

黄河宁夏段水体重金属时空分布特征及健康风险评价

曹占琪¹, 苟金明², 邱小琮^{3*}, 周琼¹, 万永鹏¹, 赵增锋¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏回族自治区水产技术推广站, 宁夏 银川 750001; 3. 宁夏大学生命科学学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:通过2019—2020年在黄河宁夏段布设12个采样点监测各季节水体中Cu、Zn、Cd、Hg 4种重金属的质量浓度, 分析重金属污染状况和来源, 并评价对人体的健康风险。结果表明:黄河宁夏段水体4种重金属质量浓度由高到低为Zn > Cu > Cd > Hg, 除了Hg质量浓度有超过II类标准限值外, 其余重金属均未超标。4种重金属春、夏、秋、冬的浓度高于冬季, Zn浓度分布差异最大。4种重金属对人体产生的总健康风险最大值为成人 $3.76 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 儿童为 $4.40 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 远低于最大可接受水平 $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, Cd为主要贡献因子。水体中Cu、Cd、Hg可能来源于工农业生产和降雨稀释, Zn可能来源于旅游交通运输和土壤淋溶。

关键词:重金属; 分布特征; 健康风险评价; 黄河宁夏段

中图分类号: X522; X820.4 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2022)05-0033-06

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Water of Ningxia Section of the Yellow River

CAO Zhan-qi¹, GOU Jin-ming², QIU Xiao-cong^{3*}, ZHOU Qiong¹, WAN Yong-peng¹, ZHAO Zeng-feng¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Fisheries Technology Extension Station of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia 750001, China; 3. School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Based on the mass concentrations of four heavy metals, Cu, Zn, Cd and Hg from 12 sampling sites in Ningxia section of the Yellow River in various seasons from 2019 to 2020, the status and sources of heavy metal pollution were analyzed, and the health risks to human body were evaluated. The results showed that the mass concentrations of the four heavy metals in Ningxia section of the Yellow River from high to low were Zn > Cu > Cd > Hg. Except for Hg mass concentration exceeding class II standard limit, other heavy metals did not exceed the standard. The concentrations of the four heavy metals were higher in spring, summer and autumn than those in winter. The difference of Zn concentration distribution was the largest. The maximum total health risk of the four heavy metals to human body was $3.76 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ for adults and $4.40 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ for children, far below the maximum acceptable level of $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$. Cd was the main contributing factor. Cu, Cd and Hg in water might come from industrial and agricultural production and rainfall dilution, while Zn might come from tourism transportation and soil leaching.

Key words: Heavy metals; Distribution characteristic; Health risk assessment; Ningxia section of the Yellow River

2012年广西龙江河重金属镉污染事件致使沿岸的生态环境和下游居民的生活受到严重影响,引起人们对水体重金属污染的广泛关注。重金属具有富集性和不可降解性^[1],可通过工业污水、农业

收稿日期:2021-07-01;修订日期:2022-07-23

基金项目:宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)基金资助项目(NXYLXK2021A03)

作者简介:曹占琪(1995—),男,宁夏银川人,硕士,研究方向为水资源与水环境调控。

*通信作者:邱小琮 E-mail: qxc7175@126.com

退水等多种途径进入江河湖泊,并随着食物链富集进而扩散,对水生生态系统结构和功能造成严重危害^[2]。此外,还可通过食物链、饮水等多种途径进入人体,威胁人类的生命健康。

黄河宁夏段是著名的引黄灌区,农业生产发达,大量的农业退水排放对黄河生态造成了一定程度的影响^[3]。现有研究^[4-5]多数是关于黄河宁夏段水质的时空变化特征和风险评价,如朱崑等^[6]对该河段的底泥重金属进行了生态风险评价,缺乏对水体重金属污染及健康风险评价的研究。今于2019—2020年在黄河宁夏段布设12个采样点,监测分析水体中重金属含量,采用重金属污染指数法评价其污染风险,采用健康风险评价模型评价重金属对人体的健康风险,采用聚类分析法解析重金属来源,为黄河水生态环境保护和治理提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

