

泚江水体重金属污染的沿程变化特征

易琦^{1,2}, 窦小东³, 赵筱青^{1,2*}, 黄茜蕊⁴ (1. 云南大学喀斯特国际联合研究中心, 云南昆明 650091; 2. 云南大学资源环境与地球科学学院, 云南昆明 650091; 3. 云南省气象局, 云南昆明 650034; 4. 云南省国土资源职业学院环境地质系, 云南昆明 650217)

摘要 为研究泚江水体重金属污染现状及其沿程迁移变化特征与动力因素, 于2010年1月在金顶铅锌矿区上、下游共采集了25个水样和底泥样, 运用单因子评价法和内梅罗综合指数法评价了水体污染程度。结果表明, 枯水期矿区下游水质均为地表水Ⅲ类, 但其受重金属的污染仍较严重, 治理难度很大, 少量重金属污染物已扩散进入澜沧江干流。究其原因, 发现金顶矿区是泚江水体重金属的根本污染源。通过分析水体中 Zn、Pb 和 As 浓度沿河程的变化态势, 发现随与矿区距离的增加, 其下游水体重金属含量趋于降低, 降速趋于减缓; 但因在水体-底泥间迁移转化特性方面的差异, 水体中 Zn、Pb 和 As 浓度的沿程减少过程不尽相同。在此过程中, 河道上的拦河坝对 Zn 和 Pb 的迁移转化过程干扰大, 对 As 则不显。此外, 流域内潜在的其他污染源引起了局部河段水体中 Pb、尤其是 As 浓度的异常变化。

关键词 泚江; 重金属污染; 单因子评价; 内梅罗综合指数; 吸附-解吸平衡

中图分类号 S181.3; K903 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)15-06848-05

Variation Characteristics of Heavy Metal Pollution in Water Body along The Bijiang River

YI Qi et al (Yunnan University International Joint Research Center for Karstology, Kunming, Yunnan 650091)

Abstract In order to study heavy metal pollution situation and its variation characteristics and dynamic factors along the Bijiang River, totally 25 samples of water and sediment in upstream and downstream of the Jinding lead-zinc mining area were collected in January 2010. By using single-factor evaluation method and Nemerow index method, the degree of water pollution was evaluated. The results showed that the downstream water quality of the mining area in the dry season belongs to the III class of surface water. However, for the serious contamination by heavy metals, governance is very difficult, and a small amount of heavy metal pollutants have spread into the Lancang River. The curve chart derived from data analyzing presents the change trends of Zn, Pb and As in water along the river, and it was discovered that Jinding mining area is the fundamental source of heavy metal pollution of Bijiang River, and with the increase of distance away from the mining area, the concentration of heavy metals in water decreased when their descent rates tended to slow down; while, as the differences of migration and transfer properties between water and sediment, there were differences among the decline process of Zn, Pb and As. Meanwhile, the barrages on the river have more influence on migration and transfer of Zn and Pb, but As seems unaffected. Furthermore, some other potential pollution sources in the basin caused abnormal concentration changes of Pb, especially As in some parts of the river.

Key words Bijiang River; Heavy metal pollutants; Single-factor evaluation; Nemerow pollution index; Adsorption-desorption balance

重金属排入天然水体后, 毒性大、难去除, 对周边环境造成极大的威胁, 并沿食物链逐级富集危害人体的健康^[1]。目前, 关于河流重金属的研究主要集中在重金属的赋存形态、影响各形态转化的因素、重金属污染的综合评价方法、迁移规律等方面。然而, 在河流重金属溯源方面的研究缺乏连续性, 尤其是关于一些大江大河的支流对整个江河重金属的贡献研究有待于进一步加强^[2]。泚江属高原河流, 是澜沧江-湄公河上游的重要支流, 河床比降大、流速急, 原是云南省兰坪、云龙两县居民生产、生活的主要水源, 但由于河水受到重金属的污染致使河水在很大程度上遭到弃用, 两县已出现水质性缺水^[3]。李瑞萍等^[4-5]运用不同的评价方法, 分别对泚江水体、底泥中重金属的污染状况进行了评价, 并探讨了水体中重金属污染物的分布规律及其原因。2009年, 云南省政府启动了泚江水污染防治工程, 投入大量人力物力, 狠抓工业污染源治理及矿区污染治理与生态恢复两大工程^[6]。其后, 仅王李鸿等^[3]对泚江生态健康的评价指标体系进行了探讨。因此, 为摸清污染控制与治理的成效, 进一步探讨泚江水体重金属污染物的产生与运移特征, 笔者于2010年初对泚江水体和底泥进行采样分析, 针对河水的重金属污染, 对

