

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.027

江西省贵溪市水系沉积物重金属污染 及其潜在生态风险评价

蒋起保¹, 欧阳永棚^{1,2,*}, 章敬若¹, 饶建锋¹, 吴美仁¹, 张伟¹

(1. 江西省地质局第十地质大队, 江西 鹰潭 335001; 2. 中国地质大学(北京)
地球科学与资源学院, 北京 100038)

摘要:为了解江西省贵溪市水系沉积物中重金属含量及污染程度, 笔者收集了该地区 600 个 1:20 万水系沉积物测量数据。对水系沉积物中各重金属含量进行统计分析, 结合研究区地质体分布特征, 笔者认为重金属高值区的形成与地质背景密切相关。地积累指数显示贵溪南部水系沉积物中 Pb 重金属污染程度较高, 分析认为该区 Pb 污染主要由燕山期火山岩富含 Pb 元素引起。潜在生态危害指数法显示研究区 Hg、Cd 2 种重金属潜在生态危害较高。研究结果对该区域的环境污染治理和土地规划具有参考意义。

关键词:水系沉积物; 重金属污染; 地积累指数; 潜在生态危害指数; 贵溪

中图分类号: P736.4+1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)03-0326-09

Evaluation of Heavy Metal Pollution and Its Potential Ecological Risk in Stream Sediments in Guixi City, Jiangxi Province

JIANG Qibao¹, OUYANG Yongpeng^{1,2,*}, ZHANG Jingruo¹, RAO Jianfeng¹,
WU Meiren¹, ZHANG Wei¹

(1. 10th Geological Party of Jiangxi Bureau of Geology, Yingtan 335001, Jiangxi, China; 2. School of Earth
Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reveal the content and pollution degree of heavy metal in stream sediments in Guixi city, Jiangxi Province, this paper collected 600 data sets of 1:200 000 sediments measurement in Guixi city. Combined with the distribution characteristics of geological bodies in the study area, it is considered that the formation of high value areas of heavy metals is closely related to the geological background. Content of heavy metals in sediments were statistically analyzed, the Geo-accumulation Index indicated that the heavy metal pollution of Pb in the stream sediments of the southern Guixi is higher. The author analyzes that Pb pollution in this area was come from Yanshanian volcanic rock. The Potential Ecological Risk Index indicated that the potential ecolog-

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2022-05-24; 网络发表日期: 2022-08-15; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 江西省重大科技研发专项“江西省土壤重金属污染源解析及安全利用关键成套技术研发与应用”(20194ABC28010) 资助成果。

作者简介: 蒋起保(1990-), 男, 工程师, 现主要从事化探及地质矿产勘查工作。E-mail: jqbcug@163.com。

* 通讯作者: 欧阳永棚(1988-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查和综合研究工作。E-mail: yongpeng0524@163.com。

ical hazards of Hg and Cd in the study area were higher. The research results have reference significance for environmental pollution control and land planning in this area.

Keywords: stream sediments; heavy metal pollution; geo-accumulation index; potential ecological risk index; Guixi

江西省贵溪市地处长珠闽三角区的“黄金接点”,是鄱阳湖生态经济区的中心城市(余达锦,2010)。贵溪市矿产资源丰富,冶炼、化工、制药、建材等工业发达。同时,贵溪也是全国商品粮基地、国家储备粮基地,水稻、蔬菜、油料植物等产量丰厚。

矿业开发与工业发展必会带来重金属污染,对农业和生活带来影响(郭路,2005;徐友宁,2005)。不少学者对贵溪冶炼厂周围重金属污染状况(孙华等,2003;胡宁静等,2004b;龙安华等,2006;徐升等,2015)、污灌水田重金属污染状况(孙华等,2001;胡宁静等,2004a)等进行了研究,其涉及面有限。为评价贵溪全市重金属污染状况,本次研究收集了贵溪全市1:20万水系沉积物测量数据,分析水系沉积物样品中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8种重金属含量分布特征,采用地积累指数法、潜在生态危害指数法对研究区水系沉积物中重金属污染状况进行初步分析评价,以期贵溪市土地利用规划提供借鉴。

