

渭河宝鸡段表层沉积物重金属污染研究

王利军, 卢新卫*, 雷 凯, 翟雨翔, 黄 静

(陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062)

摘 要:采用现场采样及室内分析方法,在对渭河宝鸡段表层沉积物基本理化性质分析的基础上,研究了沉积物中重金属的含量、赋存形态及迁移特征,并进行了污染评价。结果表明,沉积物中 Zn、Co、Cd 和 Hg 的平均含量均高于世界、中国和陕西土壤元素背景值,其中 Cd(中国和陕西土壤元素背景值的 4 倍)和 Hg(中国和世界土壤元素背景值的 7~8 倍、陕西土壤元素背景值的 16 倍)尤为突出。Cr、Ni、Zn、Cu 和 Co 在沉积物中主要以残余态形式存在(50%以上),Pb 主要以可还原态形式存在(近 55%),Mn 和 Cd 主要以乙酸可提取态形式存在(近 50%)。重金属迁移顺序为 Mn(56.70%) $\approx$ Pb(56.65%)>Cd(53.66%)>Co(48.82%)>Cu(43.99%)>Zn(21.93%)>Ni(15.49%)>Cr(11.43%),其中 Mn、Pb、Cd、Co 和 Cu 的危害较大,有近 45%~60%可以发生迁移转化。污染评价结果表明,沉积物主要受到 Cd 和 Hg 污染,具有高的潜在生态危害。

关键词:沉积物;重金属;形态;地累积污染指数法;潜在生态风险指数法

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)02-0334-07

Heavy Metal Pollution in Surface Sediment of Wei River(Baoji), China

WANG Li-jun, LU Xin-wei*, LEI Kai, ZHAI Yu-xiang, HUANG Jing

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: The physicochemical properties of surface sediment in Wei River(Baoji) were studied by pH meter, muffle, susceptibility meter, and laser granularity meter. The results showed that the mean values of pH, χ_{LF} , χ_{HF} , χ_{FD} and LOI in surface sediment were 8.64, $55.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $54.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 1.96% and 2.47%, respectively. The sediment mainly consisted of 5~50 μm (45.61%) and above 50 μm (41.47%) particles. The heavy metals concentrations in sediment were measured by ICP-MS and AFS. The results showed that the mean concentrations of Cu, Pb, Zn, Mn, Co, Ni, Cr, Cd, As and Hg were 18.43, 17.34, 90.57, 562.94, 15.83, 21.51, 55.20, 0.41, 9.59 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ and 0.47 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Compared with International, Chinese and Shaanxi Soil Element Background Value, the contents of Zn, Co, Cd and Hg were higher than them, especially for Cd(4 times of Chinese and Shaanxi Soil Element Background Values) and Hg(7~8 times of International Soil Element Background Value; 16 times of Shaanxi Soil Element Background Value). At the same time, the speciation and transfer of heavy metal elements in sediment were investigated by the modified BCR sequential extraction procedure and ICP-MS. The results showed that Cr, Ni, Zn, Cu and Co were dominated by residue(over 50%), Pb mainly existed in reducible part, Mn and Cd were rich in acetic acid extractable part, and the order of transfer of heavy metal elements was Mn(56.70%) $\approx$ Pb(56.65%)>Cd(53.66%)>Co(48.82%)>Cu(43.99%)>Zn(21.93%)>Ni(15.49%)>Cr(11.43%), in which of them, Mn, Pb, Cd, Co and Cu had higher harm and stronger transfer(about 45%~60%). The pollution and ecological risk assessment results of heavy metal elements in surface sediment of Wei River showed that the sediments were mainly contaminated by Cd and Hg, which had higher potential ecologic harm.