泚江水质及污染程度进行评价, 对河流水体主要重金属污染物的沿程变化特征进行归纳与动因剖析, 探究相关水体重金属污染物的迁移、转化规律, 以期对泚江干流——澜沧江流域环境污染的防治工作提供依据与参考。

1 研究区概况

泚江位于滇西北“三江并流区”南部, 全长 150 km, 流域面积 2 447.14 km², 自雪盘山与清水朗山之间由北向南而下, 由兰坪县经“金鸡桥”流入云龙县境内, 至“功果桥”汇入澜沧江^[7] (图 1), 是流经兰坪、云龙两县的唯一大河。泚江上游河段从兰坪金顶铅锌矿西部边缘流过。金顶铅锌矿是我国目前已探明的最大的铅锌矿, 也是世界上为数不多、储量上千万吨级的铅锌矿床之一, 矿区集中在 6.8 km² 的范围内, 80% 以上可以露天开采^[8]。由于矿区三面环山, 地势陡峻, 易于汇水, 因此在雨季大量废石、矿渣等随地表径流带入泚江, 加之矿区民办涉矿企业的发展及环境监管的力度不足, 泚江已受到严重污染, 鱼类等水生生物早已绝迹, 泚江水已无法用于生活、甚至灌溉, 致使泚江沿岸出现水质性缺水^[9]。2008、2009 年对泚江枯、丰水期水体的研究结果^[4-5] 显示, 泚江部分江段已严重污染, 为地表水质劣 V 类。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集 采样于 2010 年 1 月底进行, 由于泚江水质受金顶矿区影响较大, 因此采样点的布设以距离矿区远近为原则, 距离矿区越近样点密度越大、间距越短, 反之密度越小、间距越长。采样从泚江上游支流挂登河、干竹河开始, 直

基金项目 云南省应用基础研究面上项目(2009CD022, 2010CD012)。
作者简介 易琦(1966-), 男, 云南开远人, 副教授, 硕士, 硕士生导师, 从事水资源和城市环境问题方面研究, E-mail: yiqi@ynu.edu.cn。* 通讯作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事生态环境与生态安全方面研究, E-mail: zhaoqx748@sohu.com。
收稿日期 2013-05-13

至沱江与澜沧江交汇处,共采集沱江水样 14 个、沱江与澜沧江交汇处水样 1 个、底泥样品 10 个(图 1)。其中,S1、S3 号样点位于干竹河,S2 号样点位于挂登河,这 3 个样点均在矿区上游,基本不受矿业活动影响,能够较为真实地反映沱江水体未受矿业活动影响前的状况,可以代表沱江水体的背景值;1、2 号样点位于兰坪县境内,3~11 号样点位于云龙县境内,12 号样点为澜沧江与沱江交汇处水样(表 1)。水样直接用 2.5 L 容积的高密度聚乙烯瓶于岸边采集并贮存。同时,在 S1、S2、S3、1、2、3、7、8、11、12 号样点于岸边水缓且有泥沙淤积处分别挖取底泥样品 1~2 kg,并装于聚乙烯塑料袋内

