



移动扫码阅读

朱雪凝,刘跃斌,张逸冰,等. 滏阳河邯郸段地表水重金属污染特征研究[J]. 能源环境保护, 2021, 35(6): 94-101.

ZHU Xuening, LIU Yuebin, ZHANG Yibing, et al. Study on heavy metal pollution characteristics of surface water in Handan section of Fuyang River[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(6): 94-101.

滏阳河邯郸段地表水重金属污染特征研究

朱雪凝¹, 刘跃斌¹, 张逸冰¹, 梁轶群¹, 张 远¹, 兰建林¹, 樊景森^{1,2}, 牛红亚^{1,2}

(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056000;

2. 河北工程大学 河北省煤炭资源开发与利用协同创新中心, 河北 邯郸 056000)

摘要: 为了解滏阳河邯郸段流域重金属污染和分布特征, 采集了滏阳河地表水 23 个水样, 分析了 8 种金属元素 (As、Cr、Cu、Ni、Se、Co、Zn、Al) 的空间分布特征, 结合流域周边环境特征分析了各金属元素的来源, 利用内梅罗综合污染指数对重金属污染状况进行了评价。结果表明: 滏阳河地表水金属浓度平均值按大小顺序依次为 Cr (6.34 $\mu\text{g/L}$)、Se (5.22 $\mu\text{g/L}$)、Al (4.98 $\mu\text{g/L}$)、Ni (2.26 $\mu\text{g/L}$)、Zn (2.20 $\mu\text{g/L}$)、As (1.86 $\mu\text{g/L}$)、Cu (1.61 $\mu\text{g/L}$)、Co (0.20 $\mu\text{g/L}$); 按变异系数 C_v 值大小顺序依次为 Al (132%)、Cr (84%)、Zn (70%)、Se (54%)、Co (52%)、As (42%)、Cu (45%)、Ni (25%); 通过内梅罗综合污染指数计算, 滏阳河地表水 $P_{\text{综}}$ 为 0.92, 重金属污染程度达到轻微污染水平, 主要潜在贡献因子为 Ni; 克里金插值法表明, Co、Cr、Ni 和 Se 在峰峰矿区有含量较高的表现; 主成分分析表明, Ni、Se、Co、Zn 来源于生活污水的排放, Al 和 Cr 为陶瓷业等工厂生产过程中产生的工业污染。

关键词: 地表水; 重金属; 污染特征; 来源解析

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2021)06-0094-08

Study on heavy metal pollution characteristics of surface water in Handan section of Fuyang River

ZHU Xuening¹, LIU Yuebin¹, ZHANG Yibing¹, LIANG Yiqun¹,
ZHANG Yuan¹, LAN Jianlin¹, FAN Jingsen^{1,2}, NIU Hongya^{1,2}

(1. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China;

2. Hebei Collaborative Innovation Center of Coal Resources Development and Utilization,
Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

Abstract: In order to understand the pollution and distribution characteristics of heavy metals in the Handan section of the Fuyang River basin, 23 surface water samples of the Fuyang River were collected. The spatial distribution characteristics of 8 metal elements (As, Cr, Cu, Ni, Se, Co, Zn and Al) were analyzed. Combined with the surrounding environmental characteristics, the sources of each metal element were analyzed. The pollution status of heavy metals was evaluated by Nemero comprehensive pollution index method. The results showed that the average concentrations of these eight heavy metals in surface water of Fuyang River ranked from high to low were Cr (6.34 $\mu\text{g/L}$), Se (5.22 $\mu\text{g/L}$), Al (4.98 $\mu\text{g/L}$), Ni (2.26 $\mu\text{g/L}$), Zn (2.20 $\mu\text{g/L}$), As (1.86 $\mu\text{g/L}$), Cu (1.61 $\mu\text{g/L}$), Co (0.20 $\mu\text{g/L}$). The coefficients of variation (C_v) ranked from high to low were Al (132%), Cr (84%), Zn (70%), Se (54%), Co (52%), As (42%), Cu (45%) and Ni (25%). By calculating the Nemero comprehensive pollution index, the comprehensive pollution index of surface water in Fuyang River was

0.92 which belongs to the slight pollution level. The main potential contribution factor was Ni. The Kriging interpolation method showed that the contents of Co, Cr, Ni and Se were high in the Fengfeng mining area. The principal component analysis showed that Ni, Se, Co and Zn came from the discharge of domestic sewage, and Al and Cr came from the industrial pollution generated in factories such as ceramic industry.