Keywords: sediment; heavy metal; speciation; geo-accumulation pollution index; potential ecological risk index

重金属因具有持久性和难降解性,被称为“化学定时炸弹”^[1]。重金属污染的水体,水相中的重金属元

素含量很低,且易受温度、大气压、水流速度等外界条件影响,容易发生变化,不能客观地反映实际水环境质量^[2-3]。重金属进入水体后,首先在水环境中的液固两相(水体和悬浮颗粒物)发生平衡反应,最终富集在固相当中,在水动力搬运过程中,当其超过水动力搬运能力,便会沉积下来;其次累积在河流沉积物中的污染物在适宜的条件下(如 pH 值、氧化还原电位等)可以通过一系列物理、化学和生物化学过程重新释放

收稿日期:2010-07-30

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0861);陕西师范大学青年基金资助项目

作者简介:王利军(1978—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,讲师,从事环境评价与治理、环境污染修复研究。

E-mail: wanglijun@snnu.edu.cn

* 通讯作者:卢新卫 E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn

进入水体,造成水体的“二次污染”,这一过程不仅可以降低水体的生态功能,还可产生生物毒性效应。因此,水体沉积物是水环境的重要组成部分,既能为水体中的各种生物提供营养物质,又是有毒有害物质的贮藏库,是水环境中污染物的重要载体与污染指示剂^[4-7]。此外,重金属元素的环境行为和毒性效应不仅与重金属元素的含量有关,而且在很大程度上取决于重金属元素在环境介质中的存在形式、迁移转化特征以及生物可利用性等。因此,在沉积物重金属污染研究中,只进行重金属元素的含量分析是远远不够的,对重金属的形态分析是非常必要的^[8-12]。

渭河作为黄河的一级支流,发源于甘肃省渭源县西北鸟鼠山,是关中平原的重要灌溉水源,在陕西境内流经宝鸡、杨凌、咸阳、西安和渭南,于潼关汇入黄河。渭河自西向东从宝鸡市区穿过,重要的支流有清姜河、金陵河、千河等。宝鸡市是陕西省乃至西北的一个重要的重工业城市,在过去的十几年里,宝鸡市已经基本实现了工业化与城市化。但是,在宝鸡市城市化与工业化的过程中,大量的工业废水、生活污水和废弃物排入渭河,对渭河造成了严重的影响,由此引发的环境问题日益突出。然而,有关渭河宝鸡段河流沉积物重金属污染方面的研究鲜见报道。

本文以渭河宝鸡段表层沉积物为研究对象,在对沉积物基本理化性质分析的基础上,研究了河流表层沉积物中重金属元素的含量水平、赋存状态及迁移转化特性,评价了沉积物中重金属的污染状况与生态风险,旨在为渭河流域水环境质量评价与水污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

在现场实际调研的基础上,按照河流水质和底质监测布点的原则(在有重要支流入口处上下游设监测断面)布设采样点(见图1),2006年11月在每个采样点采集0~10 cm 河流表层沉积物样品(混合样)并装入聚乙烯塑料样品袋中,共采集样品8个,每个样品重约2 kg。

将采集好的样品带回实验室,在通风、避光、室温的条件下自然风干,然后破碎,过1 mm 的尼龙筛。一部分用长春光学精密机械与物理研究所研制的 ZM-1 型振动磨研磨使其粒径小于200 目,研磨好的样品密封在自封的聚乙烯塑料样品袋中进行重金属全量和形态分析,没有研磨的样品用于基本理化性质分析。

1.2 样品分析与质量控制

利用 PHSJ-4A 型 pH 计(上海雷磁)、马弗炉、MS2 型磁化率仪(英国 Bartington 公司)、Mastersizer-S 型激光粒度仪(英国 Malvern 仪器有限公司)分析河流沉积物的 pH、烧失量(LOI)^[13]、低频磁化率(χ_{LF})、高频磁化率(χ_{HF})、频率磁化率(χ_{FD})以及粒径组成等基本理化性质。

采用 AFS-810 型双道原子荧光分光光度计(北京吉天仪器有限公司)分析河流沉积物中 As 和 Hg 的含量水平^[14-15];利用 X-7 Series 型 ICP-MS(美国热电公司)分析河流沉积物中 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr 和 Cd 的含量水平;同时,利用修正的 BCR 连续提取技术^[16-17](表1),借助 ICP-MS 分析 Cu、Pb、Zn、Mn、