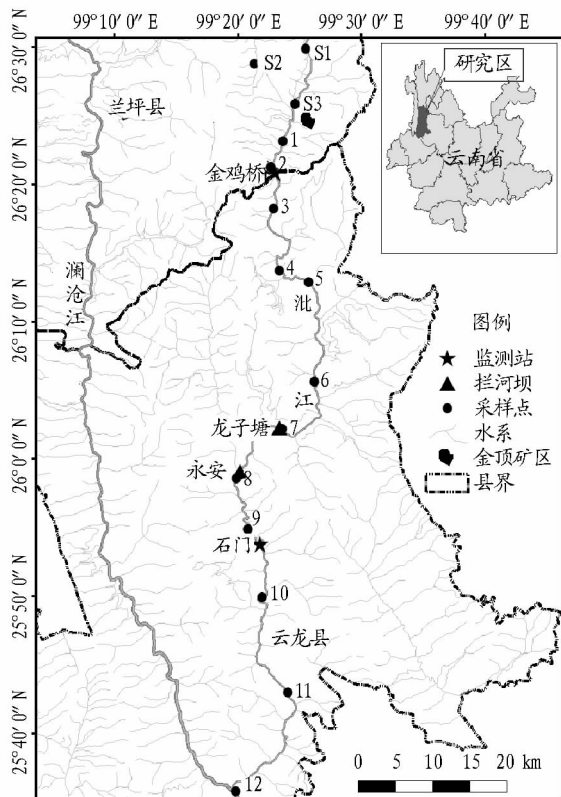


图 1 研究区采样点分布

表 1 采样点及现场调查项目

编号	位置	浑浊度	水温 ℃	pH	流速
S1*	高坪村附近	稍混	6.0	7.63	平缓
S2*	拉井公路新生桥上约 800 m	清澈	9.0	7.83	平缓
S3*	金顶加油站下约 50 m	稍混	6.0	7.44	平缓
1*	长吉村附近	非常浑浊	5.5	7.56	较急
2*	菁门村附近	非常浑浊	7.5	7.58	很急
3*	金鸡桥下约 10 km	非常浑浊	4.0	7.58	较急
4	池场坪附近桥下	非常浑浊	5.5	7.59	较缓
5	中和村二社沙南村瑞和桥下约 100 m	非常浑浊	9.0	7.61	平缓
6	包罗村通京桥下约 50 m	浑浊	9.0	7.87	平缓
7*	龙子塘水电站蓄水区	稍混	9.0	7.88	较缓
8*	永安水电站下约 300 m	稍混	8.5	8.01	平缓
9	果朗村核桃苗圃基地下	浑浊	-	7.96	-
10	宝丰乡石城组	稍混	7.0	7.84	平缓
11*	新安村下游	稍混	11.0	7.94	较急

注: * 表示同时采集水样与底泥样,其余样点仅采集水样。

贮存。

2.2 样品分析 水样及底泥样品送交国土资源部昆明矿产资源监督检测中心检测分析,各检测步骤严格按照《中国地质调查局地质调查技术标准》(DD2005-03)中的“生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)”进行。水样及底泥样品中重金属含量采用原子荧光法测量,仪器为 AFS-3100 型全自动双道原子荧光光度计,精密度 < 1.0%,检出限:As、Pb < 0.01 μg/L, Cd < 0.001 μg/L, Zn < 1.0 μg/L。水样的 pH 采用实验室 pH 法测量,仪器为 PHS-3C 型酸度计,测量分辨率: pH: 0.01 ph, 精确度: pH: ±0.01 ph。水温在采样现场用温度计测定。

3 研究方法

3.1 水质评价方法的筛选 国内外对水质评价方法的研究相当活跃,但每种评价方法各有优缺点,至今仍没有统一的、公认的评价模式。目前,对重金属污染水体水质评价多采用模糊综合评价法、灰色系统评价法、单因子评价法和内梅罗综合污染指数法。通过计算分析,运用模糊综合评价和灰色聚类评价法^[10-11]后,其结果显示沱江的水质良好,分别为地表水 II 类和 I 类,而这与目前沱江水体中鱼虾绝迹的水环境现状明显不符,结论难以采信,不适宜用作沱江水体重金属污染的评价。鉴于此,拟采用单因子评价法和内梅罗综合污染指数法,对沱江水体重金属污染进行评价与分析。此外,采集水样中的 Cd 浓度均 < 0.001 mg/L(检出限),故后文分析忽略 Cd 的影响,仅讨论 Zn、Pb 和 As 的污染问题。

3.2 单因子评价法和内梅罗综合污染指数法的应用 单因子评价法可用于评价水体水质类别,现行国家水质标准中已确定悲观评价原则,即以水质最差的单项指标的所属类别来确定水体综合水质类别^[12]。其方法是:用水体各监测项目的分类标准(GB3838-2002)^[13]直接对照沱江水体中该项目的监测结果,来确定该项目的水质类别,在所有项目的水质类别中选取水质最差类别作为沱江水体的综合水质类别。内梅罗综合污染指数法广泛用于评价河流水体重金属的污染状况,其计算公式为:

$$P_{j\text{综合}} = [(P_{j\text{imax}}^2 + P_{j\text{jave}}^2)/2]^{1/2}$$

式中, $P_{j\text{综合}}$ 为第 j 个采样点的质量综合指数; $P_{j\text{imax}}$ 为第 j 个采样点 i 污染物所有单项污染指数中的最大值; $P_{j\text{jave}}$ 为第 j 个采样点 i 污染物所有单项污染指数中的平均值; i 污染物的污染指数 $P_i = C_i/S_i$,其中 C_i 为第 i 种污染物的实测质量分数; S_i 为第 i 种污染物的环境背景值。 P_i 越大,则 i 因子的单项环境质量越差, $P_i = 1$ 时环境质量处于临界状态^[14]。 $P_{j\text{综合}}$ 值越大,污染程度越重。选取矿区上游挂登河、干竹河上基本未受矿业活动影响的 S1~S3 号样点的平均值作为沱江水体的背景值,以分析沱江水体中各种重金属的污染程度以及综合污染指数沿程变化的态势。

