

# 渭河西安段水体重金属污染现状及其健康风险评价

杨学福<sup>1,2</sup>, 关建玲<sup>3</sup>, 段晋明<sup>1</sup>, 王 蕾<sup>3</sup>, 裴晓龙<sup>3</sup>, 罗仪宁<sup>3</sup>, 李 伟<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710032; 3. 陕西省环境监测中心站, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 以 Hg, Cd, Cr<sup>6+</sup>, Pb, As, Cu, Zn 和 Se 为研究对象, 采用单因子水质标准比较法、重金属污染指数法(HPI)对渭河西安段水体的重金属污染现状进行了分析, 并采用 USEPA 的健康风险评价模型对其健康风险进行了评价。结果表明, 2012 年渭河西安段水体中 Pb 和 Cd 未检出, 依据《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》渭河西安段水体中存在一定的 Hg 污染, 其余重金属含量水平在 I—II 类标准范围内; 渭河西安段水体 HPI 值为 32.74, 小于污染临界值 100, 说明其重金属污染尚处于可接受水平; 研究涉及的重金属的非致癌和致癌健康风险均处于可接受水平, As 引起的健康风险最大, 其致癌健康风险值为  $8.50 \times 10^{-5}$ , 接近可接受水平的上限( $10^{-4}$ ), 应引起环境管理部门的特别关注。

**关键词:** 渭河西安段; 重金属; 污染; 健康风险评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)02-0152-05

中图分类号: X824

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.033

## Heavy Metal Pollution and Related Health Risk of Weihe River in Xi'an Section

YANG Xue-fu<sup>1,2</sup>, GUAN Jian-ling<sup>3</sup>, DUAN Jin-ming<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, PEI Xiao-long<sup>3</sup>, LUO Yi-ning<sup>3</sup>, LI Wei<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,

Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Department of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological

University, Xi'an, Shaanxi 710032, China; 3. Shaanxi Environmental Monitoring Center, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** The pollution by heavy metals of Hg, Cd, Cr<sup>6+</sup>, Pb, As, Cu, Zn and Se in the Weihe River of Xi'an section were analyzed using the methods of single factor water quality assessment and heavy metal pollution index(HPI). The health risks of these metals were evaluated by the method documented by USEPA. The results indicated that Pb and Cd were undetectable in all water samples, but the water was contaminated to certain degrees by Hg while all other metal contents were within the limits of the category I or II of surface waters based on the Environmental Quality Standards for Surface Water (GB3838—2002). The HPI of the water of the river in the region was 32.74, which was lower than the threshold value of 100, indicating that the pollution is within the acceptable level. The results also showed that the non-carcinogenic risk and the carcinogenic risk of the investigated metals are acceptable, and the highest carcinogenic risk was from As in the water body, with the risk index being at  $8.50 \times 10^{-5}$ . It suggests that As in water of the region should be of specific concern for the local environmental monitoring and management authorities, since its health risk index was almost close to the upper acceptable limit( $10^{-4}$ ).

**Keywords:** Xi'an section of Weihe River; heavy metals; pollution; health risk assessment

重金属可经生活污水和工业废水排放、采矿及农业面源污染、大气干湿沉降等途径进入河流水体并造成污染。即使水体中的重金属微量存在也可对生物产生毒性效应; 又因重金属具有难降解, 可在生物体内富集和放大等特点, 最终通过饮水、食物链等途径

直接或间接地进入人体, 对人体健康造成严重威胁<sup>[1]</sup>。因此, 监测和评价河流水体中的重金属元素对于河流流域的水质安全控制、当地人民生活质量和流域社会经济的可持续发展具有深远的意义<sup>[2]</sup>。渭河是黄河的最大支流, 也是陕西省的主要河流, 其在西

收稿日期: 2013-05-06

修回日期: 2013-06-14

资助项目: 陕西省学科建设人才基金项目“水质与水环境科学”(DB03087)