黄河宁夏段贯穿宁夏全区,全长397 km,多年入境实测径流量342.634亿 m^3 ,多年降雨量为289亿 m^3 。该河段附近有多个水源地,如银川市的南部水源地、征沙水源地和银川市东郊水源地;吴忠市的大坝水源地和青铜峡镇水源地;中卫市的康滩水源地等。研究区和水源地分布见图1。

1.2 采样点布设和采样时间

充分考虑黄河宁夏段的地形特点、水文条件等,共布设12个采样点,分别为西气东输管道北

(S1)、西气东输管道南(S2)、坝上南岸(S3)、坝上北岸(S4)、中宁黄河大桥北岸(S5)、中宁黄河大桥南岸(S6)、中宁枣园北岸(S7)、永宁铁路大桥西岸(S8)、青铜峡铁桥东岸(S9)、青铜峡铁桥西岸(S10)、兴庆区头道墩黄河西岸(S11)、平罗黄河大桥东岸(S12),见图1。其中,S1—S7属于卫宁段,S8—S12属于青石段。

采样时间为2019年4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)和2020年1月(冬季),每月各采水样1次。

1.3 样品采集与测定

按照《水质 采样技术指导》(HJ 494—2009)要求,用1 L采水器采集表层水下50 cm深处的水样,现场用浓硝酸酸化,将pH值调至2以下,密封保存,带回实验室。用0.45 μm 孔径微孔滤膜过滤,滤液在4 $^{\circ}C$ 条件下保存,进行微量元素分析。参照《水和废水监测分析方法》(第四版),铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)的含量用原子吸收分光光度法检测,汞(Hg)含量用原子荧光光度法检测,方法检出限依次为0.007 mg/L、0.002 mg/L、0.001 mg/L、0.000 01 mg/L。

1.4 研究方法

采用描述性统计方法分析黄河宁夏段水体重金属的最小值、最大值、平均值、标准差、相对标准偏差(RSD),采用相关性分析和聚类分析法解析水体重金属的主要来源^[7]。

1.4.1 重金属污染指数法

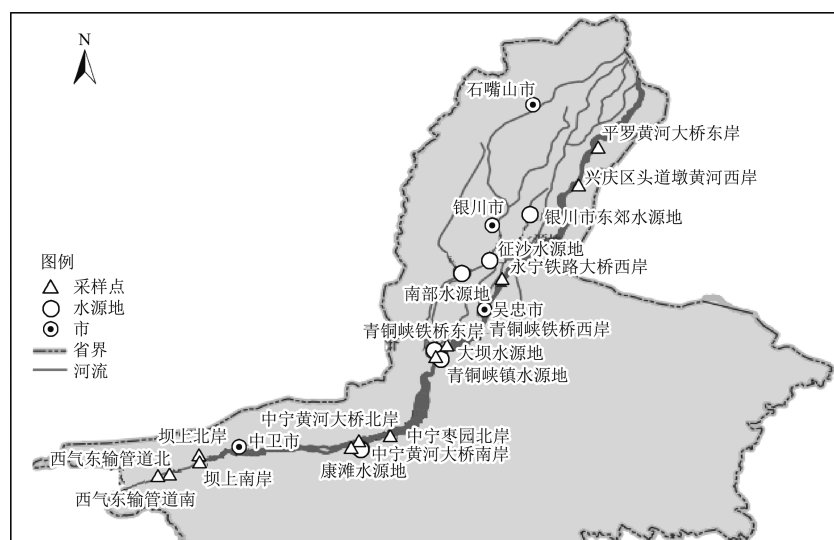


图1 研究区及采样点分布

Fig. 1 Distribution of study area and sampling sites

重金属污染指数法是评价地表水污染状况的有效工具,其模型计算公式^[8]如下,加权计算重金属污染指数(HPI)。

$$HPI = \left(\sum_{i=1}^n Q_i \times W_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n W_i \right) \quad (1)$$

$$W_i = K/S_i \quad (2)$$

$$Q_i = 100 \times C_i/S_i \quad (3)$$

式中: W_i 为第*i*种重金属指标的权重; Q_i 为第*i*种重金属指标的质量等级指数; S_i 为第*i*种重金属指标的标准限值,μg/L,文中以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类为标准评价; K 为比例常数(通常取 $K=1$); C_i 为第*i*种重金属指标的实测值,μg/L; n 为评价指标数。HPI的临界值为100。

