

# 渭河中下游河道沉积物重金属污染生态风险评价

兰金秀<sup>1,3</sup>, 张风宝<sup>1,2</sup>, 杨明义<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 河南省永城市园林绿化管理局, 河南 永城 476600)

**摘要:**以渭河中下游河道沉积物为研究对象,在分析12个干流采样点和7个一级支流采样点沉积物中Pb、Zn、Cr、Cu、Co和Ni六种重金属元素含量变化的基础上,采用Hakanson潜在生态风险指数法对河道沉积物重金属污染的生态风险程度进行了评价。渭河中下游河道19个采样点沉积物中Pb、Zn、Cr、Cu、Co和Ni六种重金属元素含量均不同程度超过了陕西省土壤重金属背景值,除Pb外,支流沉积物中其他五种重金属的平均含量都低于干流沉积物;Hakanson潜在生态风险评价结果显示,渭河中下游采样点的六种重金属元素单项生态风险指数均小于40,综合潜在生态风险指数均小于50,潜在生态风险处于较低水平,表明渭河中下游河道沉积物中重金属富集量小,基本不构成生态风险。

**关键词:**渭河; 沉积物; 重金属; 生态风险

**中图分类号:** P595

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)04-0077-06

## Assessing Heavy Metal Pollution Risk of Sediment in the Channel of the Middle and Lower Reaches of Weihe River

LAN Jinxiu<sup>1,3</sup>, ZHANG Fengbao<sup>1,2</sup>, YANG Mingyi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Landscaping Administration of Yongcheng City in Henan, Yongcheng, He'nan 476600, China)

**Abstract:** In order to understand the variations in sediment heavy metal pollution in the channel of middle and lower reaches of Weihe River, 12 sampling sites in main river channel and 7 sampling sites in tributary river channel were chosen. The changes in contents of Pb, Zn, Cr, Cu, Co and Ni in sediments were analyzed and the ecological risk assessment of heavy metals in sediment was conducted by using the method of potential ecological risk index invented by Hakanson. All heavy metal contents in sediment were higher than the soil background values of Shaanxi Province in all sampling sites. Except for Pb, the contents of the other five heavy metals in the sampling sites of the main river channel were higher than in the sampling sites of the tributary river channel. The results from the method of potential ecological risk index invented by Hakanson indicated that the single potential ecological risk index of all measured heavy metals in all sampling sites was lower than 40 and the integrated potential ecological risk index of all sampling sites was lower than 50. The potential ecological risk of heavy metals in channel of the middle and low reaches of Weihe River was at the low level. These results implied that the heavy metal accumulation was low and the potential ecological risk of all measured heavy metals hardly existed in the channel of the middle and lower reaches of Weihe River.

**Keywords:** Weihe River; sediment; heavy metals; ecological risk

河道沉积物是河流水环境的基本组成部分,它既可以为水体中的生物提供营养物质,又是各类污染物的载体和蓄积库<sup>[1-4]</sup>。重金属等污染物通过城市排污、工厂排污、流域侵蚀、大气沉降及人为释放等多种途径进入河流、湖泊等水体环境中,绝大部分吸附在

固体沉积物上,但在水环境发生改变后,可能会重新进入上覆水体,造成二次污染<sup>[5-6]</sup>,威胁用水安全。因此,开展河流沉积物重金属污染及生态风险研究,对控制和改善河流环境质量、保证水质安全和人居环境安全具有重要的意义。

渭河横贯关中平原,是陕西省境内最大的河流,也是黄河的一级支流。渭河中下游流经宝鸡、咸阳、西安、渭南等城市,是陕西省的生态廊道和沿岸城市休闲娱乐的主要场所,然而河流沿岸污染物的排入使渭河受到了污染<sup>[7]</sup>。目前对于渭河中下游河道污染的研究,主要集中在对渭河水污染的研究,而对于河道游沉积物中重金属含量、分布特征及生态风险评价的系统研究还较为薄弱<sup>[8-12]</sup>,一定程度上限制了渭河水质污染的防治、渭河河道修复的深入研究。因此在研究渭河水质污染的过程中,加强渭河河道沉积物中重金属污染的研究是非常必要的,也是非常重要的。本文在分析渭河中下游干流和支流多个采样点沉积物中主要重金属元素含量的基础上,对其生态风险进行评价,以期为控制和改善渭河河流环境质量、保证渭河水质安全及河滨人居安全提供基础数据支撑。

