

doi: 10.11720/wtyht.2023.1367

范海印,宋蕊蕊,于林松,等.鲁西北地区某典型化工园区地下水重金属污染特征及健康风险评价[J].物探与化探,2023,47(5):1326-1335. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1367>

Fan H Y, Song R R, Yu L S, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of groundwater in a typical chemical industry park in northwestern Shandong, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(5): 1326-1335. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1367>

鲁西北地区某典型化工园区地下水重金属污染特征及健康风险评价

范海印^{1,2}, 宋蕊蕊^{1,2}, 于林松^{1,2}, 滕永波^{1,2}, 万方^{1,2}, 张秀文^{1,2}, 李圣玉^{1,2}, 赵闯^{1,2}

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 地下资源环境高精度探测山东省工程研究中心, 山东 济南 250013)

摘要: 为了解鲁西北地区某典型化工园区地下水重金属的污染特征,按照化工园区地下水环境状况调查评估要求,采集 10 件地下水样品,分析 Fe、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等 6 项重金属元素浓度及空间分布特征,并对不同人群进行健康风险评价。结果表明:①该化工园区地下水重金属元素浓度均小于《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中Ⅲ类水质标准,综合污染指数变化范围为 0.37~0.68,监测点位重金属元素均为无污染。②重金属元素总体空间分布特征与化工园区内重点企业分布区域基本吻合,说明企业的生产活动等外在因素影响了地下水重金属的空间分布。③儿童的健康风险要低于成人,且皮肤接触途径的健康风险要低于饮用途径。非致癌风险在不同暴露途径下对不同人群均处于可接受水平,致癌物质 As 和 Cd 对成人存在轻微的致癌风险。当地主管部门应加强对企业生产活动的监管,对存在疑似污染的企业进行全面排查,才能有效地控制并逐步降低地下水污染对人体造成的健康风险。

关键词: 重金属;地下水;空间分布;健康风险;化工园区

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)05-1326-10

0 引言

近年来,随着我国社会经济的快速发展,工业化、城镇化建设进程不断加快,地下水重金属污染问题日益严重^[1-3]。重金属因其毒性强、隐蔽性高以及难以降解的特性^[4-7],一旦污染地下水,会对人体健康和生态环境安全造成威胁^[8-9];如重金属 Cd 是致癌物质,长时间在人体内积累,会引起肾癌、骨癌、痛痛病等一系列疾病^[10-11];Pb 和 Ni 是人体生长所必须的微量元素,但是过量的摄入会导致生殖功能下降、免疫力低下,甚至诱发癌变^[12]。因此,根据地下水重金属污染的空间分布特征,探究其污染原因,结合重金属在不同人群、不同途径下的暴露特征,来

开展人体健康风险评价具有重要意义。

化工园区是化工产业发展的重要载体,是现代化工产业发展的未来空间。化工原料、产品的性质决定了化工园区具有潜在的危险性。2021 年 12 月《地下水管理条例》颁布实施,标志着地下水迈入依法严管的新阶段。目前国内外学者如 Pokkate 等^[13]、倪彬等^[14]、Chotpantararat 等^[15]、Rattan 等^[16]和 Zhang 等^[17]针对农业灌溉区或饮用水源地地下水中重金属污染开展了较多的研究,基本认为成人的健康风险值要高于儿童,饮用途径的健康风险要高于其他途径等,但关于典型化工园区地下水重金属污染特征及其环境风险的研究报道较少。本次以山东省地质勘查基金项目为依托,选取某典型化工园区内 6 种重金属元素(Fe、Cu、Zn、As、Cd、Pb),采用内梅

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-12-21

基金项目: 山东省地质勘查基金项目(2018(49); 2019(44)); 山东地矿局科技引领项目(202227)