1 研究区概况

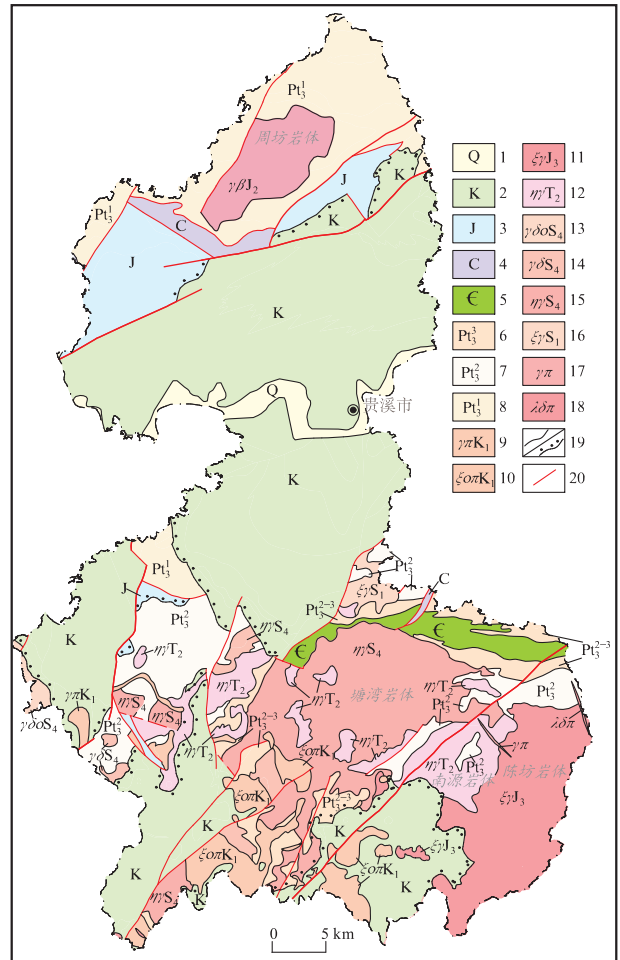
研究区位于江西省东北部,全市面积2480 km²。地处武夷山区向鄱阳湖平原过渡的中间地带,地貌形态以丘陵、山地为主,次为小平原,海拔高程40~1540 m,地势由南北两端向中部倾斜,呈马鞍形。全区年平均气温18℃,年均降雨量为1750 mm。

研究区北侧出露新元古界万年群变质岩及周坊岩体,其中万年群主要为深海盆地相夹浊流沉积的泥砂质建造,间伴有海底火山喷发产物,周坊岩体为燕山期黑云母花岗岩;中部出露大面积侏罗纪、白垩纪红色砂砾岩;南部出露大规模加里东期、燕山期中酸性岩浆岩,岩性主要为花岗斑岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等(邱骏挺等,2013)(图1)。

2 样品与评价方法

2.1 样品数据

本次收集了贵溪市1:20万水系沉积物测量数



1. 第四系;2. 白垩系;3. 侏罗系;4. 石炭系;5. 寒武系;6. 新元古界上部;7. 新元古界中部;8. 新元古界下部;9. 早白垩世花岗斑岩;10. 早白垩世石英正长斑岩;11. 晚侏罗世正长花岗岩;12. 中三叠世二长花岗岩;13. 顶志留世云英闪长岩;14. 顶志留世花岗闪长岩;15. 顶志留世二长花岗岩;16. 早志留世二长花岗岩;17. 花岗斑岩脉;18. 石英闪长斑岩脉;19. 地质界线/角度不整合界线;20. 断层

图1 贵溪市地质简图(据邱骏挺等,2013)

Fig. 1 Geological map of Guixi City

据,原数据测量单位为江西省地矿局物化探大队、福建省地质勘查技术院。样品主要采集于二级水系(0.5~3 km长水沟)中,采集物质为沉积物中的中、细砂,采样密度1件/4.13 km²。为分析方便,将数据整理汇集成600个2 km×2 km的网格数据,得到As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8种重金属元素数据集。

