

丹河水系表层沉积物重金属污染及生态风险评价

马秀平¹, 井维鑫¹, 王 茜¹, 李国保¹, 王 兰¹, 李晓敏², 郭瑞雪²

(1.山西大学生命科学学院, 太原 030006; 2.山西省渔业环境监测中心, 太原 030002)

摘 要:采用原子吸收分光光度法和原子荧光光谱法,测定了丹河水系干流及主要支流表层沉积物中重金属(Mn、Zn、Cu、Pb、Cd、Cr、Hg、As)的含量,同时用沉积物质量基准法(SQG)和 Hakanson 潜在生态风险指数法,对重金属的毒性效应、污染程度及潜在生态风险进行了评价,并分析了重金属的主要来源。结果表明,丹河水系表层沉积物中 Mn、Zn、Cu、Pb、Cd、Cr、Hg、As 的平均含量分别为 115.1、18.78、8.46、6.49、2.85、60.6、0.047、14.22 mg·kg⁻¹。Cd、As 和 Cr 的含量介于最低效应水平(LE-L)与严重效应水平(SE-L)之间。根据 SQG,丹河表层沉积物中重金属含量处于中度污染水平,可能会对河流生物产生一定的毒性效应,而 Pb、Cu、Zn 则尚无毒性效应。除了 As 和 Cr 之外,其他重金属元素之间均呈现较明显的正相关,表明在沉积物中这些重金属的含量具有共同的变化趋势,且具有一定的同源性。工业排污是造成丹河水质恶化的主要原因之一,也是重金属的主要来源。以山西省土壤背景值为参比进行 Hakanson 潜在生态风险指数评价发现,丹河水系表层沉积物呈现由强至极强的生态风险,其中 Cd 生态风险最大,Hg、As 次之。对单个重金属的潜在生态风险系数和多个重金属的潜在生态风险指数进行分析显示,生态风险较大的样点是高平市、巴公河和水东。研究结果旨在得到单一污染物的环境影响和多种污染物的综合效应的评价结果,为丹河水系沉积物及水体重金属污染防治和决策管理提供科学依据。

关键词:丹河;表层沉积物;生态风险;毒性效应;重金属

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)06-1180-07

Heavy Metal Pollution in the Surface Sediment of Dan River and Its Ecological Risk Assessment

MA Xiu-ping¹, JING Wei-xin¹, WANG Qian¹, LI Guo-bao¹, WANG Lan¹, LI Xiao-min², GUO Rui-xue²

(1.School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2.Shanxi Provincial Center for Fishery Environment Monitor, Taiyuan 030002, China)

Abstract: The concentrations of heavy metals(Mn, Zn, Cu, Pb, Cd, Cr, Hg, As) in the surface sediment of Dan River and its main tributaries were determined by using atomic absorption spectrometry(AAS) and atomic fluorescence spectrometry(AFS), and the toxic effects and sediment pollution assessment were conducted systematically by using Sediment Quality Guidelines(SQG), Hakanson Potential Ecological Risk Index. Moreover, the underlying source of heavy metal was analyzed. The results indicated that the average concentrations of Mn, Zn, Cu, Pb, Cd, Cr, Hg, As were 115.1, 18.78, 8.46, 6.49, 2.85, 60.6, 0.047, 14.22 mg·kg⁻¹ respectively. Base on the SQG, the surface sediment in Dan River was moderately contaminated by Cd, As and Cr since their concentrations were just between lowest effect level(LE-L)and severe effect level(SE-L)values, which could be result in negative biota effects in the watersheds. Except for As and Cr, other heavy metal elements found the most obvious positive correlation. These heavy metals had a common trend and the same pollution source. Industrial waste was one of the most important anthropogenic emission sources of trace elements and an important source of heavy metals mainly. Compared to the soil background values of Shanxi, the heavy metals in Dan River sediments showed more higher ecological risk, and the ecological risk of the heavy metals, arranged from the highest to lowest pollution degree, was as follows Cd>Hg>As>Pb>Cr>Cu>Zn. On the basis of analysis of potential ecological risk factor and ecological risk index of the heavy metals, it suggested that Gaoping City, Bagong River, Shuidong were the most polluted sites. This study would provide scientific basis for the prevention, control of pollution, and environmental management in Dan River.

