

## 【水环境与水生态】

# 渭河陕西段沉积物中重金属污染综合评价

黄 悦<sup>1</sup> 张风宝<sup>1,2</sup> 杨明义<sup>1,2</sup> 李玄添<sup>1</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)

摘 要: 为分析渭河陕西段沉积物中重金属的污染程度,对沉积物中 10 种重金属元素 Pb、Zn、Cr、Cu、Co、Ni、Cd、As、Sb、Mn 的含量进行分析,采用地累积指数、富集系数、污染负荷指数、内梅罗综合污染指数及潜在生态风险指数对沉积物中重金属污染进行综合评价。结果表明:2015 年沉积物中除 Cr 外其他 9 种重金属均高出陕西土壤背景值 1.49%~91.49%,Cd 高出最多;2016 年只有 Pb、Cu、Co、Cd、Mn 分别高出陕西土壤背景值 6.21%、2.10%、7.92%、17.02%、4.41%,除 Cr、Cd 外重金属含量年际之间差异均不显著;10 种重金属的污染程度及潜在生态风险整体较低,其中 Cd 及清姜河、灞河断面污染最严重,应加强对渭河周边农业及交通污染的防控,同时密切关注城市生活污水处理及入渭支流对干流的污染输入影响。

关键词: 沉积物; 污染评价; 重金属; 渭河陕西段

中图分类号: X522; TV211.1<sup>+</sup>1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.12.016

引用格式: 黄悦,张风宝,杨明义,等.渭河陕西段沉积物中重金属污染综合评价[J].人民黄河,2021,43(12):80-85,99.

## Comprehensive Evaluation of Heavy Metal Pollution in the Sediments of Weihe River in Shaanxi

HUANG Yue<sup>1</sup>, ZHANG Fengbao<sup>1,2</sup>, YANG Mingyi<sup>1,2</sup>, LI Xuantian<sup>1</sup>

( 1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water

Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Water

Conservation, GAS & MWR, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to analyze the pollution degree of heavy metals in the sediments of the Shaanxi section of the Weihe River, the contents of 10 heavy metal elements Pb, Zn, Cr, Cu, Co, Ni, Cd, As, Sb and Mn in the sediments were analyzed by using the geoaccumulation index, enrichment coefficient, pollution load index, Nemeru comprehensive pollution index and potential ecological risk index for comprehensive evaluation of heavy metal pollution in sediments. The results show that in 2015, except for Cr, the other 9 heavy metals in the sediments are all higher than Shaanxi soil background values of from 1.49% to 91.49% and Cd is the highest; in 2016, only Pb, Cu, Co, Cd and Mn are higher than that the background values of 6.21%, 2.10%, 7.92%, 17.02% and 4.41%. Except for Cr and Cd, the inter-annual differences in heavy metal content are not significant. The pollution levels and potential ecological risks of the 10 heavy metals are generally lower, and the 17 sampling sites are medium in general. Among them, Cd, Qingjiang River and Bahe River are the mostly polluted. The prevention and control of agricultural and traffic pollution around the Weihe River should be strengthened and pay close attention to the urban domestic sewage treatment and the input of pollution from the tributaries to the main river.

**Key words:** sediment; pollution assessment; heavy metals; Shaanxi section of the Weihe River

重金属污染因其生物累积能力强、环境持久性、隐蔽性、高毒性而引起了人们的极大关注<sup>[1]</sup>。近年来,经济和工业的迅猛发展,工业生产、冶金和采矿等活动正在改变重金属元素的生物地球化学循环过程,加剧了环境污染,造成濒危物种数量增加和生态环境恶化等问题<sup>[2]</sup>。大量重金属通过岩石、土壤风化作用及污水排放等方式进入河流,释放到水体中的重金属与悬浮颗粒物相结合并在沉积物中不断积累,因此沉积物是河流中重金属的主要储存库<sup>[3]</sup>。一旦环境条件(气候、pH 值等)发生变化,重金属会从沉积物中释放出来,造成水体二次污染,重金属还可能被水生动植物吸收,进而通过食物链进入人体<sup>[4-5]</sup>。

渭河流域是我国重要的工业基地之一,流域内拥有机械、电子、煤炭、化工等众多工业企业<sup>[6]</sup>。随着沿岸城市化与工业化的发展,大量工农业废水、生活污水、废弃物未经处理或未有效处理直接排入渭河,渭河干流 78% 的断面水质为劣 V 类,渭河污染问题日益突出,严重制约了当地经济的发展<sup>[7-8]</sup>,因此亟须解决渭

收稿日期:2020-04-17

基金项目:陕西省水利科技计划项目(2013slkj-11)