1.4.2 健康风险评价

采用美国环境保护署(USEPA)推荐模型^[9]和

$$R^p = \sum_{i=1}^k \left[1 - \exp \left(- \frac{2 \times 10^{-3} \times k \times C_i \times \sqrt{\frac{6 \times \tau \times TE}{\pi}} \times A_{sd} \times FE \times EF \times ED}{W \times AT \times f} \right) \times SF_i \right] / L \quad (6)$$

$$R^f = \sum_{i=1}^l \left[\frac{2 \times 10^{-3} \times k \times C_i \times \sqrt{\frac{6 \times \tau \times TE}{\pi}} \times A_{sd} \times FE \times EF \times ED}{W \times AT \times f} \times 10^{-6} / RfD_i \right] / L \quad (7)$$

式中: SF_i 为致癌物*i*的致癌强度系数,Cd为致癌物,取值为6.1 mg/(kg·d); RfD_i 为非致癌物*i*的参考剂量,Cu、Hg、Zn为非致癌物,饮水途径依次取0.04 mg/(kg·d)、0.000 3 mg/(kg·d)、0.3 mg/(kg·d),皮肤接触途径依次取0.012 mg/(kg·d)、0.000 3 mg/(kg·d)、0.01 mg/(kg·d)。其他参数的取值参考杨全锁等^[12]、韩冰等^[13]的相关研究成果: θ 为每日平均饮水量,成人取2.2 L,儿童取1 L; C_i 为污染物*i*的质量浓度,mg/L; W 为人体体重,成人取58.6 kg,儿童取22.9 kg; k 为皮肤吸附参数,取0.001 cm/h; τ 为延滞时间,取1 h; TE 为涉水行为持续时间,取0.4 h; A_{sd} 为人体表面积,成人取16 600 cm²,儿童取6 660 cm²; FE 为涉水行为频率,取0.3次/d; EF 为暴露频率,取365 d/a; ED 为暴露延时,取35 a; AT 为平均暴露时间,取12 775 d; f 为肠道吸附率,取1; L 为人均寿命,选自《2018年世界卫生统计报告》中的中国人均寿命76.4 a。

2 结果与讨论

2.1 黄河宁夏段水体重金属时空分布特征

黄河宁夏段水体重金属质量浓度统计见表1。在重金属季平均值计算时,参照《水环境监测规

Streng等^[10]提出的模型分别计算经饮水途径和皮肤接触途径对人体产生的健康风险。

不同种类的重金属对人体产生的健康危害可叠加计算,水体中4种重金属的健康危害总风险*R*可表示为: $R = R^c + R^n + R^p + R^f$,其中, R^c 、 R^p 分别表示致癌物经饮水、皮肤接触途径所致健康风险, R^n 、 R^f 分别表示非致癌物经饮水、皮肤接触途径所致健康风险^[11]。

经饮水途径所致的健康风险评价模型:

$$R^c = \sum_{i=1}^k \left[1 - \exp \left(- \frac{\theta \times C_i}{W} \times SF_i \right) \right] / L \quad (4)$$

$$R^n = \sum_{i=1}^l \left(\frac{\theta \times C_i}{W} \times 10^{-6} / RfD_i \right) / L \quad (5)$$

经皮肤接触途径所致的健康风险评价模型:

表 1 黄河宁夏段水体重金属质量浓度统计

Table 1 Statistics of heavy metal mass concentration in Ningxia section of the Yellow River

时期	重金属	范围 $\rho/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	平均值 $\rho/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	RSD/%	超标率/%
春季	Cu	—	3.5	0	0
	Zn	3~11	5.25	53.3	0
	Cd	—~3	1.37	58.4	0
夏季	Hg	0.21~0.37	0.28	17.9	100
	Cu	13~52	31.08	45.6	0
	Zn	10~28	17.25	37.8	0
秋季	Cd	1~2	1.17	33.3	0
	Hg	0.02~0.03	0.02	100	0
	Cu	—~10	6.92	38.4	0
冬季	Zn	8~160	42.75	98.2	0
	Cd	—	0.5	0	0
	Hg	0.03~0.10	0.04	75	25
监测期	Cu	—	3.5	0	0
	Zn	1~19	4.58	107.9	0
	Cd	—	0.5	0	0
	Hg	0.03~0.10	0.04	75	0
监测期	Cu	—~52	11.25	120.7	0
	Zn	1~160	17.45	148.8	0
	Cd	—~3	0.89	68.5	0
	Hg	0.02~0.37	0.10	110	75

