

南盘江流域(云南段)水系沉积物中重金属含量分布特征及其污染状况评价

熊燕^{1,2}, 宁增平^{1,*}, 刘意章¹, 赵彦龙³, 吴世良³, 刘威³

(1. 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 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 珠江流域水资源监测中心, 广州 510611)

摘要: 为了查明南盘江流域(云南段)水系沉积物中重金属的含量分布特征和污染程度,系统采集了流域内水系沉积物 25 个,运用电感耦合等离子体质谱仪分析沉积物中重金属含量。利用地球化学方法和统计学方法,对该流域水系沉积物中重金属含量、空间分布特征与元素相关性等方面进行探讨和分析;采用富集因子、地累积指数和污染负荷指数等综合指标,评估南盘江流域水系沉积物的污染程度和厘定流域主要的重金属污染元素。结果表明,南盘江流域内普遍富集 Cd,上游富集 Cr 和 As,中游富集 Pb 和 Sb,下游富集 Sb。中游处泸江支流汇入,显著影响了南盘江干流沉积物中重金属分布。流域内有色金属硫化物矿床遍布、采冶工矿企业众多,金属硫化物的自然风化和矿业活动是该流域部分河段水系沉积物中重金属富集的主要来源。南盘江流域(云南段)存在一定程度的重金属污染,且不同河段重金属污染程度差异大,表现为中游>上游>下游。流域内主要污染贡献元素为 Cd 和 As, Sb 和 Cr 次之, Zn、Pb 和 Cu 的污染程度较轻。

关键词: 重金属; 水系沉积物; 空间分布; 污染评价; 南盘江

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2017)01-0171-08 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.02.008

近年来,我国重金属污染事件频发,对生态环境和人类健康带来了严重影响。重金属主要通过自然风化和人类活动(如矿山开采和冶炼、工业“三废”、污水灌溉、生活垃圾等途径)释放进入环境^[1-2]。人类活动释放进入表生环境的重金属生物有效性高、易于迁移转化,并可通过食物链富集,对人体健康构成潜在危害^[3-5]。

水环境重金属污染一直是环境科学领域的热点问题。一方面,水体中的重金属可以通过吸附、沉淀等作用进入水系沉积物中;另一方面,沉积物中的重金属又可因水环境的改变重新进入水体中。可见,水系沉积物既是水体中重金属的汇,又是潜在的释放源^[6],水系沉积物中重金属含量能反映水体水环境质量和潜在环境风险^[7]。因此,研究水系沉积物中重金属含量分布特征,可以科学评估水系沉积物重金属污染程度和水环境质量,用于指示区域水体水质安全。

目前,国际上常用的判别环境重金属污染程度的方法有富集因子法^[8]、地累积指数法^[9]和污染负荷指数法^[10]等。这些方法均将样品重金属含量的实测值与区域背景值对比,通过计算得到相应的评价指数后对区域重金属的污染程度进行评估。此外,通过制图分析区域重金属空间分布特征也是评价重金属污染程度的有效手段之一。如 Paneer 等^[11]对印度海岸的文伯纳德湖沉积物中重金属 Cd、Zn、Pb、Cr 的富集因子进行空间分析,查明该区域重金属污染分布特征。

南盘江是珠江流域上游源头重要支流之一,流域内分布着丰富的有色金属矿产资源,长期的矿产资源开发利用对流域生态环境造成了一定的危害,影响了流域内水体水质,水体重金属超标事件时有发生,对流域内居民饮水安全构成了潜在危害风险^[12-15]。南盘江流域上游水质情况较差,普遍为三到五级^[16],上世纪 90 年代发生了多次因水污染造

收稿日期: 2016-05-30; 改回日期: 2016-07-15

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501011); 环保部公益性行业科研专项经费项目(201509051)。

第一作者简介: 熊燕(1989-),女,博士研究生,研究方向为毒害元素环境地球化学研究。E-mail: xiongyan@mail.gyig.ac.cn。

* 通讯作者: 宁增平(1980-),男,博士,副研究员,研究方向为环境地球化学。E-mail: ningzengping@mail.gyig.ac.cn。

成的死鱼事件和农业减产情况。张宏^[17]根据2006~2012年水质监测断面数据分析后指出南盘江流域(曲靖段)水体长期存在不同程度的重金属污染。姜安源^[18]研究认为南盘江流域上游陆良段的水污染源、大气污染源主要为陆良县境内的化工企业和造纸业。然而,总体而言,目前关于南盘江流域(云南段)水体水环境地球化学的研究较少,南盘江流域(云南段)水环境地球化学特征不明晰,特别是流域内沉积物中重金属分布特征和污染状况不清楚。总之,“家底”不清,将影响整个流域居民用水安全,同时将严重制约后续对整个流域综合整治的针对性和科学性。