Keywords: Dan River; surface sediment; ecological risk; toxic effects; heavy metal

收稿日期:2009-11-22

基金项目:国家自然科学基金(30870267);山西省自然科学基金(2008011069)

作者简介:马秀平(1983—),男,汉族,山西古交人,在读硕士,主要研究方向为典型重金属污染物的生物效应与分子生态毒理。

E-mail:xiuping.ma@163.com

通讯作者:王 兰 E-mail:lanwang@sxu.edu.cn

河流沉积物作为水环境重金属的主要蓄积库,处于液-固两相界面的交界处,对河流的生境、生态系统结构及生态服务功能都有重要的影响,可以反映河流受重金属污染的状况^[1-3]。在一定的物理和化学条件下,沉积物中的重金属会向水体释放,从而阻止或延缓河流的治理效果^[4]。另外,由于河流沉积物的重金属污染具有持久性、生物富集和放大作用等特点,因此,河流沉积物中重金属含量常被用作判别河流水环境质量的重要参考指标,已成为水环境研究的热点问题^[5-7]。

丹河是沁河第一大支流,地理位置介于东经 112°42'~113°25',北纬 35°05'~35°58'之间,发源于山西省高平市赵庄丹朱岭,纵贯晋城市的东部,在河南省博爱县陈庄汇入沁河。丹河在山西省境内干流全长 128.3 km,流域面积 2 931 km²^[8-9]。据报道,丹河水系附近有规模的生产企业 209 家,其中化工行业 21 家。在 209 家生产企业中,仅巴公工业园区就有 30 多家,这些企业排放的废水长期超标,导致水质严重污染。

丹河作为晋城市最重要的地面水体之一,迄今为止,重金属污染程度的调查鲜见报道。鉴于此,本研究采用有代表性的沉积物质量基准法(Sediment Quality Guidelines,简称 SQG)^[10]和潜在生态风险指数法(The Potential Ecological Risk Index)^[11],定量计算出沉积物中重金属污染潜在生态风险值,对丹河水系表层沉积物中重金属的污染程度进行评价,旨在得到单一污染物的环境影响和多种污染物的综合效应的评价结果,为丹河沉积物及水体重金属污染防治和决策管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 表层沉积物样品采集

2008 年 7 月,在丹河水系的干流以及支流共布设了 23 个断面进行采样(见表 1)。样点选取主要考虑河流交汇处、厂矿企业的排污和可能的污染源下游,每个采样点用自制采泥器采集河流沉积物表层 0~5 cm 泥样 3 份,混合均匀后立即封存于干净的聚乙烯袋中,带回实验室置-20℃冰箱冷冻保存。同时用便携式电导率仪(雷磁 DDB-303A,中国)和 pH 计(雷磁 PHB-4,中国)对丹河的干流及支流的电导率(EC)和 pH 值进行现场测定。

1.2 样品预处理与分析

样品风干,轻轻捻碎,过 20 目筛,然后研磨过 100 目筛,用四分法缩分后,贮存待测。样品消解参照四酸(HCl-HNO₃-HF-HClO₄)消解法(GB/T 17137-40

1997)。用火焰原子分光光度计(SHIMADZU AA6300,日本)测定 Mn、Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr 的含量;Hg、As 用王水消解,原子荧光分光光度计(海光 AFS230E,中国)测定含量。所用试剂均为分析纯,水为超纯水,玻璃器皿经 10%硝酸浸泡 24 h 以上,使用前用超纯水冲洗干净。分析过程均加入国家环境监测总站的环境标准物质(土壤 ESS-2)进行质量控制,同批次样品设定空白对照,测定结果的相对误差(RE)<12.2%,相对标准偏差(RSD)<13.9%,检测限为 0.001~0.020 mg·L⁻¹,符合质控要求。数据用 SPSS 13.0 软件分析。

表 1 采样点编号

Table 1 The number of sampling sites

编号	采样点	编号	采样点	编号	采样点
S1	赵庄水库	S9	河西镇	S17	水东
S2	李家	S10	杜寨水库	S18	小会
S3	长平	S11	野川河	S19	杨庄河
S4	釜山水库	S12	原村河	S20	许湾
S5	杨家庄	S13	许河	S21	山王庄镇
S6	箭头	S14	杜村	S22	陈庄(丹河)
S7	高平市	S15	巴公河	S23	陈庄(沁河)
S8	庞村	S16	任庄水库		