1 材料方法

1.1 样品采集

采样时间为 2015 年 9 月,在渭河河道中下游自宝鸡林家村至潼关共设置 19 个采样点,其中在渭河干流参照国控监测断面设置 12 个采样点,在渭河 7 条主要支流入渭处设置 7 个采样点,利用 GPS 定位,采样点坐标见表 1。在每个采样点选取 3 个次级采样点采取表层 10 cm 深的底泥约 1.5 kg,共计采集样品 57 个,将泥样装入自封袋,进行标记,带回实验室进行分析。

表 1 渭河中下游河道采样点坐标

编号	采样点	东经	北纬
1	干流 林家村	107°03'28.74"	34°22'20.02"
2	一级支流 清姜河入渭	107°07'02"	34°21'37"
3	干流 卧龙寺桥	107°18'09.77"	34°21'00.31"
4	干流 虢镇桥	107°24'00.56"	34°20'26.14"
5	干流 常兴桥	107°49'57.15"	34°14'10.23"
6	一级支流 黑河入渭	108°25'01.22"	34°11'46.04"
7	干流 兴平	108°30'18.57"	34°13'43.92"
8	一级支流 涝河入渭	108°35'00.38"	34°12'58.06"
9	干流 咸阳铁桥	108°42'16.40"	34°19'18.14"
10	一级支流 沔河入渭	108°44'40.28"	34°18'41.63"
11	干流 草滩	108°58'02.73"	34°22'20.02"
12	一级支流 灞河入渭	109°00'39.16"	34°25'21.80"
13	干流 耿镇桥	109°05'58.98"	34°28'02.16"
14	干流 新丰镇大桥	109°14'35.29"	34°26'17.07"
15	干流 沙王渡	109°28'36.29"	34°32'53.79"
16	干流 树园	109°32'55.31"	34°31'28.83"
17	一级支流 洛河入渭	110°02'47.05"	34°45'43.03"
18	干流 潼关吊桥	110°14'09.82"	34°36'57.53"
19	一级支流 泾河入渭	108°59'50.42"	34°27'3.24"

1.2 样品分析及测定

将样品放置于阴凉处自然风干,剔除样品中植物

根系、有机残渣等。风干后的样品研磨过 100 目的尼龙筛备用。采用王水消解法对样品进行消解,使用 AES 测定样品中的 Pb,Zn,Cr,Cu,Co 和 Ni 六种重金属元素含量。

1.3 评价方法

采用瑞典学者 Hakanson<sup>[13]</sup> 提出的潜在生态风险指数法进行评价,该方法可以综合反映沉积物中重金属对生态环境的影响潜力。潜在生态风险指数计算公式如下:

单项重金属污染指数:

$$C_i^f = C_d^i / C_b^i \tag{1}$$

单项重金属的潜在生态风险指数:

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_i^f \tag{2}$$

沉积物多种重金属综合潜在生态风险指数:

$$RI = \sum T_r^i \cdot C_d^i / C_b^i \tag{3}$$

式中: $C_i^f$  为第  $i$  种重金属元素的污染指数; $C_d^i$  为第  $i$  种重金属元素的实测值; $C_b^i$  为第  $i$  种重金属元素的评价参比值,本研究采用陕西省土壤重金属元素的背景值<sup>[14]</sup>,Pb,Zn,Cr,Cu,Co 和 Ni 参比值分别为 20.9,66.1,61.1,20.1,10.1,27.7 mg/kg; $E_r^i$  为第  $i$  种重金属元素的潜在生态风险指数; $T_r^i$  为毒性响应系数,Pb,Zn,Cr,Cu,Co 和 Ni 的毒性响应系数分别为 5,1,2,5,5,5;RI 为重金属综合潜在生态风险指数。Hakanson 潜在生态风险指标及分级见表 2。