作者简介:黄悦(1998—),女(瑶族),广西桂林人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀

通信作者:张风宝(1980—),男(回族),宁夏彭阳人,研究员,博士,研究方向为坡面土壤侵蚀过程及其环境效应

E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

河水质污染问题。有关学者以往对陕西渭河沉积物重金属污染的研究多限于部分河段(如西安段、宝鸡段、渭南段、杨凌—兴平段等)<sup>[8-11]</sup>,关于渭河陕西段的研究<sup>[12-15]</sup>因采样断面或重金属元素较少而使得相关评价不够全面。

沉积物中重金属污染评价方法的优点及适用性各不相同,其中:地累积指数法、富集系数法考虑了人类活动对环境的影响;污染负荷指数法、内梅罗综合污染指数法能较全面反映沉积物的总体质量,但没有考虑重金属的迁移特性和重金属间的生物毒性效应<sup>[16-18]</sup>;潜在生态风险指数法综合考虑了重金属的毒性、迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感性,可以综合反映沉积物中重金属对环境的潜在影响<sup>[17-18]</sup>。笔者综合分析了2015年、2016年汛后渭河陕西段沉积物中10种重金属的含量,并采用地累积指数法、富集系数法、污染负荷指数法、内梅罗综合污染指数法及潜在生态风险指数法对沉积物中重金属的污染程度及其潜在生态风险进行综合评价,以期为渭河陕西段沉积物中重金属的污染防治及水环境保护提供依据。

## 1 研究方法

渭河是黄河的最大支流,主要流经甘肃天水,以及陕西省关中平原的宝鸡、咸阳、西安、渭南等地,最后在渭南市潼关港口汇入黄河。渭河流域属于典型的大陆性季风气候区,采样以渭河陕西段为主,干流长502.4 km,入渭支流有清姜河、黑河、泾河、灞河、洛河等<sup>[15]</sup>。

### 1.1 样品采集及重金属含量测定

采样时间为2015年11月及2016年11月,采样点设置在渭河流经的主要城市及支流入渭口,共设置了17个采样断面(见图1),每个采样断面设置3个采样点,每个采样点采集表层10 cm的沉积物样品至少2.0 kg。样品带回实验室阴凉处自然风干3~4周,剔除样品中的可见侵入物后,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)<sup>[19]</sup>测定沉积物中Pb、Zn、Cr、Cu、Co、Ni、Cd、As、Sb、Mn等10种重金属的含量。



图1 采样断面分布

## 1.2 污染评价方法

(1) 地累积指数法。地累积指数法由德国学者Muller提出,其综合考虑了自然地质过程重金属背景值及人类活动对重金属污染的影响,广泛用于评价河流沉积物中重金属污染问题。地累积指数计算公式为

$$I_{geo} = \text{lb}\left(\frac{C_d^i}{kC_b^i}\right) \quad (1)$$

式中: $I_{geo}$ 为重金属的地累积指数; $C_d^i$ 为第*i*种重金属的实测值,mg/kg; $C_b^i$ 为第*i*种重金属的陕西土壤背景值,mg/kg; $k$ 为常数,一般取1.5。

地累积指数分级标准见表1<sup>[1 20]</sup>。

表1 地累积指数分级

地累积指数	≤0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
污染级别	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	轻度	偏中度	中度	偏重	重度	严重

(2) 富集系数法。富集系数被广泛应用于评价人类活动对沉积物中重金属富集程度的影响。Al因其在迁移过程中的惰性而被作为标准元素,富集系数计算公式为

$$EF = \frac{(C_i/C_{Al})_{\text{sample}}}{(C_i/C_{Al})_{\text{background}}} \quad (2)$$

式中:EF为重金属的富集系数; $C_i$ 和 $C_{Al}$ 分别为沉积物样品中待评价重金属、Al的含量,mg/kg;sample和background分别表示待评价重金属、Al的实测值和陕西土壤背景值。

富集系数分级标准见表2<sup>[21-22]</sup>。

表2 富集系数分级

富集系数	≤1	1~2	2~5	5~20	20~40	>40
污染级别	0	1	2	3	4	5
污染程度	无	轻微	中度	显著	强烈	极强

(3) 污染负荷指数法。污染负荷指数常用来描述某地受多种重金属综合污染的程度,按以下公式进行计算:

$$C_t^i = C_d^i/C_b^i \quad (3)$$

$$PLI = \sqrt[n]{C_t^1 \times C_t^2 \times \dots \times C_t^n} \quad (4)$$

式中:PLI为某采样点的污染负荷指数,PLI≤1为无污染,1<PLI≤2为中度污染,2<PLI≤3为重度污染,PLI>3为极强污染<sup>[23-24]</sup>;C<sub>t</sub><sup>i</sup>为第*i*种重金属的污染系数; $n$ 为重金属种类数。

