

DOI:10.7524/AJE.1673-5897.20180718001

艾提业古丽·热西提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 王维维, 等. 博斯腾湖流域地下水重金属污染的人体健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(2): 251-259

Atiyagul Rixit, Mamattursun Eziz, Wang W W, et al. The human health risk assessment of heavy metal pollution of groundwater in Bosten Lake Basin [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(2): 251-259 (in Chinese)

博斯腾湖流域地下水重金属污染的人体健康风险评估

艾提业古丽·热西提¹, 麦麦提吐尔逊·艾则孜^{1,*}, 王维维¹, 迪力夏提·司马义¹, 艾尼瓦尔·买买提²

1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054

2. 新疆大学化学与化工学院, 乌鲁木齐 830046

收稿日期: 2018-07-18 录用日期: 2018-11-29

摘要: 在新疆博斯腾湖流域绿洲灌区采集 67 个浅层地下水样品, 测定其中 Cu、Mn、Cd、Cr、Ni 和 Zn 等 6 种重金属元素的含量, 采用 Nemerow 综合污染指数对地下水中重金属污染程度进行评价, 借助 US EPA 健康风险评估模型对地下水中重金属污染的潜在健康风险进行评价。结果表明: ①地下水中各元素平均含量大小顺序依次为: Mn > Zn > Cu > Ni > Cr > Cd, 各元素平均含量均未超出国家标准的限值; ②研究区地下水中各重金属元素单项污染指数平均值从大到小依次为: Cd(2.04)、Mn(0.69)、Ni(0.45)、Cr(0.24)、Zn(0.07)、Cu(0.03)。综合污染指数的变化范围在 0.23 ~ 2.22 之间, 平均值为 0.73, 呈现轻微污染; ③健康风险评估结果表明, 地下水中 6 种重金属对成人的潜在非致癌健康风险 HI 为 7.83E-01 < 1, 表明暴露的个体不太可能有明显的不良健康影响; 对儿童的潜在非致癌健康风险 HI 为 1.05E+01 > 1, 表明研究区地下水重金属可能对当地儿童的健康产生不利影响, 有进一步研究的必要性。

关键词: 重金属; 地下水; 污染; 健康风险; 博斯腾湖流域

文章编号: 1673-5897(2019)2-251-09 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

The Human Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution of Groundwater in Bosten Lake Basin

Atiyagul Rixit¹, Mamattursun Eziz^{1,*}, Wang Weiwei¹, Dilxat Ismayil¹, Anwar Mohammad²

1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Received 18 July 2018 accepted 29 November 2018

Abstract: A total of 67 samples of shallow groundwater were collected in Bosten Lake Basin, Xinjiang, and the concentrations of 6 heavy metal elements including Cu, Mn, Cd, Cr, Ni, and Zn of the samples were determined. The pollution levels of heavy metals in groundwater were analyzed based on the Nemerow Pollution Index and the potential human health risks of heavy metals were assessed based on the US EPA Health Risk Assessment Model. Results showed that: ① The average concentrations of each element in groundwater were ranked as: Mn > Zn >

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561073); 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室开放课题(XJDX0909-2013-02)

作者简介: 艾提业古丽·热西提 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为绿洲生态安全研究, E-mail: aitiyeguli@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: oasiseco@126.com

Cu > Ni > Cr > Cd, and the average concentrations of each element were lower than the National Groundwater Quality Standard; ② The average values of the Individual Pollution Index of heavy metal elements of groundwater in the study area ranged as: Cd(2.04), Mn(0.69), Ni(0.45), Cr(0.24), Zn(0.07) and Cu(0.03). The Comprehensive Pollution Index ranged from 0.23 to 2.22, with an average value of 0.73, at the slight pollution level; ③ Results of health risk assessment indicated that the potential non-carcinogenic health risk index (HI) of six heavy metals of groundwater, for adults, was $7.83E-01 < 1$, which explained that the individual exposure were unlikely to have significant adverse health effects. Meanwhile, the potential non-carcinogenic health risk index (HI) for children was $1.05E+01 > 1$, and it explained that heavy metals of groundwater in the study area may have adverse effects on the health of local children, which needs further research.

Keywords: heavy metal; groundwater; pollution; health risk; Bosten Lake Basin

水质型水资源匮乏是中国水资源面临的重要问题之一,水资源短缺问题在农业方面尤为严重^[1]。近年来,区域城市化、工业化和农业集约化背景下,人类活动对地下水质量的影响日益加剧,危害地下水系统的结构和功能^[2-3]。重金属元素由于具有潜伏性强、迁移速率慢、污染后果严重以及扩散性等特点,不仅通过积累影响地下水系统的正常功能,而且还通过不同途径进入人体,严重危害人类健康和区域生态安全^[4-6],从而受到普遍关注。