2 结果与分析

2.1 丹河水系表层沉积物中重金属的含量与污染

从表 2 得出,丹河水系表层沉积物中重金属的含量与山西省土壤背景值(表 5)相比有很大的增加,其中 Cd 增加最为明显,达到背景值的 27.94 倍;Hg 次之,为背景值的 2.04 倍;再有是 As、Cr。根据 SQG,对丹河水系表层沉积物中重金属污染的毒性效应进行了探讨(表 3),将丹河水系采样点(S1~S23)的重金属含量与相应的河流沉积物 LE-L、SE-L 值进行了比较^[12]。结果显示(图 1),丹河水系表层沉积物中 Zn、Cu、Pb 的浓度均低于 LE-L 水平,表明这 3 种重金属基本无生物毒性效应;约 87%样点中的 Cd、65%样点中的 As 和全部样点的 Cr 浓度超出了 LE-L 值,且高平市区(S7)和杨庄河(S19)As 浓度超出了 SE-L 值,Cd、As 和 Cr 含量基本介于 LE-L 与 SE-L 值之间,处于中度污染水平,可能会对河流生物及水生生态系统产生一定的毒害作用。Hg 浓度除了在支流巴公河(S15)超出了 LE-L 值外,其余样点均小于 LE-L 值。由于沉积物中 Cd、As、Cr、Hg 的含量相对比较高,且 As 在高平市区(S7)和杨庄河(S19)的浓度已超出了 SE-L 值,Hg 在支流巴公河(S15)已高于 LE-L 值,因此,应作为丹

表 2 丹河水系表层沉积物重金属含量和水体 pH 值、电导率

Table 2 Concentrations of heavy metal in surface sediment and pH value, conductivity in water of Dan River										
项目	Zn	Cu	Cr	Cd	Mn	Pb	Hg	As	pH 值	电导率/ μS·cm ⁻¹
	mg·kg ⁻¹									
S1	5.56	2.29	63.6	2.59	33.1	5.33	n.d.	12.27	8.51	357
S2	16.54	6.76	69.6	3.54	91.0	7.08	n.d.	27.80	7.58	454
S3	11.23	1.23	46.1	3.33	189.8	7.82	n.d.	5.51	8.46	791
S4	14.68	4.29	63.0	4.58	36.3	6.34	n.d.	27.45	8.76	359
S5	3.31	3.46	50.3	2.55	40.5	4.04	n.d.	11.60	8.22	732
S6	6.13	0.37	32.9	1.98	45.7	6.99	0.023	7.08	8.35	730
S7	8.96	15.18	45.2	3.69	128.5	9.19	n.d.	76.96	7.94	771
S8	12.60	7.77	48.2	5.16	163.8	8.64	0.103	5.10	7.09	1 095
S9	6.10	1.35	54.2	2.97	89.4	6.53	0.013	17.18	7.28	905
S10	5.92	0.73	52.2	2.17	78.2	7.68	n.d.	11.19	7.43	315
S11	5.90	0.23	36.9	3.24	27.8	6.34	n.d.	0.92	6.99	721
S12	7.81	3.08	59.3	2.82	162.3	3.40	0.003	9.48	7.22	729
S13	12.12	3.95	61.4	3.15	83.1	5.06	n.d.	12.30	8.13	1 554
S14	9.34	6.45	55.8	2.79	81.4	6.62	n.d.	27.81	7.48	1 571
S15	112.50	37.76	65.2	5.38	253.1	12.78	0.848	7.75	6.45	1 564
S16	10.66	5.07	62.5	n.d.	48.8	3.67	0.014	3.98	6.91	925
S17	84.62	40.03	87.1	5.83	165.8	10.67	0.023	n.d.	5.98	1 304
S18	34.76	9.09	77.9	n.d.	322.2	4.13	0.033	10.41	7.33	1 218
S19	12.85	10.43	68.2	1.68	153.1	7.12	n.d.	35.94	7.26	956
S20	12.15	9.11	68.3	n.d.	146.2	4.96	0.006	7.65	7.50	731
S21	12.82	10.03	52.1	2.95	93.3	4.92	0.016	2.60	7.77	746
S22	13.21	8.33	92.4	1.83	70.9	5.61	n.d.	2.28	6.30	899
S23	12.08	7.73	80.2	3.39	142.6	4.32	n.d.	3.81	6.65	687

注:n.d.表示未检出或低于检出限。

表 3 SQG 中的 LE-L 和 SE-L 值(mg·kg⁻¹)
Table 3 LE-L and SE-L values of Sediment Quality
Guidelines(mg·kg⁻¹)

项目	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Mn
LE-L	6	0.2	0.6	26	16	120	31	—
SE-L	33	2	10	110	110	820	250	—