(4) 内梅罗综合污染指数法。内梅罗综合污染指数法是通过单因子污染指数得到综合污染指数的方法,能较全面地评判重金属及区域的污染程度,是应用最广泛的评价土壤重金属污染程度的方法之一,单因子污染指数、综合污染指数计算公式分别为

$$P_i = C_i/S_i \quad (5)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{P_a^2 + P_{\max}^2}{2}} \quad (6)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  种重金属的单因子污染指数;  $C_i$  为第  $i$  种重金属含量的实测值;  $S_i$  为第  $i$  种重金属的陕西土壤背景值;  $P_N$  为待评价采样点的重金属综合污染指数;  $P_a$  为待评价采样点中各重金属的单因子污染指数平均值;  $P_{max}$  为待评价采样点中各重金属的最大单因子污染指数。

单因子污染指数和综合污染指数分级标准见表 3<sup>[5 25]</sup>。

表 3 污染指数分级标准

单因子污染评价		综合污染评价	
单因子污染指数 $P_i$	污染等级	综合污染指数 $P_N$	污染等级
$\leq 1$	无污染	$\leq 0.7$	安全
1~2	轻污染	0.7~1.0	警戒线
2~3	中污染	1.0~2.0	轻污染
>3	重污染	2.0~3.0	中污染
		>3.0	重污染

(5) 潜在生态风险指数法。潜在生态风险指数法是瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出的, 不仅考虑了重金属含量, 还考虑了重金属的毒性、重金属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, 综合反映了沉积物中重金属对生态环境的潜在影响。计算公式为

$$E_r^i = T_r^i C_f^i \quad (7)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (8)$$

式中:  $E_r^i$  为第  $i$  种重金属的潜在生态风险指数;  $T_r^i$  为第  $i$  种重金属元素的毒性系数, Pb、Cu、Co、Ni 的毒性系数均为 5, Zn、Mn 的毒性系数为 1, Cr、Cd、As、Sb 的毒性系数分别为 2、30、10、7;  $RI$  为某采样点的综合潜在生态风险指数。

由于本研究的 10 种重金属元素与 Hakanson 提出潜在生态风险指数法时的 8 种污染物不同, 因此对综合潜在生态风险分级标准进行了调整, 见表 4<sup>[4, 26]</sup>。

表 4 潜在生态风险分级标准

单项潜在生态风险		综合潜在生态风险	
风险指数 $E_r^i$	风险等级	风险指数 $RI$	风险等级
$\leq 40$	低	$\leq 50$	低
40~80	中等	50~100	中等
80~160	较高	100~200	较高
160~320	高	>200	很高
>320	很高		

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属含量

对 2015 年、2016 年 17 个采样点表层沉积物中重金属元素的含量进行描述性统计分析, 得到 10 种重金属元素含量的最大值、最小值、平均值、标准差等, 见表 5。2015 年渭河陕西段沉积物中除 Cr 外其余 9 种重金属元素的平均含量均高出陕西土壤背景值 1.49%~91.49%, 其中 Cd 高出最多。2016 年只有 Pb、Cu、Co、Cd、Mn 的平均含量高出陕西土壤背景值 2.10%~17.02%, Cd 高出最多。2015 年、2016 年 Pb、Cu、Co、Cd、Mn 的平均含量均超出了土壤背景值, 除 Cr、Cd 外其他 8 种重金属元素的平均含量年际之间均无显著差异 (显著性水平  $p>0.05$ )。除 2015 年 Cd 为高度变异外, 其他重金属元素均为中低度变异<sup>[27]</sup>, 说明渭河陕西段重金属含量空间变异性相对较小。

表 5 渭河陕西段沉积物中重金属含量统计

重金属	采样年份	含量 / (mg · kg <sup>-1</sup> )			标准差 / (mg · kg <sup>-1</sup> )	变异系数 / %	陕西土壤背景值 / (mg · kg <sup>-1</sup> )
		最小值	最大值	平均值			
Pb	2015	16.17	58.03	26.42 a	11.34	42.92	21.4
	2016	15.13	54.77	22.73 a	9.52	41.88	
Zn	2015	52.22	139.33	77.45 a	23.71	30.61	69.4
	2016	43.67	107.33	62.92 a	18.16	28.86	
Cr	2015	39.33	100.33	60.25 a	15.18	25.20	62.5
	2016	36.67	77.67	49.67 b	10.69	21.51	
Cu	2015	18.23	39.16	25.74 a	5.78	22.47	21.4
	2016	15.23	37.93	21.85 a	6.56	30.01	
Co	2015	9.74	15.47	12.29 a	1.62	13.14	10.6
	2016	8.67	15.70	11.44 a	2.38	20.79	
Ni	2015	19.33	42.10	30.45 a	6.09	19.99	28.8
	2016	20.77	42.20	28.16 a	5.25	18.64	
Cd	2015	0.09	0.40	0.18 a	0.10	55.56	0.094
	2016	0.09	0.20	0.11 b	0.04	36.36	
As	2015	7.33	24.00	12.76 a	4.29	33.64	11.1
	2016	5.00	14.67	10.69 a	2.39	22.35	
Sb	2015	0.73	3.30	1.36 a	0.54	39.61	1.34
	2016	0.73	1.30	1.12 a	0.17	15.37	
Mn	2015	498.22	891.33	641.68 a	118.74	18.50	557.0
	2016	445.33	857.67	581.57 a	101.65	17.48	