Key Words: Surface water; Heavy metals; Pollution characteristics; Source analysis

0 引言

滏阳河发源于邯郸峰峰矿区,地处干旱半干旱地区,水资源极为匮乏^[1],流经邯郸市核心区域,人口高度密集,沿岸工业快速发展,受到生活污染、工业污染和农业污染的影响,进入地表水的重金属迁移能力差,难以被降解,极易对人体健康产生危害^[2]。当前,关于滏阳河重金属污染研究主要涉及沉积物和水环境两个方面,而针对水环境的研究主要集中在重金属空间分布特征、污染来源判断和污染评价上^[3-10]。研究内容上,对滏阳河水环境的研究主要为重金属元素的理化性质、水体富营养化以及毒理性的分析等^[3,5-6,9-10];研究地域上,对滏阳河水环境的研究区域一般涉及多市,多集中于邯郸段、衡水段和邢台段^[3-10]。鉴于滏阳河是邯郸市重要的内陆河,河流流经邯郸市中心,经常接纳生活污水,受到人类影响,故对其污染分析具有重要意义。

为此,本研究以滏阳河邯郸段为研究对象,从地表水重金属角度进行污染分析,旨在了解滏阳河邯郸段水体重金属污染现状,测试了地表水样品中 As、Cr、Cu、Ni、Se、Co、Zn、Al 的总含量,分析

了研究区域内地表水重金属的分布特征,使用内梅罗综合污染指数法对滏阳河邯郸段地表水进行污染评价并对其污染来源进行了解析,以期为滏阳河的污染治理提供基础数据。

1 调查方法

1.1 研究区概况

滏阳河流域,属海河流域子牙河系,发源于邯郸峰峰矿区滏山南麓,流经邯郸、邢台、衡水和沧州。滏阳河流域近年来经济发展迅速,是我国北方典型的缺水、水资源分布不均的流域^[7]。滏阳河在邯郸市内为最上段,自东武仕水库流经峰峰矿区、磁县、邯山区、丛台区、永年区、曲周县、鸡泽县至邯邢边界,长约 119 km,流域面积 2 747 km²^[8]。

1.2 采样点布设和样品采集

水样采集前将存放样品的聚乙烯桶用蒸馏水清洗 3 遍以上,取水前,用所采的水样冲洗取样瓶 2~3 次^[11]。将采样桶沉入水下 10~15 cm 深处采样,避免将砂砾、植物碎屑等带入瓶内^[11]。样品采集后贴上标签并详细记录采样点及其附近的情况^[11]。在滏阳河流域共布设 23 个采样断面,每个断面设置 1 个采样点,具体分布见图 1。

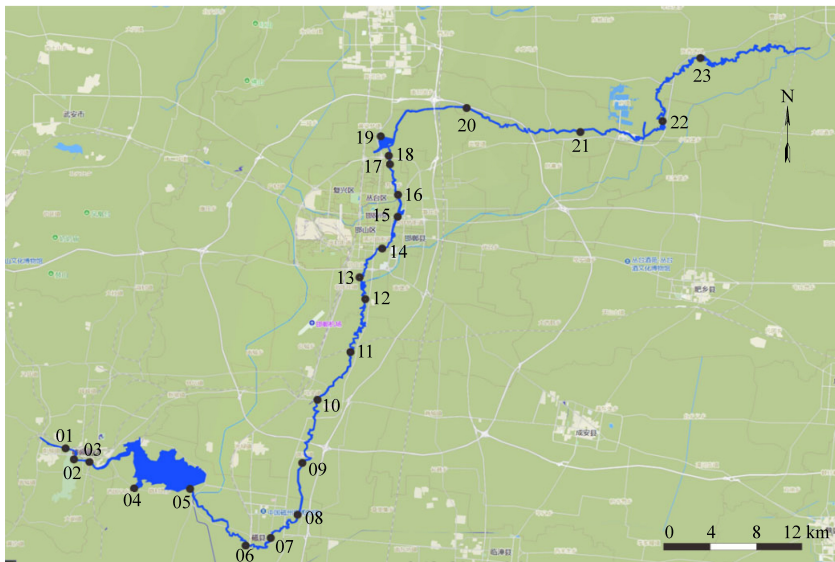


图 1 滏阳河采样点分布

Fig.1 Sampling points distributed in Fuyang River

1.3 分析方法

重金属离子测试均在中国科学院国家重点实验室完成,采用等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测定,测试精度优于 0.5%。