河污染防治的重点。从图 1 还明显看出,丹河干流在高平市(S7)和水东(S17)段以及支流巴公河(S15)污染比较严重,这与侯素霞等^[8]应用模糊数学对丹河水环境进行综合评价的结果基本一致。

2.2 丹河水系表层沉积物重金属的相关性与来源

对丹河水系表层沉积物的重金属含量、电导率(EC)及 pH 值进行 Pearson 相关性分析,并计算出相应的 Pearson 相关系数。从表 4 观察到,Zn 含量与 Mn、Pb、Hg、Cu 含量间存在显著正相关 ($P<0.01$),但与 As、Cr 含量间不相关;Mn 含量与 Zn、Hg、Cu 含量

间均呈显著正相关($P<0.05$);Pb 含量与除 Mn、Cr、As 以外的其他重金属元素含量间均存在显著正相关($P<0.01$);Cd 含量与 Pb 含量存在显著正相关 ($P<0.01$), Hg 含量与 Zn、Pb、Cu 含量存在显著正相关($P<0.01$)。EC 值与 Zn、Mn、Hg、Cu 含量间存在显著正相关 ($P<0.05$)。然而,pH 值与 Zn、Cr、Cu 含量间存在显著负相关($P<0.01$)。由于 pH 值可作为控制金属离子向固相迁移的主要因素,吸附量随 pH 值的增高而增大,且重金属离子容易被氢氧化物共沉淀与吸附,因而较易在沉积物中产生累积现象^[13-14]。

需要说明的是,上述文献中的 pH 值是指底泥沉积物的 pH 值,而本研究的 pH 值为丹河水体的 pH 值,且 pH 值基本接近中性。因此,其显著负相关不能直接说明丹河水系 pH 值高,Zn、Cr、Cu 含量就低,可能有其他原因,有待于进一步研究。除 As 和 Cr 外,其他重金属元素之间均呈现较明显的正相关关系,表明在沉积物中这些重金属的含量具有共同的变化趋势,