因此,本文选择南盘江流域(云南段)作为研究区域,系统采集流域水体水系沉积物,采用地球化学和统计学方法,从元素含量、空间分布特征和污染状况评价等方面进行分析和探讨,以期查明研究区域水系沉积物中重金属的含量分布特征,评价南盘江流域(云南段)的污染程度,并厘定流域主要污染元素和潜在污染源,为南盘江流域(云南段)重金

属污染防治提供科学基础数据。

1 研究区域概况:

南盘江发源于云南省曲靖市乌蒙山余脉马雄山东麓,是珠江的源头河段之一。南盘江主干流全长914 km,河道平均坡降为1.74‰,在云南省流域面积为43 311 km²。

研究区(23°26′23.7″~25°45′53.7″N,103°10′38.4″~103°54′5.8″E)位于云南省东部的南盘江干流及其主要支流(图1)。该区域海拔为738~2 017 m,年均气温17.1℃,每年的4~5月份为旱季,6~9月为雨季,年均降水量在1 100 mm左右。南盘江(云南段)以宜良和泸江汇合口为界,将其分为上、中、下游三段^[12]。

南盘江流域(云南段)分布有大量的有色金属矿山和化工企业。其中,位于南盘江上游的曲靖为云南省最重要的工业城市之一,境内分布有大量的矿产资源和化工企业(如造纸厂、钛锌厂、铬盐化工厂等);位于中游的个旧市是文明中外的“锡都”,

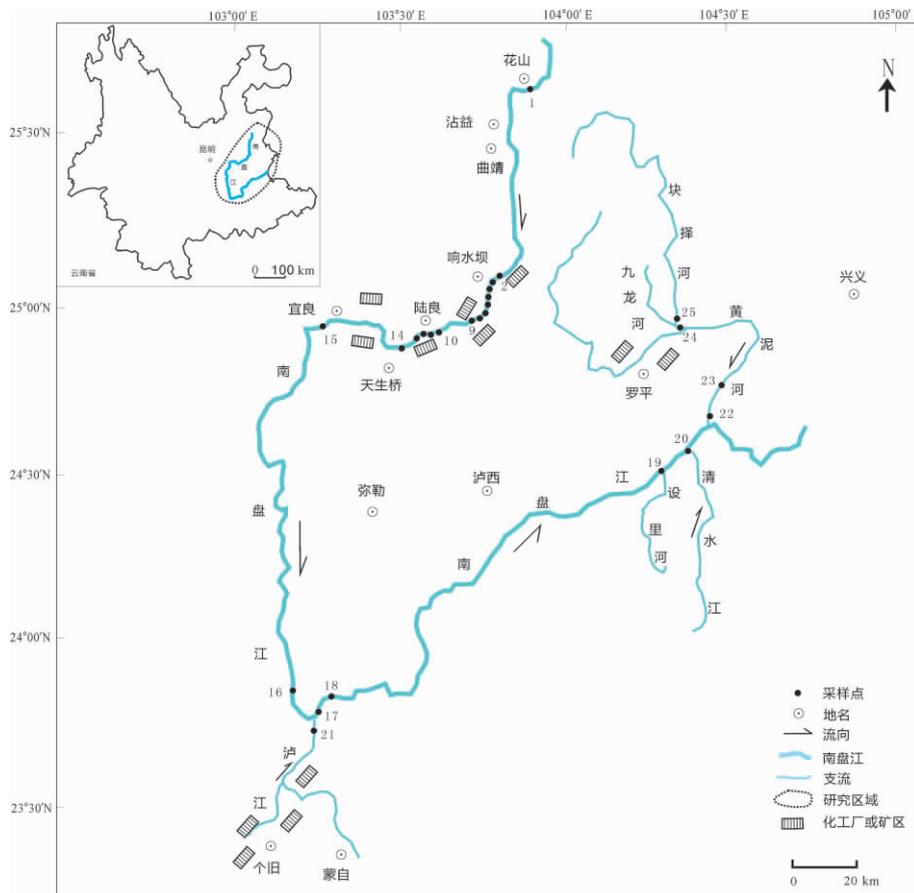


图1 研究区域及采样点位置图

Fig.1 Map of the sampling sites

它和临近的蒙自市均分布有锑、铅、锌、铜、锡、煤等矿产资源;此外,流域下游的罗平县拥有丰富的铅锌矿、煤等矿产资源。

2 材料和方法

2.1 样品采集

沿南盘江(云南段)流域干流和主要支流,系统采集了代表性水系沉积物样品25个(图1)。每个采样点中5 m²范围内至少采集3个子样品,混匀后作为该点的代表样品,装入样品袋带回实验室。