2.2 评价方法

水系沉积物重金属污染的评价方法众多,目前应用较广泛的有地积累指数法(贾振邦等,2000;廉雪琼,2002;谢文平等,2012)、污染负荷指数法(徐争启等,2004;王婕等,2013;于霞等,2015)、潜在生态危害指数法(贾振邦等,2001;丁振华等,2006;张雷等,2011)、健康风险评价法(李仲涛,2015;马海珍,2021)及基于GIS技术的评价方法(陈翠华等,2008)。不同的评价有各自的优缺点(霍文毅等,1997;张鑫等,2005;丁喜桂等,2005;陈明等,2015),本文使用地积累指数法和潜在生态危害指数法对贵溪水系沉积物中的重金属污染程度进行初步评价。

表1 地积累指数污染程度分级表

Tab. 1 The geo-accumulation index and classification of pollution degree

污染程度	无污染	无-中度污染	中度污染	中-强污染	强污染	强-极强污染	极强污染
级数	0	1	2	3	4	5	6
地积累指数 I_{geo}	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5

2.2.2 潜在危害风险指数法

潜在危害风险指数法由瑞典学者 Hakanson (1980)提出,是一种利用重金属生物毒性系数及沉积物中重金属含量与地质背景值的比值来研究重金属污染程度的指标。与地积累指数法相比,该方法不仅考虑了重金属含量与背景值的关系,还考虑了重金属的生物毒性,可为人们健康提供参照,是目前运用较多的重金属污染评价方法。其计算公式为:

$$E_i = T_i \times P_i \quad (2)$$

$$RI = \sum E_i = \sum T_i \times C_s^i / C_n^i \quad (3)$$

式中: C_s^i 为沉积物中某一重金属实测浓度值, C_n^i 为全国水系沉积物丰度值, E_i 为沉积物中某一重

2.2.1 地积累指数法

地积累指数法由德国学者 Muller(1969)提出,是利用重金属含量与其背景值的关系研究重金属污染的一种定量指标。该方法考虑了不同地区不同地质背景对重金属污染的影响,能够较科学、直观的评价沉积物中重金属污染状况。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k B_i)] \quad (1)$$

式中: C_i 为水系沉积物中某一重金属元素的浓度,常数 k 是为消除岩石差异引起的背景值变动的常数,本文取 $k=1.5$, B_i 为全国水系沉积物丰度值(鄢明才,1995等)。沉积物重金属污染程度共分为7级(表1)。

金属的潜在生态危害系数, T_i 是反映重金属毒性水平的毒性响应系数, RI 为多因子综合潜在生态危害指数。本次采用的全国水系沉积物丰度值(鄢明才等,1995)、毒性影响系数(徐争启等,2008)见表2,评价标准见表3。

表2 重金属的全国水系沉积物丰度值 C_n^i 与生物毒性系数 T_i 表

Tab. 2 Background values of stream sediments C_n^i and toxic coefficient T_i of different heavy metals

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
C_n^i	9.1	140	58	21	42	24	25	68
T_i	10	30	2	5	40	5	5	1

表3 潜在生态危害系数 E_i 、潜在生态危害指数 RI 与生态危害分级表

Tab. 3 Ecological risk coefficient, risk index and classification of risk intensity

生态危害程度	轻微	中等	强	很强	极强
潜在生态危害系数 E_i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
潜在生态危害指数 RI	<150	150~300	300~600	>600	

3 结果与分析

3.1 重金属元素含量统计

对研究区600个水系沉积物数据集中As、Cd、

Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8种重金属含量进行统计分析,结果见表4。从水系沉积物中重金属的平均含量看,As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 6种重金属的平均含量值低于全国水系沉积物背景值,Hg重金属平均含量与全国水系沉积物背景值相当,Pb重金属平均含

量高于全国水系沉积物背景值,说明引起 Pb 污染的物质来源较多。

从变异系数看,As、Cu、Hg、Ni、Zn 5 种重金属元素变异系数小于 0.7,说明这 5 种重金属元素离

散型较小,在空间分布上较为均匀;Cr 元素的变异系数接近 1;而 Cd、Pb 2 种元素变异系数 > 1.2,说明其含量变化幅度较大,在高值区形成污染的可能性较大。