健康风险评价以风险度作为指标,把环境污染与人体健康联系起来,定量描述污染物对人体产生健康危害的风险,是很有效的环境评价方法^[7]。1983年,美国国家科学院(NAS)首次提出了基于危害鉴定、剂量-效应评估、暴露评估、风险表征的“四步法”,用以评估环境污染物对人体健康所产生的风险。随后美国环保署(US EPA)又对健康风险评价做出了更为细致的说明。目前“四步法”健康风险评价模型运用于各种环境介质中的多种污染物健康风险评价研究。Rattan等^[6]、Chotpantararat等^[8]和Pokkate等^[4]采用US EPA健康风险评价模型进行不同区域地下水中重金属污染的健康风险评估研究。近年来,国内学者丁昊天等^[9]、Chai等^[10]、张妍等^[2]、陈雪彬等^[11]、Zhang等^[12]和陈云增等^[13]也对我国不同区域地下水中重金属污染及健康风险方面进行了研究,取得了一些重要研究成果,但研究目前仍然相对缺乏,尤其对新疆地下水重金属污染的健康风险方面报道很少。已有研究表明,新疆博斯腾湖流域地下水重金属超标类型多,超标率高^[14];流域内农田土壤重金属污染较严重,已威胁农田土壤环境质量^[15-16]。博斯腾湖流域灌区农业生产过程中农业用水一定程度上靠地下水灌溉,灌溉用水经地下水-土壤、地下水-植物、土壤-植物等多种暴露途径对土壤

环境、人体健康以及整个生态系统安全产生直接或间接地危害^[17]。因此,对该区域地下水重金属进行污染特征及健康风险评价是非常必要的。

基于此,本文以博斯腾湖流域为研究区,结合地统计法、Nemerow综合污染指数以及US EPA健康风险评价模型,对地下水中Cu、Mn、Cd、Cr、Ni和Zn等元素的含量、污染特征以及潜在健康风险进行评估。研究成果对于掌握内陆湖流域地下水重金属污染情况提供基础资料,也能为维护流域地下水环境安全以及人体健康提供科学依据。

1 研究区概况 (Research area)

博斯腾湖流域位于新疆开都河下游,北天山主脉的依连哈比尔尕山南麓,库鲁克塔格山北部,地处 $85^{\circ}50' \sim 87^{\circ}15'E, 41^{\circ}52' \sim 42^{\circ}22'N$ (图1)。

研究区海拔高程1 050 ~ 1 400 m,总面积213 000 hm^2 。区域地势西高东低,北高南低,最低处为我国最大的内陆淡水湖——博斯腾湖。研究区地处我国西北干旱内陆区,水资源的变化直接制约着生态系统的发展演变趋势^[10-11]。该流域多年平均降水量约68 mm,多年平均蒸发量约2 360 mm,多年平均气温约8.63 $^{\circ}C$;地下水补给量为 $14.07 \times 10^8 m^3 \cdot a^{-1}$,可开采量为 $9.05 \times 10^8 m^3 \cdot a^{-1}$,储存量约 $1.320 \times 10^8 m^3 \cdot a^{-1}$ ^[18]。博斯腾湖流域腹地的焉耆盆地四周为前第四纪古老地层,盆地内部广泛分布第四纪冲洪积、沼泽和湖积物。盆地第四纪岩性结构自西北向东南逐渐变细,以砂砾石、中粗砂、中细砂、黏性土为主。由于第四系岩性结构控制,从洪积扇顶部到冲洪积平原,地形由高到低,坡降由陡变缓,岩性颗粒由粗变细,致使从西部、西北部山前冲洪积平原到下游冲积平原依次形成了单一潜水、上部潜水-下部多层承压水和上部潜水-下部多层承压自流

水含水层^[16]。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 土壤样品采集与测定

2016年8月在研究区采集了67个浅层地下水样品,地下水埋深介于0.5~14.5 m。采集的样品先经0.45 μm滤膜过滤,加优级纯HNO₃(1:1)调节pH,当pH<2时放入1 L塑料瓶待测。地下水样品中重金属含量测定方法参考了生活饮用水标准检验方法(GB/T 5750.6—2006)^[19]。用美国进口的火焰原子吸收光谱仪(Agilent 200AA)测定Cd、Cr、Cu、Mn、Ni和Zn等6种元素含量。实验所用的药品均为优级纯,测定实验委托新疆大学理化测试中心测定。

2.2 水质污染评价

Nemerow综合污染指数(NI)^[20],是当前国内外进行综合污染指数计算的最常用的方法之一。该方法先求出各因子的分指数(超标倍数),然后求出个分指数的平均值,取最大分指数和平均值来计算对研究区地下水重金属污染状况进行分析。NI的计算公式为:

$$I_i = \frac{P_i}{S_i} \quad (1)$$

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

式中, I_i 为单因子污染指数, P_i 为重金属*i*的实测浓度, S_i 为重金属*i*的评价标准,本研究采用国家《GB/T 14848—2017 地下水质量标准》^[21]中的Ⅲ类标准作为评价标准。 I_{\max} 是单因子污染指数最大值, I_{ave} 是单因子污染指数平均值。 I_i 和NI的污染分级标准为: I_i 或NI≤0.7属于无污染,0.7< I_i 或NI≤1.0属于轻微污染,1< I_i 或NI≤2属于轻度污染,2< I_i 或NI≤3属于中度污染, I_i 或NI≥3属于重度污染。