注: 重金属 Cd 含量低于测定下限 0.1 mg/kg 时, 其含量取陕西土壤背景值; 不同小写字母表示 2015 年、2016 年沉积物中重金属含量差异显著

## 2.2 重金属污染评价

(1) 地累积指数。2015年、2016年渭河陕西段表层沉积物中10种重金属整体为无污染状态,见图2。2015年Co、Ni及2016年Cr、Co、Ni、As、Sb在各断面均无污染;2015年Cd污染最严重(林家村、清姜河、虢镇桥、咸阳铁桥、草滩、灞河、耿镇桥、潼关吊桥断面为轻度污染),Pb次之(清姜河、卧龙寺桥、虢镇桥、灞河断面为轻度污染);2016年Cd污染最严重(清姜河、草滩、灞河断面为轻度污染),其他重金属的轻度污染断面占比在12%以内,且多为清姜河、灞河断面。渭河陕西段沉积物中Cd污染最严重,且支流的污染程度高于干流,2016年重金属污染程度较2015年有所改善。

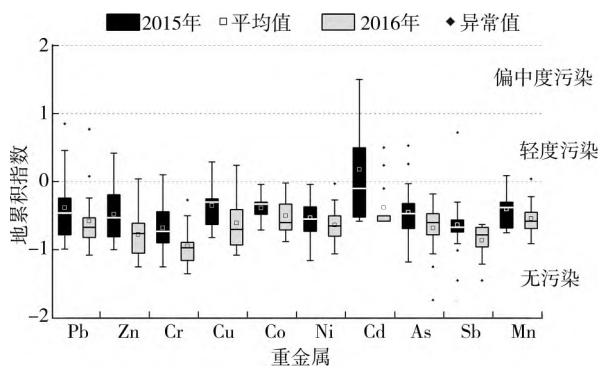


图2 渭河陕西段沉积物中重金属的地累积指数

(2) 富集系数。2015年除Cd为中度污染外其他9种重金属均为轻度污染,2016年除Cr、Sb为无污染外其他8种重金属均为轻度污染,见图3。2015年林家村、清姜河、虢镇桥、草滩、灞河、耿镇桥、潼关吊桥断面的Cd,卧龙寺桥、虢镇桥、灞河断面的Cu,黑河、虢镇桥断面的Mn,卧龙寺桥、灞河断面的Zn,沙王渡断面的Sb,清姜河断面的Pb,咸阳铁桥断面的As均为中度污染;2016年只有草滩、灞河断面的Cd,灞河断面的Pb为中度污染,其他断面均为无污染或轻度污染。渭河陕西段沉积物中Cd污染最严重,2016年较2015年重金属污染程度明显降低。

(3) 污染负荷指数。2015年林家村、清姜河、卧龙寺桥、虢镇桥、黑河、咸阳铁桥、草滩、灞河、耿镇桥、新丰镇大桥、洛河、潼关吊桥等12个断面均为中度污染,2016年只有林家村、清姜河、常兴桥、黑河、草滩、灞河断面为中度污染,其他断面均为无污染,见图4。2015年渭河陕西段沉积物重金属总体呈中度污染状态,2016年则呈无污染状态。从空间分布来看,2015年、2016年中度污染断面均位于上中游地区。2016年各采样断面沉积物的重金属综合污染程度均明显降低,但清姜河、灞河断面的污染仍较严重。