4 结果与分析

4.1 水质类别与主要污染源

4.1.1 综合水质可达到地表水 III 类标准。 利用单因子评价法,将水样分析数据(表 2)与各项项目的标准限值作比较。结

果表明,在2010年枯水期,矿区上游S1~S3号样点水体综合水质均属地表水Ⅰ类;矿区下游1~11号样点综合水质均属地表水Ⅲ类,12号样点综合水质属地表水Ⅰ类。其中,Zn在1~7号样点均属地表水Ⅱ类,8~12号样点均属地表水Ⅰ类;Pb除12号样点属地表水Ⅰ类外,其余各样点均属地表水Ⅲ类;As在1~12号样点均属地表水Ⅰ类。总体看,矿区下游应为Ⅲ类水质,但明显差于矿区上游水质,显然,泚江水体重金属污染受矿区排污影响极大。

表2 泚江水体重金属含量 mg/L

样点	Zn	Pb	Cd	As
S1~S3	0.006	0.002	<0.001	0.004
1~7	0.077~0.25	0.017~0.027	<0.001	0.009~0.029
8~11	0.006~0.042	0.011~0.015	<0.001	0.005~0.028
12	0.016	0.007	<0.001	0.019

4.1.2 金顶矿区是水体 Zn、Pb 和 As 污染的根本污染源。采用内梅罗综合污染指数法,评价泚江水体污染程度。结果表明,相对于背景值,金顶矿区下游1~12号样点水体都受到了严重的污染,其中距离排污口最近的1号样点的综合污染指数为31.19,为重度污染基准值的10倍多,水体受矿区污染最为严重;综合污染指数沿程趋于下降,最小值为3.81。可见,矿区作业是造成泚江水体重金属污染的根本污染源。此外,1~11号样点水体中Zn浓度除8号样点与背景值相等外,其余各点均高于选定的背景值,且其最大值甚至为背景值的41.67倍;Pb浓度分别约为背景值的5~13倍,As浓度分别约为背景值的2~7倍。可见,对泚江现状水质构成严重威胁的重金属污染物依次为Zn、Pb和As,各污染物沿河程的分布及其具体影响则较为复杂。

4.1.3 水质评价。2010年初,矿区下游河段的综合水质虽可达到地表水Ⅲ类标准,但受矿区持续排污的影响,加之底泥中逐年累积的重金属污染物的作用,相对于其水体背景值,泚江水体的重金属污染仍较严重,且在未来相当长的时期内其影响仍难根除。同时,泚江与澜沧江交汇处的12号样点受澜沧江干流来水作用,其综合水质可达地表水Ⅰ类标准;但是,相对于设定的背景值,该处水体中Zn、Pb、As浓度分别为背景值的2.67、3.50、4.83倍,水体综合污染指数也达到4.54,仍显现出了一定程度的污染水平;而且,该样点底泥中Zn、Pb的浓度值低,而底泥中As的浓度则为矿区上游背景值的2.16倍。由此可见,源自泚江流域的重金属污染物已扩散到了澜沧江干流,致使其潜在着受污染的风险,尤其是底泥中As积累的长期影响问题不容忽视。

4.2 水体重金属污染物总体分布特征 总体上,矿区下游河段水体中Zn、Pb、As浓度随距矿区距离的增加而趋于下降,个别样点出现起伏变化(图2);重金属污染物浓度的沿程下降速率与距矿区的距离大致呈反比。以1号样点各重金属浓度为基准,1~3号样点Zn、Pb、As下降速率较大,分别下降了28%、33.3%、48.8%,且下降速率表现为As>Pb>Zn;4~12号样点下降速率相对较慢。由此推理,金顶矿区无疑是泚江水体重金属污染物的根本来源;而且,重金属

污染物随江水迁移已进入澜沧江干流,其中的Zn和Pb污染影响程度还较轻,而As污染的问题则较为复杂。显然,除矿区作业影响外,在水体重金属污染物的迁移过程中,其具体波动变化显然还受到流域内其他自然过程与生产活动,以及河流水体与底泥中重金属离子迁移转化机理等因素的影响。