2.3 地下水重金属健康风险评价

2.3.1 暴露量的确定

地下水中重金属的暴露主要表现为慢性每日摄入量(CDI,mg·(kg·d)⁻¹)。每天的平均剂量(CDI)是指在特定的接触时间内,以每单位体重为单位的每日剂量,平均剂量。CDI用于在未经过滤的地下水中接触化学品。为了估算直接暴露于地下水的情况,考虑了2种接触途径,包括在地下水中吸入重金属和与地下水接触的皮肤。在2个接触途径中,CDI是用以下公式计算的^[22]:

饮水途径摄入日均暴露量[CDI_{oral}/(mg·(kg·

d)⁻¹]:

$$CDI_{\text{der}} = \frac{CW \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

皮肤接触途径摄入日均暴露量[CDI_{der}/(mg·(kg·d)⁻¹]:

$$CDI_{\text{der}} = \frac{CW \times SA \times PC \times ET \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (4)$$

总日均暴露量[CDI_{total}/(mg·(kg·d)⁻¹]:

$$CDI_{\text{total}} = CDI_{\text{oral}} + CDI_{\text{der}} \quad (5)$$

式中,CDI_{oral}为地下水饮水途径暴露剂量,单位为mg·(kg·d)⁻¹;CW为地下水中污染物的平均浓度,mg·L⁻¹;IR为地下水的日均摄入量,成人取1.8 L·d⁻¹,儿童取0.7 L·d⁻¹;EF为地下水暴露频率,取350 d·a⁻¹;ED为地下水暴露持续时间,成人取24 y,儿童取6 y;BW为人体体重,成人取62.4 kg,儿童取21.2 kg;AT为平均总的暴露时间,成人取24×365 d,儿童取6×365 d;CDI_{der}为地下水的皮肤接触途径暴露剂量,mg·(kg·d)⁻¹;SA为地下水的总皮肤接触表面积,成人取16 600 cm²,儿童取12 000 cm²;PC指地下水种重金属元素皮肤渗透常数(其中Cr的值为1.5×10⁻³ cm·h⁻¹,Ni的值为2×10⁻⁴ cm·h⁻¹,Zn的值为6×10⁻⁴ cm·h⁻¹,Cd、Cu和Mn的值为1×10⁻³ cm·h⁻¹)^[23];ET为暴露频率,0.33 h·d⁻¹;CF为体积转换因子,0.001 mL·cm⁻³^[24-27]。

2.3.2 人体潜在健康风险表征

地下水中Cu、Mn、Cd、Cr、Ni和Zn等6种重金属对人体都具有潜在健康风险,因此对这6种元素都进行非致癌健康风险。潜在非致癌风险用非致癌风险熵(HQ)和非致癌风险指数(HI)来表示^[22],其计算公式为:

$$HQ = \frac{CDI_{ij}}{RfD_{ij}} \quad (6)$$

$$HI = \sum HQ = HQ_{\text{oral}} + HQ_{\text{der}} \quad (7)$$

根据美国环保署^[23],当HI<1时,暴露的个体不太可能有明显的不良健康影响。与此相反,当HI>1时,表明有可能对人类健康产生不利影响,并有进一步研究的必要性。根据相关研究,表1给出了不同接触途径中PC和RfD的值^[26-31]。根据US EPA资料确定的暴露评价参数见表1^[24-26]。

3 结果 (Results)

3.1 研究区地下水中重金属含量特征

研究区地下水6种重金属元素质量浓度统计见

表2,从表2可以看出,Cu、Mn、Cd、Cr、Ni与Zn的含量变化范围介于 $0.009 \sim 0.108 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.005 \sim 0.297 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.002 \sim 0.011 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.005 \sim 0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.000 \sim 0.109 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $0.005 \sim 0.454 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。与《国家地下水质量标准》中Ⅲ类标准相比,Cu、Cr、Ni无超标现象,Mn、Cd和Zn的超标率分别为10.45%、1.49%和10.45%,说明研究区地下水中重金属Mn、Cd和Zn有不同程度的积累。其中,地下水中Cd含量较高可能是由于研究区土壤中Cd含量较高^[6],土壤中的Cd元素经灌溉水与降水的淋滤作用不断的溶解进入浅层地下水系统所导致的。各元素平均含量大小顺序依次为:Mn > Zn > Cu > Ni > Cr > Cd,各元素平均含量均未超出国家标准的限值。研究区地下水中重金属Cu、Mn、Cr、Ni和Zn等的变异系数(CV)分别为0.729、0.897、0.516、1.083和1.314,均大于0.5,表明研究区地下水

中重金属含量分布不均匀、空间变异明显。

3.2 地下水重金属污染评价

采用Nemerow污染指数法,计算得到了研究区地下水中各重金属元素单项污染指数(I_i)与综合污染指数(NI)。由表3可知,研究区地下水中各重金属元素单项污染指数平均值从大到小依次为: Cd (2.04)、Mn (0.69)、Ni (0.45)、Cr (0.24)、Zn (0.07)、Cu (0.03)。地下水中Cd呈现中度污染,其他5种元素均呈现无污染。