范》(SL 219—2013)规定,低于检出限的按1/2检出限参加计算。以《地表水环境质量标准》

(GB 3838—2002)中Ⅱ类为评价标准(Cu、Zn、Cd和Hg的标准限值分别为1.0 mg/L、1.0 mg/L、0.005 mg/L和0.000 05 mg/L)。由表1可知,黄河宁夏段水体4种重金属质量浓度由高到低为Zn > Cu > Cd > Hg,除了Hg质量浓度有超过Ⅱ类标准限值外,其余重金属均未超标。总体上,4种重金属的RSD均较高,说明各采样点重金属质量浓度分布存在较大差异。其中,Zn的差异最大,其次是Cu和Hg。从超标率来看,Hg出现超标情况,Hg的超标率达到75%,应当引起重视。

图2(a)—(d)分别为黄河宁夏段各采样点4种重金属质量浓度季节变化。由图2可见,整体上,春、夏、秋三季4种重金属质量浓度差异明显,且均高于冬季。Cu质量浓度为夏季最高,秋季次之,春冬季最低;Zn质量浓度为秋季最高,夏、春季

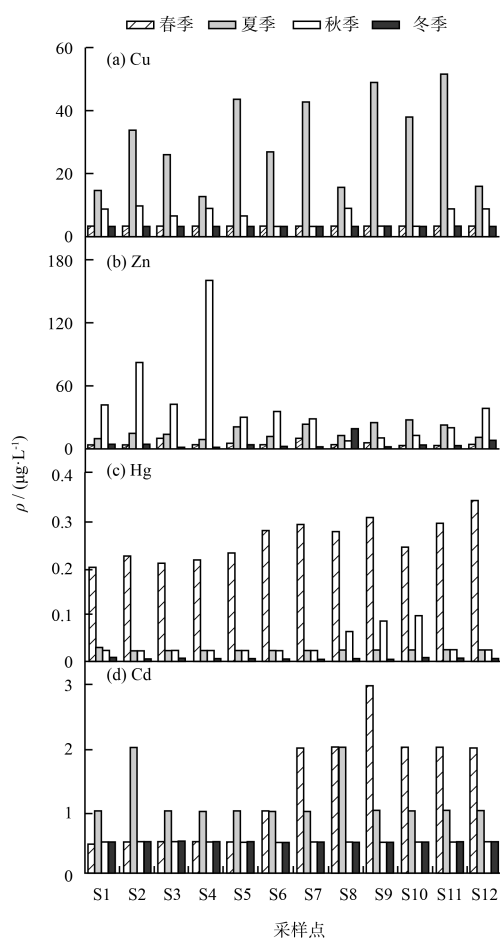


图2 黄河宁夏段各采样点4种重金属质量浓度季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of mass concentration of the four heavy metals at each sampling site in Ningxia section of the Yellow River

次之,冬季最低;Cd质量浓度为春季最高,夏季次之,秋冬季最低;Hg质量浓度为春季最高,秋、夏季次之,冬季最低。Zn和Hg春、夏、秋季的质量浓度除个别点位外均高于冬季,其中Hg春季质量浓度远高于其他季节,Cu、Hg、Cd冬季各点位质量浓度极为稳定。Cu质量浓度最大值出现在夏季采样点S11处;Zn质量浓度最大值出现在秋季采样点S4处,且四季各点位质量浓度变化明显;Cd质量浓度最大值出现春季采样点S9处,春、夏季沿程各点位质量浓度差异大;Hg质量浓度最大值出现在春季采样点S12处,春季沿程各点位质量浓度变化明显。

2.2 黄河宁夏段水体重金属HPI评价

图3为黄河宁夏段各采样点HPI值季节变化。由图3可见,只有春季和部分秋季的点位的HPI值超过临界值100,而夏季和冬季的HPI值低于临界值,春季的HPI值最大,各点位HPI值远超其他季节,冬季的HPI值最小。污染严重的季节是春季,污染最严重的是S12,污染程度的变化趋势与Hg的变化趋势一致,说明HPI值受Hg的影响较大。据了解,这两个地区工农业发达,有可能是农药化肥的施用通过灌溉排入,也有可能通过地质矿产等工业排入水体。