2.2 测定方法

沉积物样品于室温自然风干,除去砂砾和动植物残体后,破碎,四分法取10 g样品用玛瑙研钵研磨,过筛(200目)后密封保存。样品用HClO₄-HNO₃-HF的混合酸在高温高压条件下消解,将消解液蒸至近干后用稀HCl定容,置于4℃冰箱冷藏待测。测试分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成,用电感耦合等离子体质谱仪(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; Agilent 7700x, USA)测定超痕量元素含量。实验用水为Milli-Q超纯水,实验试剂均为优级纯。通过设置一定数量的标样、平行样和空白样对消解流程和分析测试进行质量控制,所有元素分析误差在95%置信水平上均控制在±10%以内,平行样的相对偏差在±5%以内。

2.3 数据处理

利用SPSS软件对沉积物元素含量进行Pearson相关性分析。Sigmaplot软件绘制元素富集因子箱型图及流域沉积物中元素含量变化趋势图,其他数据整理和分析采用Microsoft Excel完成。

3 结果与讨论

3.1 研究区域水系沉积物中元素含量分析

南盘江流域(云南段)所有采样点水系沉积物中重金属平均含量均不同程度高于我国及全球页岩的平均值(表1)。其中,Zn、As、Cr含量均达到140 mg/kg以上,Pb平均含量为101 mg/kg。研究区域水系沉积物中重金属平均含量较全球页岩均值

表1 研究区域水系沉积物中部分重金属含量统计

检测项目	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Sb
元素平均含量	146.2	4.52	150	80	101	239	5.5
中国东部泥(页)岩	7.8	0.11	72	29	23	80	0.6
全球页岩	13.0	0.30	90	45	20	95	1.5

倍数的变化趋势为: Cd(15.1) > As(11.2) > Pb(5.0) > Sb(3.5) > Zn(2.5) > Cu(1.8) > Cr(1.7)。研究区域水系沉积物中重金属含量较高,一方面可能是研究区域具有较高的地球化学背景值,重金属通过自然风化淋滤作用进入水体,进而在沉积物中富集;另一方面,研究区域周边矿山和工厂在采选冶过程中产生的工业废水排入河流;露天堆放的废渣在雨水冲刷淋滤作用下释放重金属进入流域水体也可能是流域沉积物中重金属富集的重要原因。南盘江(云南段)上游采样点重金属平均含量与全球页岩中重金属含量对比,其富集趋势是As>Cd=Cr>Pb>Sb>Zn>Cu,中游采样点的富集情况是Cd>As>Pb>Zn>Sb>Cu>Cr,下游采样点的富集情况为Cd>Pb>Zn>Sb>As>Cu>Cr。

南盘江干流水系沉积物中,As和Cr在流域内含量变化趋势基本一致,Pb、Zn、Cu和Cd、Sb、Sn这两组元素各自变化趋势也相似(图2)。Pearson相关性分析结果表明,Cr与As显著正相关($R=0.696$, $P=0.01$, $n=25$),亲硫元素Cu、Cd、Sb、Zn之间也具有显著相关性(表2),这些元素地球化学性质相似,可能分别有相同的来源^[7,19]。Cr和As可能的来源是2011年在云南陆良境内露天堆放的化工厂铬渣;Cu、Cd、Sb和Zn可能来自于南盘江流域周边的化工厂废水排放和矿业活动。

南盘江上游沉积物中重金属含量在采样点2(响水坝)、点9(铬渣场上游)、点12(铬渣场旁)均表现为较高的值(图2),重金属含量高的颗粒物(如铬矿渣等)在雨水冲刷作用下进入河流沉积物中可能是该现象的主要原因。而在流域中下游沉积物中除Cd含量显著增加外,As、Cr、Zn、Cu、Sb含量均有不同程度降低,即流域内水系沉积物中重金属含量从上游至下游整体呈下降趋势。这种变化趋势的可能原因是,流域水体中溶解态重金属受到水体物理化学自净作用(吸附、沉淀等)在沉积物中富集。此外,下游新支流汇入,对干流水体中重金属也有不同程度的稀释作用。

相对而言,Cr在南盘江上游水系沉积物中最为富集,在中游和下游则明显降低,与全球页岩中的Cr含量相当。前人研究证实,南盘江上游沿岸分布的多个铬酸盐化工厂极可能是该流域上游水体Cr污染的重要来源^[15,18,20],这与我们野外调研发现该流域上游沿岸露天堆放有大量富含铬等毒害元素的废渣现状基本相符。铬渣可通过物理冲刷作用