表 4 研究区水系沉积物中重金属元素含量统计结果表

Tab. 4 Statistics of heavy metals contents in surface sediments of the study area

元素	最大值	最小值	中值	平均值	标准偏差	变异系数	全国水系沉积物背景值
As	66	0.1	7	7.89	5.09	0.73	9.1
Cd	1 787	0.5	87	106.72	108.59	1.25	140
Cr	533.3	0.7	29.85	33.81	30.02	1.01	58
Cu	51.2	1.8	11.8	13.21	6.52	0.55	21
Hg	292	0.5	37.5	42.52	25.24	0.67	42
Ni	71.2	2.7	12.9	14.53	7.51	0.58	24
Pb	780	6.1	28.95	34.66	36.10	1.25	25
Zn	203	6.8	56.1	54.52	23.92	0.43	68

注: Cd、Hg 含量为 ug/kg,其他元素含量为 mg/kg。

3.2 重金属分布特征

贵溪水系沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8 种重金属元素分布特征见图 2。

(1) Cd、Pb、Zn 重金属含量分布规律具有相似性,整体南高北低,高值区规模较大,主要分布在冷水、耳口、樟坪及金屯等地区。Cd、Pb 最高值出

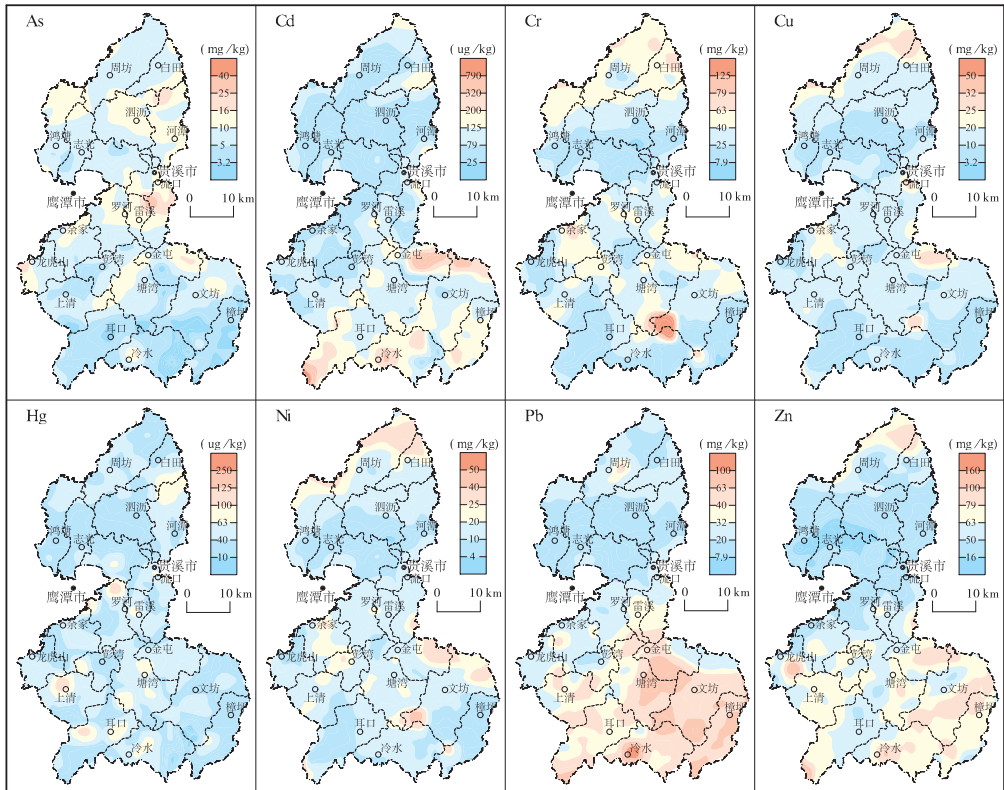


图 2 水系沉积物中重金属元素分布特征图

Fig. 2 Distribution patterns of heavy metals in surface sediments

表 7 潜在生态风险指数评价统计结果表
Tab. 7 Evaluation results of potential ecological risk index

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	RI
最大值	72.53	382.93	18.39	12.19	278.10	14.83	156.00	2.99	446.59
最小值	0.11	0.11	0.02	0.43	0.48	0.56	1.22	0.10	13.81
中值	7.69	18.64	1.03	2.81	35.71	2.69	5.79	0.83	82.71
平均值	8.67	22.87	1.17	3.15	40.50	3.03	6.93	0.80	87.10