2.3 黄河宁夏段水体重金属健康风险评价

黄河宁夏段水体重金属健康风险评价结果见表2。Cu、Zn、Hg属于非致癌污染物,评价时用 R^a 和 R^f 值,Cd属于致癌污染物,评价时用 R^c 和 R^p 值。由表2可知,黄河宁夏段S8采样点处水体4种重金属对人体的总健康风险R值最大,成人达到 $3.76 \times 10^{-6} a^{-1}$,儿童达到 $4.40 \times 10^{-6} a^{-1}$,均远低于推荐的最大可接受水平 $1 \times 10^{-4} a^{-1}$ 。成人的健康风险低于儿童。饮水途径产生的健康风险值远高于皮肤接触途径;致癌物产生的健康风险远高

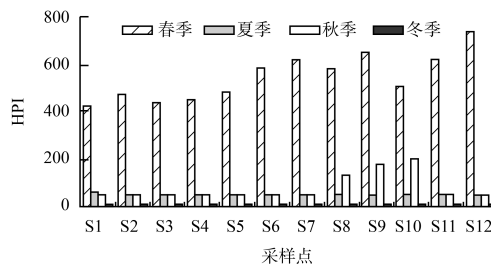


图3 黄河宁夏段各采样点HPI值季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of HPI value at each sampling site in Ningxia section of the Yellow River

表 2 黄河宁夏段水体重金属健康风险评价结果
Table 2 Health risk assessment of heavy metal in Ningxia section of the Yellow River

a⁻¹
a⁻¹

采样点	R ^c /10 ⁻⁶		R ⁿ /10 ⁻¹²		R ^p /10 ⁻⁸		R ^f /10 ⁻¹²		R/10 ⁻⁶	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
S1	1.87	2.18	2.36	2.75	0.71	0.76	4.06	4.33	1.88	2.19
S2	2.62	3.05	4.16	4.84	1.00	1.06	7.00	7.46	2.63	3.06
S3	1.87	2.18	2.77	3.23	0.71	0.76	5.27	5.48	1.88	2.19
S4	1.87	2.18	6.59	7.67	0.71	0.76	9.38	9.99	1.88	2.19
S5	1.87	2.18	2.53	2.95	0.71	0.76	5.17	5.51	1.88	2.19
S6	2.25	2.61	2.17	2.53	0.86	0.91	4.05	4.31	2.26	2.62
S7	2.99	3.49	2.66	3.09	1.14	1.22	5.19	5.53	3.00	3.50
S8	3.75	4.38	1.78	2.07	1.43	1.52	3.37	3.59	3.76	4.40
S9	3.75	4.36	1.91	2.23	1.43	1.52	5.08	5.41	3.76	4.38
S10	2.99	3.49	2.01	2.33	1.14	1.22	4.75	5.05	3.00	3.50
S11	2.99	3.48	2.18	2.53	1.14	1.22	5.57	5.93	3.00	3.49
S12	2.99	3.49	2.40	2.80	1.14	1.22	4.77	5.08	3.00	3.50

于非致癌物。R^c的主要贡献因子是 Cd,表明 4 种重金属中 Cd 为最主要健康风险污染物。

进一步分析重金属健康风险的空间分布特征发现,从采样点 S1—S12 的顺序,成人和儿童健康风险值的总体变化趋势为先增加后减少,卫宁段(S1—S7)的健康风险值均低于青石段(S8—S12)。这与 Cd 的质量浓度时空变化趋势相一致,再次说明健康风险值由 Cd 决定。其中健康风险值较大的采样点均在青石段。青石段区域工农业发达,承纳农业退水、部分生活污水和工业废水。影响健康风险评价的因素很多,文中仅研究分析了 4 种重金属,得出健康风险值可能偏小。综上所述,黄河宁夏段的健康风险值的大小与 Cd 含量、用水途径、年龄组成等有关,最主要的是 Cd 含量,而 Cd 含量又与所在区域土地利用类型有关。因此,应从土地利用类型方面着手治理重金属污染,同时避免直接饮用该区域的水体。