作者简介: 杨学福(1981—), 男(汉族), 宁夏回族自治区同心县人, 博士研究生, 助教, 研究方向为水源水质健康风险评价。E-mail: yangxuefu@163.com。

通信作者: 段晋明(1957—), 男(汉族), 山西省静乐县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水科学与技术, 水质微量污染物控制, 水资源环境保护与管理等研究。E-mail: JINMINGDUAN@xauat.edu.cn。

安市境内蜿蜒 150 km,使该市深受其益。然而西安市人口密集,又是重要的工业基地,西安市依靠渭河水系发展的同时,大量的生产、生活废水排入境内受纳水体并最终汇入渭河,使之一度成为重度污染的河流和黄河最主要的污染源<sup>[3]</sup>。国务院 2008 年批复的《关中—天水经济区发展规划》对西安市提出了“打造国际化大都市”的新定位,要求区域发展的同时应更加注重生态建设和环境保护。目前对于渭河流域西安段水体的研究主要集中在水质状况、水资源综合评价与利用、水质污染优化控制等方面,而针对渭河流域尤其是西安段水体中重金属的污染研究非常有限<sup>[4-5]</sup>,对其重金属的健康风险评价尚属空白。本研究以渭河西安段为主要研究区域,以其干流和支流水体中重金属的常规监测数据为基础,分析渭河流域西安段水体中重金属的污染现状,并对其进行健康风险评价,以期为渭河流域西安段水体的水质安全控制提供基础数据和技术支持。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 数据来源

采用西安市环境监测站 2012 年渭河西安段水体 10 个监测断面的重金属常规水质监测数据,其中干流沿程监测断面 4 个,6 条主要支流入渭监测断面各 1 个。监测指标包括重金属汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)和类金属砷(As)、硒(Se)共 8 项。监测频次为每月 1 次。

### 1.2 评价方法

#### 1.2.1 污染现状评价方法

(1) 单因子水质标准比较法。选用监测浓度值或浓度年均值,参照《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》进行评价,低于或等于该类标准限值时称为达到该类标准;以Ⅲ类标准限值作为临界值,当浓度超过Ⅲ类标准限值时即为超标。

(2) 重金属污染指数法(HPI)。以加权算术平均值为基础,对水体中各个重金属产生的水质污染影响进行综合评价<sup>[6]</sup>。目前在国外应用较多,在国内的应用鲜见报道。通常按分为 3 步计算:

① 计算第  $i$  个重金属指标的权重:

$$W_i = k/S_i \quad (1)$$

② 计算第  $i$  个重金属指标的质量等级指数:

$$Q_i = 100(C_i/S_i) \quad (2)$$

③ 加权计算重金属污染指数:

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

式中: $S_i$ ——水域功能允许的最高浓度值( $\mu\text{g/L}$ )

〔《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》的Ⅲ类标准限值〕; $k$ ——由条件决定的比例常数,为计算简便通常取 1; $C_i$ ——水体中重金属的监测浓度值( $\mu\text{g/L}$ ); $n$ ——评价指标的个数。根据研究文献<sup>[6]</sup>,通常污染临界指数  $HPI_c = 100$ ,当  $HPI > 100$  时,认为该水体的重金属污染程度已超过其最高可接受水平。

1.2.2 健康风险评价方法 健康风险评价是 20 世纪 80 年代兴起的,该方法是以风险度作为评价指标,将环境污染与人体健康联系起来,定量描述污染对人体产生的健康危害风险<sup>[7]</sup>。本文选用目前国际上广泛采用的 USEPA 健康风险评价模型<sup>[8]</sup>计算健康风险,并考虑研究区域内人群状况,对模型中的参数取值进行适当调整。分两步进行计算:

(1) 计算长期日均摄入量(CDI)。饮水消化吸收和皮肤接触吸收是水环境中的重金属对人体产生健康风险的两种主要途径<sup>[9]</sup>。分别通过公式(4)—(5)计算经饮水和经皮肤接触两种途径所致的长期日均摄入量

$$CDI_w = \frac{C_w \cdot IR \cdot ABS_g \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \quad (4)$$

$$CDI_d = \frac{C_w \cdot SA \cdot K_p \cdot ABS_d \cdot ET \cdot EF \cdot ED \cdot CF}{BW \cdot AT} \quad (5)$$