为了解研究区水系沉积物中各重金属潜在生态风险污染级别,计算统计了各重金属元素潜在生态风险指数分级频率(表 8)。结果显示,研究区样品中 As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等 6 种重金属元素污染程度较低,潜在生态危害较小。Hg、Cd 2 种重金属在

研究区的潜在生态危害性较大(图 3),其中 Hg 重金属轻微生态危害、中等生态危害、强生态危害和很强生态危害的频率分别为 59.83%、35.5%、3.83% 和 0.83%,存在 Hg 重金属中等及中等以上潜在生态危害的地区主要为河潭北部、罗河北部、上清北部、

表 8 潜在生态风险指数分级频率分布统计表(%)
Tab. 8 The distribution of potential ecological risk index grading frequency(%)

重金属	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	RI
轻微	99.83	92.17	100	100	59.83	100	99.83	100	96.17
中等	0.17	6.17	0	0	35.50	0	0	0	3.33
强	0	1.00	0	0	3.83	0	0.17	0	0.50
很强	0	0.50	0	0	0.83	0	0	0	0
极强	0	0.17	0	0	0	0	0	0	0

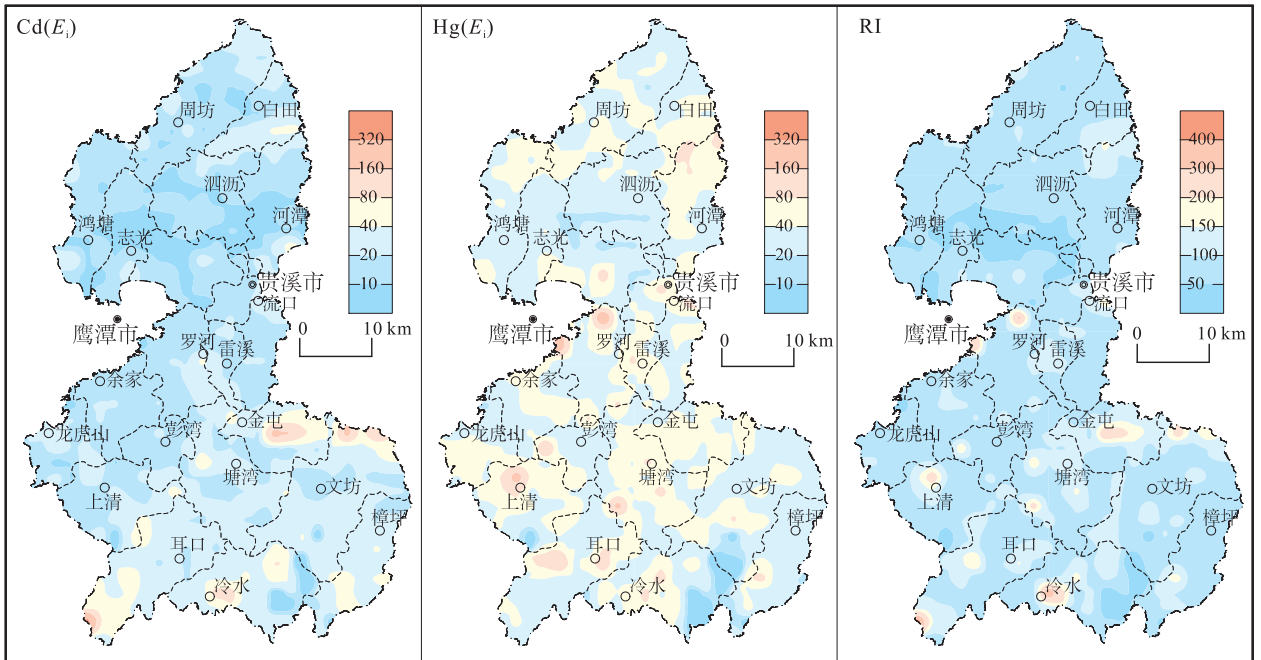


图 3 水系沉积物中 Hg、Cd 重金属及综合潜在生态危害分布图

Fig. 3 Distribution of the risk index of Hg、Cd heavy metals and RI in stream sediments