2.4 黄河宁夏段水体重金属来源解析

图 4(a)(b)分别为黄河宁夏段水体 4 种重金属和 12 个采样点聚类。由图 4 可见,4 种重金属可聚为两类,Zn 为一类,其他 3 种重金属为另一类。12 点采样点分为两类,S1、S2、S3、S4 为第一类区域,其余 8 个采样点为第二类区域。

在不考虑人为因素的情况下,研究表明污染物浓度随流量的增加而被稀释减少。由《宁夏水资源公报》可知,宁夏段降雨量从南向北依次减少,第一区域降水量高于第二区域,而第一区域内 Cu、Cd、Hg 的浓度均低于第二区域,即 Cu、Cd、Hg 浓度变化符合降雨稀释规律。夏、秋季雨量大于春、冬

季,且第一区域降水量大于第二区域,聚类和相关资料显示,Zn 在夏、秋季的浓度高于春、冬季,并且 Zn 在第一类区域的浓度高于第二类区域,Zn 的浓度变化规律与土壤淋溶规律相吻合,其可能受土壤淋溶的影响,这与吕琳莉等^[14]对西藏尼洋河分析的结果相一致。

结合表 1 可知,Cu 的浓度夏秋季高于春冬季,而夏秋季是工农业的生产期,且第二区域 Cu 的浓度较高。由《宁夏回族自治区水功能区划》可知,第二区域属于农业用水区和过渡区,以工农业生产为主,研究表明 Cu 的含量与农业的农药化肥使用过量有关,也与区域内的工业废水排放有关^[15]。因此,Cu 主要来源于农药化肥的施用通过灌溉退水排入水体^[16]和工业废水的排放^[17]。据了解,Zn 可能来源于机动车刹片、润滑油燃烧和轮胎磨损等产生的交通运输污染物^[18-19],这可能与采样点周围人口多、车辆交通繁忙有关,还可能与旅游轮船所产生的各种废水、尾气、漏油等有关。由聚类分析结果和图 2 可知,第一类区域内 Zn 浓度偏高,而该区域属于旅游区且离公路较近,故 Zn 的来源为交通运输污染和旅游轮船产生的污染。由聚类分析可知,Cd 和 Hg 可能具有同源性,研究表明 Cd 基本由陆源地表径流输入水体,同时矿产开发也是 Cd 输入的重要来源^[20]。Hg 的来源主要有区域地质来源、径流输入和大气干湿沉降^[21],而 Cd 和 Hg 浓度最大值分别出现在采样点 S9 和 S12 处,所在区域为农业用水区。因此,Cd 和 Hg 的来源可能是农药化肥的施用通过灌溉排入,也有可能通过地质矿产等排入水体^[22]。这与 HPI 评价结果一致。

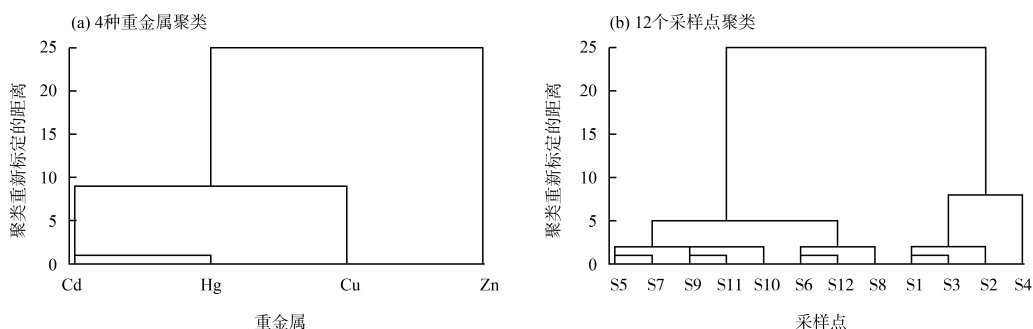


图4 黄河宁夏段水体4种重金属和12个采样点聚类

Fig. 4 Clustering diagram of the four heavy metals and 12 monitoring sites in Ningxia section of the Yellow River