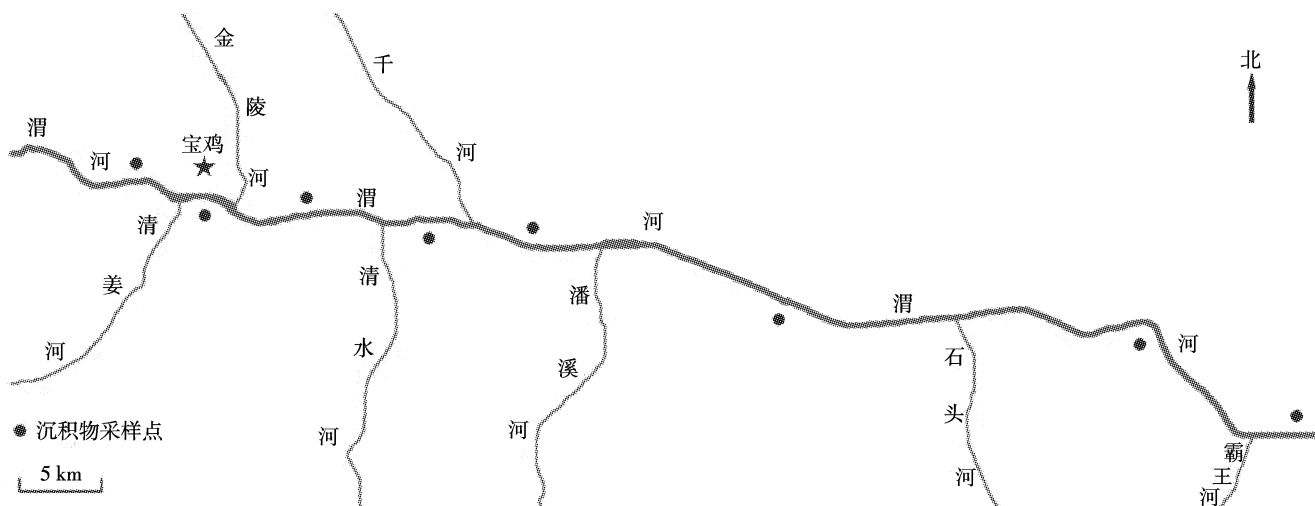


图1 河流沉积物采样点

Figure 1 The sampling sites of river sediment in Wei River(Baoji)

表 1 修正 BCR 法提取分析流程

Table 1 The extracting and analytical flow of the modified BCR

步骤	提取剂	样品(g)/溶液(mL)	提取时间	形态
1	0.11 mol·L ⁻¹ HOAc	1:40	振荡 16 h	乙酸可提取态
2	0.5 mol·L ⁻¹ NH ₂ OH·HCl,pH=1.5	1:40	振荡 16 h	可还原态
3	8.8 mol·L ⁻¹ H ₂ O ₂ ,pH=2~3,85 ℃水浴	1:10	1 h,偶尔振荡	可氧化态
	8.8 mol·L ⁻¹ H ₂ O ₂ ,pH=2~3,85 ℃水浴	1:10	1 h,偶尔振荡	
	1.0 mol·L ⁻¹ NH ₄ Ac,pH=2	1:50	振荡 16 h	
4	王水或 HCl/HNO ₃ /HClO ₄	1:10		残余态

Co、Ni、Cr 和 Cd 在不同形态中的含量水平。

在进行河流沉积物重金属含量分析时,利用水系沉积物标样 GSD-12 和土壤标样 GSS-1(购自地矿部物探化所)进行质量控制,所分析元素的误差均在 5% 以内。

1.3 评价方法

目前,国内外评价河流沉积物重金属污染的方法比较多,普遍采用的方法有地累积污染指数法、潜在生态风险指数法、脸谱图法、综合污染指数法、内梅罗综合指数法、污染负荷指数法、沉积物富集系数法和次生相富集系数法,这些方法都有各自的优缺点和适用范围^[18]。鉴于地累积污染指数法考虑了人类活动对环境的影响和成岩作用对背景值的影响,潜在生态风险指数法考虑了重金属元素的毒性、在沉积物中的迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感性,以及重金属区域背景值差异,消除了区域差异和异源污染的影响,本文采用地累积污染指数法和潜在生态风险指数法对渭河宝鸡段表层河流沉积物重金属进行污染和生态风险评价,评价指标为 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 和 Hg。