塘湾中部、耳口中部及冷水中部等地区;Cd 重金属轻微生态危害、中等生态危害、强生态危害、很强生态危害和极强生态危害的频率分别为 92.17%、6.17%、1.0%、0.5%和 0.17%,存在 Cd 重金属中等及中等以上潜在生态危害的地区主要为金屯东部、耳口西南部等地区。多因子综合潜在生态危害指数 RI 可综合评价研究区潜在生态危害,结果显示,研究区轻微生态危害、中等生态危害和强生态危害的频率分别为 96.17%、3.33%和 0.5%,整体为轻微生态危害,未见大面积的潜在生态危害地区,在金屯东部、罗河北部、上清北部、冷水中部及耳口西南部存在局部潜在生态危害。综合以上结果,研究区存在局部 Hg、Cd 重金属潜在生态危害。

3.5 两种评价方法结果比较

研究区 2 种水系沉积物污染评价方法的结果存在差异。地积累指数法显示研究区 8 种重金属污染程度强弱排序为 $Pb > Hg > As > Zn > Cd > Cu > Ni > Cr$,主要重金属污染元素为 Pb;潜在生态风险指数显示研究区 8 种重金属污染程度强弱排序为 $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$,主要重金属污染元素为 Hg、Cd。此外,2 种评价方法中各污染级别的样品频数也不同。产生差异的原因是地积累指数法主要考虑地质背景的富集程度,而潜在生态风险指数法还考虑了生物毒性的影响,如 Hg、Cd 的毒性系数高,其潜在生态危害程度较高,而 Pb 毒性系数较低,虽其地积累指数高,但潜在生态危害程度不高。

4 讨论

(1)贵溪市水系沉积物中重金属元素高值区的形成与地质背景密切相关。如贵溪南部出露的大面积燕山期火山岩-火山碎屑岩,地层中 Pb、Zn 背景值较高,已在冷水坑地区发现亚洲最大的银铅锌矿床,而 Cd 可类质同象置换 Zn 离子,从而形成了贵溪南部 Cd、Pb、Zn 重金属高值区;再如白田北部、周坊东北部出露万年群地层,地层中含有基性古火山岩,基性古火山岩中富含 Cr、Ni 重金属元素;文坊西南部存在多期岩浆活动,热液活化塘湾岩基并在局部萃取富集形成 Cr、Ni 重金属高值。

(2)潜在生态风险指数考虑了重金属的生物毒性水平,对人类健康生活更具指导意义。其结果显示研究区水系沉积物中 Hg 的潜在生态危害最高,其次为 Cd。Hg 元素可能造成神经系统损坏,Cd 元素可能伤害骨骼、导致免疫力下降等,应对这两种重金属超标加以关注和防范。

参考文献(References):