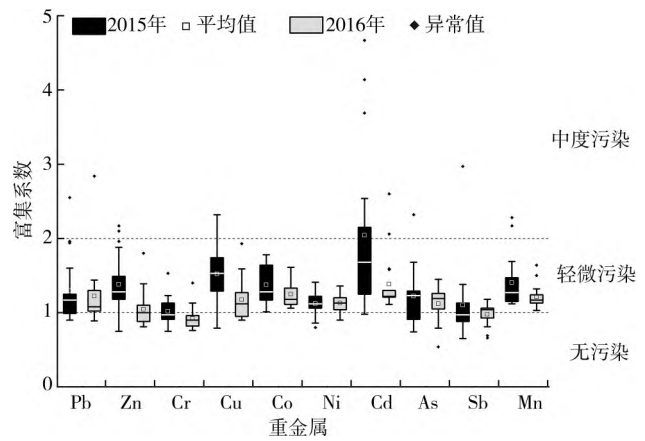


图3 渭河陕西段沉积物中重金属的富集系数

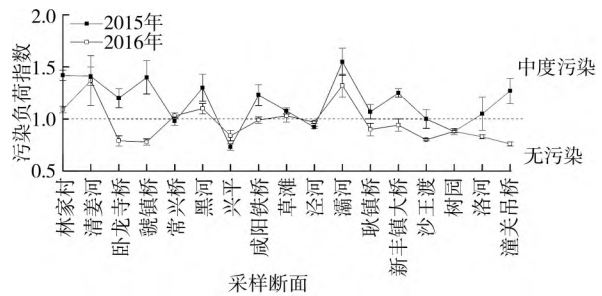


图4 各采样断面沉积物的污染负荷指数

(4) 内梅罗综合污染指数。2015年渭河陕西段沉积物中Cd污染最严重,18%的断面为重污染、12%的断面为中污染;Pb、Zn、As、Sb、Mn次之,分别有12%、6%、6%、6%、6%的断面为中污染;Cu、Co、Ni、Cr污染较轻,各断面均为无污染或轻污染。2016年Pb、Cd污染较严重,均有6%的断面为中污染;Sb在各断面均为无污染;其他7种重金属污染程度较轻,各断面均为无污染或轻污染,见图5。渭河陕西段沉积物中Cd污染最严重,2016年渭河陕西段重金属污染程度大幅降低。

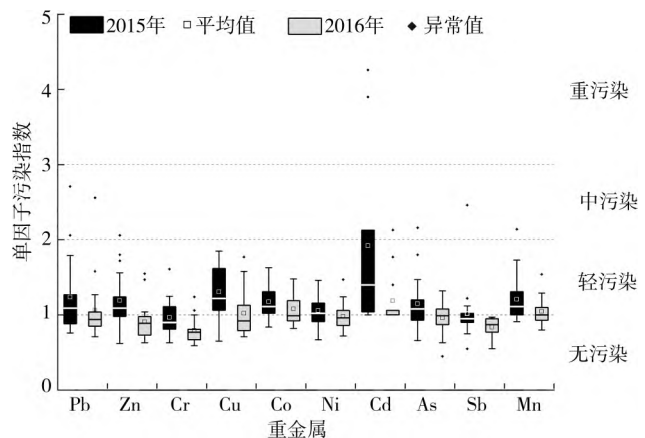


图5 渭河陕西段沉积物重金属单因子污染指数

2015年、2016年渭河陕西段沉积物中重金属综合污染指数总体为轻污染。2015年潼关吊桥断面为中

污染,清姜河、灞河断面为重污染;2016年灞河断面为中污染,其他断面为警戒线或轻污染,见图6。从空间分布来看,2015年、2016年渭河陕西段重金属污染无明显变化规律。2016年各采样断面沉积物重金属综合污染程度均显著降低,但灞河断面的污染程度仍较严重。

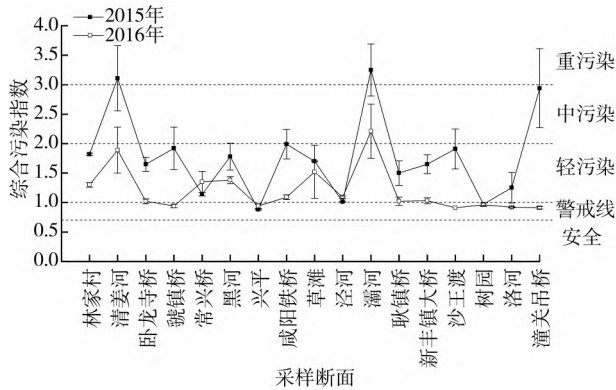


图6 各采样断面沉积物重金属综合污染指数

(5) 潜在生态风险指数。2015年除Cd为中等潜在生态风险外,其他9种重金属的潜在生态风险均为低,Cd有18%的断面为较高风险,53%的断面为中等风险;2016年10种重金属潜在生态风险等级均为低风险,且潜在生态风险指数有所降低(见图7),仅24%的断面Cd为中等风险。重金属Cd对各断面综合潜在生态风险指数(RI)的平均贡献率均最高,2015年、2016年分别为55.16%、47.32%,可见Cd是造成渭河陕西段重金属综合潜在生态风险最主要的元素。