1.3.1 地累积污染指数法

地累积污染指数法是由德国海德堡大学沉积物研究所的 Müller 于 1969 年提出,是一种研究水体沉积物中重金属污染的定量指标^[19],其计算公式为:

$$I_{\text{Geo}}=\log_2(C_i/kB_i)$$

式中: I_{Geo} 为地累积污染指数; C_i 为重金属元素 i 的实测浓度; B_i 为所测元素的环境背景值,本研究中取陕西土壤元素背景值(表 6); k 为常数, $k=1.5$ 。根据 I_{Geo} 数值的大小,可以将重金属污染程度分为 7 个等级,即:0~6 级(表 2)。

1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是瑞典学者 Lars Hakanson 在 1980 年应用沉积学原理建立的一套评价重金属污染以及生态风险性的方法^[20],其计算公式为:

表 2 地累积污染指数分级

Table 2 The grade of the geo-accumulation pollution index

污染程度	无污染	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重污染	重污染	严重污染
级别	0	1	2	3	4	5	6
I_{Geo}	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	≥ 5

①重金属元素污染系数

$$C_f^i=C_i/C_n^i$$

式中: C_f^i 为重金属元素 i 的污染系数; C_i 为重金属元素 i 的实测浓度; C_n^i 为重金属元素 i 的评价参比值,一般采用工业化以前的沉积物中重金属元素最高背景值(表 3),也有取区域土壤元素背景值^[21],本研究分别以工业化以前沉积物中重金属元素最高背景值和陕西省土壤元素背景值为评价参比。

表 3 重金属元素背景参考值和毒性系数

Table 3 The background value and toxicity coefficient of heavy

metal elements							
元素	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn
$C_n^i/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.25	1	15	50	70	90	175
T_r^i	40	30	10	5	5	2	1

②重金属污染程度

$$C_d=C_f^1+C_f^2+\cdots+C_f^i+\cdots(i=1\cdots m)$$

③重金属元素 i 的潜在生态风险系数

$$E_r^i=T_r^i\cdot C_f^i$$

式中, E_r^i 为金属元素 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属元素 i 的毒性响应系数,反映重金属元素的毒性水平以及生物对重金属污染的敏感程度(表 3)。

沉积物中多种重金属元素总的潜在生态风险指数 E_{RI} 等于所有重金属元素潜在生态风险系数的总和,计算公式为:

$$\begin{aligned} E_{\text{RI}} &= \sum E_r^i (i=1\cdots m) = \sum T_r^i \cdot C_f^i (i=1\cdots m) \\ &= \sum T_r^i \cdot C_i / C_n^i (i=1\cdots m) \end{aligned}$$

重金属污染评价指标及其污染程度和潜在生态风险程度的关系如表 4。

表 4 潜在生态风险指数分级

Table 4 The grade of the potential ecological risk index

C_i^j	单因子污染物污染程度	C_d	总体污染程度	E_i^j	单因子污染物生态危害程度	E_{RI}	总的潜在生态风险程度
<1	低	<8	低	<40	低	<150	低
1~3	中等	8~16	中等	40~80	中等	150~300	中等
3~6	重	16~32	重	80~160	较重	300~600	重
≥6	严重	≥32	严重	160~320	重	≥600	严重
				≥320	严重		

2 结果与讨论

2.1 沉积物基本理化性质

表 5 给出了渭河宝鸡段表层沉积物的基本理化性质:渭河宝鸡段表层沉积物的 pH 范围是 8.22~8.98, 平均值是 8.64, 呈现微碱性;低频磁化率(χ_{lf})和高频磁化率(χ_{hf})的范围分别是 $(39.2\sim80.5)\times10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(38.3\sim80.3)\times10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值分别是 $55.2\times10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $54.2\times10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$; 频率磁化率(χ_{fd})的范围是 0.25%~5.22%, 平均值是 1.96%; 烧失量(LOI)的范围是 1.74%~3.94%, 平均值是 2.47%; 粒径分析表明, 渭河宝鸡段表层沉积物主要由 5~50 μm (45.61%) 和 50 μm 以上(41.47%)的粒径颗粒组成。