2 结果与讨论

2.1 濠阳河地表水重金属分布特征

2.1.1 濠阳河地表水重金属含量分析

濠阳河地表水体重金属含量统计见表 1。地表水中 8 种金属浓度平均值大小顺序依次为 Cr (6.34 $\mu\text{g/L}$)>Se(5.22 $\mu\text{g/L}$)>Al(4.98 $\mu\text{g/L}$)>Ni (2.26 $\mu\text{g/L}$)>Zn(2.20 $\mu\text{g/L}$)>As(1.86 $\mu\text{g/L}$)>Cu(1.61 $\mu\text{g/L}$)>Co(0.20 $\mu\text{g/L}$)。根据表 1 可知,各重金属的变异系数 C_v 值大小顺序依次为 Al (132%)>Cr(84%)>Zn(70%)>Se(54%)>Co(52%)>As(42%)>Cu(45%)>Ni(25%)。除重金属 Al 为强变异外,其余金属元素均为中等程度变异,说明研究区域中重金属的空间分布差异性较大,其中 Al 的空间差异性最大。

选取《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(以下简称水质标准),I 类水质水中涉及的 6 种重金属(Cr、As、Zn、Ni、Cu、Se),由表 1 可

知,Cr 在 7 个采样点超过水质标准中 I 类水质标准,超标率为 30.43%。Se 在两个采样点超过水质标准中 I 类水质标准,超标率为 8.69%。除此之外,濠阳河水中的 As、Cu、Zn、Ni 四种金属元素的质量浓度均低于水质标准限值。这说明研究区域地表水有不同程度的 Cr 和 Se 积累。

与濠阳河全流域^[13]相比,邯郸段地表水重金属 As、Cr、Ni、Cu、Zn、Co 均低于其平均值,其中 As 和 Zn 的检测值在濠阳河全流域范围值之外,小于其最小值。Se 的平均值高于濠阳河全流域,检测值在全流域的范围值内,这说明邯郸段有明显 Se 污染。表 2 为国内其它河口的重金属含量,与我国其它大河河口相比,本研究 Cr 的平均值高于珠江口、长江口和黄河口,Ni 的平均含量低于珠江口,Cu 的含量低于珠江口和黄河口,高于长江口,Co 的含量略高于珠江口,但两者相差不大,Zn 的含量远低于珠江口、长江口和黄河口。从以上分析可以看出,本研究与濠阳河全流域相比,Se 含量偏高,As、Cr、Ni、Cu、Co 和 Zn 的含量偏低;与珠江口和长江口以及黄河口相比,Cr 的含量偏高,Zn 的含量偏低。

表 1 濠阳河地表水重金属含量统计表

Table 1 Statistics table of heavy metal contents in surface water of Fuyang River

金属元素	最大值/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	最小值/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均值/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	标准差/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	变异系数/%	标准限值 ^[12] /($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
As	3.48	0.83	1.86	0.77	42	50
Al	15.65	0.03	3.76	4.98	132	/
Cr	18.87	2.82	6.34	5.30	84	10
Ni	3.67	1.54	2.26	0.58	25	/
Se	10.91	2.18	5.22	2.83	54	10
Cu	3.79	0.39	1.61	0.73	45	10
Co	0.56	0.11	0.20	0.10	52	/
Zn	5.15	0.37	2.20	1.53	70	50

表 2 国内其它河口的重金属含量

Table 2 Contents of heavy metals in other estuaries of China

$\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

金属元素	濠阳河全流域 ^[13]		珠江口 ^[14]	长江口(冬季) ^[15]		黄河口(冬季) ^[15]	
	平均值	范围值	平均值	平均值	范围值	平均值	范围值
As	11.06	5.61~49.20	/	3.74	1.20~6.70	1.22	0.76~2.32
Cr	191.51	1.27~6 226.00	3.29	0.40	0.15~0.90	3.21	1.16~4.61
Ni	31.16	0.80~571.00	2.40	/	/	/	/
Se	2.78	0.41~12.90	/	/	/	/	/
Cu	16.67	1.85~265.10	4.17	1.30	0.70~2.70	3.01	2.05~4.47
Co	5.19	0.36~27.77	0.16	/	/	/	/
Zn	517.04	6.65~25 370.00	29.70	9.42	1.55~22.30	16.00	11.60~20.50