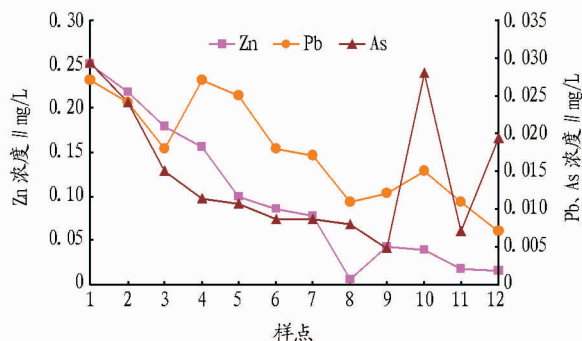


图2 矿区下游水体中Zn、Pb、As的分布

4.3 水体重金属污染物的沿程变化特征及其动因 进入水体的重金属污染物在各种物理、化学、生物因素作用下可改变其化学结构和性质,首先大部分以各种形态化合物的形式吸附于悬浮物或沉积于底泥,然后悬浮物随水迁移,在不同的水力学作用及物化过程中,部分通过絮凝作用沉降到水底形成沉积物。当环境条件(如温度、pH等)发生改变时,悬浮物、沉积物中的重金属将发生转化并释放,形成二次污染^[15]。河流水体与底泥间重金属的吸附-解吸平衡过程、河道拦河坝,以及其他的流域内自然和人类活动过程都会对河流水体重金属污染物浓度产生明显和潜在的影响。分析泚江水体中Zn、Pb、As浓度的沿程变化特征,除矿区的影响之外,还须考虑上述相关影响因子,才能进一步弄清水污染现象的本质与规律。

4.3.1 Zn浓度沿程平稳下降,但在拦河坝区段出现一处低值区。泚江水体中Zn在迁移过程中,浓度总体上呈现平稳下降态势(图2)。水体中的活性态Zn在迁移过程中容易与周围的碳酸盐矿物产生共沉淀或吸附^[8],因此泚江河道中的含Zn悬浮物随江水下冲的距离较短。1~3号样点底泥中的Zn大量富集,4号样点底泥中沉积下来的Zn已较少,往下游则更趋减少。而水体中的Ca²⁺对沉积物中的Zn具有较强的交换释放作用,可将沉积物中的Zn解吸出来^[16]。泚江流域属于岩溶地区,其地层中含大量钙质泥岩^[17],水体中Ca²⁺浓度相对较高。因此,1~3号样点Zn受底泥二次释放影响较大,缓解了水体中Zn在矿区较近处浓度急剧下降的现象,使得水体中Zn浓度在沿河程下降的过程中总体上呈现一个较缓的态势。由于河道上两处拦河坝的影响,水体中的Zn浓度在坝址下游一定范围出现明显的低值区段。兰坪铅锌矿的大规模开采始于1985年,20多年来大量含有重金属的碎小矿粒、尾矿在泚江河道沉积。龙子塘电站(表1)建成后,上游随江水下移的重金属元素被大量拦截,而坝址下游河床经侵蚀,富含重金属的底泥也被大量冲刷,水体重金属含量趋于下降;至2007年6月永安电站(表1)又建成投产,坝下一定距离的河床亦侵蚀严重,8号样点(坝下约300m)底泥

中 Zn 含量在 1~11 号样点中最低,也客观反映了水沙平衡变化及底泥污染现状。此外,这一区段水流减缓,水体重金属趋于沉积;而 pH 偏高,如 8 号样点即为所有样点中最大值,达 8.01,这也一定程度抑制了底泥中重金属的释放,以致水体中 Zn 浓度出现低值。拦河坝对水体中 Zn 浓度的影响最为突出,而对 As 的影响则不明显。水电站建成后,在坝前推移质被拦截,悬移质大量沉积,而坝下河水会通过剥蚀河床与河岸努力夺回沉积物,被剥蚀的物质会在下游更远的地方进一步沉积下来^[18]。于是,在坝下一定距离之外,因下冲污染底泥的影响,水体中 Zn 的二次污染问题又呈现出来(图 2)。