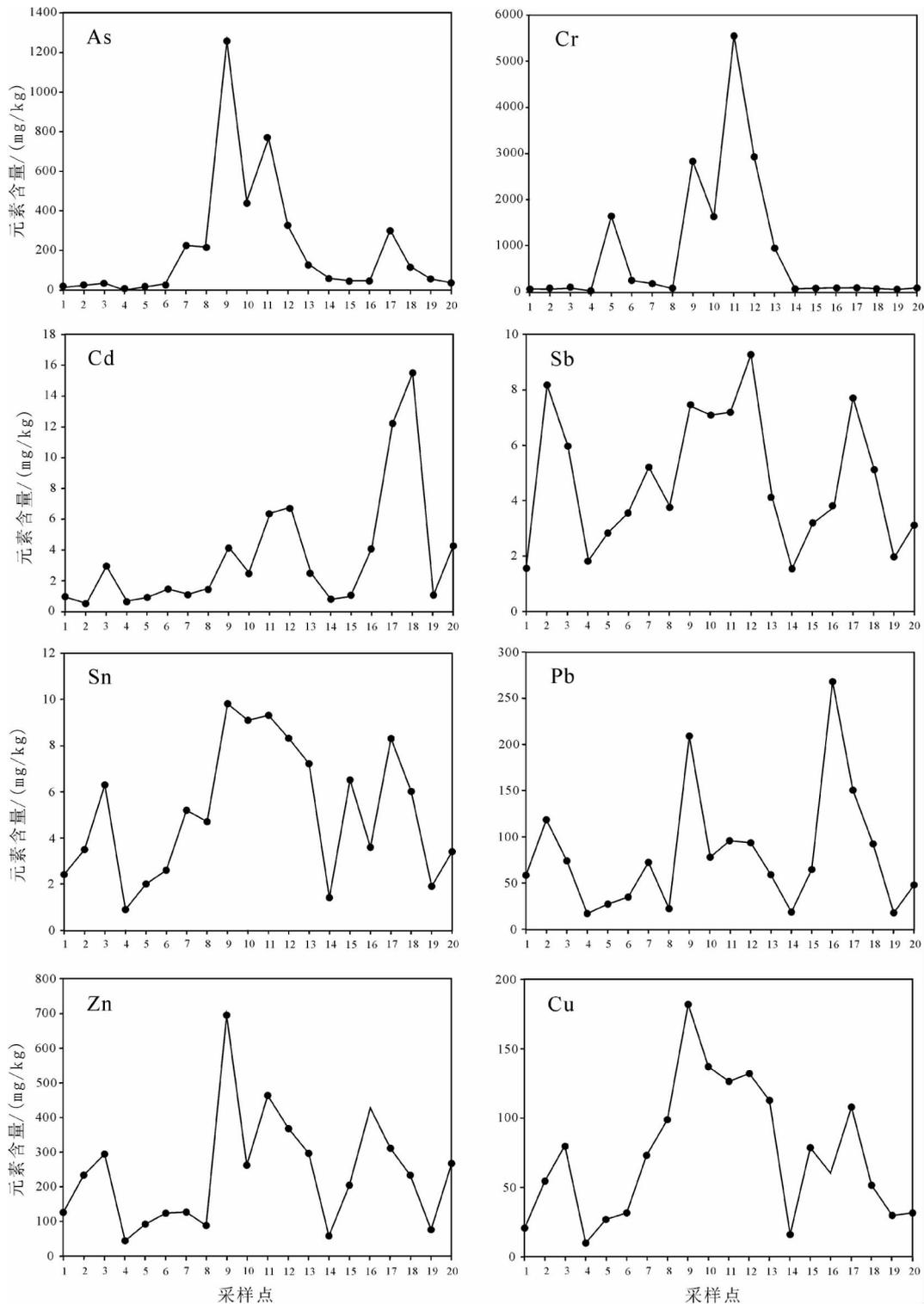


图2 南盘江主干流水系沉积物中重金属含量变化趋势

Fig.2 Distribution characteristic of heavy metals in sediments in the main stream of the Nanpan River Basin

进入沉积物中;此外,铬渣在雨水淋滤作用下,Cr被释放进入水体,经过氧化还原、吸附、絮凝、沉淀等作用进入沉积物^[21]造成了流域上游水系沉积物富集Cr。南盘江中下游沉积物中Cr含量降低而As

含量增高,可能与泸江支流的汇入有关。泸江支流的水系沉积物相对于汇合前南盘江干流沉积物具有低Cr高As的特点(泸江沉积物中Cr、As含量分别为103 mg/kg和533 mg/kg;汇合前干流沉积物中