2.1.2 地表水污染分布特征

利用克里金插值法对濠阳河邯郸段地表水 8

种金属元素进行分析,结果见图 2。根据图 2 可知,濠阳河邯郸段地表水中 Al 元素在峰峰矿区和

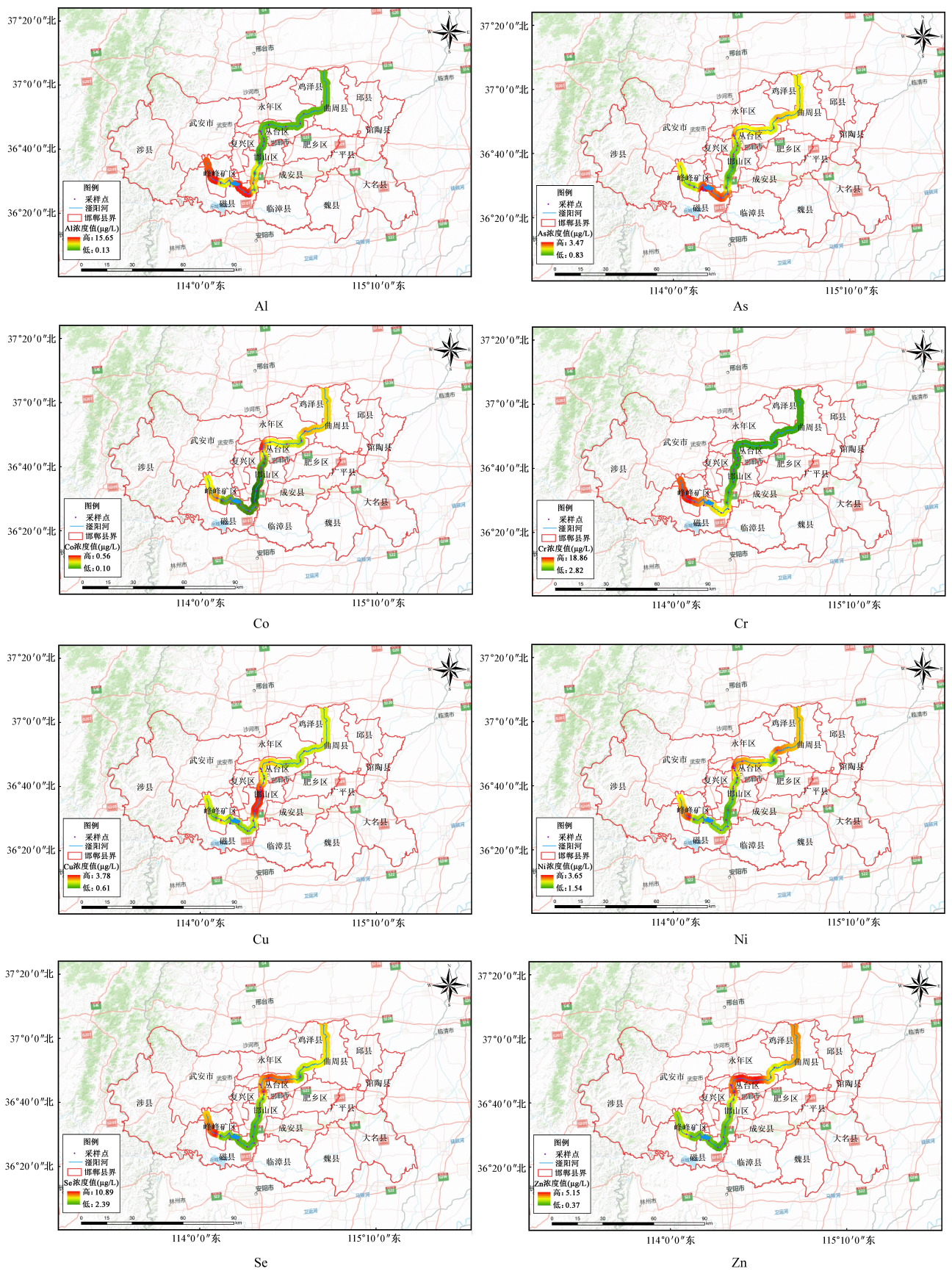


图 2 滏阳河浅层地表水中重金属浓度的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metals concentrations in the shallow surface water of Fuyang River