4.3.2 Pb 浓度沿程波状下降,最大峰值出现在矿区下游较远处。沱江水体中的 Pb 浓度沿河流全程明显下降,但因多种显现和潜在作用的影响,其浓度变化呈波状起伏,最大峰值出现在距矿区较远的云龙县境内(图 2)。水中悬浮物对重金属具有较强的吸附作用^[19],靠近矿山且位于兰坪城区附近的 1~3 号样点的江水悬浮物较多,对入河重金属的吸附作用很强,且该江段水流较急(表 1),吸附于悬浮物的重金属大量向下游运移。而沱江水体中 Pb 受底泥二次释放影响也较大,因此在 4 号样点出现水体 Pb 浓度的最大值,不能排除与下冲较远后才沉积于河床的底泥 Pb 释放有一定关联;当然,同时也存在其他未明因素的干扰,从而引起水体中的 Pb 浓度的显著起伏过程。分段考查水体 Pb 浓度的递减曲线(图 2),可发现 1~3 号样点水体 Pb 浓度下降速率快于 Zn。相对地,水中 Ca^{2+} 对底泥中 Pb 的交换释放作用小于 $\text{Zn}^{[16]}$,其对水体 Pb 的释放增强作用稍弱,加之其他物理、化学沉降过程的影响,或可解释水体 Pb 浓度沿河程的下降速率比 Zn 大的缘由。另外,拦河坝的构筑也使得 4 号样点以下水体中 Pb 浓度的变化产生了一定的起伏。如前所述,两座拦河坝的建设较大程度改变了河流局部的水沙平衡和水环境中的物理、化学过程,与 Zn 类似,其也明显干扰了水体 Pb 浓度的沿程减弱过程,但其波动幅度相对比 Zn 要小(图 2)。然而,在沱江水体重金属沿河的迁移变化过程中,由此是否可说明水工构筑物对 Pb 的影响小于 Zn 还需要更深入、广泛的研讨。

4.3.3 As 浓度沿程下降先快后慢,但在河流下游呈异常的起伏变化。在研究河段的上、中游,水体中 As 的浓度沿河程下降较为规律,上游下降快,而中游的下降速率显著减缓(图 2),主要是受到与矿区的距离和江水流速的影响,却几乎不受拦河坝的干扰。首先,1~3 号样点水体中 As 的浓度随与矿区距离的增加而迅速降低。究其原因,一方面由于沱江底泥中的 As 主要以残渣态为主,水体中 As 主要受固定污染源所排放的含 As 污染物的影响^[20],因此不同于 Zn 和 Pb,矿区下游水体中 As 的浓度在下降过程中受底泥释放供给较小,下降速率明显大于 Zn 和 Pb;另一方面,此江段流速较快(表 1),其沉降速度是否亦随之加快而促进水体中 As 浓度的下降尚待研究(类似的情况也出现在 11 号样点)。4~9 号样点间的水体中 As 浓度的沿程下降速率明显减缓,而此中游

河段的水流也较为平缓。可见,沱江水体 As 浓度的降速与流速之间似乎存在一定的正相关关系,而其与河水的浑浊度、水温与 pH 却难以找出明显的相关性(表 1)。此外,拦河坝所在区段 As 浓度并无类似 Zn、Pb 的明显变化(图 2),可见其对沱江水体 As 浓度的变化影响不大。沱江下游河段水体 As 浓度出现异常变化(图 2),显然有除矿区外的其他污染源的影响。处于河流下游的 9~11 号样点水体中 As 浓度出现急剧的起伏变化,必然是受其他 As 污染来源的影响。目前,可推断的原因是此区段位于矿区下游流域中耕地面积最大的宝丰乡附近^[21],农药的面源污染及其他生产活动问题值得考证。最后,在澜沧江干流上的 12 号样点处水体 As 浓度又出现高值,主要是由于此处两江交汇,水体扰动剧烈,对底泥的再悬浮作用强,使得底泥中重金属较易向水体中迁移;加之该处底泥中的 As 较高,仅次于靠近矿区的 1~3 号样点,故而导致水体中 As 浓度出现上扬。同时,12 号样点底泥中 As 含量为 11 号样点的 2 倍多,也尚不清楚澜沧江干流上游来水、来沙对其的影响。此外,与 As 不同,该点底泥中 Zn 和 Pb 的含量分别为 190、110 mg/kg,低于选定的底泥背景值的浓度 663、340 mg/kg。因此,江水汇流扰动并未显现出对水体中 Zn、Pb 浓度的明显影响。

综上所述,矿区下游水体中 Zn、Pb、As 的浓度及下降速率与距矿区的距离密切相关,总体上,随着与矿区距离的加大,重金属浓度趋于下降,且下降速率也趋于减缓。同时,沱江水体中重金属的沿程变化也显现出明显的差异。除了主要由于底泥中重金属各形态的含量、水体与底泥间的吸附-解吸平衡作用不同,从而导致水体中 Zn、Pb、As 浓度的沿程递减速率不同之外,还突出表现在:①因为两座电站拦河坝的影响,水体中 Zn 和 Pb 的浓度在相应河段出现起伏变化,As 则几乎不受干扰;②不同于 Zn 和 As,水体中 Pb 的浓度在距矿区较远河段才出现最大峰值,这与其迁移转化特性有极大的关系,也受其他未知污染源的影响;③沱江水体中 As 浓度的沿程变化一定程度上反映出与江水流速的负相关关系,但其科学性尚待探究。而水体中 As 浓度在沱江下游出现异常,主要受到临近污染源的作用所致。总之,沱江水体重金属污染主要是由矿区的矿业活动引起,且距离矿区越远,受矿业活动的影响越小。然而,由此产生的重金属污染物顺流而下,已进入澜沧江干流,对其水质构成了一定的威胁。