2.2 沉积物中重金属元素含量水平

渭河宝鸡段表层沉积物中重金属元素的测试统计结果见表 6。由表 6 可见, 渭河宝鸡段表层沉积物

中 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr、Cd、As 和 Hg 的含量范围分别为 9.31~26.33、11.63~24.62、38.28~321.04、456.29~748.05、12.13~18.35、15.78~29.59、43.04~73.13、0.23~0.84、6.39~13.67 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 0.07~1.96 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量分别为 18.43、17.34、90.57、562.94、15.83、21.51、55.20、0.41、9.59 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 0.47 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。重金属元素 Zn、Co、Cd 和 Hg 的平均含量均高于世界、中国及陕西土壤元素背景值, 尤其是 Hg 和 Cd。渭河宝鸡段表层沉积物中 Hg 的平均含量是中国及世界土壤元素背景值的 7~8 倍、陕西土壤元素背景值的 16 倍, Cd 的平均含量是中国及陕西土壤元素背景值的 4 倍。从变异系数来看, Hg、Zn 和 Cd 变异系数较大, 说明其含量受人类活动影响较大。

2.3 沉积物中重金属元素存在形态及其危害

图 2 给出了渭河宝鸡段表层沉积物中重金属元素在各形态的百分比。可以看出, 渭河宝鸡段表层沉

表 5 河流沉积物理化性质

Table 5 The physical and chemical properties of river sediment

指标	pH	$\chi_{lf}/\times10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	$\chi_{hf}/\times10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	$\chi_{fd}/\%$	LOI/%	<5 $\mu\text{m}/\%$	5~50 $\mu\text{m}/\%$	>50 $\mu\text{m}/\%$
最小值	8.22	39.2	38.3	0.25	1.74	4.76	30.89	8.07
最大值	8.98	80.5	80.3	5.22	3.94	30.86	61.06	62.02
平均值	8.64	55.2	54.2	1.96	2.47	12.92	45.61	41.47

表 6 河流沉积物重金属含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 6 The content of heavy metals in river sediment($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

元素	最小值	最大值	平均值	标准偏差	变异系数	世界土壤背景值 ^[22]	中国土壤背景值 ^[22]	陕西土壤背景值 ^[22]
Cu	9.31	26.33	18.43	7.56	0.41	30	22.6	21.4
Pb	11.63	24.62	17.34	4.50	0.26	35	26.0	21.4
Zn	38.28	321.04	90.57	93.72	1.03	9	74.2	69.4
Mn	456.29	748.05	562.94	101.58	0.18	1 000	583	557
Co	12.13	18.35	15.83	1.99	0.13	8	12.7	10.6
Ni	15.78	29.59	21.51	4.62	0.21	50	26.9	28.8
Cr	43.04	73.13	55.20	10.29	0.19	70	61.0	62.5
Cd	0.23	0.84	0.41	0.26	0.64	0.35	0.097	0.094
As	6.39	13.67	9.59	2.61	0.27	6	11.2	11.1
Hg	0.07	1.96	0.47	0.64	1.37	0.06	0.065	0.030

积物中,Cr、Ni、Zn、Cu 和 Co 主要以残余态形式存在(残余态占4态总和50%以上);Pb 主要以可还原态形式存在(近55%);Mn 和 Cd 主要以乙酸可提取态形式存在(近50%)。在元素BCR形态分析中,残余态是“稳定态”,比例越高,可迁移部分、生物可利用部分越少,对环境的影响也就越小;乙酸可提取态、可还原态和可氧化态是“非稳定态”,比例越高,可迁移部分、生物可利用部分越高,对环境影响也就越大。

由图2可见,在酸性条件下,重金属元素的迁移顺序是Mn(45.94%)>Cd(43.75%)>Co(31.53%)>Cu(11.32%)>Zn(4.54%)>Cr(2.30%)>Pb=Ni(0.00%),其中Mn、Cd 和 Co 危害较大;在还原条件下,重金属的迁移顺序是Pb(54.85%)>Cu(28.92%)>Co(16.90%)>Zn(14.33%)>Cd(9.51%)>Mn(8.59%)>Ni(7.23%)>Cr(4.44%),其中Pb 和 Cu 危害较大;在氧化条件下,重金属的迁移顺序是Ni(8.27%)>Cr(4.69%)>Cu(3.75%)>Zn(3.06%)>Mn(2.17%)>Pb(1.80%)>Co=Cd(0.40%),重金属危害相对较小;在环境介质当中,整体迁移的顺序是Mn(56.70%)≈Pb(56.65%)>Cd(53.66%)>Co(48.82%)>Cu(43.99%)>Zn(21.93%)>Ni(15.49%)>Cr(11.43%),其中Mn、Pb、Cd、Co 和 Cu 危害较大,有近45%~60%可以发生迁移转化,进入水体或被生物间接利用,通过食物链进入人体危害健康。