表 2 Hakanson 潜在生态风险指标及分级

$E_r^i$	RI	生态风险程度
≤40	≤50	较低
40~80	50~100	中等
80~160	100~200	较高
160~320	≥200	高
≥320	—	很高

2 结果与分析

2.1 沉积物重金属含量分析

渭河干流采样点沉积物中重金属含量见图 1,Pb,Zn,Cr,Cu,Co 和 Ni 的含量范围分别为 16.16~40.50,54.42~175.75,51.35~113.48,15.55~38.76,12.52~19.74,25.26~48.47 mg/kg,平均值分别为 24.02,93.65,70.94,26.78,15.98,36.30 mg/kg,与陕西省土壤背景值相比均不同程度的超出背景值,其中以 Zn 的含量超出最多,说明渭河沉积物中重金属已有不同程度的富集。六种元素分别在卧龙寺桥、虢镇桥、新丰镇桥处含量较高,在沙王渡、树园处含量较低。主要是由于宝鸡市内拥有矿物、冶金、化工、电子、建材等多种工业企业,大量的工业废水和生活污水排入渭

河,且由于渭河在宝鸡境内径流量较小,自净能力相对较弱,故渭河流过宝鸡市后,流至下游卧龙寺桥处沉积物中重金属元素含量较高,而虢镇有电子电器、化工、秦岭铜厂等企业,故六种元素也保持较高的含

量<sup>[15]</sup>。而沙王渡、树园由于灞河、沔河等径流量较大的支流的汇入,使得渭河径流量明显增多,自净能力强,且沙王渡、树园已经远离咸阳、西安等大型城市,受到的人为影响较小,故重金属含量相对较低。