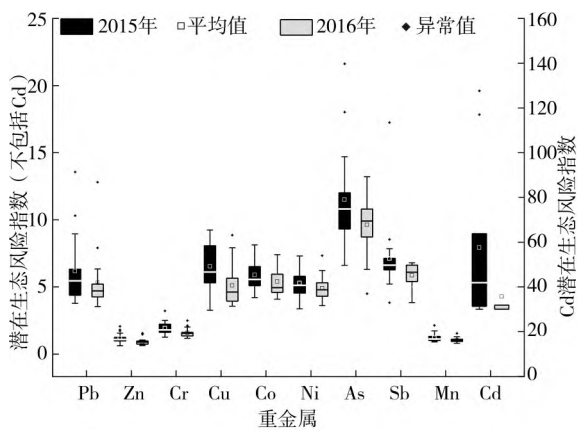


图7 渭河陕西段沉积物中重金属的潜在生态风险指数

2015年渭河陕西段表层沉积物重金属综合潜在生态风险总体为较高风险,2016年则为中等风险。2015年林家村、清姜河、虢镇桥、咸阳铁桥、草滩、灞河、潼关吊桥断面为较高潜在生态风险,2016年清姜河、灞河断面为较高潜在生态风险,其他断面均为中等潜在生态风险,见图8。从空间分布来看,其整体无明显变化规律。2016年渭河陕西段沉积物重金属综合

潜在生态风险显著降低,但清姜河、灞河断面的潜在生态风险仍较高。

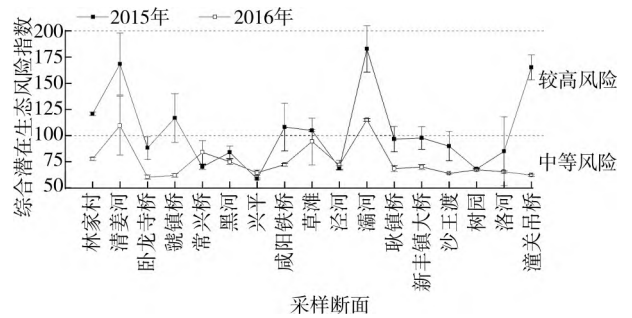


图8 各采样断面沉积物的综合潜在生态风险指数

### 2.3 重金属污染综合评价

地累积指数和富集系数计算结果均显示2015年、2016年渭河陕西段表层沉积物中Cd污染最严重。污染负荷指数计算结果显示,2015年沉积物重金属综合污染总体为中度污染,2016年则为无污染,对比发现两年中灞河断面污染均最严重,其次为清姜河断面。内梅罗综合污染指数计算结果显示,沉积物重金属综合污染等级总体为轻污染,其中Cd污染最严重,灞河是污染最严重的断面。潜在生态风险指数计算结果显示,2015年沉积物的重金属综合潜在生态风险总体为较高风险,2016年则为中等风险,其中Cd的潜在生态风险最高,清姜河、灞河断面潜在生态风险最高。

2016年渭河陕西段沉积物的重金属污染程度较2015年显著降低,表明对渭河陕西段的污染治理及对污染源的管控效果显著。10种重金属的污染程度及潜在生态风险均较低,其中Cd污染最严重,与其他研究结果一致<sup>[12-14]</sup>。Cd主要来源于农业污染,尤其是化肥、农药的施用,应加强对渭河周边农业污染的防治;汽车尾气及轮胎磨损的碎屑中也含有Cd粉尘,同时应注意交通污染的防控<sup>[28-29]</sup>。17个采样点的综合污染程度及综合潜在生态风险为中等,其中清姜河、灞河断面的污染程度最严重,表明支流的污染程度高于干流的,应密切关注注入渭支流对干流的污染输入,同时清姜河、灞河分别靠近宝鸡市和西安市市区,表明人类活动对渭河污染有重要影响,应注重城市生活污水处理。

### 3 结论

(1) 重金属含量分析表明,2015年渭河陕西段表层沉积物中,除Cr外,Pb、Zn、Cu、Co、Ni、Cd、As、Sb、Mn均高于陕西土壤背景值,其平均值分别高出23.46%、11.60%、20.28%、15.94%、5.73%、91.49%、14.95%、1.49%、15.20%。2016年只有Pb、Cu、Co、Cd、

Mn 分别高出陕西土壤背景值 6.21%、2.10%、7.92%、17.02%、4.41% ,其他 5 种重金属均低于背景值。2015 年、2016 年除 Cr、Cd 外 ,其他 8 种重金属的平均含量均无显著差异。