磁县段含量较高;As 在磁县和东武仕水库含量较高,在邯山区含量较低;Co 在峰峰矿区源头处和丛台区含量较高;Cr 在峰峰矿区含量较高,且随水流方向含量逐渐下降;Cu 在邯山区含量较高,且随水流方向呈下降趋势;Ni 在峰峰矿区、丛台区、永年区、曲周县和鸡泽县含量较高;Se 在峰峰矿区源头处和丛台区含量较高;Zn 在丛台区含量较高,随水流方向含量有所下降,在曲周段处含量又升高。综上,各重金属元素在邯郸市污染各有不同。其中 Co 和 Se 的污染地域较为一致,均在峰峰矿区源头处和丛台区段含量较高;Co、Cr、Ni 和 Se 则在峰峰矿区都有含量较高的表现,这说明滏阳河水在峰峰矿区处受到较严重污染。在调查滏阳河时发现滏阳河源头滏源公园处有一明显生活污水排污口,污水未经处理便直接排入滏阳河,无人处理;滏阳河黑龙洞景区也有一处排污口,是经过处理的生活污水达到一级 A 标准后排入滏阳河内。因此,滏阳河地表水在峰峰矿区的含量较高的原因可能是由生活污水的排放所导致。

2.2 滏阳河地表水重金属污染特征

2.2.1 内梅罗综合污染指数法

(1) 单因子污染指数法

单因子污染指数法是一种较为传统的水质评价方法,在我国水质监测工作中应用广泛,它将各评价因子的测试值与选定的各类标准进行比较,以判定单项水质或者沉积物、土壤的类别。一般情况下,单因子指数法的评价结果以最差评价结果作为区域内水质、沉积物、土壤的污染等级,其计算方法如式(1)。

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

表 4 综合污染指数分级统计表

Table 4 Classification statistics of comprehensive pollution index

污染分级	污染指数	污染等级	污染程度
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	无污染	清洁
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	轻微污染	尚清洁
3	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	中度污染	土壤轻污染,作物开始受到污染
4	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	重度污染	土壤作物均受到中度污染
5	$P_{\text{综}} > 3$	严重污染	土壤作物均受污染,已相当严重

2.2.2 基于内梅罗综合污染指数法的污染评价

选取水质标准中的Ⅰ类水质标准作为滏阳河地表水环境中重金属评价标准,计算得到地表水重金属单因子污染指数评价结果如表 5 所示。各采样点 As、Cu、Co 和 Zn 单因子污染指数 <1 ,为无污染状态;元素 Al 除在 1、5、6 号三个采样点处单

式中, P_i ——为重金属 i 的单因子污染指数;

C_i ——为重金属 i 的实测值;

S_i ——为重金属 i 的评价标准限值(以水质标准中的Ⅰ类水质标准作为滏阳河水环境中重金属评价标准)。评价结果单因子污染指数分级^[16]见表 3。

表 3 单因子污染指数分级统计表

Table 3 Classification statistics of single factor pollution index

污染分级	污染指数	污染等级
1	$P_i \leq 1$	无污染
2	$1 < P_i \leq 2$	轻微污染
3	$2 < P_i \leq 3$	中度污染
4	$3 < P_i \leq 5$	重度污染
5	$P_i > 5$	严重污染

(2) 综合污染指数法

综合污染指数法是在单因子污染指数法基础上建立起来的一种污染评价方法,它摆脱了单因子污染指数法在污染评价过程中的单一性,而是将更多种重金属元素的单一评价结果进行数学归纳和统计分析,从而在更大范围对地表水重金属污染作出综合评价。内梅罗综合污染指数计算公式^[17]详见式(2)。

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{\text{max}})^2 + (P_{\text{ave}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综}}$ ——为水样的综合污染指数;

P_{max} ——为重金属元素 i 的单因子污染指数的最大值;

P_{ave} ——为各单因子污染指数的平均值。

综合污染指数分级见表 4。

因子污染指数 >1 呈现轻微污染状态外其余采样点均呈现无污染状态,Al 呈现无污染状态;元素 Cr 除在 1~7 号七个采样点处单因子污染指数 >1 呈现轻微污染状态外,其余采样点呈现无污染状态,Cr 呈现无污染状态;Ni 除在 2、3、8、9、10、12、14、15、22 号九个采样点 <1 呈现无污染状态外,在