表 2 研究区沉积物中金属元素间的 Pearson 相关系数($n=20$)Table 2 Pearson correlation coefficient of heavy metals in sediments($n=20$)

元素	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Sb	Zn
As							
Cd	0.245						
Cr	0.696**	-0.093					
Cu	0.739**	0.32	0.496*				
Pb	0.265	0.341	0.021	0.409*			
Sb	0.418*	0.637**	0.182	0.593**	0.347		
Zn	0.295	0.538**	0.085	0.493*	0.880**	0.462*	

注: **表示在 0.01 水平(双侧) 上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧) 上显著相关。

Cr、As 含量分别为 172.9 mg/kg 和 44.8 mg/kg) , 泸江支流与南盘江干流汇合后, 干流内水系沉积物 Cr 的含量降低而 As 增高(Cr、As 含量分别为 139.9 mg/kg 和 248.1 mg/kg) 。

南盘江中游水系沉积物中相对富集 Pb、Zn、Cu、Sb、Cd, 平均含量分别为 185.5、548、91.9、8.4、10.6 mg/kg。这与流域中游周边分布有锑、铅、锌等多种有色金属硫化物矿集区有关, 该区域具有较高的重金属地球化学背景值。区域内 Pb、Zn、Cu、Sb 等重金属通常以共生或伴生形式存在于硫化物中, 在自然风化和采冶活动作用下大量释放进入表生环境^[22-23]。这直接导致了流经该多金属矿集区的泸江支流水体水系沉积物中元素 Pb、Zn、Cu、Sb、Cd 含量明显偏高, 分别为 231、1220、148、12、392 mg/kg。其与主干流交汇后的采样点(点 17) 沉积物的重金属含量(Pb、Zn、Cu、Sb、Cd 含量分别为: 150.5、312、108、7.7、12.2 mg/kg) , 比交汇前(Pb、Zn、Cu、Sb、Cd 含量分别为: 69.3、231.3、78.6、4.8、2.3 mg/kg) 明显升高, 因此, 泸江支流是南盘江中游水体中 Pb、Zn、Cu、Sb、Cd 等重金属的主要来源, 分布在南盘江中游附近的有色金属矿山和冶炼厂可能是南盘江流域中游河段 Pb、Zn、Cu、Sb、Cd 等毒害元素的重要源头。

3.2 污染评价

3.2.1 富集因子

富集因子(EF) 是定量评价污染程度与污染来源的重要指标^[8], 富集因子的计算常采用 Fe、Al、Zr、Ti 等作为参比元素^[24]。由于 Fe 是地壳的主要元素之一, 其化学性质较为稳定, 在研究区域样品中普遍且较均匀的存在(平均含量为 3.72%)。因

此本文对南盘江流域水系沉积物富集因子的计算选取 Fe 作为参比元素。计算公式如下:

$$EF = (M/Fe)_{\text{样品}} / (M/Fe)_{\text{页岩}}$$

式中 $M_{\text{样品}}$ 为样品中待测元素的含量; $M_{\text{页岩}}$ 为页岩中该待测元素的含量。

根据上式计算得到南盘江流域(云南段) 重金属元素的富集因子分布特征(表 3) , 该流域水系沉积物中各重金属元素整体污染级别依次为 $Cd > As > Cr > Pb > Sb > Zn > Cu$ 。其中, As、Cd、Cr 的平均富集因子分别为 14.54、17.54、8.27, 按照 Sutherland^[25] 富集因子分级标准(表 4) 划分属于显著污染; Pb、Sb、Zn 的平均富集因子分别为 4.58、3.55、3.34, 为中度污染; Cu 属于轻微污染, 平均富集因子为 1.68。南盘江上游河段水系沉积物中污染程度最严重的元素为 As、Cd、Cr; 中游河段水系沉积物中污染程度最严重的元素为 As、Cd; 下游河段水系沉积物中污染程度最严重的元素为 Cd。

表 3 研究区水系沉积物中重金属富集因子

Table 3 Enrichment factors of heavy metals in sediments

元素	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Sb	Zn
范围	0.41~78.83	0.74~108.19	0.64~69.63	0.43~3.45	0.30~11.98	0.44~9.47	0.67~10.63
平均值	14.54	17.54	8.27	1.68	4.58	3.55	3.34
标准偏差	19.93	22.92	15.42	0.89	2.94	1.86	2.41

表 4 Sutherland 富集因子分级标准^[25]Table 4 Sutherland classification Criteria of enrichment factors^[25]