(2) 地累积指数评价结果显示: 重金属 Cd 污染最严重 ,且支流的污染程度高于干流的。富集系数评价结果显示: 2015 年除 Cd 为中度污染外 ,其他 9 种重金属均为轻微污染; 2016 年除 Cr、Sb 为无污染外 ,其他 8 种重金属均为轻微污染。污染负荷指数评价结果显示: 2015 年 17 个采样断面沉积物重金属综合污染总体为中度污染 ,2016 年则为无污染 ,两年中灞河断面污染均最严重 ,其次为清姜河断面。内梅罗综合污染指数评价结果显示: 17 个采样断面沉积物重金属综合污染等级总体为轻污染 ,其中 Cd 及灞河断面污染最严重。潜在生态风险指数评价结果显示: 2015 年 17 个采样断面沉积物重金属综合潜在生态风险总体为较高风险 ,2016 年为中等风险 ,其中清姜河、灞河断面的潜在生态风险最高。

(3) 渭河陕西段沉积物中 10 种重金属的污染程度及潜在生态风险均较低 ,17 个采样断面的综合污染程度及潜在生态风险为中等 ,其中重金属 Cd 及清姜河、灞河断面的污染程度最严重 ,应加强对渭河周边农业及交通污染的防控 ,同时密切关注城市生活污水处理及入渭支流对干流的污染输入影响。

参考文献:

[1] LIU R , MEN C , LIU Y , et al. Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Yangtze Estuary Sediment [J]. Marine Pollution Bulletin , 2016 , 110( 1) : 564-571.

[2] BILGIN A , KONANCI M U. Evaluation of Surface Water Quality and Heavy Metal Pollution of Coruh River Basin ( Turkey ) by Multivariate Statistical Methods [J]. Environmental Earth Sciences , 2016 , 75( 12) : 1029-1047.

[3] GUI L , PENG S C , CHEN T H , et al. Evaluation of Sediment-Associated Heavy Metal Pollution in Chaohu Lake , Eastern China [J]. Water Resources , 2019 , 46( 4) : 614-623.

[4] GUO W H , LIU X B , LIU Z B , et al. Pollution and Potential Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in the Sediments Around Dongjiang Harbor , Tianjin [J]. Procedia Environmental Sciences , 2010( 2) : 729-736.

[5] ZHANG Z Y , YANG X D , YANG S T. Heavy Metal Pollution Assessment , Source Identification , and Health Risk Evaluation in Aibi Lake of Northwest China [J]. Environ Monit Assess , 2018 , 190( 2) : 69-82.

[6] 王硕.渭河流域综合生态风险评价[D].西安: 陕西师范大学 2019: 1.

[7] 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: 10-11.

[8] 翟萌.渭河杨凌—兴平段表层沉积物中重金属的环境地球化学研究[D].西安: 陕西师范大学 2010: 11-13.

[9] 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: 9-14.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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) : 79-84.

[13] 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) : 9182-9184 , 9190.

[14] 杨学福 ,姚志鹏 ,王蕾 ,等.渭河陕西段表层沉积物重金属污染特征及潜在风险[J].中国环境监测 , 2017 , 33( 2) : 61-67.

[15] 兰金秀.渭河陕西段沉积物中重金属污染的时空变化研究及污染评价[D].杨凌: 西北农林科技大学 2016: 6-8 , 12.

[16] 杨永强.珠江口及近海沉积物中重金属元素的分布、赋存形态及其潜在生态风险评价[D].广州: 中国科学院研究生院( 广州地球化学研究所) 2007: 13-14.

[17] 王利军.宝鸡市街尘、土壤及渭河沉积物重金属污染研究[D].西安: 陕西师范大学 2008: 23-24.

[18] 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: 13.

[19] SHAFIE N A , ARIS A Z , ZAKARIA M P , et al. Application of Geoaccumulation Index and Enrichment Factors on the Assessment of Heavy Metal Pollution in the Sediments [J]. Journal of Environmental Science and Health: Part A , 2013 , 48( 2) : 182-190.

[20] 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( 6) : 1808-1815.

[21] 盛维康 ,侯青叶 ,杨忠芳 ,等.湘江水系沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J].中国环境科学 , 2019 , 39( 5) : 2230-2240.

[22] 李娟 ,杨忠芳 ,夏学齐 ,等.长江沉积物环境地球化学特征及生态风险评价[J].现代地质 2012 , 26( 5) : 939-946.

[23] FERATI F , KEROLLI-MUSTAFA M , KRAJA-YLLI A. Assessment of Heavy Metal Contamination in Water and Sediments of Trepca and Sitnica Rivers , Kosovo , Using Pollution Indicators and Multivariate Cluster Analysis [J]. Environ Monit Assess , 2015 , 187( 6) : 338-353.