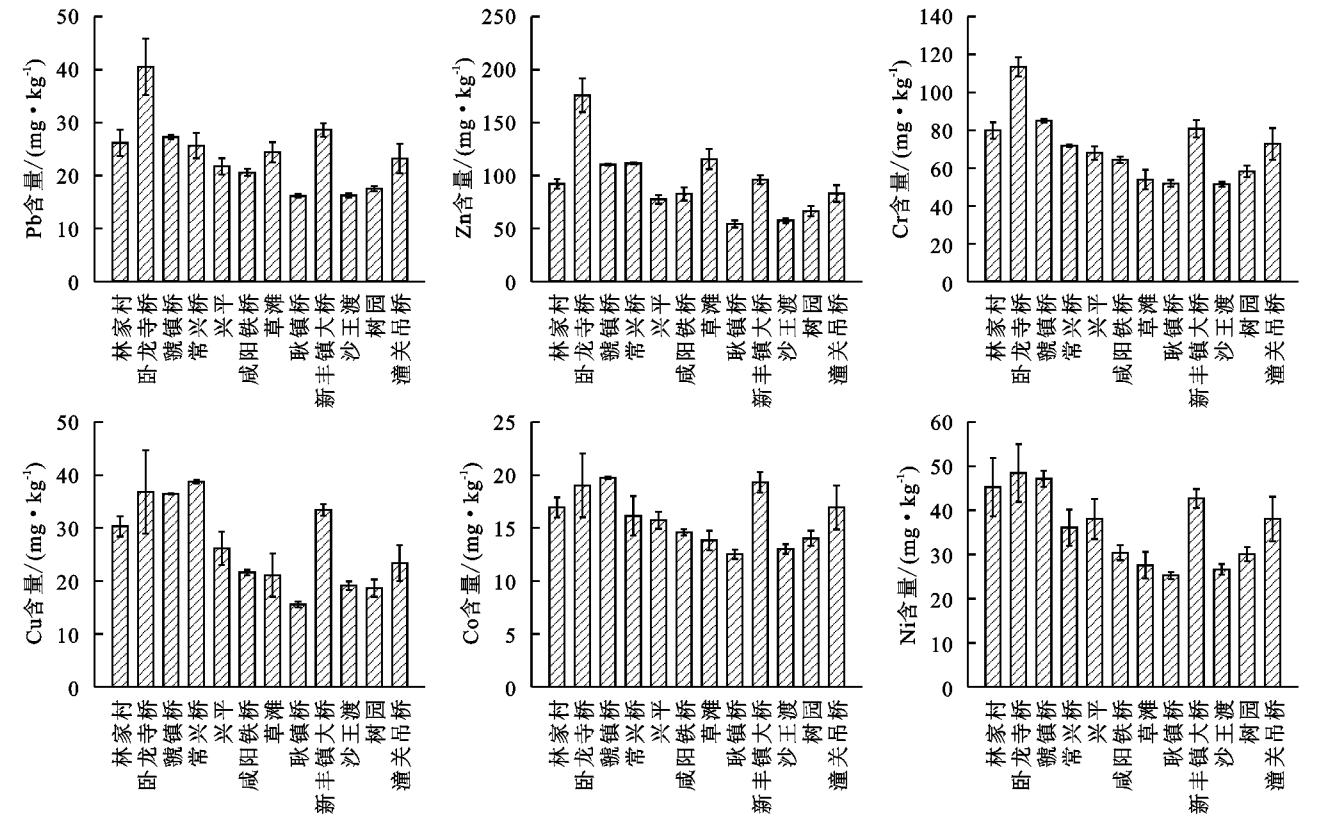


图 1 渭河中下游干流采样点沉积物中重金属含量

渭河中下游主要支流采样点沉积物中重金属含量见图 2,Pb,Zn,Cr,Cu,Co 和 Ni 的含量范围分别为 19.47~51.66,37.62~120.67,39.42~78.07,13.45~38.80,10.67~19.66,18.65~43.47 mg/kg,平均值分别为 29.19,82.04,60.51,24.83,15.34,31.05 mg/kg,不同程度的超出了陕西省土壤背景值,其中以 Zn 的含量超出相对较多,说明渭河支流沉积物也有不同程度的重金属富集现象。总体上看,七条支流中以清姜河入渭处富集较为严重,涝河入渭处重金属含量最低。这是由于清姜河流经宝鸡市,在市区汇入渭河,宝鸡市内有各类工业企业,工业废水的排放已经对清姜河造成了一定的污染。而涝河是位于渭河的南岸支流,水质清澈,泥沙含量少,且沿途并未流经一些较大的城市,受到的人为影响较小,所以重金属含量相对较低。

通过对渭河中下游河道干流和支流沉积物重金属含量对比,发现除 Pb 外,支流沉积物中其他五种重金属元素的平均含量都低于干流沉积物的含量,干流沉积物中 Zn 和 Cr 的平均含量高出支流中 Zn 和 Cr 的含量较多,其他元素含量差异较小,说明渭河干流沉积物中 Zn

和 Cr 的富集较支流高。清姜河入渭和灞河入渭处沉积物中 Pb 和 Zn 两种重金属含量均高于渭河干流的平均水平较多,说明清姜河和灞河的汇入可能加重渭河 Pb 和 Zn 两种重金属的富集。其他支流沉积物中六种重金属元素与渭河干流沉积物的平均水平差异较小,但由于支流六种重金属元素含量大部分都不同程度的高于陕西省土壤背景值,说明这些支流的汇入对渭河干流沉积物重金属富集也有一定的影响。

对渭河中下游干流及支流沉积物重金属元素间进行 Pearson 相关分析,其结果见表 3。渭河干流沉积物中六种元素之间均呈现极显著相关性,因渭河中下游河道沿岸城市的冶金、铸造、有色金属、化工等的生产都与这几种金属密切相关,它们之间的高度一致性很好的反应了这几种重金属有着共同的污染来源<sup>[16]</sup>。渭河支流沉积物中 Pb 与 Zn 呈极显著性相关,与 Cu,Cr,Co 和 Ni 相关性不显著,Cu,Cr,Co 和 Ni 呈两两显著性相关,这说明这 Pb 和 Zn 两种元素有相近的地球化学行为,Cu,Cr,Co 和 Ni 四种重金属元素有相近的地球化学行为,具有相似的来源。这也间接说明干流和支流沉积物中重金属的异源性。