式中: $C_w$ ——水体中重金属的平均浓度( $\mu\text{g/L}$ ); $IR$ ——摄入频率,取 2.2 L/d; $ABS_g$ ——肠胃消化吸收因子,无量纲; $EF$ ——暴露频率,取 365 d/a; $ED$ ——暴露持续时间,取 70 a; $BW$ ——平均体重,取 60 kg; $AT$ ——终身暴露时间,取 25 550 d; $SA$ ——皮肤接触面积,取 18 000  $\text{cm}^2$ ; $K_p$ ——皮肤渗透系数( $\text{cm/h}$ ); $ABS_d$ ——皮肤接触吸收因子,无量纲; $ET$ ——洗浴暴露时间,取 0.6 h/d; $CF$ ——单位换算系数,取  $10^{-3}$  L/ $\text{cm}^3$ 。各重金属的  $ABS_d$ ,  $ABS_g$  和  $K_p$  选自 USEPA<sup>[10-11]</sup>。

(2) 计算健康风险值。依据国际癌症研究所(IARC)的分类标准,将重金属按照其潜在致癌风险进行分组,依据 USEPA 健康风险评价模型进行致癌与非致癌风险评价。

① 非致癌风险:一般认为,生物体对非致癌性物质的反应有剂量阈值,低于特定的阈值可认为不会产生健康风险<sup>[12]</sup>。非致癌风险通常用健康风险系数(HQ)表示,按公式(6)计算:

$$HQ = \frac{CDI}{RfD} \quad (6)$$

② 致癌风险:对于致癌性物质,一般认为没有剂量阈值,只要有微量存在,即会对人体产生不利影响<sup>[9]</sup>。化学致癌物的致癌风险通常用致癌风险值

(CR)表示,当  $CDI \cdot SF < 0.01$  时,按公式(7)计算;否则,按公式(8)计算:

$$CR = CDI \cdot SF \quad (7)$$

$$CR = 1 - \exp(-CDI \cdot SF) \quad (8)$$

式中:CDI——长期日均摄入量 [ $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ]; RfD——重金属在特定暴露途径下的参考剂量 [ $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ],经饮水途径的参考剂量均选自 USEPA<sup>[11,13]</sup>,经皮肤接触途径的参考剂量<sup>[8]</sup>:  $RfD_d = RfD_m \cdot ABS_g$ ; SF——致癌斜率因子 [ $(\text{kg} \cdot \text{d})/\mu\text{g}$ ],经饮水途径致癌斜率因子选自 USEPA<sup>[11,13]</sup>,经皮肤接触途径致癌斜率因子<sup>[8]</sup>:  $SF_d = SF_m \cdot (ABS_g)^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 渭河西安段水体中重金属污染特征分析

2.1.1 渭河西安段水体中 8 种重金属的含量特征  
统计分析结果显示(表 1),2012 年渭河流域西安段干支流各断面中,Pb 和 Cd 全年未检出,Hg,  $\text{Cr}^{6+}$ , As, Cu, Zn 和 Se 均有检出,除 Hg 外其含量水平均在《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》的 I—II 类水质标准范围内。

渭河流域西安段水体 2012 年全年监测 Hg 样品 120 个,其中 87.12% 达到 I—II 类水质标准,

12.12% 达到 III 类水质标准,0.76% 超标(支流灞河入渭断面三郎村于 11 月份超标 1 次),这说明依据现行地表水环境质量标准渭河流域西安段水体中存在一定的 Hg 污染,但对比胡月红等<sup>[5]</sup>的研究结果发现其污染程度近年来呈明显下降趋势。将渭河西安段 2012 年逐月 Hg 监测浓度值与 2012 年西安段的降水监测数据对比分析发现,Hg 为 III 类或 Hg 超标的月份多为降雨量小的秋冬季,说明降雨量对渭河西安段的 Hg 含量水平有一定影响。另外,值得注意的是依据《地表水环境质量(GB3838—2002)》评价,渭河流域西安段水体中的 Hg 含量有个别样品超过 III 类标准限值,但依据《生活饮用水卫生标准(GB5749—2006)》和 WHO《饮用水水质准则》评价,该样品中的 Hg 含量水平并未超过标准限值。