从地下水中各重金属元素不同污染级别样点数占样点总数的比例来看,所有样点Cu和Zn的 I_i 呈现无污染,98.51%样点重金属Cr的 I_i 呈现无污染。Mn呈现无污染、轻微、轻度和中度污染样点数分别占样点总数的62.69%、26.87%、5.97%和4.48%。Ni呈现无污染、轻微、轻度、中度和重度污染样点数分别占样点总数的61.19%、14.93%、10.45%、7.46%

表1 健康风险评价模型参数PC和RfD值

Table 1 Values of PC and RfD of the health risk assessment model parameters

元素 Elements	PC/(cm·h ⁻¹)	皮肤暴露 RfD/(mg·(kg·d) ⁻¹) Dermal exposure RfD/(mg·(kg·d) ⁻¹)	饮用水途径 RfD/(mg·(kg·d) ⁻¹) Oral exposure RfD/(mg·(kg·d) ⁻¹)
Cu	1.0×10^{-3}	0.012	0.04
Mn	1.0×10^{-3}	0.0008	0.024
Cd	1.0×10^{-3}	0.000005	0.0005
Cr	2.0×10^{-3}	0.00006	0.003
Ni	2.0×10^{-4}	0.0054	0.02
Zn	6.0×10^{-4}	0.06	0.30

注:PC表示皮肤渗透常数,RfD表示重金属元素不同暴露途径的参考剂量。

Note: PC stands for the absorption coefficient of the human body; RfD stands for the reference dose for different exposure pathways of heavy metals.

表2 研究区地下水中重金属含量统计(n=67)

Table 2 Statistics of heavy metal concentrations in groundwater in study area (n=67)

元素 Elements	最小值 /(mg·L ⁻¹) Min	最大值 /(mg·L ⁻¹) Max	平均值 /(mg·L ⁻¹) Mean	标准差 /(mg·L ⁻¹) St.D	CV	国家标准* /(mg·L ⁻¹) National Standard*	超标率 /% Excedence ratio
Cu	0.009	0.108	0.027	0.020	0.729	1.0	0
Mn	0.005	0.297	0.069	0.061	0.897	0.10	10.45%
Cd	0.002	0.011	0.007	0.002	0.345	0.01	1.49%
Cr	0.005	0.042	0.012	0.006	0.516	0.05	0
Ni	0.000	0.109	0.022	0.024	1.083	0.05	10.45%
Zn	0.005	0.454	0.065	0.086	0.314	1.0	0

注:*《国家地下水质量标准》Ⅲ类标准;以人体健康基准值为依据,主要适用于生活饮用水水源及工、农业用水。CV表示变异系数。

Note: * Third grade of the National Groundwater Quality Standard: Based on the human health standard value, which is mainly suitable for drinking water sources and industrial and agricultural water use. CV stands for coefficient of variation.

和 5.97%。Cd 呈现无污染、轻微、轻度污染样点数分别占样点总数的 49.25%、49.25%、1.50%。研究区地下水中重金属元素综合污染指数的变化范围在 0.23~2.22 之间,平均值为 0.73,呈现轻微污染。研究区地下水 NI 值呈现无污染、轻微、轻度和中度污染样点数分别占样点总数的 58.21%、29.85%、7.46%、4.08%。

3.3 健康风险评价

根据 US EPA 健康风险评价方法的参数及重金属元素实测含量来计算出博斯腾湖流域灌区地下水中 Cu、Mn、Cd、Cr、Ni 和 Zn 等重金属元素通过饮水途径和皮肤暴露途径对成人和儿童的非致癌风险暴露剂量(表 4)。从表 4 可见,地下水中 Zn 对成人和儿童的总日均非致癌暴露剂量(CDI_{total})分别为 $1.80 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $2.08 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,其总日均非致癌暴露量最高;而 Cu 对成人和儿童的总日均非致癌暴露量分别为 $7.62 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $8.75 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,其总日均非致癌暴露量最低。研

究区地下水中 6 种重金属通过 2 种途径的总日均非致癌暴露量从大到小依次为: Zn、Mn、Cd、Cr、Ni 与 Cu。

整体来看,博斯腾湖流域中地下水 6 种重金属对成人的总日均非致癌暴露量均高于对儿童的总日均非致癌暴露量,说明地下水重金属污染对成人的非致癌健康危害更高。从暴露途径来看,无论对成人还是儿童,通过饮水途径摄入的地下水重金属为该研究区地下水中重金属最主要的暴露途径,通过皮肤接触途径对人体的健康危害作用较小。研究区地下水 6 种重金属元素通过饮水和皮肤暴露途径对成人的暴露量均大于对儿童的暴露量。

在非致癌风险日均暴露量分析的基础上,计算得到了研究区地下水中非致癌重金属的非致癌风险熵(HQ)和非致癌风险指数(HI)(表 5)。由表 5 可见,研究区地下水 6 种重金属在 2 种暴露途径下成人与儿童的非致癌风险熵从大到小的顺序为: HQ_{Cr}、HQ_{Cd}、HQ_{Cu}、HQ_{Ni}、HQ_{Mn}、HQ_{Zn}。对成人来说,地下