其余采样点>1 呈轻微污染,Ni 呈轻微污染状态;Se 除在 1 号和 16 号两个采样点>1 呈轻微污染状态外,在其余采样点呈无污染状态,Se 整体呈无污染状态。

滏阳河地表水重金属内梅罗综合污染指数评价结果如表 5 所示。研究区内各点位内梅罗综合

污染指数整体变化范围为:0.56~1.45。其中,1 号采样点 $P_{综}$ 值受 Cr 元素 P_i 值影响较大,评价结果较差。地表水中 1、2、3、5、6、19、23 号七个采样点的 $P_{综}>1$,表现为轻污染。整体来说,地表水中重金属污染程度达到轻微污染水平,主要潜在贡献因子为 Ni。

表 5 滏阳河地表水单因子污染指数和综合污染指数统计表

Table 5 Statistical table of single factor pollution index and comprehensive pollution index in surface water of Fuyang River

采样点	As	Al	Cr	Ni	Se	Cu	Co	Zn	$P_{综}$
1	0.03	1.57	1.89	1.70	1.07	0.09	0.07	0.05	1.45
2	0.03	0.26	1.65	0.87	0.22	0.04	0.03	0.02	1.20
3	0.04	0.54	1.51	0.98	0.26	0.21	0.03	0.02	1.11
4	0.07	0.49	1.27	1.04	0.33	0.10	0.03	0.02	0.94
5	0.06	1.46	1.17	1.01	0.32	0.11	0.03	0.02	1.10
6	0.06	1.47	1.09	1.05	0.36	0.11	0.03	0.01	1.10
7	0.06	0.43	1.08	1.04	0.36	0.13	0.03	0.01	0.81
8	0.02	0	0.33	0.82	0.31	0.13	0.02	0.02	0.60
9	0.02	0.06	0.33	0.79	0.32	0.26	0.02	0.02	0.58
10	0.02	0.01	0.33	0.93	0.32	0.24	0.03	0.02	0.68
11	0.02	0.03	0.33	1.11	0.43	0.38	0.03	0.03	0.81
12	0.02	0.04	0.32	0.96	0.41	0.18	0.03	0.03	0.71
13	0.03	0.04	0.32	1.21	0.44	0.23	0.03	0.04	0.88
14	0.03	0	0.31	0.97	0.33	0.17	0.03	0.03	0.71
15	0.02	0.04	0.29	0.77	0.32	0.06	0.03	0.03	0.56
16	0.03	0.12	0.29	1.33	1.09	0.15	0.04	0.10	0.98
17	0.03	0.41	0.29	1.22	0.73	0.18	0.04	0.07	0.90
18	0.03	0.26	0.28	1.28	0.76	0.16	0.04	0.09	0.94
19	0.06	0.27	0.29	1.83	0.82	0.20	0.11	0.07	1.34
20	0.04	0.14	0.28	1.42	0.99	0.19	0.05	0.10	1.05
21	0.05	0	0.29	1.31	0.91	0.12	0.05	0.10	0.96
22	0.04	0	0.30	0.84	0.32	0.14	0.04	0.06	0.61
23	0.05	0.27	0.35	1.53	0.58	0.15	0.07	0.04	1.12
最大值	0.07	1.57	1.89	1.83	1.09	0.38	0.11	0.10	1.45
最小值	0.02	0	0.28	0.77	0.22	0.04	0.02	0.01	0.56
平均值	0.04	0.34	0.63	1.13	0.52	0.16	0.04	0.04	0.92

2.3 地表水重金属污染来源

2.3.1 相关性分析

通过 SPSS 软件对地表水中 As、Al、Cr、Ni、Se、Cu、Co、Zn 共 8 种元素进行相关性分析,分析结果见表 6。根据表 6 可知,Ni 和 Co 的相关性最强,相关系数为 0.882,呈极显著正相关($P<0.01$),Ni 和 Se 的相关性也很强,相关系数为 0.817,呈极显著正相关($P<0.01$),说明 Ni、Co、Se 之间关系密切,具有一定的同源性。Se 和 Zn 也呈极显著正相