5 结论与讨论

通过对沱江水体重金属污染现状的综合评价,以及水体中 Zn、Pb、As 的沿程变化特征及其动因的归纳和探讨,可得出以下结论:

(1)按现行国家水质标准,2010 年初枯水期金顶矿区下游沱江水质均为地表水Ⅲ类,但相对于其水体背景值,矿区下游的重金属污染仍较严重,加之底泥中重金属污染物的持续累积,其污染治理难度很大;而在沱江与澜沧江交汇处水质可达Ⅰ类标准,但源自沱江流域的少量重金属污染物已扩散进入澜沧江干流,长此以往,澜沧江水质存在受污染的威胁。

(2) 金顶矿区无疑是泚江水体重金属污染的根本污染源,总体上,随着与矿区距离的增加,其下游泚江水体中 Zn、Pb、As 的浓度均趋于降低,下降速率也趋于减缓;受到各自的理化特性、底泥中重金属各形态的含量和与底泥间的吸附、解吸平衡作用等的差异影响,水体中 Zn、Pb、As 浓度的沿程减小过程也不尽相同。

(3) 泚江河道上的拦河坝对 Zn 和 Pb 的迁移转化过程干扰明显,对 As 则不然。此外,流域内存在除矿山以外的其他重金属污染源,导致了局部河段水体中 Pb 和 As 的浓度异常变化,对 As 的影响尤为突出。

该研究仅依托一次枯水期的实地调查资料与数据,在样品采集、检测过程中也难免存在误差,且缺乏泚江全流域各排污口重金属浓度及水体流速、流量等具体数据,这些都可能影响到评价和分析结果的深度、广度和准确性。同时,由于其他潜在的污染源不明,泚江河水流速、河床形态变化较大,水体中重金属迁移转化的机理复杂、影响因素众多,目前对水体重金属沿程变化的动因分析还较为局限。欲全面弄清泚江水体重金属迁移转化的动因及其影响程度,科学甄别目前尚不明晰的一些判断或推理(如泚江水体 As 浓度的沿程下降速率与流速是否成正比等),必须有针对性地进一步开展更深入、细致的调查与研究。

参考文献

- [1] 耿雅妮. 河流重金属污染研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 262-265.
- [2] 田成秀, 李文明, 郑长远. 河流重金属研究进展[J]. 青海师范大学学报, 2011(4): 25-28.
- [3] 王李鸿, 角媛梅, 明庆忠, 等. 泚江兰坪段生态健康评价指标体系研究

[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(2): 48-52.

(上接第 6847 页)

- [21] 刘根华, 张绍军. 石家庄市城市水文问题的思考及对策[J]. 水文, 2011, 31(2): 93-96.
- [22] SOUSHI KATO, YASUSHI YAMAGUCHI. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM + Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99: 44-54.
- [23] 温兴平, 胡光道, 杨晓峰. 基于 Landsat 影像下广州市植被覆盖变化对城市热岛的影响[J]. 生态环境, 2008, 3(17): 82-88.
- [24] BUI SHAND T A. Urbanization and changes in precipitation, a statistical approach[J]. Journal of Hydrology, 1979, 40: 365-375.
- [25] ERNESTO JAUREGUI. Urban effects on convective precipitation in Mexico city[J]. Atmospheric Environment, 1996, 26: 3383-3389.
- [26] 王玉芳, 任金刚, 黄磊, 等. 城市化对水文水资源的影响[J]. 海河水利, 2011(2): 11-13.
- [27] 李书平, 马京津. 城市化进程对北京地区降水的影响分析[J]. 气象科学, 2011, 31(4): 414-421.
- [28] 张玉英, 平克建. 城市化对水文情势的影响[J]. 治淮, 2001(4): 37-38.
- [29] 周建康, 黄红虎, 唐忆, 等. 城市化对南京市区域降水量变化的影响[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 44-46.
- [30] 李天杰. 上海市区城市化对降水的影响初探[J]. 水文, 1995(3): 34-41.
- [31] 吴息, 王晓云, 曾宪宁, 等. 城市化效应对北京市短时降水特征的影响[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(1): 68-72.
- [32] 金云. 城市化与上海城市水文[J]. 上海水务, 2003, 19(2): 39-41.
- [33] 史明春, 许京怀. 苏州城市化进程中的水文效应浅析[J]. 江苏水利, 2004(6): 36-37.
- [34] 伍文辉. 柳州气候变化分析[J]. 广西气象, 2006, 27(2): 15-17, 21.
- [35] BAIK J J, KIM Y H, CHUN H Y. Dry and moist convection forced by an