表 3 地下水不同污染级别样点数占样点总数的百分数 (n=67)

Table 3 Percentages of sites at different pollution levels in the total groundwater sampling sites (n=67)

污染级别 Pollution level	I_i						NI
	Cu	Mn	Cd	Cr	Ni	Zn	
无污染 No pollution	100	62.69	49.25	98.51	61.19	100	58.21
轻微污染 Slight pollution	0	26.87	49.25	1.49	14.93	0	29.85
轻度污染 Low pollution	0	5.97	1.50	0	10.45	0	7.46
中度污染 Medium pollution	0	4.48	0	0	7.46	0	4.48
重度污染 High pollution	0	0	0	0	5.97	0	0

注: I_i 表示单项污染指数, NI 表示综合污染指数。

Note: I_i stands for the single pollution index; NI stands for the Nemerow comprehensive index.

表 4 非致癌物质的饮水途径和皮肤暴露途径的暴露剂量 (单位: $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$)

Table 4 Daily exposure to the non-carcinogens by the dermal pathway and the drinking water pathway (unit: $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$)

元素 Elements	CDI _{oral}		CDI _{der}		CDI _{total}	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children
Cu	7.60E-04	8.70E-04	2.31E-06	4.92E-06	7.62E-04	8.75E-04
Mn	1.92E-03	2.20E-03	5.85E-06	1.25E-05	1.93E-03	2.21E-03
Cd	1.87E-04	2.14E-04	5.69E-07	1.21E-06	1.88E-04	2.15E-04
Cr	3.47E-04	3.97E-04	2.11E-06	4.49E-06	3.49E-04	4.01E-04
Ni	6.32E-04	7.23E-04	3.84E-07	8.18E-07	6.32E-04	7.24E-04
Zn	1.80E-03	2.07E-03	3.29E-06	7.01E-06	1.80E-03	2.08E-03

注: CDI_{oral} 表示饮水途径暴露剂量, CDI_{der} 表示皮肤接触途径暴露剂量; CDI_{total} 表示总日均暴露剂量。

Note: CDI_{oral} stands for the daily dose in oral ingestion pathway; CDI_{der} stands for the daily dose in dermal contact pathway; CDI_{total} stands for total daily dose.

水中 Cu、Mn、Cd、Cr、Ni 和 Zn 的 HQ 对 HI 的贡献率分别为 2.44%、11.16%、62.31%、19.27%、4.05% 和 0.77%。对儿童来说,地下水中 Cu、Mn、Cd、Cr、Ni 和 Zn 的 HQ 对 HI 的贡献率分别为 2.11%、10.2%、63.82%、19.72%、3.48% 和 0.67%。可以看到,研究区地下水重金属元素导致的非致癌健康风险主要受重金属 Cd 不同暴露途径污染风险所贡献。

在重金属元素 2 种暴露途径非致癌风险中,饮水途径非致癌风险熵(HQ_{oral})比皮肤接触途径非致癌风险熵(HQ_{der})高。地下水中 6 种重金属元素通过饮水途径对成人的非致癌健康风险均大于对儿童的非致癌健康风险,通过皮肤接触途径对儿童的非致癌健康风险均大于对成人的非致癌健康风险。总体来看,博斯腾湖流域灌区地下水中 6 种重金属对成人的潜在非致癌健康风险 HI 为 7.83E-01,表明非致癌健康风险属于可接受风险水平;对儿童的潜在非

致癌健康风险 HI 为 1.05E+01,表明存在轻微的非致癌健康风险。

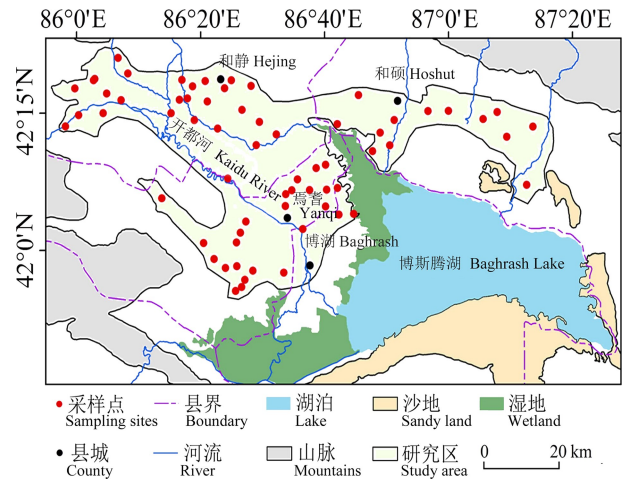


图1 研究区及采样点分布示意图

Fig. 1 The location of study area and sampling points

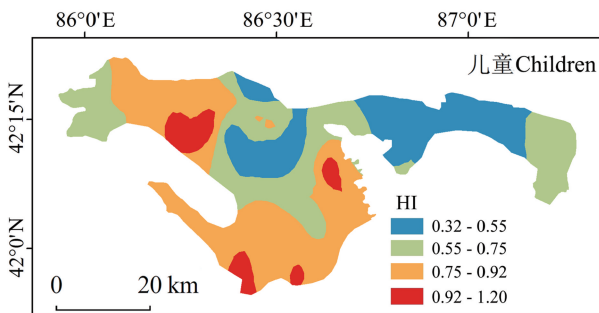


图2 研究区绿洲地下水重金属 HI 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of HI value of groundwater heavy metal in study area