- 陈翠华,倪师军,何彬彬,等. 基于污染指数法和 GIS 技术评价江西德兴矿区土壤重金属污染[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2008,38(1):105-111.
- CHEN Cuihua, NI Shijun, HE Binbin, et al. Assessing heavy metals contamination of soils based on the pollution index and GIS methods in Dexing Mines, Jiangxi Province, China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2008, 38(1):105-111.
- 陈明,蔡青云,徐慧,等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J]. 生态环境学报,2015,24(06):1069-1074.
- CHEN Ming, CAI Qingyun, XU Hui, et al. Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediments[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(06):1069-1074.
- 丁喜桂,叶思源,高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态,2005,21(08):31-36+38.
- DING Xigui, YE Siyuan, GAO Zongjun. Methods of heavy metal pollution evaluation for off-shore sediments[J]. Marine Geology Letters, 2005, 21(08):31-36+38.
- 丁振华,贾洪武,刘彩娥,等. 黄浦江沉积物重金属的污染及评价[J]. 环境科学与技术,2006,29(02):64-66+119.
- DING Zhenhua, JIA Hongwu, LIU Caie, et al. Pollution and assessment of heavy metals in Huangpu River sediments[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(02):64-66+119.
- 郭路,李云峰,姬亚东. 矿业开发与环境保护关系综述[J]. 西北地质,2005,38(02):94-98.
- GUO Lu, LI Yunfeng, JI Yadong. Summarizing the relation between the development of mining and the protection of environment[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(02):94-98.
- 胡宁静,李泽琴,黄朋,等. 贵溪市污灌水田重金属元素的化学形态分布[J]. 农业环境科学学报,2004,23(04):683-686.

- HU Ningjing, LI Zeqin, HUANAG Peng, et al. Chemical forms of heavy metals in swage-irrigated paddy soil in Guixi City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(04):683-686.
- 胡宁静, 李泽琴, 黄朋, 等. 江西贵溪冶炼厂重金属环境污染特征及生态风险评价[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(S1):467-471.
- HU Ningjing, LI Zeqin, HUANG Peng, et al. The vertical distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in agricultural soils near smelter[J]. *Advances in earth sciences*, 2004, 19(S1):467-471.
- 霍文毅, 黄风茹, 陈静生, 等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. *地理科学*, 1997, 17(01):82-87.
- HUO Wenyi, HUANG Fengru, CHEN Jingsheng, et al. Comparative study of assessment method for river particulate heavy metal pollution[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(01):82-87.
- 贾振邦, 赵智杰, 杨小毛, 等. 洋涌河、茅洲河和东宝河沉积物中重金属的污染及评价[J]. *环境化学*, 2001, 20(03):212-219.
- JIA Zhenbang, ZHAO Zhijie, YANG Xiaomao, et al. Pollution and assessment of heavy metals in Yangchong River, Maozhou River and Dongbaoriver Sediments, Shenzhen [J]. *Environmental Chemistry*, 2001, 20(03):212-219.
- 贾振邦, 周华, 赵智杰, 等. 应用地积累指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(04):525-530.
- JIA Zhenbang, ZHOU Hua, ZHAO Zhijie, et al. The Application of the Index of Geoaccumulation to Evaluate Heavy Metal Pollution in Sediments in the Benxi Section of the Taizi River [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, 36(04):525-530.
- 李仲涛. 闽江福州段多介质重金属健康风险评价[D]. 福州大学, 2015.
- LI Zhongtao. The Health Risk Assessment of Heavy Metal in Multi-Medium of Minjiang River in Fuzhou Section Abstract[D]. Fuzhou University, 2015.
- 廉雪琼. 广西近岸海域沉积物中重金属污染评价[J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(03):39-42.
- LIAN Xueqiong. The assessment on the pollution of heavy metals in sediment of Guangxi Inshore[J]. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(03):39-42.
- 龙安华, 刘建军, 倪才英, 等. 贵溪冶炼厂周边农田土壤重金属污染特性及评价[J]. *土壤通报*, 2006, 37(06):1212-1217.
- LONG Anhua, LIU Jianjun, NI Caiying, et al. assessment on the characteristic of heavy metals contaminated farm land soil around guixi smeltery Jiangxi Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(06):1212-1217.
- 马海珍, 段磊, 朱世峰, 等. 基于梯形模糊数的地下水源地环境健康风险评价[J]. *西北地质*, 2021, 54(02):248-258.
- MA Haizhen, DUAN Lei, ZHU Shifeng, et al. Assessment of the environmental risk of groundwater source based on trapezoidal fuzzy number[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(02):248-258.
- 邱骏挺, 余心起, 吴淦国, 等. 江西冷水坑矿区构造-岩浆活动的年代学约束[J]. *岩石学报*, 2013, 29(03):812-826.
- QIU JunTing, YU XinQi, WU GanGuo, et al. Geochronology of igneous rocks and nappe structures in Lengshuikeng deposit, Jiangxi Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(03):812-826.
- 孙华, 孙波, 张桃林. 江西省贵溪冶炼厂周围蔬菜地重金属污染状况评价研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(01):70-72.
- SUN Hua, SUN Bo, ZHANG Taolin. Assessment of pollution of heavy metals on vegetable field around Guixi Smeltery, Jiangxi Province[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2003, 22(01):70-72.
- 孙华, 张桃林, 孙波. 江西省贵溪市污灌水田重金属污染状况评价研究[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(06):405-407.
- SUN Hua, ZHANG Taolin, SUN Bo. Assessment of Pollution of heavy metals on paddy field with sewage irrigation in Guixi City, Jiangxi Province[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(06):405-407.
- 王婕, 刘桂建, 方婷, 等. 基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2013, 43(02):97-103.
- WANG Jie, LIU Guijian, FANG Ting, et al. Assessment of pollution characteristics of heavy metals in the sediments of Huaihe River (Anhui Section) by Pollution Load Index[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2013, 43(02):97-103.
- 谢文平, 王少冰, 朱新平, 等. 珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(06):1808-1815.
- XIE Wenping, WANG Shaobing, ZHU Xinping, et al. Resi-