渭河流域西安段水体中 6 种检出的重金属年平均含量由大到小依次为:  $\text{Zn} > \text{As} > \text{Cr}^{6+} > \text{Cu} > \text{Se} > \text{Hg}$ (表 1),与国内其它同类河流如汉江上游、淮河、东江、拉萨河相比<sup>[14-17,2]</sup>,渭河流域西安段水体中 Hg 含量水平高于淮河和东江; $\text{Cr}^{6+}$  含量水平低于汉江上游,但高于淮河;As 含量水平低于汉江上游和拉萨河,但高于东江;Cu, Zn 含量水平低于淮河和拉萨河;Se 含量水平低于汉江上游。

表 1 2012 年渭河流域西安段水体中 8 种重金属的含量状况

重金属		Hg	Cd	$\text{Cr}^{6+}$	Pb	Cu	Zn	As	Se
检出率/%		23.48	0.00	1.52	0.00	3.85	75.00	74.04	63.46
最大检出浓度		0.42	ND	5.00	ND	30.0	108.0	46.90	8.90
年均值		0.03	ND	4.02	ND	1.87	18.54	4.14	0.79
单因子水质标准比较法评价结果/%	达到 I 类的样品比率	87.12	—	100	—	97.12	86.50	100	100
	达到 II 类的样品比率	0	—	0	—	2.88	12.50	0	0
	达到 III 类的样品比率	12.12	—	0	—	0	0	0	0
	样品超标率	0.76	—	0	—	0	0	0	0
我国《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》III 类标准限值		0.1	5	50	50	1 000	1 000	50	10
我国《生活饮用水卫生标准(GB5749—2006)》限值		1	5	50	10	1 000	1 000	10	10
WHO《饮用水水质准则》限值 <sup>[14]</sup>		6	3	50	10	2 000	—	10	10

注:ND 代表未检出。检出率 = (检出样品个数/实际检测样品个数) × 100%。

2.1.2 渭河西安段水体中重金属的总量和 HPI 评价比较  
渭河西安段水体干流断面的重金属总量评价结果显示,上游咸阳铁桥断面的重金属总量最大,下游新丰桥断面重金属总量最小,沿渭各断面重金属总量有明显的下降趋势(图 1)。渭河西安段干流断面的 HPI 指数评价结果显示:下游断面新丰桥 HPI 指数最大,污染程度相对最严重;咸阳铁桥、天江人渡、耿镇桥 HPI 指数有逐渐下降趋势,但总体来说相

不大(图 1)。渭河西安段沿渭支流各入渭断面重金属总量和 HPI 评价结果显示,重金属总量在农村西站(皂河)最大,但 HPI 指数在三郎村(灞河)最高,按各断面 HPI 指数大小顺序依次为:三郎村 > 临河入渭 > 农场西站 > 涝河入渭 > 三里桥 > 黑河入渭(图 2)。这说明同一河流重金属的总量评价结果和 HPI 指数评价结果不尽一致,结合各断面 8 种重金属的分含量分析发现总量低、HPI 指数高的断面含毒性重金属如

Hg 的含量相对较多。对照 HPI 指数评价的定义和计算方法可以看出,HPI 指数考虑各个重金属对环境产生危害的权重,更能客观反应水体中各个重金属对水质产生的综合污染影响程度。根据上述方法,计算得到渭河流域西安段水体中 8 种重金属的 HPI 为 32.74,低于污染临界值 100,说明渭河西安段水体的重金属污染程度低于该段水域功能的国家标准要求限值,处于可接受水平。