2.4 沉积物重金属污染评价

2.4.1 基于地累积污染指数法的污染评价

表7是基于Müller地累积污染指数法的沉积物重金属污染评价结果。可以看出,渭河宝鸡段表层沉积物中Cu、Pb、Zn、Cr 和 As 的地累积污染指数的平

均值均小于零,总体上未受污染,但Zn的地累积污染指数的最大值大于1,说明局部地段沉积物中Zn出现偏中度污染。沉积物中Cd和Hg的地累积污染指数平均值分别为1.33和2.48,分别处于偏中度污染水平和重度污染水平。Cd和Hg的地累积污染指数的最大值分别为2.58和5.44,说明在局部地段渭河表层沉积物中Cd和Hg分别达到中度污染水平和严重污染水平。由此可见,渭河宝鸡段表层沉积物的主要污染元素是Cd和Hg。

表7 基于地累积污染指数重金属污染评价

Table 7 The assessment of heavy metal pollution based on geo-accumulation pollution index

I_{geo}	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg
最小值	-1.79	-1.47	-1.44	-1.12	0.68	-1.38	0.64
最大值	-0.29	-0.38	1.63	-0.36	2.58	-0.26	5.44
平均值	-0.93	-0.93	-0.57	-0.79	1.33	-0.85	2.48

2.4.2 基于潜在生态风险指数法的生态风险评价

表8是以工业化以前沉积物中重金属元素最高背景值为评价参考值,基于Lars Håkanson潜在生态风险指数法的重金属污染评价结果。从表8可见,重金属污染程度指数 C_d 和总的潜在生态风险指数 E_{RI} 分别为4.68和98.74,表明渭河宝鸡段表层沉积物重金属总体处于低污染水平,潜在生态风险较低。从单个重金属元素的污染系数 C_i^f 及潜在生态风险系数 E_i^f 来看,Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 和 As 处于低等污染水平和低等生态危害水平,但Zn在局部达到中等污染水平;对于Hg,污染水平和生态危害水平均达到了中等水平,同时在局部达到了严重污染水平和重度生态危害水

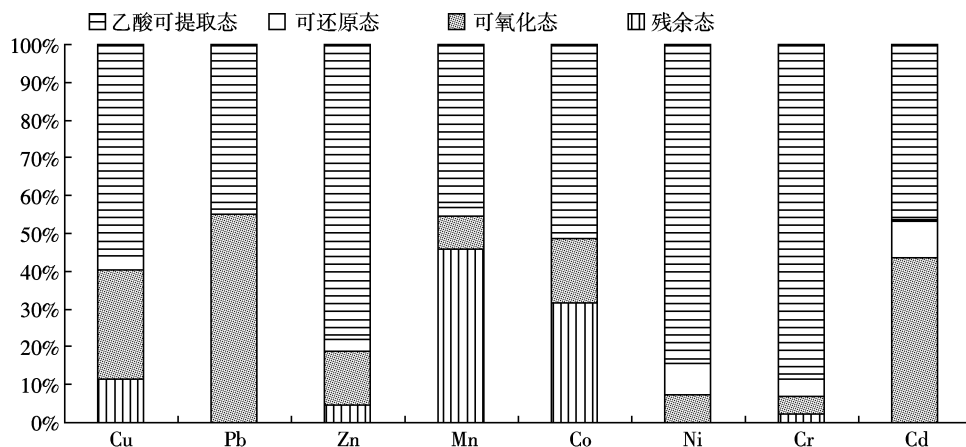


图2 河流沉积物重金属形态分布

Figure 2 The distribution of speciation of heavy metals in river sediment

平。由此可见,渭河宝鸡段表层沉积物中 Hg 污染应当引起有关部门重视。

表 8 基于工业化前背景值的潜在生态风险指数法
重金属污染评价

Table 8 The potential ecological risk index based on heavy metal background values before industry period

元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg
C_i^j	最小值	0.19	0.17	0.22	0.48	0.23	0.43
	最大值	0.53	0.35	1.84	0.81	0.84	0.91
	平均值	0.37	0.25	0.52	0.61	0.41	0.64
E_i^j	最小值	0.93	0.83	0.22	0.96	6.79	4.26
	最大值	2.63	1.76	1.84	1.63	25.25	9.11
	平均值	1.84	1.24	0.52	1.23	12.37	6.39
C_d							4.68
E_{RI}							98.74