EF 范围	污染程度
$EF < 1$	无污染
$1 \leq EF < 2$	轻微污染
$2 \leq EF < 5$	中度污染
$5 \leq EF < 20$	显著污染
$20 \leq EF < 40$	强污染
$EF \geq 40$	极强污染

根据元素的富集因子箱型图(图 3) 可知, 研究区域内 As、Cd、Cr 为左偏态分布, 不同采样点 As、Cd、Cr 的污染程度差异大。Cd、As 为南盘江流域内污染最为严重的两种元素, 其污染程度整体为显著到极强污染。Cr 的富集因子中位数线 $EF < 2$, 属于无污染到轻微污染, 这些受到较小 Cr 污染的采样点主要分布在流域下游, 而上游河段 Cr 污染程度为显著污染。Sb 为右偏态分布, 流域内 Sb 污染程度整体较高, 可能与附近锑矿的开采加工有关。Cu、Pb、

Zn的富集因子箱型图呈对称尾重分布,其污染程度在研究区域中变化不大,可能与研究区域的元素高背景值有关。

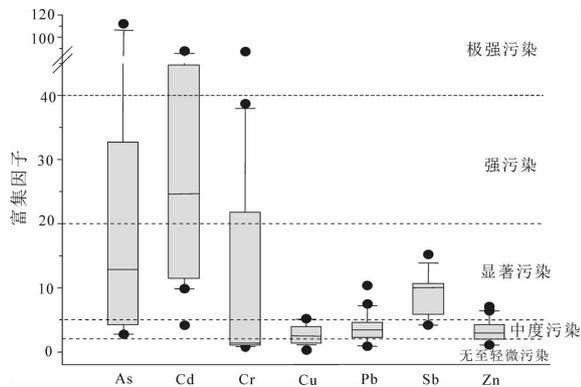


图3 研究区水系沉积物重金属富集因子箱型图

Fig.3 Box-plot for enrichment factors of heavy metals in sediments

3.2.2 地累积指数

地累积指数(I_{geo})是评价水系沉积物中重金属富集程度的重要参数,也是区分水体重金属污染源于人为活动抑或自然地质过程的重要参数,能够反映水系沉积物或土壤中重金属污染状况,被广泛用于判断人为活动对水系沉积物或土壤的影响程度^[9]。其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n)$$

式中, C_n 为样品中元素 n 的浓度; B_n 为该元素的背景浓度;1.5为修正指数,通常用来表征沉积特征、岩石地质及其它影响^[11]。

选取中国东部页岩作为地球化学背景,根据Forstner^[26]分级标准(表5)对地质累积指数进行分级,进而判定南盘江流域水系沉积物中重金属元素污染等级(表6)。结果表明,研究区域水系沉积物中金属元素Cd为5级强-极强污染,As为4级强污染,Sb为3级中-强污染,Cr、Pb、Zn、Cu为2级中度污染,各元素污染级别依次为Cd>As>Sb>Pb>Zn>Cr>Cu。

流域内不同采样点的水系沉积物重金属元素污染程度不同,采样点中Cd、As的污染程度基本高于中度污染;Sb为中度至强污染;Pb、Zn、Cu为无至强污染等级。研究区域内多数采样点Cr为无污染,仅少数采样点水系沉积物中Cr受到污染,这与采样点铬渣的露天堆放有关。总体而言,地累积指数评价结果与富集因子法评价结果基本一致。

3.2.3 污染负荷指数

污染负荷指数是一种综合评价区域污染程度

表5 Forstner 地质累积指数分级标准^[26]

Table 5 Forstner classification Criteria of geo-accumulation index

I_{geo} 范围	污染级别	污染程度
$I_{geo} < 0$	0	无污染
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	无污染到中度污染
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	中度污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中度污染到强污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	强污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	强污染到极强度污染
$I_{geo} \geq 5$	6	极强污染

的方法,该指数受到研究区域多种金属元素共同影响,可以直观显示各金属元素对污染贡献的权重^[10,27]。其计算公式为:

(1) 采样点某种金属的最高污染系数

$$CF_i = C_i/C_{oi}$$

式中, C_i 为元素实测含量, C_{oi} 为背景值含量;

(2) 采样点的污染负荷指数

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \cdots CF_n}$$

式中, CF_i 为采样点某金属的最高污染系数;