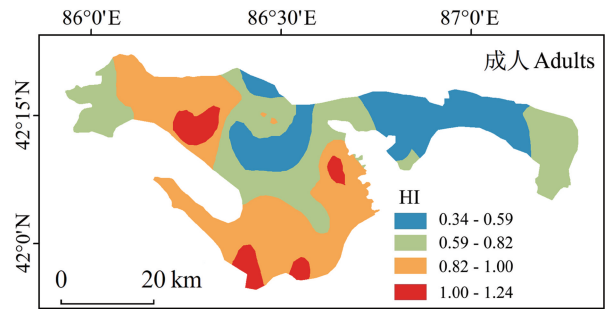


表5 研究区地下水中重金属非致癌风险指数

Table 5 Non-carcinogenic risk index of heavy metals in groundwater in the study area

元素 Elements	HQ _{oral}		HQ _{der}		HQ _{total}		HI	
	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children
Cu	1.90E-02	2.17E-02	1.93E-04	4.10E-04	1.92E-02	2.21E-02		
Mn	8.02E-02	9.18E-02	7.32E-03	1.56E-02	8.75E-02	1.07E-01		
Cd	3.74E-01	4.28E-01	1.14E-01	2.42E-01	4.88E-01	6.70E-01	7.83E-01	1.05E+01
Cr	1.16E-01	1.32E-01	3.52E-02	7.49E-02	1.51E-01	2.07E-01		
Ni	3.16E-02	3.62E-02	7.12E-05	1.51E-04	3.17E-02	3.64E-02		
Zn	6.01E-03	6.88E-03	5.49E-05	1.17E-04	6.06E-03	7.00E-03		

注:HQ_{oral} 表示饮水途径风险熵, HQ_{der} 表示皮肤接触途径风险熵, HQ_{total} 表示总风险熵, HI 表示非致癌风险指数。

Note: HQ_{oral} stands for the hazard quotient in oral ingestion pathway; HQ_{der} stands for the hazard quotient in dermal contact pathway; HQ_{total} stands for the total hazard quotient; HI stands for the non-carcinogenic risk index.

基于 GIS 技术, 结合克里金最优内插法, 得到了研究区地下水中重金属污染引起的成人与儿童的非致癌风险指数(HI)空间分布格局图(图 2)。从图 2 可见, 地下水中重金属污染引起的成人与儿童的 HI 值空间分布情况基本一致。地下水潜在非致癌健康风险较大的区域主要分布于和静县南部、焉耆县南部和东北部。这些区域地下水中 Cd 含量较高直接导致风险指数 HI 偏高。HI 较高的区域由于位于湖泊、沼泽或河流周边区域农田, 地下水位高, 地下水埋深多在 1 m 以内, 较易受周围各种污染因素的影响, 特别是农药、化肥和有机肥等农业活动使地下水中的 Cd 富集^[6], 致使 HI 值较高。潜在非致癌健康风险较小的区域主要分布于焉耆县中部与和硕县。博斯腾湖流域地下水重金属污染分布和水质污染情况直接联系到人体健康, 农作物的生长与产量, 所以进行重金属检测, 并对超标的重金属污染因子采取相应的防护措施与制定重金属处理方案是有必要的。

4 讨论 (Discussions)

地下水中重金属元素通过 2 种不同途径进入人体, 在体内过量蓄积会对健康产生危害。本研究检测的 6 种重金属元素平均含量均未超出《国家地下水质量标准》中 III 类标准的限值, 表明研究区地下水环境质量处于可持续的安全范围之内。由于焉耆盆地是我国加工辣椒与加工番茄主产区, 地下水重金属的污染也会不同程度上影响到这些农作物的产量以及人们的身体健康, 考虑到部分样本中 Mn、Cd 和 Zn 含量超出了《国家地下水质量标准》中 III 类标准的限值, 地下水中 Mn、Cd 和 Zn 这 3 种重金属污染应当引起重视。虽然博斯腾湖流域地下水重金属含量未超出安全极限, 但饮水途径和皮肤接触途径非致癌风险已达到了较高的水平。其中 Cd 引起的非致癌风险(对 HI 的贡献率大于 60%)值得重视。重金属元素的富集程度越高, 其受到人为污染的可能性越大。结合采样点实际情况, Cd、Mn 和 Zn 含量较高的采样点主要分布于研究区内人口密度较大的区域。这些区域的人类活动, 农田农业生产过程中的化肥和农药以及博湖县南部农产品加工产业以可能导致农田土壤重金属积累与污染, 并通过灌溉水、降水的下渗等方式渗入到地下水系统并导致地下水中这些元素含量的增加。