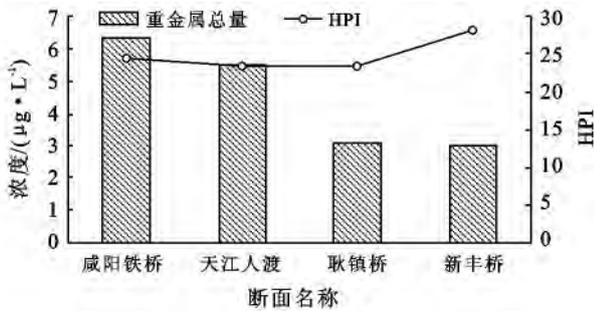


图 1 渭河流域(西安段)干流各断面重金属总量与 HPI 指数比较

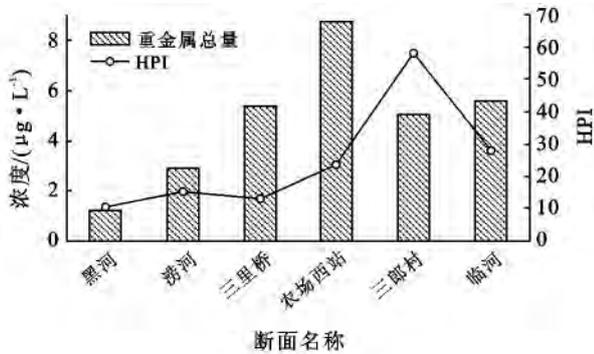


图 2 渭河流域(西安段)支流各入渭断面重金属总量与 HPI 指数比较

2.2 渭河流域西安段水体中重金属的健康风险评价

2012 年渭河流域西安段水体各研究断面 Pb 和 Cd 全年未检出,不参与定量健康风险评价。根据 1.2.2 中的方法,对 As 和 Cr<sup>6+</sup> 同时参与致癌风险评价和非致癌风险评价,Hg,Se,Cu 和 Zn 仅参与非致

癌风险评价。

根据 1.2.2 中的健康风险评价模型和评价参数可以计算出 2012 年渭河流域西安段水体中 Hg,Se,Cu,Zn,As 和 Cr<sup>6+</sup> 通过饮水和皮肤接触两种途径暴露所致的非致癌健康风险值(表 2)和致癌健康风险值(表 3)。由表 2 可以看出,本研究涉及的几种重金属通过皮肤接触途径对人体健康所造成的危害远小于通过饮水途径所造成的危害,这与许多学者<sup>[18]</sup>的研究结论一致。渭河流域西安段水体中各重金属的非致癌健康风险值介于  $3.76 \times 10^{-5} \sim 1.89 \times 10^{-1}$  之间,其中 As 产生的非致癌健康风险值最大,Hg 产生的非致癌健康风险最小,各重金属产生的非致癌健康风险由大到小依次为:  $As > Se > Cr^{6+} > Cu > Zn > Hg$ (表 2)。一般认为,重金属产生的非致癌健康风险值超过 1 时会对人体产生健康风险<sup>[18]</sup>,因此渭河流域西安段水体中检出的 6 种重金属通过饮水消化和皮肤接触暴露对人体产生的非致癌健康风险很小或者不会产生非致癌健康风险。渭河流域西安段水体中 As 和 Cr<sup>6+</sup> 对周围居民产生的致癌健康风险分别为  $8.50 \times 10^{-5}$  和  $1.70 \times 10^{-6}$ (表 3)。大多数研究认为化学致癌物的致癌健康风险值介于  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  时可能对人体产生潜在致癌风险,但仍处于可以接受的范围<sup>[16-17]</sup>,依据此范围评价,渭河流域西安段水体中 As 和 Cr<sup>6+</sup> 对于人体所产生的致癌健康风险值处于可接受水平。但值得注意的是,渭河流域西安段水体中 As 所引起的致癌健康风险接近可接受范围的上限  $10^{-4}$ ,考虑到本研究仅计算了饮水和皮肤接触两种致癌途径,而 As 还有可能通过食物摄入等其它暴露途径危害人体健康,本研究评价的健康风险可能比实际对人体产生的健康风险小。同理,与其它重金属相比,计算得到的渭河流域西安段水体中 As 产生的非致癌健康风险值最大,其值最接近 1,因此渭河流域西安段水体中的 As 对人体可能会产生一定的健康风险。综上所述,考虑到流域内居民的人体健康安全,渭河流域西安段水体中的 As 应作为优先控制的重金属污染物引起环境管理部门的特别关注。