- dues and potential ecological risk assessment of metal in sediments from lower reaches and estuary of Pearl River [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(06):1808-1815.
- 徐升, 弓晓峰, 刘春英, 等. 贵溪冶炼厂周边土壤重金属污染分析与生态风险评价[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2015, 39(01):96-102.
- XU Sheng, GONG Xiaofeng, LIU Chunying, et al. Ecological risk assessment and pollution analysis on the heavy metals contaminated soil around Guixi Smeltery[J]. *Journal Of Nanchang University (Natural Science)*, 2015, 39(01):96-102.
- 徐友宁. 矿山环境地质与地质环境[J]. *西北地质*, 2005, 38(04):108-112.
- XU Youning. Mine environmental geology and mine geological environment[J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(04):108-112.
- 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(02):112-115.
- XU Zhengqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al. Calculation of heavy metals toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(02):112-115.
- 徐争启, 倪师军, 张成江, 等. 应用污染负荷指数法评价攀枝花地区金沙江水系沉积物中的重金属[J]. *四川环境*, 2004, 23(03):64-67.
- XU Zhengqi, NI Shijun, ZHANG Chengjiang, et al. Assessment on heavy metals in the sediments of Jinsha River in Panzhihua Area by pollution load index[J]. *Sichuan Environment*, 2004, 23(03):64-67.
- 鄢明才, 迟清华, 顾铁新, 等. 中国各类沉积物化学元素平均含量[J]. *物探与化探*, 1995, 19(06):468-472.
- YAN Mingcai, CHI Qinghua, GU Tiexin, et al. Average element content of various sediments in China[J]. *Geochemical Exploration*, 1995, 19(06):468-472.
- 于霞, 安艳玲, 吴起鑫. 赤水河流域表层沉积物重金属的污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(05):1400-1407.
- YU Xia, AN Yangling, WU Qixin. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Chishui River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(05):1400-1407.
- 余达锦. 基于生态文明的鄱阳湖生态经济区新型城镇化发展研究[D]. 南昌:南昌大学, 2010.
- YU Dajin. Research on the development of new urbanization in poyang lake eco-economic based on conservation culture[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.
- 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 环渤海典型海域潮间带沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(08):1676-1684.
- ZHANG Lei, QIN Yanwen, ZHENG Binghui, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments from typical areas in the Bohai Sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(08):1676-1684.
- 张鑫, 周涛发, 杨西飞, 等. 河流沉积物重金属污染评价方法比较研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2005(11):1419-1423.
- ZHANG Xin, ZHOU Taofa, YANG Xifei, et al. Study on assessment methods of heavy metal pollution in river sediments[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 2005(11):1419-1423.
- Hakanson Lars. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Pergamon*, 1980, 14(8).
- Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geochemical Journal*, 1969, 2:108-118.