Mercury contamination of riverine sediments in the vicinity of a mercury cell chlor-alkali plant in Sagua River, Cuba[J]. Chemosphere, 2016, 152: 376-382.
- [30] LIU W C, HU L M, LIN T, et al. Distribution and mass inventory of mercury in sediment from the Yangtze River estuarine-inner shelf of the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2017, 132: 29-37.
- [31] SHI J B, IP C C M, ZHANG G, et al. Mercury profiles in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area of South China[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1974-1979.
- [32] ADAMO P, ARIENZO M, IMPERATO M, et al. Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port[J]. Chemosphere, 2005, 61(6): 800-809.
- [33] LINDBERG S E, HARRISS R C. Mercury-organic matter associations in estuarine sediments and interstitial water [J]. Environmental Science & Technology, 1974, 8(5): 459-462.
- [34] RAVICHANDRAN M. Interactions between mercury and dissolved organic matter: a review [J]. Chemosphere, 2004, 55(3): 319-331.

(上接第228页)

- [26] XIONG C M, WANG W, TAN F T, et al. Investigation on the efficiency and mechanism of Cd(II) and Pb(II) removal from aqueous solutions using MgO nanoparticles [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 99: 664-674.
- [27] SUZUKI T, NAKAHARA F, KAWAMOTO T, et al. Immobilization of arsenate in kaolinite by the addition of magnesium oxide: an experimental and modeling investigation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 300: 680-687.
- [28] 赖胜强, 林亲铁, 项江欣, 等. 氧化镁基固化剂对铅离子的吸附作用及其影响因素[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3859-3865.
- [29] KAMEDA K, HASHIMOTO Y, OK Y S, et al. Stabilization of arsenic and lead by magnesium oxide (MgO) in different seawater concentrations [J]. Environmental Pollution, 2018, 233: 952-959.
- [30] SHEN Z T, HOU D Y, XU W D, et al. Assessing long-term stability of cadmium and lead in a soil washing residue amended with MgO-based binders using quantitative accelerated ageing [J]. Science of The Total Environment, 2018, 643: 1571-1578.
- [31] GARCÍA M A, CHIMENOS J M, FERNÁNDEZ A I, et al. Low-grade MgO used to stabilize heavy metals in highly contaminated soils [J]. Chemosphere, 2004, 56: 481-491.
- [32] 黄迪, 杨燕群, 肖选虎, 等. 土壤重金属污染治理修复剂技术 [J]. 现代化工, 2018, 38(11): 39-43.
- [33] PEHLIVANA E, ÖZKAN A M, DINC S, et al. Adsorption of Cu²⁺ and Pb²⁺ ion on dolomite powder [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167: 1044-1049.
- [34] YAMKATE N, CHOTPANTARAT S, SUTHIRAT C, et al. Removal of Cd²⁺, Pb²⁺ and Zn²⁺ from contaminated water using dolomite powder [J]. Human & Ecological Risk Assessment, 2017, 23(5): 1178-1192.
- [35] 周凤飒, 黄雷, 梁鹏, 等. 电镀场地污染土壤稳定化修复药剂的设计优化 [J]. 环境工程, 2019, 37(5): 23-28.
- [36] 陈才丽, 张进, 成应向, 等. 骨炭和硫化钠联用修复镉-锌污染土壤 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(8): 4069-4074.
- [37] CAO X D, WAHBI A, MA L, et al. Immobilization of Zn, Cu, and Pb in contaminated soils using phosphate rock and phosphoric acid [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3): 555-564.
- [38] 王利, 李永华, 姬艳芳, 等. 羟基磷灰石和氯化钾联用修复铅锌矿区铅镉污染土壤的研究 [J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2114-2118.

欢迎订阅《环境工程》杂志 邮发代号 82-64