关($P<0.01$),相关系数为 0.852,说明 Se 的来源一部分和 Ni、Co 相同,一部分和 Zn 相同。Al 和 Cr 的相关系数为 0.719,呈极显著正相关($P<0.01$),说明 Al 和 Cr 具有共同的来源。As-Al、As-Co、Cr-Cu、Co-Zn 相关系数分别为 0.479、0.459、0.442、0.441,均达到显著相关水平。说明 As 的来源一部分与 Al 相同,一部分与 Co 相同;Cr 和 Al 的同源性较大,但也有一部分来源和 Cu 相关;Co 和 Ni 的同源性较大,但也有一部分来源和 As、Zn 相关;

Ni、Co、Se 有共同的来源;Se 和 Zn 的同源性较大,但同时也和 Ni、Co、Zn 具有相同的来源。

表 6 滏阳河地表水中重金属间的 Person 相关性分析

Table 6 Person correlation analysis of heavy metals in surface water of Fuyang River

重金属	相关系数 <i>P</i>							
	As	Al	Cr	Ni	Se	Cu	Co	Zn
As	1.00							
Al	0.479 *	1.00						
Cr	0.30	0.719 * *	1.00					
Ni	0.40	0.24	0.00	1.00				
Se	0.13	0.09	-0.16	0.817 * *	1.00			
Cu	-0.34	-0.36	-0.442 *	0.05	-0.02	1.00		
Co	0.459 *	0.18	-0.01	0.882 * *	0.621 * *	-0.06	1.00	
Zn	0.06	-0.24	-0.421 *	0.575 * *	0.852 * *	-0.02	0.441 *	1.00

* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著

* * 在 0.01 级别(双尾),相关性显著

2.3.2 来源解析

在 SPSS 中对地表水的数据进行 KMO 和巴特利特球形度检验,得到地表水的 KMO 为 0.572, Bartlett 值为 0.00($P<0.001$)。说明适合对地表水重金属做主成分分析。对滏阳河邯郸段地表水中重金属元素进行主成分分析,共提取 2 个特征值大于 1 的主成分,代表了可能存在的 2 种来源。2 个主成分的累积贡献率为 71.71%,结果见表 7。

主成分 1 的贡献率为 40.99%,Ni、Se、Co、Zn 在第一主成分上的载荷相对较高,分别为 0.947、0.892、0.868 和 0.737,表明第一主成分主要支配着地表水重金属元素 Ni、Se、Co 和 Zn 的来源,结合地表水重金属空间分布特征以及重金属元素间的相关性可知,滏阳河地表水中 Ni、Se、Co 和 Zn 重金属元素主要来源于生活污染。地表水重金属空间分布特征图表明 Ni、Se、Co 和 Zn 在滏阳河源头滏源公园处和丛台区的含量较高,根据实地调查,源头滏源公园处有一明显生活污水排污口,污水未经处理便直接排入滏阳河,无人处理,而丛台区流经邯郸市中心,人口密集,容易产生污水的排放,再加上北环路与滏阳河交叉点也有一处生活污水排污口,许多人类生产活动产生的废水等携带污染物被排放入滏阳河内。因此,第一主成分可以考虑为生活污水的排放等生活污染。

主成分 2 的贡献率为 30.71%,Al 和 Cr 在第二主成分上的载荷相对较高,分别为 0.842 和 0.879,第二主成分主要支配着地表水重金属元素 Al 和 Cr 的来源,

结合地表水重金属空间分布特征和元素间的

相关性可知,滏阳河地表水中 Al 和 Cr 的积累主要在邯郸段的峰峰矿区和磁县处。据调查,峰峰矿区盛产陶瓷,有象牙瓷、白玫瓷、骨质瓷等数十种,而陶瓷材料中含有 Cr、Pb 等重金属,在生产过程中还会产生 Al 污染。因此,第二主成分可以考虑为陶瓷业等工厂生产过程中产生的工业污染。

表 7 研究区地表水重金属主成分分析结果

Table 7 Results of principal component analysis of heavy metal in surface water of the study area

金属元素	载荷	
	成分 1	成分 2
As	0.471	0.577
Al	0.232	0.842
Cr	-0.043	0.879
Ni	0.947	0.003
Se	0.892	-0.233
Cu	-0.113	-0.599
Co	0.868	0.065
Zn	0.737	-0.474