(3) 区域的污染负荷指数

$$PLI = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \cdots PLI_n}$$

式中, PLI_i 为区域内采样点的污染负荷指数。

本研究中,污染负荷指数的计算以中国东部页岩的元素丰度作为背景值。计算结果表明,最高污染负荷指数位于与南盘江主干流交汇前的泸江支流,泸江水体受区域金属开采冶炼活动的影响,故水系沉积物污染负荷指数相对较高。南盘江流域(云南段)的污染负荷指数为3.29,其中流域的上、中、下游的区域污染负荷指数分别为3.88、4.97和2.85,按Tomlinson分级可知,南盘江流域水系沉积物基本处于Ⅲ级污染水平。根据研究区域各金属元素的最高污染系数(表7)基本可以厘定流域水系沉积物污染的主要贡献元素,即:上游为Cd、As、Cr;中游为Cd、As、Sb;下游为Cd、Sb。

4 结论

通过地球化学分析初步查明了南盘江水系沉积物中重金属富集程度依次为Cd>As>Pb>Sb>Zn>Cu>Cr。上游显著富集元素As、Cd、Cr,中游富集元素Cd、As、Sb,下游富集元素Cd、Sb。流域内广泛分布的金属硫化物的自然风化作用以及矿业采选活动是流域内水系沉积物重金属富集的主要因

表 6 研究区域水系沉积物地累积指数分布表
Table 6 Geo-accumulation index of heavy metals in sediments

元素	各污染级别样点数/个							I_{geo}	级别
	0 级 无污染	1 级 无-中度污染	2 级 中度污染	3 级 中-强污染	4 级 强污染	5 级 强-极强污染	6 级 极强污染		
As	1	5	6	3	2	4	4	3.12	4 级
Cd	0	0	3	6	4	4	8	4.32	5 级
Cr	13	4	2	0	3	2	1	1.44	2 级
Cu	7	7	10	1	0	0	0	1.20	2 级
Pb	6	6	7	4	2	0	0	1.60	2 级
Sb	0	4	4	9	6	2	0	2.92	3 级
Zn	5	7	9	1	3	0	0	1.54	2 级

表 7 南盘江流域(云南段) 重金属污染负荷指数表

Table 7 Pollution loading index of heavy metals
in the Nanpan River Basin(Yunnan section)

区域	最高污染系数 $CF = C_{\text{样品}}/C_{\text{页岩}}$							PLI 区域
	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Sb	Zn	
上游	30.64	20.43	15.17	2.71	3.02	8.33	2.90	3.88
中游	19.63	80.36	1.10	2.52	7.40	9.54	4.05	4.97
下游	6.65	31.55	1.35	2.10	1.55	14.48	2.41	2.85

素。在无新支流汇入南盘江流域时,流域沉积物的金属元素含量随着与污染源距离的增加而降低,可能是重金属元素在长距离运移过程中发生

沉降、吸附等作用。污染程度较高的泸江在南盘江中游处汇入,对干流水系沉积物的元素含量产生显著影响。

采用富集因子法、地累积指数法和污染负荷指数法三种方法从不同角度综合厘定研究区域重金属污染程度。三种评价方式得到的结果基本吻合,即南盘江流域(云南段) 水系沉积物中存在一定的重金属污染。污染负荷指数法结果表明流域内主要污染贡献元素为 Cd 和 As, Sb 和 Cr 次之,而 Zn、Pb 和 Cu 的污染程度较轻。研究区域不同采样点的污染程度差异大,表现为中游>上游>下游。

参 考 文 献

- [1] Sebel S, Turk J. Natural and anthropogenic influences on the year-round temperature dynamics of air and water in Postojna show cave, Slovenia [J]. *Tourism Management*, 2014, 40: 233-243.
- [2] Liu Y Z, Xiao T F, Ning Z P, et al. High cadmium concentration in soil in the Three Gorges region: Geogenic source and potential bioavailability [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 37: 149-156.
- [3] 杨刚,沈飞,钟贵江,等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2011, 9(31): 2014-2021.
- [4] 郭伟,赵仁鑫,张君,等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. *环境科学*, 2011, 10(32): 3099-3105.
- [5] Kapusta P, Sobczyk L. Effects of heavy metal pollution from mining and smelting on enchytraeid communities under different land management and soil conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 517-526.
- [6] Liaghati T, Preda M, Cox M. Heavy metal distribution and controlling factors within coastal plain sediments, Bells Creek catchment, southeast Queensland, Australia [J]. *Environment International*, 2004, 29(7): 935-948.
- [7] Zhuang W, Gao X. Distributions, sources and ecological risk assessment of arsenic and mercury in the surface sediments of the southwestern coastal Laizhou Bay, Bohai Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 99(1-2): 320-327.
- [8] Zhang R. Historical trends in the anthropogenic heavy metal levels in the tidal flat sediments of Lianyungang, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(7): 1458-1468.
- [9] Qing X, Zheng Y T, Li S G. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city(Anshan), Liaoning, Northeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 120: 377-385.
- [10] Zhao H. Index models to evaluate the potential metal pollution contribution from washoff of road-deposited sediment [J]. *Water Research*, 2014, 59: 71-79.
- [11] Selvam A P, Priya S L, Banerjee K, et al. Heavy metal assessment using geochemical and statistical tools in the surface sediments of Vembanad