地下水重金属污染的人体健康风险评估是地下水环境中有毒化学物质及其各种暴露途径分析的有效方法^[29]。特殊环境背景下, 重金属元素对人体的

危害程度主要受各环境介质中重金属元素含量及人体摄入量大小等诸多因素的影响。近年来, 虽然国内学者采用 US EPA 健康风险模型、内梅洛综合污染指数、模糊数学方法^[20,22,30]等方法进行中国地下水重金属污染的健康风险评估, 但由于研究起步晚, 在评价的各环节均存在一定的局限性与不确定性^[31]。

综上所述: 1) 通过实际检测研究区地下水中重金属的含量得知, 与《国家地下水质量标准》中 III 类标准相比, Cu、Cr、Ni 无超标现象, Mn、Cd 和 Zn 的超标率分别为 10.45%、1.49% 和 10.45%; 各元素平均含量大小顺序依次为: Mn > Zn > Cu > Ni > Cr > Cd, 各元素平均含量均未超出国家标准的限值。

2) 研究区地下水中各重金属元素单项污染指数平均值从大到小依次为: Cd(2.04)、Mn(0.69)、Ni(0.45)、Cr(0.24)、Zn(0.07)、Cu(0.03)。研究区地下水中重金属元素综合污染指数的变化范围介于 0.23 ~ 2.22 之间, 平均值为 0.73, 呈现轻污染。研究区地下水 NI 值呈现无污染、轻微、轻度和中度污染样点数分别占样点总数的 58.21%、29.85%、7.46% 和 4.08%。

3) 博斯腾湖流域地下水中 6 种重金属通过 2 种途径的总日均非致癌暴露量从大到小依次为: Zn、Mn、Cr、Cd、Ni、Cu。饮水途径为该研究区地下水中重金属最主要的暴露途径。地下水中 6 种重金属对成人的潜在非致癌健康风险 HI 为 7.83E-01 < 1, 表明暴露的个体不太可能有明显的不良健康影响; 对儿童的潜在非致癌健康风险 HI 为 1.05E+01 > 1, 表明研究区地下水重金属可能对当地儿童的健康产生不利影响, 有进一步研究的必要性。

通讯作者简介: 麦提吐尔逊·艾则孜(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为干旱区绿洲土壤环境安全研究。

参考文献 (References):

- [1] 马闯, 杨军, 雷梅, 等. 北京市再生水灌溉对地下水的重金属污染风险[J]. 地理研究, 2012, 31(12): 2250-2258
Ma C, Yang J, Lei M, et al. Assessing the effect of reclaimed water irrigation on groundwater pollution of heavy metals in Beijing [J]. Geographical Research, 2012, 31(12): 2250-2258 (in Chinese)
- [2] 张妍, 李发东, 欧阳竹, 等. 黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 121-128
Zhang Y, Li F D, Ouyang Z, et al. Distribution and health risk assessment of heavy metals of groundwaters in the ir-