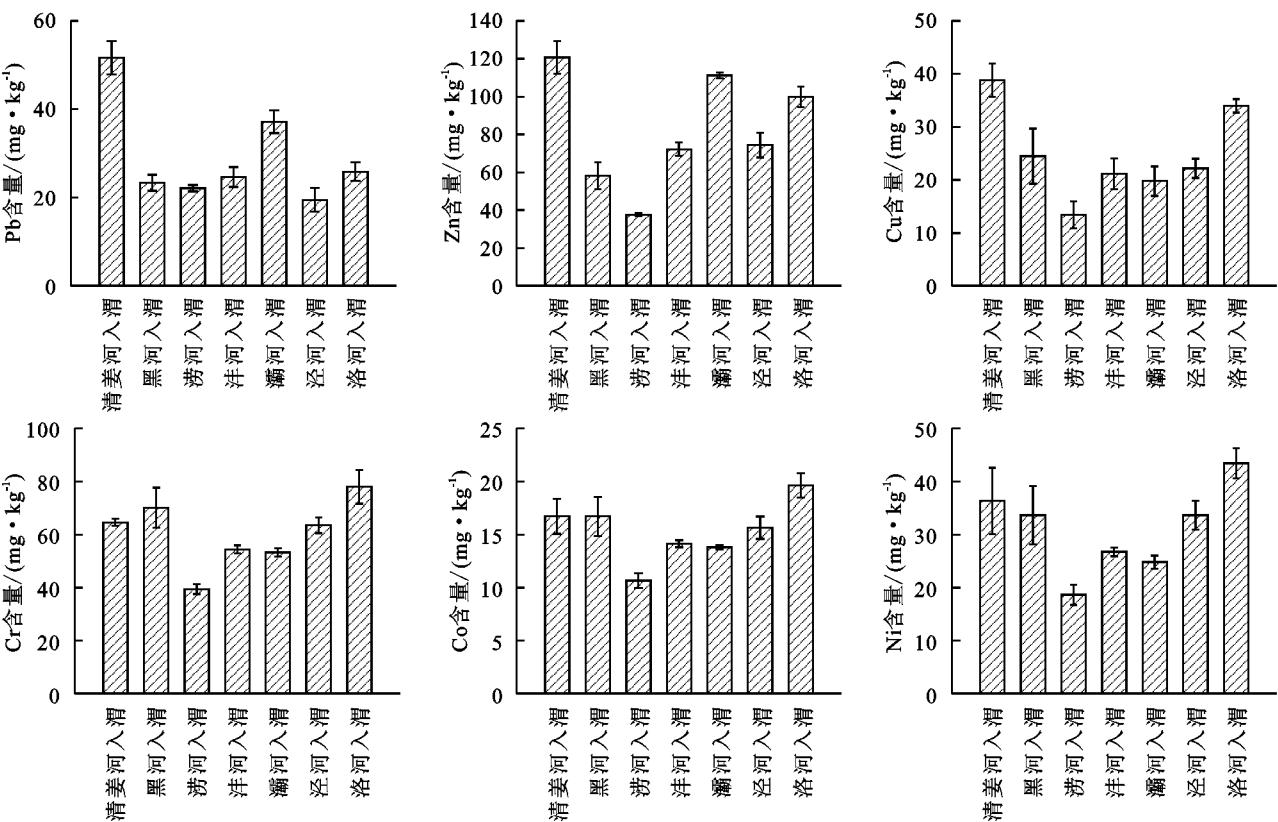


图 2 渭河中下游一级支流采样点沉积物中重金属含量

表 3 渭河中下游干流和一级支流河道沉积物中重金属含量 Pearson 相关系数矩阵

采样点	元素种类	Pb	Zn	Cr	Cu	Co	Ni
渭河 中 下游 干流	Pb	1	0.95**	0.94**	0.80**	0.80**	0.82**
	Zn		1	0.83**	0.73**	0.65*	0.65*
	Cr			1	0.81**	0.87**	0.92**
	Cu				1	0.86**	0.84**
	Co					1	0.95**
	Ni						1
渭河 中下游 一级 支流	Pb	1	0.79*	0.08	0.62	0.16	0.17
	Zn		1	0.44	0.72	0.53	0.51
	Cr			1	0.76*	0.99**	0.97**
	Cu				1	0.83*	0.86*
	Co					1	0.99**
	Ni						1