表 2 渭河流域西安段水体中重金属的非致癌健康风险值

重金属	RfD <sub>m</sub> /(µg·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	HQ <sub>m</sub>	RfD <sub>d</sub> /(µg·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	HQ <sub>d</sub>	HQ
Hg	0.3	$3.58 \times 10^{-5}$	0.003	$1.87 \times 10^{-6}$	$3.76 \times 10^{-5}$
Cu	40	$4.68 \times 10^{-4}$	12	$2.71 \times 10^{-8}$	$4.68 \times 10^{-4}$
Zn	300	$4.12 \times 10^{-4}$	60	$3.23 \times 10^{-8}$	$4.12 \times 10^{-4}$
Se	5	$2.31 \times 10^{-3}$	2.2	$6.24 \times 10^{-8}$	$2.31 \times 10^{-3}$
As	0.3	$1.89 \times 10^{-1}$	0.025	$1.76 \times 10^{-4}$	$1.89 \times 10^{-1}$
Cr <sup>6+</sup>	3	$1.12 \times 10^{-3}$	0.075	$1.86 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-3}$

注:RfD<sub>m</sub>为经饮水途径的参考剂量,RfD<sub>d</sub>为经皮肤接触途径的参考剂量;HQ<sub>d</sub>为经饮水途径的非致癌健康风险值,HQ<sub>m</sub>为经皮肤接触途径的非致癌健康风险值。

表 3 渭河流域西安段水体中重金属的致癌健康风险值

重金属	SF/(kg·d·μg <sup>-1</sup> )	CR
As	1.5×10 <sup>3</sup>	0.85×10 <sup>-4</sup>
Cr <sup>6+</sup>	5.0×10 <sup>2</sup>	1.70×10 <sup>-6</sup>

注:SF 为致癌斜率因子,CR 为致癌风险值。

### 3 结论

(1) 2012 年渭河流域西安段水体中 Pb 和 Cd 全年未检出,检出的 6 种重金属年平均含量由大到小依次为:Zn>As>Cr<sup>6+</sup>>Cu>Se>Hg。依据现行的《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》,针对渭河水质中研究涉及的 8 种重金属指标进行评价发现,除 Hg 外其它重金属含量水平均在《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》的 I—II 类水质标准范围内;渭河流域西安段水体中重金属存在一定的 Hg 污染,但其污染程度近年来呈明显下降趋势,降雨量对渭河西安段水体中的 Hg 含量水平有一定影响。

(2) 渭河西安段水体中重金属的总量评价结果和 HPI 指数评价结果不尽一致,在描述多种重金属对水质产生的影响时 HPI 指数更能客观反映水体中各个重金属对水质产生的综合污染影响程度。2012 年渭河流域西安段水体中 8 种重金属的 HPI 为 32.74,低于污染临界值 100,说明渭河西安段水体的重金属污染相对于水域功能要求,尚处于可接受水平。渭河西安段干流由上游至下游重金属总量逐渐减小,但下游断面新丰桥 HPI 指数最大,污染相对最严重;渭河西安段沿渭支流中农村西站(皂河)重金属总量最大,但 HPI 指数在三郎村(灞河)最高,按断面 HPI 指数大小顺序依次为:三郎村>临河入渭>农场西站>涝河入渭>三里桥>黑河入渭。