- rigation district of the lower reaches of Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1): 121-128 (in Chinese)
- [3] 林曼利, 桂和荣, 彭位华, 等. 典型矿区深层地下水重金属含量特征及健康风险评价-以皖北矿区为例[J]. *地球学报*, 2014, 35(5): 589-598
- Lin M L, Gui H R, Peng W H, et al. Health risk assessment of heavy metals in deep groundwater from different aquifers of a typical coal mining area: A case study of a coal mining area in northern Anhui Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(5): 589-598 (in Chinese)
- [4] Pokkate W, Srilert C, Wattasit S, et al. Heavy metal contamination and human health risk assessment in drinking water from shallow groundwater wells in an agricultural area in Ubon Ratchathani Province, Thailand [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2014, 36(1): 169-182
- [5] 杨俊, 吕府红, 宋永伟, 等. 典型重金属污染地区蔬菜中重金属含量及健康风险[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(9): 952-956
- Yang J, Lu F H, Song Y W, et al. Vegetable heavy metal content and health risks in the typical heavy metal contaminated area [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2017, 39(9): 952-956 (in Chinese)
- [6] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, et al. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater: A case study [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 109(3-4): 310-322
- [7] Fryer M, Collins C D, Ferrier H, et al. Human exposure modeling for chemical risk assessment: A review of current approaches and research and policy implications [J]. *Environmental Science and Policy*, 2006, 9(3): 261-274
- [8] Chotpantarat S, Wongsasuluk P, Siriwong W, et al. Non-carcinogenic hazard maps of heavy metal contamination in shallow groundwater for adult and aging populations at an agricultural area in northeastern Thailand [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2014, 20: 689-703
- [9] 丁昊天, 袁兴中, 曾光明, 等. 基于模糊化的长株潭地区地下水重金属健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(11): 1323-1328
- Ding H T, Yuan X Z, Zeng G M, et al. Health risk assessment from heavy metals in groundwater of Changsha-Zhuzhou -Xiangtan District based on fuzzy theory [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(11): 1323-1328 (in Chinese)
- [10] Chai L Y, Wang Z X, Wang Y Y, et al. Ingestion risks of metals in groundwater based on TIN model and dose-response assessment: A case study in the Xiangjiang watershed, central-south China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(16): 3118-3124
- [11] 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 等. 降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义[J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 123-130
- Chen X B, Yang P H, Lan J C, et al. Variation characteristics and environmental significant of trace elements under rainfall condition in karst groundwater [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1): 123-130 (in Chinese)
- [12] Zhang Y, Li F D, Li J, et al. Spatial distribution, potential sources, and risk assessment of trace metals of groundwater in the North China Plain [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2015, 21(3): 726-743
- [13] 陈云增, 李天奇, 马建华, 等. 淮河流域典型癌病高发区土壤和地下水重金属积累及健康风险[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4537-4545
- Chen Y Z, Li T Q, Ma J H, et al. Health risk assessment of heavy metal accumulation in soil and groundwater in a typical high cancer incidence area of Huai River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12): 4537-4545 (in Chinese)
- [14] 曾妍妍, 周殷竹, 周金龙, 等. 新疆南部典型地区地下水重金属空间分布特征[J]. *环境化学*, 2015, 34(12): 2310-2312
- Zeng Y Y, Zhou Y Z, Zhou J L, et al. Spatial distribution characteristics of heavy metals of groundwater in typical areas of southern Xinjiang [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(12): 2310-2312 (in Chinese)
- [15] 阿吉古丽·马木提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 买托合提·阿那依提, 等. 基于地理信息系统技术的新疆焉耆绿洲农田土壤重金属污染评价和潜在生态风险预警[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(6): 658-663
- Ajigul M, Mamattursun E, Mattohti A, et al. GIS technology based research on the heavy metal pollution evaluation and ecological risk warning assessment of farmland soils in Karashahar Oasis, Xinjiang [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2017, 39(6): 658-663 (in Chinese)
- [16] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地理学报*, 2017, 72(9): 1680-1694
- Mamattursun E, Ajigul M, Anwar M, et al. Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1680-1694 (in Chinese)
- [17] Smith C J, Hopmans P, Cook F J. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia [J]. *Environmental Pollution*, 1996, 94(3): 317-323

- [18] Rai P K. Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: An eco-sustainable approach [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2008, 10(2): 133-160
- [19] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5750.6—2006 生活饮用水标准检验方法金属指标[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
Ministry of Health of the P.R. China, Standardization Administration of the P.R. China. GB/T 5750.6—2006 Standard Examination Methods for Drinking Water Metal Parameters [S]. Beijing: China Standard Press, 2006 (in Chinese)
- [20] Nemerow N L. Stream, Lake, Estuary, and Ocean Pollution [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Publishing Co., 1985
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the P.R. China, Standardization Administration of the P.R. China. GB/T14848—2017 Standard for Groundwater Quality [S]. Beijing: China Standard Press, 2017 (in Chinese)
- [22] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual Part A, vol.1 (EPA/540/1-89/002) [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989: 1-100
- [23] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Understanding the Safe Drinking Water Act. EPA 816-F-04-030 [R]. Washington DC: US EPA, 2004: 1-2
- [24] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Exposure Factors Handbook. EPA/600/P-95/002 [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1997: 104-126
- [25] Li Y Y, Tao H J, Xu J, et al. QTL analysis for cooking traits of super rice with a high-density SNP genetic map and fine mapping of a novel boiled grain length locus [J]. *Plant Breeding*, 2015, 134: 535-541
- [26] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Electronic Code of Federal Regulations, Title 40- Protection of Environment, Part 423d Steam Electric Power Generating Point Source Category. Appendix A to Part 423e 126, Priority Pollutants [R]. Washington DC: US EPA, 2013
- [27] 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 环境科学出版社, 2016: 21-62
Duan X L. Highlights of the Chinese Exposure Factors Handbook (Adults) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2016: 21-62 (in Chinese)
- [28] 段小丽. 中国人群暴露参数手册(儿童卷)概要[M]. 北京: 环境科学出版社, 2016: 170-202
Duan X L. Highlights of the Chinese Exposure Factors Handbook (Children) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2016: 170-202 (in Chinese)
- [29] Ma H W, Hung M L, Chen P C. A systemic health risk assessment for the chromium cycle in Taiwan [J]. *Environment International*, 2007, 33(2): 206-218
- [30] 张敏, 高东东, 何成江, 等. 基于模糊数学的德阳市平原地下水环境质量评价[J]. *环境工程*, 2016, 34(4): 151-155
Zhang M, Gao D D, He C J, et al. Environmental quality evaluation of Deyang Plain groundwater based on fuzzy mathematics [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(4): 151-155 (in Chinese)
- [31] 麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提, 阿吉古丽·马木提, 等. 新疆焉耆盆地农田土壤重金属污染及健康风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(2): 171-181
Mamattursun E, Anwar M, Ajigul M, et al. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of farmland soils of Yanqi Basin in Xinjiang [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(2): 171-181 (in Chinese) ◆