3 结论

(1) 黄河宁夏段水体4种重金属质量浓度由高到低为 $Zn > Cu > Cd > Hg$, 除了 Hg 质量浓度有超过Ⅱ类标准限值外, 其余重金属均未超标。HPI 评价表明, 春季和部分秋季点位的 HPI 值超过临界值, Hg 为主要贡献因子。

(2) 健康风险评价结果表明, 黄河宁夏段水体4种重金属对人体产生的总健康风险最大值成人为 $3.76 \times 10^{-6} a^{-1}$, 儿童为 $4.40 \times 10^{-6} a^{-1}$, 远低于最大可接受水平 $1 \times 10^{-4} a^{-1}$, 致癌物 Cd 的健康风险贡献率最大; 成人的健康风险低于儿童; 致癌物产生的健康风险大于非致癌物, 饮水途径产生的健康风险远高于皮肤接触途径。

(3) 聚类分析和来源解析表明, 黄河宁夏段水体中重金属 Cu 、 Cd 、 Hg 可能来源于工农业生产和降雨稀释, Zn 可能来源于旅游交通运输和土壤淋溶。

[参考文献]

[1] 刘乃静, 李臻, 赵银鑫, 等. 吴忠市表层土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 7114-7121.

[2] 耿雅妮. 河流重金属污染研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 262-265.

[3] 宁忠瑞, 李虹彬. 基于水质标识指数的黄河宁夏段水质评价与分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S1): 56-61.

[4] 林涛, 徐盼盼, 钱会, 等. 黄河宁夏段水质评价及其污染源分析[J]. 环境化学, 2017, 36(6): 1388-1396.

[5] 李亚斌, 王海科, 钱会, 等. 宁夏彭阳水质监测断面的水质评价及预测[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(1): 36-40.

[6] 朱崑, 李志刚, 李健, 等. 宁夏黄河流域湖泊湿地底泥重金属污染特征及生态风险评价[J]. 中国农学通报, 2013, 29(35): 281-288.

[7] 乔明叶, 陈丽刚, 陈凯. 黄河宁夏中卫河段一维水流数学模型

应用研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(7): 215-217.

[8] MAHATO M K, SINGH G, SINGH P K, et al. Assessment of mine water quality using heavy metal pollution index in a coal mining area of Damodar River Basin, India[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, 99(4): 54-61.

[9] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: Human health evaluation manual (Part A) interim final[R]. Washington D. C.: US EPA, 1989: 58-88.

[10] STRENCE D L, CHAMBERLAIN P J. Multimedia environmental pollutant assessment system: Exposure pathway and human health impact assessment models[R]. Washington D. C.: Pacific Northwest National Laboratory, 1995: 23-30.

[11] 开晓莉, 张维江, 邱小琼, 等. 清水河污染物对儿童所致健康风险评估[J]. 环境化学, 2018, 37(12): 2809-2819.

[12] 杨全锁, 郑西来, 许延营, 等. 青岛市黄岛区饮用水源健康风险评价[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(2): 83-86.

[13] 韩冰, 何江涛, 陈鸿汉, 等. 地下水有机污染人体健康风险评价初探[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 224-229.

[14] 吕琳莉, 李朝霞, 黄毅, 等. 西藏尼洋河水体重金属分布特征及风险评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 193-199.

[15] 赵增锋, 石伟, 邱小琼, 等. 清水河流域水体中5种重金属的分布特征及健康风险评价[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(3): 35-40.

[16] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 971-984.

[17] 毕斌. 洞庭湖水环境中重金属污染特征、赋存形态及其源解析[D]. 临汾: 山西师范大学, 2017.

[18] 王宏康. 水体污染及防治概论[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1991.

[19] 贺新星, 魏芳, 范健, 等. 宁连高速两侧土壤及小麦重金属污染特征研究[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(5): 28-32.

[20] 何本蜻, 王中伟, 张婷, 等. 贵黄公路沿线重金属分布特征、来源解析及风险评价[J]. 地球与环境, 2021, 49(2): 164-171.

[21] 王道芳, 付善明, 常向阳, 等. 粤西某硫铁矿尾矿库下农田土壤重金属的形态分布及生物有效性[J]. 环境化学, 2013, 32(9): 1813-1814.

[22] 孙晓静, 王起超, 邵志国. 第二松花江中下游沉积物汞的时空变化规律[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1062-1066.