- Lake, Southwest Coast of India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(10): 5899–5915.
- [12] 胡涛, 施凤宁. 南盘江水体中重金属特征污染物及控制断面的筛选 [J]. *环境科学导刊*, 2013, 32(S1): 56–58.
- [13] 荆春燕, 许海平. 南盘江流域水污染控制研究 [J]. *云南环境科学*, 2002, 21(2): 24–25.
- [14] 王海鹰. 南盘江上游生态环境现状及其保护 [J]. *云南环境科学*, 1997, 16(2): 16–18.
- [15] 夏宁宁. 南盘江云南省出境断面 20 年水质监测结果及回顾评价 [J]. *环境科学导刊*, 2014, 33(4): 70–71.
- [16] 李保欣. 南盘江污染治理触探 [J]. *人民珠江*, 1997, 4: 47–48.
- [17] 张宏. 曲靖市境内南盘江水质变化趋势及影响因素分析 [J]. *环境科学导刊*, 2013, 32(4): 59–63.
- [18] 姜安源. 陆良环境污染现状分析及环境保护对策 [J]. *地域研究与开发*, 1997, 16: 107–111.
- [19] Zhang Z. Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 126: 94–101.
- [20] 陶文东, 周波, 杨为民, 等. 南盘江上游水污染综合防治规划研究 [J]. *云南环境科学*, 1997, 16(1): 38–41.
- [21] 李如忠, 姜艳敏, 潘承荣, 等. 典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估 [J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 1067–1075.
- [22] Xu H. Leaching of a complex sulfidic, silicate-containing zinc ore in sulfuric acid solution under oxygen pressure. *Separation and Purification Technology*, 2012, 85: 206–212.
- [23] Minz F. Detailed characterisation of antimony mineralogy in a geometallurgical context at the Rockliden ore deposit, North-Central Sweden [J]. *Minerals Engineering*, 2013, 52: 95–103.
- [24] 毕木天. 关于富集因子及其应用问题 [J]. *环境科学*, 1984, 5(5): 68–70.
- [25] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 611–627.
- [26] Forstner U, Schoer J, Knauth H D. Metal pollution in the tidal Elbe River [J]. *Science of the total environment*, 1990, 11: 347–368.
- [27] Tomlinson M J, Gergel S E, Beechie T J, *et al.* Long-term changes in river-floodplain dynamics: Implications for salmonid habitat in the Interior Columbia Basin, USA [J]. *Ecological Applications*, 2011, 21: 1643–1658.

Distribution and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Sediments in the Nanpan River Basin (Yunnan Section)

XIONG Yan^{1,2}, NING Zengping¹, LIU Yizhang¹, ZHAO Yanlong³, WU Shiliang³, LIU Wei³

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Water Resources Protection Bureau of Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China)

Abstract: In order to reveal the distribution characteristics of heavy metals in the Nanpan River Basin (Yunnan section), twenty-five sediment samples were collected. Contents of trace metal in sediments were determined by using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Geochemical and statistic methods were applied to analyze the spatial distribution and correlation of heavy metals in sediments of the Nanpan River. Degree of contamination and major pollutant elements in the Nanpan River basin were assessed by using enrichment factor (EF), pollution loading index (PLI) and index of geo-accumulation (I_{geo}). Results show that the enrichment degree of heavy metal elements in sediments of the Nanpan River are followed the order of Cd>As>Cr>Pb>Sb>Zn>Cu. Cadmium is riched in the whole Nanpan River basin, while the upper reaches are enriched in Cr and As; the middle reaches are enriched in Pb and Sb; and the lower reaches are enriched in Sb. Lujiang tributary in the middle reaches significantly influences the distribution of elements in sediments of the Nanpan River. Due to nonferrous metal sulfide deposits, mining and smelting factories are located throughout the Nanpan River Basin. Potential sources of heavy metals in sediments of the Nanpan River basin might be the weathering of sulfide and mining/smelting activities. The Nanpan River Basin (Yunnan section) is polluted by heavy metals, and its pollution degree varies from different reaches (middle reaches>upper reaches>lower reaches). Among the major contamination elements in the Nanpan River, Cd and As occupy the first place; Sb and Cr rank the second; while Pb, Zn and Cu take the third place.

Key words: heavy metal; sediment; spatial distribution; pollution evaluation; The Nanpan River basin