说明丹河水系表层沉积物重金属污染具有一定的同源性。

2.3 丹河水系表层沉积物重金属的环境风险评价

根据瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态风险

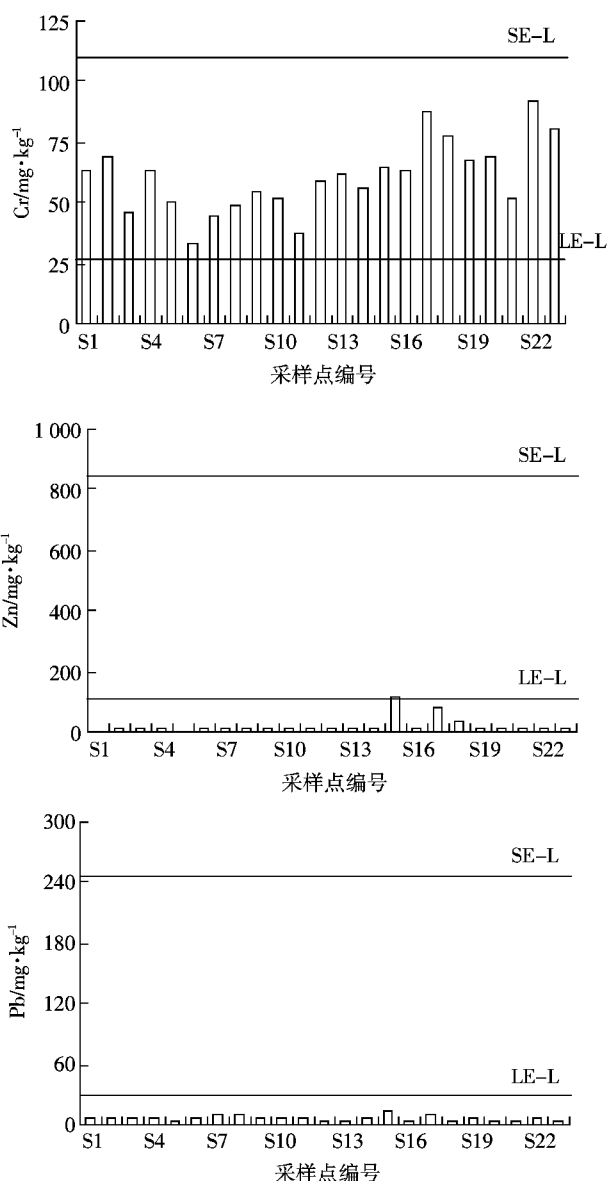
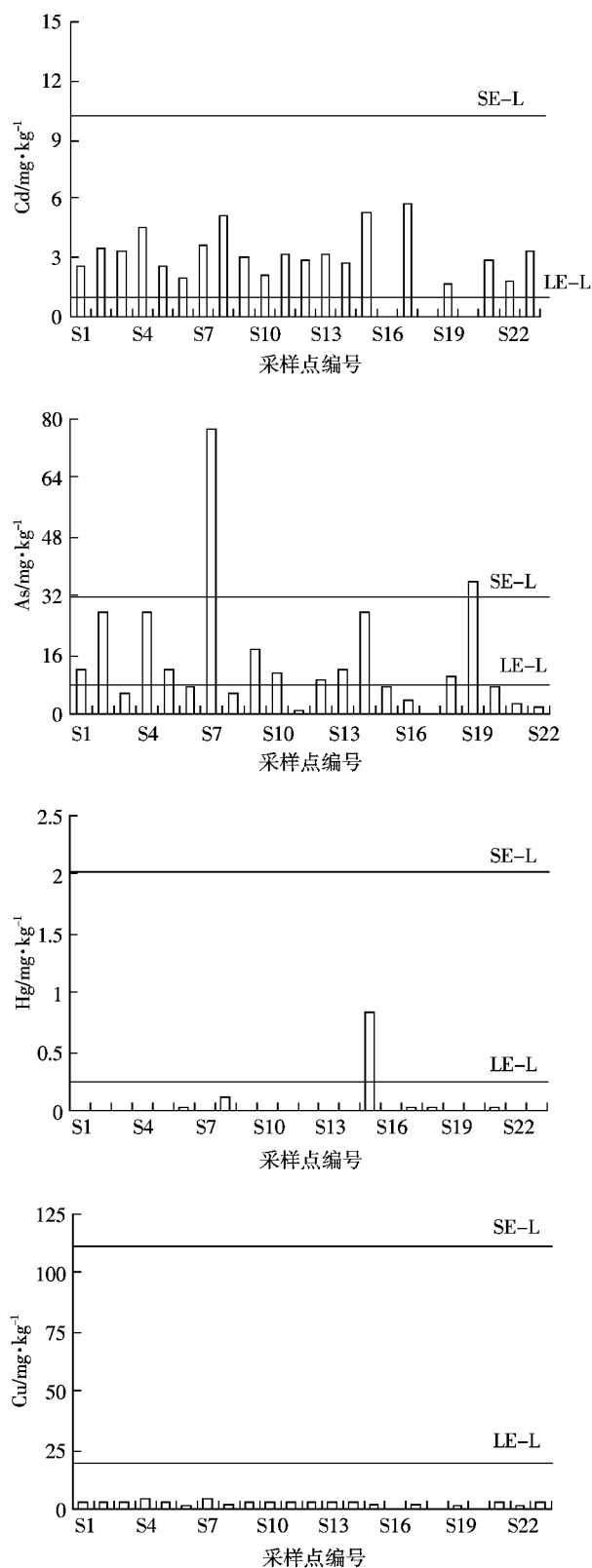


图1 丹河水系表层沉积物的重金属含量与生物效应阈值水平

Figure 1 Concentrations of heavy metal in surface sediment and related biological effects limits in Dan River

指数法,某一区域沉积物中第*i*种金属的潜在生态风险系数 E_i^i 及沉积物中多种重金属的潜在生态风险指数RI可分别表示为:

$$E_i^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (1)$$

$$RI = \sum E_i^i = \sum T_r^i \cdot C_f^i = \sum T_r^i \cdot C_s^i / C_n^i \quad (2)$$

式中: C_f^i 为重金属*i*相对于沉积物背景值的污染系数($C_f^i = C_s^i / C_n^i$); C_s^i 为表层沉积物重金属*i*的实测浓度; C_n^i 为表层沉积物中重金属*i*的背景参考值; T_r^i 为重金属元素*i*的毒性响应系数,反映其毒性水平和生物对污染的敏感程度。

在计算 Hakanson 潜在生态风险指数时,本研究

表 4 丹河水系表层沉积物中重金属含量与 EC、pH 值间的相关关系($n=23$)
Table 4 Correlation of heavy metals, EC and pH in the surface sediment of Dan River($n=23$)