2.2 沉积物重金属污染潜在生态风险评价

以陕西省土壤中重金属元素背景值作为参考值,采用 Hakanson 潜在生态风险指数法对河道沉积物重金属污染的生态风险程度进行评价。根据公式(1)(2)(3) 计算出每个采样点 6 种重金属元素的单项潜在生态风险指数和每个采样点的综合潜在生态风险指数(表 4)。

结果显示,干流沉积物中 Pb,Zn,Cr,Cu,Co 和 Ni 六种重金属元素的单项潜在生态风险指数平均值分别为 5.75,1.42,2.32,6.66,7.91,6.55,重金属单项潜在生态风险从高到低为 Co>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn,支流沉积物中的平均值分别为 6.98,1.24,1.98,6.18,7.59,5.60,重金属单项潜在生态风险从

高到低为 Co>Pb>Cu>Ni>Cr>Zn。尽管沉积物中六种重金属元素含量均超出了陕西省土壤背景值,但六种重金属元素的单项潜在生态风险指数都小于 40,属于较低的风险等级。干流和支流各采样点重金属综合潜在生态风险指数均小于 50(表 4),处于较低的风险等级。干流采样点中卧龙寺桥综合潜在生态风险指数最高,新丰镇大桥最低;支流采样点中清姜河入渭处综合潜在生态风险指数最高,涝河入渭处最低。渭河中下游河道各采样点沉积物中重金属的单项潜在生态风险指数和综合潜在生态风险指数说明渭河流域中下游沉积物重金属的生态危害都很弱,当前不会对流域生态环境产生危害。

表 4 渭河中下游干流和一级支流采样点沉积物中重金属潜在生态风险指数

序号	采样点		单项潜在生态风险指数 $E_i^r$						RI
	位置		Pb	Zn	Cr	Cu	Co	Ni	
1	渭河 中下游 干流	林家村	6.27	1.39	2.61	7.54	8.39	8.17	34.37
2		卧龙寺桥	9.69	2.66	3.71	9.16	9.41	8.75	43.39
3		虢镇桥	6.53	1.67	2.79	9.07	9.77	8.51	38.34
4		常兴桥	6.14	1.69	2.35	9.64	8.00	6.51	34.33
5		兴平	5.20	1.18	2.22	6.50	7.79	6.86	29.75
6		咸阳铁桥	4.93	1.25	2.10	5.38	7.22	5.49	26.37
7		草滩	5.84	1.75	1.76	5.25	6.85	4.98	26.42
8		耿镇桥	3.87	0.82	1.70	3.87	6.20	4.56	21.01
9		新丰镇大桥	6.85	1.46	2.64	8.31	9.56	7.71	36.54
10		沙王渡	3.90	0.87	1.68	4.75	6.45	4.81	22.45
11	渭河 中下 游一 级支 流	树园	4.19	1.01	1.91	4.64	6.95	5.43	24.12
12		潼关吊桥	5.55	1.26	2.38	5.81	8.38	6.86	30.25
13		清姜河入渭	12.36	1.83	2.12	9.65	8.28	6.56	40.79
14		黑河入渭	5.58	0.88	2.30	6.09	8.28	6.08	29.21
15		涝河入渭	5.29	0.57	1.29	3.35	5.28	3.37	19.15
16		汭河入渭	5.90	1.09	1.78	5.26	7.00	4.83	25.87
17		灞河入渭	8.89	1.68	1.75	4.92	6.84	4.48	28.56
18		洛河入渭	6.18	1.51	2.56	8.44	9.73	7.85	36.27
19		泾河入渭	4.66	1.13	2.08	5.51	7.75	6.07	27.20