- [4] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 滇西泚江流域水体中重金属元素的地球化学特征[J]. 地质通报, 2008, 27(7): 1071-1078.
- [5] 王李鸿, 角媛梅, 明庆忠, 等. 云南省泚江流域水体重金属污染评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(5): 595-600.
- [6] 陈春, 和杏丽. 谈资源整合对泚江流域污染治理的成效[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(6): 55-57.
- [7] 赵筱青, 李丽娇, 杨红辉, 等. 云南泚江流域农田土壤重金属 Pb、Zn、Cd、As 的地球化学特征[J]. 地球学报, 2012, 31(3): 331-340.
- [8] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 兰坪金顶铅锌矿区土壤重金属 Zn、Cd 分布特征研究[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 126-133.
- [9] 苏跃龙. 泚江污染及危害防治对策初探[J]. 云南环境科学, 2004, 23(S1): 118-120.
- [10] 祝慧娜, 袁兴中, 梁婕, 等. 河流环境污染风险模糊综合评价模型[J]. 中国环境科学, 2011, 31(3): 516-521.
- [11] 付建平, 许振成, 任明忠, 等. 基于灰色聚类模型对北江沉积物中重金属的环境质量评价[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(2): 183-185.
- [12] 李名升, 张建辉, 梁念, 等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 617-624.
- [13] 中国环境科学研究院. 地表水环境质量标准. GB 3838-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 角媛梅, 周鸿斌, 史正涛, 等. 铅锌矿区河谷沉积物的磁学特征与重金属污染的关系[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 201-205.
- [15] 李明明, 甘敏, 朱建裕, 等. 河流重金属污染底泥的修复技术研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(1): 67-71.
- [16] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 208-215.
- [17] 云南省云龙县志编纂委员会. 云龙县志[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [18] 赵惠君, 张乐. 关注大坝对流域环境的影响[J]. 长江职工大学学报, 2002, 19(1): 4-8.
- [19] 陈静生, 周家义. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 111-112.
- [20] 张娟, 许金泉. 兰坪泚江中砷污染的化学形态及迁移转化规律[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(2): 75-80.
- [21] 吴学灿, 张秀敏, 等. 云南省泚江流域水污染防治规划[R]. 云南省环境科学研究院, 2009: 19-50.
- urban heat island[J]. Jappl Meteor, 2001, 40: 1462-1475.
- [36] GRADY D P, MOTE T L. Patterns and causes of Atlanta, suburban heat island-initiated precipitation[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42(9): 1273-1284.
- [37] 宋晓猛, 朱奎. 城市化对水文影响的研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(4): 33-35.
- [38] 王玉芳, 任金刚, 黄磊, 等. 城市化对水文水资源的影响[J]. 海河水利, 2011(2): 11-13.
- [39] 朱恒峰, 赵文武, 康慕滨, 等. 水土保持地区人类活动对汛期径流影响的估算[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 400-406.
- [40] 李养龙, 赵凯, 金林, 等. 城市化发展面临的水文问题[J]. 山西水利科技, 2001(4): 86-88.
- [41] 齐冰, 刘洪吉, 汪秀岩. 城市化与环境水文[J]. 吉林水利, 2001(8): 3-5.
- [42] BOVINGA T B, MCCRAYB J E. Issues in urban hydrology: The emerging field of urban contaminant[J]. Hydrology Journal of Arid Environments, 2006, 67: 607-628.
- [43] 宋献方, 夏军, 于静洁, 等. 应用环境同位素技术研究华北典型流域水循环机理的展望[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 527-537.
- [44] KAYANE S X, I TANAKA T, SHIMADA J. A study of groundwater cycle using stable isotope in Sri Lanks[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(10): 1479-1496.
- [45] KAYANE S X, I TANAKA T, SHIMADA J. Conceptual model of evolution of groundwater quality at the wet zone in Sri Lanks[J]. Environmental Geology, 1999, 39(2): 149-164.
- [46] 徐晶, 宋天华. 银川平原典型城市水源地与环境水文地质问题浅析[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(3): 55-56, 59.
- [47] 许乃政, 刘红樱, 魏峰. 长江三角洲地区水文水资源变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12): 7277-7279.