项目	Zn	Mn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	Cu	EC	pH
Zn	1									
Mn	0.569**	1								
Pb	0.686**	0.298	1							
Cd	0.469*	0.045	0.680**	1						
Cr	0.396	0.332	-0.066	-0.065	1					
Hg	0.777**	0.436*	0.619**	0.378	0.043	1				
As	-0.177	-0.029	0.213	0.075	-0.174	-0.110	1			
Cu	0.924**	0.506*	0.690**	0.490*	0.450*	0.613**	0.010	1		
EC	0.535**	0.464*	0.309	0.163	0.188	0.438*	-0.086	0.515*	1	
pH	-0.527**	-0.352	-0.260	-0.119	-0.550**	-0.327	0.319	-0.577**	-0.413*	1

注:*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$ 。

采取全球工业化以前的沉积物重金属最高背景值^[11,15]和山西省土壤背景值作为参比^[16],选择 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 7 种重金属元素参与评价(表 5)。结合丹河重金属的污染特征,参考 Hakanson^[11]、陈静生等^[17]和 Pekey 等^[18]的工作成果,其指标 E^i 、RI 及污染强度分级标准见表 6。

表 5 两种参比沉积物中相关重金属含量的参考值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 5 Commended values of heavy metal concentrations in sediments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb
工业化前全球沉积物重金属最高背景值	15	0.25	1.0	90	50	175	70
山西省土壤背景值	9.1	0.023	0.102	55.3	22.9	63.5	14.7

表 6 表层沉积物中重金属元素的生态风险强度划分标准
Table 6 Criteria for the classification of degrees of the ecological risk of heavy metals in surface sediment

潜在生态风险系数或指数	生态风险强度
$E^i<40$ 或 $\text{RI}<150$	轻微
$40\leq E^i<80$ 或 $150\leq \text{RI}<300$	中等
$80\leq E^i<160$ 或 $300\leq \text{RI}<600$	强
$160\leq E^i<320$ 或 $\text{RI}\geq 600$	很强
$E^i\geq 320$	极强

按照沉积物重金属潜在生态风险指数的计算公式及确定生态风险强度的各项指标,可以计算出丹河水系采样点的重金属潜在生态风险系数和生态风险指数(表 7)。

从表 7 发现,以全球工业化前沉积物中重金属含量的最高背景值为参比,单种重金属的潜在生态风险以 Cd 的最为严重, E^i 的平均值达到 85.6,52%样点的

表 7 丹河水系表层沉积物中重金属潜在生态风险系数(E^i)和潜在生态风险指数(RI)

Table 7 Ecological risk factor and ecological risk index of heavy metals in surface sediment of Dan River

项目	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb
E^i * 均值	9.48	7.52	85.6	1.35	0.85	0.11	0.46
RI*	105.4						
E^i ** 均值	15.63	81.76	838.8	2.19	0.85	0.30	2.21
RI**	941.7						

注:*表示以工业化前沉积物重金属最高背景值为参比;**表示以山西省土壤背景值为参比。

E^i 值介于 80 和 160 之间,为强生态风险水平,26%样点为中等生态风险水平;Hg 在巴公河(S15)的 E^i 值为 135.59,达到了强生态风险水平,其余样点为轻微生态风险水平;As 在高平市(S7)的 E^i 值为 51.31,属于中等生态风险水平,其余样点属于轻微生态风险水平;其他 4 种重金属呈现轻微的生态风险水平。生态风险水平由强到弱的顺序为 $\text{Cd}>\text{As}>\text{Hg}>\text{Cr}>\text{Cu}>\text{Pb}>\text{Zn}$ 。以多种重金属的潜在生态风险指数 RI 来评价,丹河水系 78%样点 RI 小于 150,处于轻微的生态风险等级,而 17%的样点 RI 介于 150 和 300 之间,处于中等生态风险等级。但是,以山西省土壤背景值为参比,丹河水系表层沉积物 78%样点的 RI 值大于 600,处于很强的生态风险等级,9%样点的 RI 值在 300~600 之间,处于强生态风险等级。单种重金属的潜在生态风险同样以 Cd 污染程度最为严重,其 E^i 的平均值为 838.8,87%样点的 E^i 大于 320,属于生态风险极强的元素;Hg 的平均 E^i 值为 81.76,为中等生态风险水平,但在高平市(S8)和巴公河(S15)分别达到了 178.81 和 1 473.83,属于强和极强的生态风险水平;