2.3 河道重金属污染近十年变化比较分析

利用本研究结果与 2006 年以来其他学者对渭河中下游河道沉积物中重金属含量的研究进行对比分析,结果见表 5,本研究中 Pb 的含量及单项潜在生态风险指数明显低于尹斌等<sup>[17]</sup>在渭河渭南段的研究,稍低于花莉等<sup>[10]</sup>人在陕西段的研究,稍高于其他学者的研究;元素 Zn 的含量及单项潜在生态风险指数则低于花莉等<sup>[10]</sup>在陕西的研究,高于其他学者的研究;元素 Cr 的含量及单项潜在生态风险指数稍高于王利军等<sup>[6]</sup>在宝鸡段,花莉等<sup>[10]</sup>、Han 等<sup>[18]</sup>人在陕

西段的研究,但低于其他人分别在咸阳、西安、杨凌等地的研究,尤其是明显低于张斌斌等<sup>[19]</sup>在关中段的研究;元素 Cu 的含量及单项潜在生态风险指数明显低于张斌斌等<sup>[19]</sup>在关中段的研究,稍低于翟雨翔等<sup>[16]</sup>在咸阳段的研究,稍高于其他学者的研究;元素 Co 的含量及其单项潜在生态风险指数明显低于张斌斌等<sup>[19]</sup>、翟萌等<sup>[20]</sup>的研究,与其他学者的研究差异较小;元素 Ni 的含量及潜在生态风险指数均高于其他学者的研究。说明渭河中下游河道沉积物中重金属含量及其潜在生态风险存在时空上的变异性。

表 5 渭河陕西段沉积物重金属元素含量及生态风险综合对比

研究区域	项目	Pb	Zn	Cr	Cu	Co	Ni	RI	文献来源
本研究	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	24.02	93.65	70.94	26.78	15.98	36.30	30.61	—
	$E_i^r$	5.75	1.42	2.32	6.66	7.91	6.55		
渭河咸阳段	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	22.7	68.4	90.1	28.0	—	26.4	—	翟雨翔等 <sup>[16]</sup>
	$E_i^r$	5.43	1.03	2.95	6.97	—	4.77		
渭河西安段	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	21.4	66.1	91.3	21.2	14.5	25.6	26.18	雷凯等 <sup>[21]</sup>
	$E_i^r$	5.12	1.00	2.99	5.27	7.18	4.62		
渭河宝鸡段	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	17.34	90.57	55.2	18.43	15.83	21.51	23.63	王利军等 <sup>[6]</sup>
	$E_i^r$	4.15	1.37	1.81	4.58	7.84	3.88		
渭河关中段	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	17.05	90.56	136.67	53.46	37.67	32.87	47.80	张斌斌等 <sup>[19]</sup>
	$E_i^r$	4.08	1.37	4.47	13.30	18.65	5.93		
渭河杨凌—兴平段	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	18.9	72.7	100.2	17.7	33.9	21.1	—	翟萌 <sup>[20]</sup>
	$E_i^r$	4.52	1.10	3.28	4.40	16.78	3.81		
渭河渭南段	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	36.67	75	—	—	—	—	33.90	尹斌 <sup>[17]</sup>
	$E_i^r$	8.77	1.13	—	—	—	—		
渭河陕西段	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	26.51	101.31	62.52	20.57	—	22.99	—	花莉等 <sup>[10]</sup>
	$E_i^r$	6.34	1.53	2.05	5.12	—	4.15		
渭河陕西段	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	20.2	65.9	66.7	22.7	12.4	30.9	25.38	Han 等 <sup>[18]</sup>
	$E_i^r$	4.83	1.00	2.18	5.65	6.14	5.58		
黄河沉积物	$C_d/(mg \cdot kg^{-1})$	21.42	75.66	51.34	21.81	—	—	—	袁浩等 <sup>[22]</sup>
	$E_i^r$	5.12	1.14	1.68	5.43	—	—		

综合来看,包括本研究在内,现有关于渭河沉积物重金属含量及其潜在生态风险评价的相关研究的结果之间没有较大差异,说明近年来,渭河中下游河道环境状况并未明显变化,整体潜在生态风险较低。与黄河沉积物<sup>[22]</sup>中 Pb, Zn, Cr 和 Cu 含量及潜在生态风险相比的结果说明渭河中下游沉积物重金属富集程度高于黄河沉积物,渭河的汇入一定程度上加重黄河沉积物中重金属含量。