[24] 张杰 ,郭西亚 ,曾野 ,等.太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J].环境科学 2019 , 40( 5) : 2202-2210.

[25] 罗飞 ,巴俊杰 ,苏春田 ,等.武水河上游区域土壤重金属污染风险及来源分析[J].岩矿测试 2019 , 38( 2) : 195-203.

[26] 杨学福 ,关建玲 ,和莹 ,等.渭河( 陕西段) 表层沉积物重金属污染现状及其潜在风险研究[J].环境科学与管理 , 2018 , 43( 8) : 176-180.

( 下转第 99 页)

- mental Management, 2009, 44(2): 243-255.
- [35] KUMAR S K, RAMMOHAN V, SAHAYAM J D, et al. Assessment of Groundwater Quality and Hydrogeochemistry of Manimuktha River Basin, Tamil Nadu, India [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2009, 159(1-4): 341-351.
- [36] 刘兵, 王贺, 姜永海, 等. 基于水化学和氢氧同位素的东宫河流域不同水体转化关系研究 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(9): 1979-1990.
- [37] CHIDAMBARAM S, ANANDHAN P, PRASANNA M V, et al. Major Ion Chemistry and Identification of Hydrogeochemical Processes Controlling Groundwater in and Around Neyveli Lignite Mines, Tamil Nadu, South India [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(9): 3451-3467.
- [38] XIAO J, JIN Z D, WANG J, et al. Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Solute Sources of Groundwater Within the Tarim River Basin in the Extreme Arid Region, NW Tibetan Plateau [J]. Quaternary International, 2015, 380-381: 237-246.
- [39] MONTEY V D, RADAKOVITCH O, VALLET-COULOMB C, et al. Origin of Groundwater Salinity and Hydrogeochemical Processes in a Confined Coastal Aquifer Case of the Rhone delta (Southern France) [J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(8): 2337-2349.
- [40] 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因 [J]. 环境化学, 2017, 36(2): 380-389.
- [41] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 [J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5428-5439.
- [42] 胡春华, 周文斌, 夏思奇, 鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析 [J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1620-1626.
- [43] 刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环 [J]. 地球化学, 2008, 37(4): 404-414.

【责任编辑 吕艳梅】

(上接第85页)

- [27] 李岩, 师华定, 刘孝阳, 等. 耒水流域土壤重金属污染的时空变异对比 [J]. 环境工程学报, 2020, 14(3): 1-11.
- [28] 柯盛, 张际标, 孙省利, 等. 珠江口沉积物重金属源解析及富集与生物毒性的关系 [J]. 广东海洋大学学报, 2017, 37(4): 69-77.
- [29] 刘靳, 涂耀仁, 蒲雅丽, 等. 重金属在黄浦江流域的污染现状与来源解析 [J]. 环境科技, 2019, 32(6): 1-12.

【责任编辑 吕艳梅】

(上接第90页)

- [9] 秦文婧, 宋献方, 谷洪彪. 基于层次聚类法的柳江煤矿对地下水水质影响分析 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 30-39.
- [10] 安茂国. 兖州煤田煤矸石中敏感性元素动态淋滤特征及环境效应评价 [J]. 山东国土资源, 2019, 35(7): 51-57.
- [11] 汪美华, 张隆, 柴义伦. 皖南山区农村地下水化学特征分析与水质评价 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 37-41.
- [12] 刘志涛, 沙福建, 蒋书杰. 广饶县浅层地下水水化学演化分析研究 [J]. 山东国土资源, 2017, 33(3): 48-51.
- [13] 于大潞, 郑丽爽, 于世林. 济南南部垃圾填埋场对地下水质量的影响分析 [J]. 山东国土资源, 2015, 31(8): 54-58.
- [14] GIBBS R J. Mechanisms Controlling World Chemistry [J]. Science, 1970, 170: 1088-1090.
- [15] 刘伟坡, 沙娜, 程旭学, 等. 海原县山前地下水化学特征分析 [J]. 人民黄河, 2019, 41(8): 82-87.
- [16] 董维红, 孟莹, 王雨山, 等. 三江平原富锦地区浅层地下水水化学特征及其形成作用 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(2): 542-553.
- [17] 郭永海, 沈照理, 钟佐燊. 河北平原地下水化学环境演化的地球化学模拟 [J]. 中国科学: D辑, 1997, 27(4): 360-365.
- [18] 侯国华, 高茂生, 党显璋. 唐山曹妃甸浅层地下水水化学特征及咸化成因 [J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 49-57.
- [19] 李扬, 杨桢, 康凤新, 等. 东阿水文地质单元地下水硝酸盐污染来源的同位素分析 [J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 19-27.

【责任编辑 吕艳梅】