As、Cr、Cu、Zn 和 Pb 的平均 E^i 值皆小于40,为轻微生态风险水平。生态风险水平由强到弱的顺序为: Cd>Hg>As>Pb>Cr>Cu>Zn。

3 讨论

通常天然河流中的重金属污染物主要来源于土壤、岩石的侵蚀风化,人类的活动,工农业城市污水的排放及大气沉降^[19-21]。丹河是晋城市重要的地表水资源,干流沿线附近集中了大量的化工、煤焦、电镀、黑色金属冶炼企业。化工、电镀等工业排放的废水中含有大量的镉;煤焦、冶炼金属等工业排放的废水中含有大量的 As、Cr、Hg 和 Pb 等。如果处理不当,大量的 Cd、As、Cr、Hg 和 Pb 等将排入周围水环境中,从而导致污染。根据现场调查结果,丹河水系接纳了干流沿线的工农业生产排污废水。虽然干流沿线部分工业废水得到了处理,但是由于工业废水的排放标准大大高于地面水标准,而且即使处理后的工业废水也未能达标。梁家妮等^[22]对冶炼厂附近水田土壤中重金属进行研究,发现 Cd、As 的含量比较高, Cd 严重超标。鉴于丹河水系周边化工、煤焦、化肥、冶炼等工业废水不达标排放,建议应加强对当地这些企业排放的监控和管理。

利用 Hakanson 的潜在生态风险指数法进行丹河水系表层沉积物的风险评价,发现采样点沉积物中重金属含量呈现出强至极强的生态风险,其中 Cd 的生态风险最强, Hg、As 次之, Zn 最低。这是由于 Cd 相对于其他重金属而言毒性系数 T^i 最高, 相应的生态风险系数 E^i 也最高, 导致各取样点的 RI 值亦大大升高, 所以潜在生态风险等级也最大。尽管沉积物中 Hg 的含量较低, 但因其毒性系数较高, 使得 RI 值仅次于 Cd。根据工业化前全球沉积物重金属含量背景值为参比的计算结果, 丹河水系表层沉积物中重金属含量表现出由轻微至强的生态风险, 与李朝生等^[23]对黄河河流沉积物重金属含量的潜在生态风险评价结果基本一致。由于丹河地处黄河流域, 其沉积物的环境风险与黄河沉积物亦有相似之处。对单个重金属的潜在生态风险系数和多个重金属的潜在生态风险指数分析得知, 生态风险较大的样点是高平市(S7)、巴公河(S15)和水东(S17), 这与前面 2.1 中用 SQG 法评价和现场调查的结果相吻合。以山西省土壤背景值作为参比, 进行丹河水系表层沉积物潜在生态风险指数评价, 能更好地反映丹河水系的污染现状。

综上所述, 随着每年排入丹河的城市工业废水、

生活污水日益增多, 且丹河水系内的支流都是一些源头性小河, 水源较少, 河流本身实际变成了城市工业废水和生活污水的排污渠。本研究结果及评价与丹河水系目前的污染状况较吻合, 能比较客观地反映丹河水系环境的质量现状。

4 结论

(1) 根据 SQG, Cd、As 和 Cr 含量介于 LE-L 与 SE-L 之间, 可能会对丹河水系生物产生一定的毒性效应, 而 Pb、Cu、Zn 则尚无毒性效应。

(2) 丹河水系表层沉积物中除 As 和 Cr 之外, 其他重金属之间均呈现较明显的正相关, 表明在沉积物中这些重金属的含量具有共同的变化趋势, 且具有一定的同源性。工业排污是造成丹河水水质恶化的主要原因之一, 也是重金属的主要来源。

(3) 以山西省土壤背景值为参比进行 Hakanson 潜在生态风险指数评价, 丹河水系表层沉积物呈现由强至极强的生态风险, 其中 Cd 生态风险最大, Hg、As 次之。7 种重金属的生态风险由强到弱的顺序为: Cd>Hg>As>Pb>Cr>Cu>Zn。生态风险较大的样点是高平市(S7)、巴公河(S15)和水东(S17)。

参考文献:

- [1] 刘文新, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究 I. C-B-T 质量三合一方法 (Triad) [J]. 环境科学学报, 1999, 19(2): 120-126.
LIU Wen-xin, TANG Hong-xiao. Sediment quality criteria for heavy metal pollution in the Lean River I. Sediment quality triad approach [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(2): 120-126.
- [2] Sina S N, Chuah H, Lob W. Assessment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River, Hong Kong [J]. *Environment International*, 2001, 26: 297-301.
- [3] Forstner U, Wittmann G T. Metal pollution in the aquatic environment [M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 1979: 110-192.
- [4] Millward G E, Glegg G A. Fluxes and retention of trace metals in the Humber estuary [J]. *Estuarine, Coastal Shelf Science*, 1997, 44: 97-105.
- [5] Akcay H, Oguz A, Karapire C. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments [J]. *Water Research*, 2003, 37: 813-822.
- [6] Huang K M, Lin S. Consequences and implication of heavy metal spatial variations in sediments of the Keelung River drainage basin, Taiwan [J]. *Chemosphere*, 2003, 53: 1113-1121.
- [7] Liu J L, Li Y L, Zhang B, et al. Ecological risk of heavy metals in sediments of the Luan River source water [J]. *Ecotoxicology*, 2009, 18: 748-758.
- [8] 侯素霞, 刘新铭, 钟 秦. 模糊数学在丹河水环境综合评价中的应用 [J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1411-1414.

- HOU Su-xia, LIU Xin-ming, ZHONG Qin. Application of fuzzy mathematics to Dan River's water environment comprehensive evaluation[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1411-1414.
- [9] 韩托, 王茜, 王兰. 山西沁河流域溪蟹生态调查及河流污染现状[J]. *四川动物*, 2008, 27(5): 804-806.
- HAN Tuo, WANG Qian, WANG Lan. Ecological investigation of freshwater crab and river pollution in Basin of Qinhe River[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2008, 27(5): 804-806.
- [10] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments and biota [J]. *Marine Environmental Residues*, 1995, 19: 81-87.
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14: 975-1001.
- [12] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based Sediment Quality Guideline for freshwater ecosystems[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39: 20-31.
- [13] 郝向英, 宝迪, 赵慧, 等. 黄河水中 pH 值对镉与沉积物相互作用的影响[J]. *内蒙古大学学报*, 2001, 30(2): 136-138.
- HAO Xiang-ying, BAO Di, ZHAO Hui, et al. The effect of the value of pH on Cd(II) absorption characteristic in the Yellow River[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2001, 30(2): 136-138.
- [14] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51: 844-851.
- [15] 陈静生, 王忠, 刘玉机. 水体金属污染潜在危害: 应用沉积学方法评价[J]. *环境科技*, 1989, 9(1): 16-25.
- CHEN Jing-sheng, WANG Zhong, LIU Yu-ji. Application of sedimentology in assessing heavy metal contamination in water and the potential ecological hazard[J]. *Environmental Science and Technology*, 1989, 9(1): 16-25.
- [16] 史崇文, 赵玲芝, 郭新波, 等. 山西省土壤元素背景值的分布规律及其影响因素[J]. *农业环境保护*, 1996, 15(1): 24-28.
- SHI Chong-wen, ZHAO Ling-zhi, GUO Xin-bo, et al. The distributing and influence of background concentrations of soil heavy metals in Shanxi Province[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(1): 24-28.
- [17] 陈静生, 陶澍, 邓宝山, 等. 水环境化学[M]. 重庆: 高等教育出版社, 1987: 176-178.
- CHEN Jing-sheng, TAO Shu, DENG Bao-shan, et al. *Water environmental chemistry*[M]. Chongqing: Higher Education Press, 1987: 176-178.
- [18] Pekey H, Karakas D, Ayberk S, et al. Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48: 946-953.
- [19] Klavins M, Briede A, Rodinov V, et al. Heavy metals in Rivers of Latvia [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 262: 175-183.
- [20] Yu K Y, Tasi L J, Chen S H, et al. Chemical binding of heavy metals in anoxic river sediments[J]. *Water Research*, 2001, 35: 406-409.
- [21] Levent T A, Yilmaz F, Demirak A, et al. Sources and distribution of trace metals in the Saricay stream basin of Southwestern Turkey [J]. *Environ Monit Assess*, 2007, 125: 47-57.
- [22] 梁家妮, 周静, 马友华, 等. 冶炼厂综合堆渣场围坝下水田重金属污染特征与评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(5): 877-882.
- LIANG Jia-ni, ZHOU Jing, MA You-hua, et al. Status and assessment of heavy metals pollution in paddy soil around the spoil area of smeltery [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5): 877-882.
- [23] 李朝生, 王新伟, 何江, 等. 河流沉积物重金属潜在生态风险及其空间分异—以黄河包头段为例 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 308-311.
- LI Chao-sheng, WANG Xin-wei, HE Jiang, et al. Potential ecological risk and its spatial variance of heavy metals in river sediments: A case study on the Baotou section of the Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 308-311.