### 3 结论

(1) 以陕西省土壤背景值作为参考值,通过对 12 个渭河干流采样点和 7 个支流采样点的重金属含量分析表明, Pb, Zn, Cr, Cu, Co 和 Ni 六中重金属元素均不同程度的超出了背景值,渭河中下游及其支流均存在不同程度的重金属富集。

(2) 渭河中下游沉积物单项重金属的潜在生态风险指数和综合潜在生态风险指数显示,所有采样点的 Pb, Zn, Cr, Cu, Co 和 Ni 六种重金属的单项生态风险指数都小于 40, 所有采样点的综合潜在生态风险指数都小于 50, 说明渭河中下游河道沉积物重金属污染轻微, 潜在生态风险较低。

(3) 经与其他文献数据相比较,渭河中下游河道沉积物重金含量在近十年来变化较小, 潜在生态风险较低, 渭河中下游河道沉积物中重金属污染状况近十年来并无明显变化。

#### 参考文献:

- [1] Stead-Dexter K, Ward N I. Mobility of heavy metals within freshwater sediments affected by motorway stormwater[J]. *Science of the total environment*, 2004, 334:271-277.
- [2] Von der Heyden C J, New M G. Sediment chemistry: a history of mine contaminant remediation and an assessment of processes and pollution potential[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, 82(1):35-57.
- [3] 易文利. 渭河宝鸡段表层沉积物营养盐分布特征及污染评价[J]. *河南科学*, 2014, 32(4):616-619.
- [4] 翟雨翔, 卢新卫, 黄静. 渭河(咸阳段)表层沉积物中重金属形态分布特征[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(3):145-148.
- [5] Hongyi N I U, Wenjing D, Qunhe W U, et al. Potential toxic risk of heavy metals from sediment of the Pearl River in South China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(8):1053-1058.
- [6] 王利军, 卢新卫, 雷凯. 渭河宝鸡段表层沉积物重金属污染研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(2):334-340.
- [7] 雷凯, 卢新卫, 王利军, 等. 渭河西安段表层沉积物重金属分布及潜在生态风险评价[J]. *地质科技情报*, 2008, 27(3):83-87.
- [8] 罗琳, 宋进喜, 王颖. 渭河陕西段河床沉积物重金属污染分析[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2013, 49(1):79-83.
- [9] 杨小刚, 宋进喜, 陈佳. 渭河陕西段潜流带沉积物重金属变化初步分析[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(8):2051-2061.
- [10] 花莉, 张成, 马宏瑞. 渭河干流陕西段国控断面沉积物重金属分布及潜在生态危害评价[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(15):9182-9185.
- [11] Yang X, Duan J, Wang L, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment in the Wei River in China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(3):111.
- [12] Lu X, Li L Y, Lei K, et al. Water quality assessment of Wei River, China using fuzzy synthetic evaluation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(8):1693-1699.
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [14] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990:347-379.
- [15] 王旭, 曹军骥, 张宝成. 渭河干流(宝鸡段)表层沉积物 Cu, Zn, Pb 污染特征与评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2008, 20(6):26-29.
- [16] 翟雨翔. 渭河咸阳段沉积物重金属污染研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009.
- [17] 尹斌. 渭河渭南段重金属分析及防治对策[J]. *云南地理环境研究*, 2015, 27(2):13-18.
- [18] Han Y M, Cao J J, Wu F, et al. Geochemistry and environmental assessment of major and trace elements in the surface sediments of the Wei River, China[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, 14(10):2762-2771.
- [19] 张斌斌. 渭河关中段河床沉积物中重金属赋存形态分析[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [20] 翟萌. 渭河杨凌—兴平段表层沉积物中重金属的地球化学研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010.
- [21] 雷凯. 渭河西安段水体及水系沉积物重金属环境地球化学研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2008.
- [22] 袁浩, 王雨春, 顾尚义, 等. 黄河水系沉积物重金属赋存形态及污染特征[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(11):1966-1971.