(3) 本研究显示渭河西安段水体中重金属通过皮肤接触途径对人体健康所造成的危害远小于通过饮水途径所造成的危害,与许多学者对其它河流的重金属健康风险评价研究结论一致。渭河流域西安段水体中重金属通过饮水消化和皮肤接触暴露两种途径对人体产生的非致癌健康风险值介于  $3.76 \times 10^{-5} \sim 1.89 \times 10^{-1}$  之间,按由大到小顺序依次为:As>Se>Cr<sup>6+</sup>>Cu>Zn>Hg;渭河流域西安段水体中 As 和 Cr<sup>6+</sup> 对周围居民产生的致癌健康风险分别为  $8.5 \times 10^{-5}$  和  $1.70 \times 10^{-6}$ 。根据相关文献<sup>[16-17]</sup>,本研究所涉及的重金属的非致癌和致癌健康风险值均处于可接受的范围,但 As 所引起的健康风险最大,特别是其致癌健康风险值接近可接受范围的上限  $10^{-4}$ ,因此渭河流域西安段水体中的 As 应作为优先控制的重金属

污染物引起环境管理部门的特别关注。

(4) 需要指出的是,本研究采用 USEPA 健康风险评价模型,但考虑到研究区域不同年龄人群在不同暴露环境下产生的健康风险不同,同时模型中一些参数取值选自 USEPA,所述结果是对渭河流域西安段水体中重金属所做的初步健康风险评价。在今后的研究中,应当根据具体研究区域的实际状况选取更为合适的模型参数,得出更准确的健康风险值,为当地政府的水质安全管理提供更为科学的参考。

#### [参 考 文 献]

- [1] 孙超,陈振楼,张翠,等.上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J].环境科学研究,2009,22(1):60-65.
- [2] 刘凤,李梅,张荣飞,等.拉萨河流域重金属污染及健康风险评价[J].环境化学,2012,31(5):580-585.
- [3] 王东琦,贺延龄,高榕,等.渭河西安市段铅污染状况及其来源分析[J].环境科学学报,2009,29(10):2203-2208.
- [4] 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].陕西西安:陕西师范大学,2008.
- [5] 胡月红,宋文斌,宋涛,等.渭河流域西安段汞污染状况及其来源调查思路分析[C]//中国环境科学学会学术年会论文集:第1卷.北京:中国环境科学出版社,2011:547-551.
- [6] Reza R, Singh G. Assessment of heavy metal contamination and its indexing approach for river water[J]. International Journal of Environment Science and Technology, 2010, 7(4):785-792.
- [7] 黄奕龙,王仰麟,谭启宇,等.城市饮用水源地水环境健康风险评价及风险管理[J].地学前缘,2006,13(3):162-167.
- [8] USEPA(US Environmental Protection Agency). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part A)[OL]. (2012-02-06) [2013-04-02]. <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/ragsa/>.
- [9] Kim E Y, Little J C, Chiu N. Estimating exposure to chemical contaminants in drinking water[J]. Department of Civil and Environmental Engineering, 2004, 38(6):1799-1806.
- [10] USEPA(US Environmental Protection Agency). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E) [OL]. (2012-05-06) [2013-04-02]. <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/ragsa/>.
- [11] USEPA(US Environmental Protection Agency). Risk-Based Screening Table[OL]. (2012-05-04) [2013-04-03]. [http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rb-concentration\\_table/Generic\\_Tables/index.htm](http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rb-concentration_table/Generic_Tables/index.htm).

(下转第 162 页)