注:以工业化以前沉积物中重金属元素最高背景值为评价参考值。

表 9 是以陕西土壤背景值为评价参考值,基于 Lars Håkanson 潜在生态风险指数法重金属污染评价结果。从表 9 可以看出,重金属污染程度指数 C_d 和总的潜在生态风险指数 E_{RI} 分别为 24.76 和 777.85,表明渭河宝鸡段表层沉积物重金属总体处于重污染水平,潜在生态风险较重。从单个重金属元素的污染系数 C_i 和潜在生态危害系数 E_i^j 来看,Cu、Pb、Cr 和 As 处于低等污染水平和低等生态危害水平,Zn 中污染水平,Cd 处于重污染水平和重生态危害水平;对于 Hg,污染水平和生态危害水平均达到了严重水平。由此可见,渭河宝鸡段表层沉积物中 Cd 和 Hg 污染应当引起有关部门重视。

表 9 基于陕西土壤背景值的潜在生态风险指数法
重金属污染评价

Table 9 The potential ecological risk index based on Shaanxi soil element background value

元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg
C_i^j	最小值	0.44	0.54	0.55	0.69	2.41	0.58
	最大值	1.23	1.15	4.63	1.17	8.95	1.23
	平均值	0.86	0.81	1.30	0.88	4.39	0.86
E_i^j	最小值	2.18	2.72	0.55	1.38	72.19	5.75
	最大值	6.15	5.03	4.63	2.34	268.57	12.31
	平均值	4.31	4.05	1.30	1.77	131.56	8.64
C_d							24.76
E_{RI}							777.85

注:以陕西土壤背景值为评价参考值。

3 结论

(1)渭河宝鸡段表层沉积物的 pH、 χ_{LF} 、 χ_{HF} 、 χ_{FD} 和 LOI 分别为 8.64、 55.2×10^{-8} 、 $54.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 、1.96% 和 2.47%,沉积物主要由粒径 5~50 μm (45.61%) 和 50 μm 以上 (41.47%) 的颗粒组成。

(2)重金属含量分析表明,渭河宝鸡段表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr、Cd、As 和 Hg 含量分别是 18.43、17.34、90.57、562.94、15.83、21.51、55.20、0.41、9.59 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.47 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。同世界、中国和陕西土壤元素背景值比较发现,Cu、Pb、Ni 和 Cr 均小于世界、中国和陕西土壤元素背景值,Mn、Fe 和 As 介于三者之间,Zn、Co、Cd 和 Hg 均高于世界、中国和陕西土壤元素背景值,尤其是 Cd 和 Hg。

(3)渭河宝鸡段表层沉积物重金属形态分析表明,Cr、Ni、Zn、Cu 和 Co 主要以残余态的形式存在(残余态占四态总和的 50%以上),Pb 主要以可还原态形式存在(近 55%);Mn 和 Cd 主要以乙酸可提取态形式存在(近 50%)。迁移的顺序是:Mn(56.70%) $\approx$ Pb(56.65%)>Cd(53.66%)>Co(48.82%)>Cu(43.99%)>Zn(21.93%)>Ni(15.49%)>Cr(11.43%),其中 Mn、Pb、Cd、Co 和 Cu 危害较大,有近 45%~60% 可以发生迁移转化,进入水体或被生物体间接利用,通过食物链进入人体危害健康。

(4)地累积污染指数及潜在生态风险指数评价结果表明,渭河宝鸡段表层沉积物主要受 Cd 和 Hg 污染,具有高的潜在生态危害,应当引起有关部门重视。

参考文献:

- [1] Stigliani W M, Doelman P, Salomons W, et al. Chemical time bombs—predicting the unpredictable[J]. *Environment*, 1991, 33:4–30.
- [2] 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(3):212–219.
- [3] JIA Z B, ZHAO Z J, YANG X M, et al. Pollution and assessment of heavy metals in Yangchong River, Maozhou River and Dongbao River sediments, Shenzhen[J]. *Environmental Chemistry*, 2001, 20(3):212–219.
- [4] 刘芳文, 颜文, 王文质, 等. 珠江口沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(3):34–38.
- [5] LIU F W, YAN W, WANG W Z, et al. Pollution of heavy metals in the Pear River Estuary and its assessment of potential ecological risk[J]. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(3):34–38.
- [6] Dexter K S, Ward N I. Mobility of heavy metals within fresh water sediments affected by motorway storm water [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 334–335:271–277.
- [7] 白晓慧, 杨万东, 陈华林, 等. 城市内河沉积物对水体污染修复的影响

- 响研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5):562-565.
- BAI X H, YANG W D, CHEN H L, et al. Influence of sediment in city river on water pollution restoration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5):562-565.
- [6] Tylmann W. Lithological and geochemical record of anthro - pogenic changes in recent sediments of a small and shallowlake(Lake Pusty Staw, Northern Poland)[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2005, 33:313-325.
- [7] 石志芳, 姜 霞, 杨苏文, 等. 巢湖表层沉积物中重金属污染的时空变化特征及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 948-954.
- SHI Zhi-fang, JIANG Xia, YANG Su-wen, et al. The spatial and temporal variation characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Chaohu, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):948-954.
- [8] Fan W H, Wang W X, Chen J S, et al. Cu, Ni, and Pb speciation in surface sediments from a contaminated bay of Northern China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44:816-832.
- [9] Akcay H, Oguz A, Karapire. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz River sediments[J]. *Water Research*, 2003, 37:813-822.
- [10] Farkas A, Erratico C, Vigano L. Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po [J]. *Chemosphere*, 2007, 68:761-768.
- [11] Kunwar P S, Dinesh M, Vinod K, et al. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti River sediments:A tributary of the Ganges, India[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312:14-27.
- [12] 张凤英, 阎百兴, 朱立禄. 松花江沉积物重金属形态赋存特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):163-167.
- ZHANG Feng-ying, YAN Bai-xing, ZHU Li-lu. Speciation of heavy metals in sediment of the Songhua River, Northeast of China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):163-167.
- [13] Irabien M J, Velasco F. Heavy metals in Oka River sediments(Urdaibai National Biosphere Reserve, Northern Spain):Lithogenic and anthro-pogenic effects[J]. *Environmental Geology*, 1999, 37(1-2):54-63.
- [14] 王利军, 卢新卫, 雷 凯. 宝鸡市街尘中 As 和 Hg 含量及其环境风险评价[J]. 环境科学研究, 2007, 20(5):35-38.
- WANG L J, LU X W, LEI K. The contents of arsenic and mercury and environmental risk assessment of street dusts in Baoji[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(5):35-38.
- [15] 蔡顺香. 双道原子荧光光谱法同时测定土壤中的砷和汞[J]. 光谱实验室, 2005, 22(1):120-122.
- Cai S X. Simultaneous determination of trace arsenic and mercury in soil by atomic fluorescence spectrometry[J]. *Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2005, 22(1):120-122.
- [16] Sahuquillo A, Rauret G, Bianchi M, et al. Mercury determination in solid phases from application of the modified BCR-sequential extraction procedure:A valuable tool for assessing its mobility in sediments [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2003, 375:578-583.
- [17] Umoren I U, Udoh A P, Udousoro I I. Concentration and chemical speciation for the determination of Cu, Zn, Ni, Pb and Cd from refuse dump soil using the optimized BCR sequential extraction procedure [J]. *The Environmentalist*, 2007, 27:241-252.
- [18] 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(8):31-36.
- DING X G, YE S Y, GAO Z J. Methods of heavy metal pollution evaluation for off-shore sediments[J]. *Marine Geology Letters*, 2005, 21(8):31-36.
- [19] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2:108-118.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control - A sediment logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14:975-1001.
- [21] 马秀平, 井维鑫, 王 茜, 等. 丹江水系表层沉积物重金属污染及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6):1180-1186.
- MA Xiu-ping, JING Wei-xin, WANG Qian, et al. Heavy metal pollution in surface sediment of Dan River and its ecological risk assessment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1180-1186.
- [22] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990:87-90; 330-496.
- China Environment Protection Agency, The Total Station of China Environment Monitoring. Chinese soil element background values [M]. Beijing:China Environment Science Press, 1990:87-90, 330-496.