3 结 论

(1)滏阳河地表水 8 种金属浓度平均值大小顺序依次为 Cr (6.34 μg/L) > Se (5.22 μg/L) > Al (4.98 μg/L) > Ni (2.26 μg/L) > Zn (2.20 μg/L) > As (1.86 μg/L) > Cu (1.61 μg/L) > Co (0.20 μg/L), 各重金属的变异系数 C_v 值大小顺序依次为 Al (132%) > Cr (84%) > Zn (70%) > Se (54%) > Co (52%) > As (42%) > Cu (45%) > Ni (25%)。滏阳河邯郸段地表水中 Cr 和 Se 的均值含量较高,

Cu 和Co 均值则相对较少。地表水中 Cr 有 7 个采样点超过水质标准中 I 类水质标准,超标率为 30.43%;Se 有两个采样点超过水质标准中 I 类水质标准,超标率为 8.69%。

(2)克里金差值法表明各重金属元素在邯郸市的空间分布特征各有不同。其中,Co 和 Se 的污染地域较为一致,均在峰峰矿区源头处和丛台区段含量较高;Co、Cr、Ni 和 Se 则在峰峰矿区都有含量较高的表现。

(3)通过内梅罗综合污染指数计算得到滏阳河地表水 $P_{\text{综}} = 0.92$,重金属污染程度达到轻微污染水平,主要潜在贡献因子为 Ni。

(4)相关性分析和主成分分析表明地表水由 2 个主成分构成,Ni、Se、Co、Zn 在第一主成分上的载荷相对较高,根据实地调查,推测第一主成分为生活污水的排放等生活污染;Al 和 Cr 在第二主成分上的载荷相对较高,第二主成分可以考虑为陶瓷业等工厂生产过程中产生的工业污染。

参考文献

[1] 户作亮. 海河流域水资源与水环境综合管理知识管理系统 [J]. 水利信息化, 2010, 10 (5): 11-17.

[2] 刘昭,周宏,刘伟,等. 清江流域地下水重金属含量特征及健康风险初步评价 [J]. 环境工程, 2021, 28 (7): 1-10.

[3] 张博文,赵甲亭,吴二威,等. 滏阳河河流水体中重金属污染特征及其对青海弧菌和斜生栅藻的毒性效应 [J]. 生态毒理学报, 2018, 13 (1): 179-189.

[4] 王若冰,赵钰,单保庆,等. 海河流域典型重污染河流滏阳河沉积物氨化和硝化速率研究 [J]. 环境科学学报, 2018, 38 (3): 858-866.

[5] Zhang Wenqiang, Jin Xin, Liu Dong. Temporal and spatial var-

iation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river—Fuyang River in northern China [J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2017, 55 (1): 34-43.

[6] Wenzhong Tang, Shenghui Duan, Baoqing Shan, et al. Concentrations, diffusive fluxes and toxicity of heavy metals in pore water of the Fuyang River, Haihe Basin [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 127 (1): 33-40.

[7] 郎超,单保庆,李思敏,等. 滏阳河表层沉积物重金属污染现状分析及风险评价 [J]. 环境科学学报, 2016, 36 (1): 64-73.

[8] 王月锋,田在峰,李楠. 滏阳河邯郸段表层沉积物中重金属污染研究 [J]. 安徽农业科学, 2014, 42 (23): 7946-7948+7951.

[9] 李文赞,李叙勇,王慧亮,等. 滏阳河主要水环境污染物空间分布特性研究 [J]. 环境科学学报, 2012, 32 (11): 2814-2819.

[10] 张景森,张静,张景广,等. 人为因素对滏阳河邯郸段河流水化学的影响 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2010, 27 (4): 40-45.

[11] 拉巴次仁,布多,谭欣,等. 西藏尼洋河水环境重金属元素水平与风险评估 [J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29 (4): 33-36.

[12] GB 3838—2002, 地表水环境质量标准 [S].

[13] 吴二威. 海河支流重金属污染特征及 Hg^{2+} 对水生藻类的毒性研究 [D]. 石河子市: 石河子大学, 2014: 30-40.

[14] 宋美英. 珠江河口水体和沉积物中重金属的分布特征及风险评估 [D]. 广州: 暨南大学, 2014: 33-37.

[15] 张亚南. 黄河口、长江口、珠江口及其邻近海域重金属的河口过程和沉积物污染风险评价 [D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2013: 37-42.

[16] 李静,谢正苗,徐建明,等. 杭州市蔬菜地土壤重金属环境质量评价 [J]. 生态环境, 2003, 12 (3): 277-280.

[17] 金腊华,邓家泉,吴小明. 环境评价方法与实践 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 20-23.