- 225-230.
- [12] 邱微,赵庆良,李崧,等.基于“压力—状态—响应”模型的黑龙省生态安全评价研究[J].环境科学,2008,29(4):1148-1152.
- [13] 杨春红,张正栋,田楠楠.基于P—S—R模型的汕头市土地生态安全评价[J].水土保持研究,2012,19(3):209-214.
- [14] 李璇琼,何政伟,陈晓杰.RS和GIS支持下的县域生态安全评价[J].测绘科学,2013,38(1):68-71.
- [15] 杨尽利,周忠发,邱添.典型喀斯特地区生态安全评价及防治措施探讨:以贵州省石阡县为例[J].中国农学通报,2012,28(11):227-231.
- [16] 刘世梁,郭旭东,连纲,等.黄土高原典型脆弱区生态安全多尺度评价[J].应用生态学报,2007,18(7):1554-1559.
- [17] 杨庆媛.西南丘陵山地区土地整理与区域生态安全研究[J].地理研究,2003,22(6):698-708.
- [18] 龚丽妍,王耕.基于灰关联的大连庄河市生态安全评价研究[J].环境科学与管理,2011,36(2):153-157.
- [19] 张松男,雷国平,李秀霞.基于P—S—R模型的城市生态安全模糊物元评价[J].水土保持研究,2013,20(2):170-175.
- [20] 张强,薛惠锋,张明军.基于可拓分析的区域生态安全预警模型及应用[J].生态学报,2010,30(16):4277-4286.
- [21] 李明月,赖笑娟.基于BP神经网络方法的城市土地生态安全评价[J].经济地理,2011,31(2):289-293.
- [22] 殷春雪,李锋,钱谊.基于熵权的长沙市城市生态安全综合评价与预测[J].环境科学与技术,2013,36(1):169-174.
- [23] Huang Huifen, Jeff K, Lo Shanglien. Review of PSR framework and development of a DPSIR model to assess greenhouse effect in Taiwan [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 177(4):623-635.
- [24] 彭建,吴健生,潘雅婧,等.基于PSR模型的区域生态可持续性评价概念框架[J].地理科学进展,2012,31(7):933-940.
- [25] 郑泽娜,周伟.基于主成分的河北省地级市城市生态安全预警评价[J].中国农学通报,2013,29(14):118-123.
- [26] 杨锡涛,周学红,张伟.基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究[J].生态学报,2012,32(22):7230-7238.
- [27] 赵丽,朱永明,付梅臣,等.主成分分析法和熵值法在农村居民点集约利用评价中的比较[J].农业工程学报,2012,28(7):235-242.
- [28] 郭锐利,郑钦玉,刘娟,等.基于熵值法和GM(1,1)模型的重庆城市生态系统健康评价[J].中国环境科学,2012,32(6):1148-1152.
- [29] 石云,焦超卫,米文宝,等.基于GIS的彭阳县退耕还林(草)决策分析[J].中国水土保持,2009(9):26-28.
- [30] Huang Beibei. Ecological poverty measurement and eco-purchase system design [N]. People's Daily Online, 20110802(2).
- [31] 刘艳梅.西部地区生态贫困与生态型反贫困战略[J].哈尔滨工业大学学报,2005,7(6):97-101.
- [32] 于存海.论内蒙古农牧区生态安全、生态贫困与生态型反贫困特区建设[J].内蒙古财经学院学报,2006(5):26-30.

(上接第 156 页)

- [12] Miguel E D, Iribarren I, Chacon E, et al. Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain) [J]. Chemosphere, 2007, 66(3):505-513.
- [13] USEPA(US Environmental Protection Agency). Integrated Risk Information System (IRIS)[OL]. (2012-03-03)[2013-04-05]. <http://www.epa.gov/iris/>.
- [14] WHO(World Health Organization). Guidelines for drinking-water quality, fourth edition[OL]. (2012-08-09)[2013-04-05]. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3rev/zh/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/zh/index.html).
- [15] Li Siyue, Zhang Quanfa. Risk assessment and seasonal variations of dissolved trace elements and heavy metals in the Upper Han River, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 18(1/3):1051-1058.
- [16] Wang Zhifeng, Guo Zhongxing. Preliminary Risk Assessment of Metal Pollution in Source Water of Huaihe River [M]// Measuring Technology and Mechatronics Automation in Electrical Engineering. Springer US, 2012: 385-392.
- [17] 王若师,许秋瑾,张娴,等.东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评估[J].环境科学,2012,33(9):3083-3088.
- [18] Wu Bing, Zhao Dayong, Jia Haiying, et al. Preliminary risk assessment of trace metal pollution in surface water from Yangtze River in Nanjing Section, China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, 82(4):405-409.