第一作者: 范海印(1990-),男,山东鄄城人,工程师,主要从事地质矿产及地球化学相关工作。Email: 741370828@qq.com

通讯作者: 滕永波(1969-),男,山东广饶人,高级工程师,主要从事地质矿产及地球化学相关工作。Email: yongboteng@sina.com

罗综合污染指数法对研究区地下水水质污染现状进行评价^[18],根据现场调查结合重金属空间分布特征识别地下水重金属污染源,最后利用 USEPA 健康风险评价模型对评价区儿童、成人开展健康风险评价,可为相关管理部门对地下水资源保护、改良以及提升周边居民幸福生活指数提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于鲁西北某县,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,平均年降水量 527.1 mm,境内春季多西南风,冬季多东北、西北风。研究区位于黄河下游冲积平原,地势平缓,地形呈自西南向东北倾斜,海拔 9~11 m,依据平原地貌的形态、成因类型等特征,区内微地貌属于浅平洼地。研究区属于华北地台的中、新生代断陷盆地,中生代以来,沉积了巨厚的新生界地层,以第四系和新近系为主。研究区属于鲁西北平原松散岩类水文地质区,地下水类型为松散岩类孔隙地下水,主要化学类型为重碳酸盐型,含水层岩性以粉细砂及粉土为主,含水层厚度 0.8~2.0 m,在水平方向上含水层多呈舌状和透镜体状分布,在垂直方向上含水层与相对隔水层交错分布,富水性及径流条件较差。区域水文地质详见图 1。

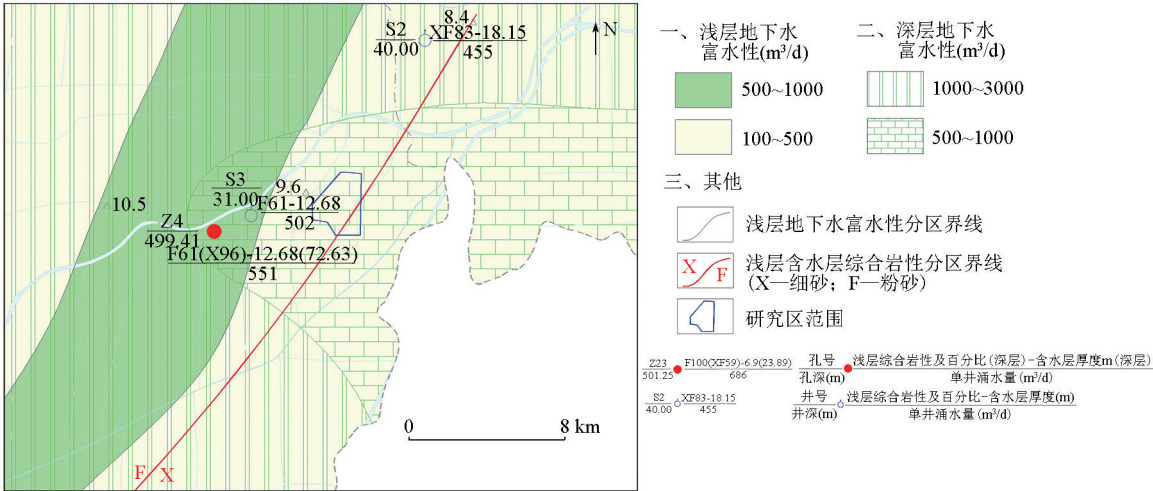


图 1 研究区区域水文地质

Fig. 1 Regional hydrogeological map of the study area

1.2 样品采集与分析

研究区目前建设面积 12 km²,以化工新材料、专用精细化学品及石化深加工为主要生产产业,通过企业产品、原辅材料、生产工艺及“三废”排放,识别化工园区特征污染物主要为铅、镉、铬、砷、镍等重金属以及苯系物、石油类化合物等。园区周边基本为农田、村庄,无工矿企业分布。点位布设依据《化工园区地下水环境状况调查评估技术方案》^[19],在化工园区的上游、垂直于地下水流向方向两侧、下游以及内部主要敏感点附近共布设监测井 10 口,其中新建井 5 口,井深 8.8~10.0 m,口径 160 mm,管壁结构为 PVC 材质;借用园区、企业自行监测井 5 口,井深 9.0~11.0 m,口径 110mm,管壁结构为 PVC 材质。点位分布见图 2。

2021 年 9 月,在丰水期期间采集地下水样品 10 件,现场使用 HX-W 便携式水质多参数检测仪检测

并记录样品 pH、温度、浊度、电导率、溶解氧等水质基本参数,用 0.45 μm 的微孔滤膜对样品处理后装于 500 mL 棕色玻璃瓶中,加入 3 mL 65% 的硝酸,调节 pH 至 2 以下,置于 4 ℃ 的保温箱冷藏保存。样品分析测试工作由山东省地矿局中心实验室完成,测试方法依据《环境监测分析方法标准制定技术导则》(HJ 168—2020)^[20],其中 Cu、Zn、As、Cd、Pb 运用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Perkin Elmer, USA) 分析测定,Fe 运用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Perkin Elmer, USA) 分析测定。测试过程中采取空白实验、精密度控制、准确度控制等多种方式进行质量控制。根据质量控制报告可知,空白样品分析测试结果均低于各元素分析方法检出限,精密度控制合格率 96.3%~100%,加标回收率范围在 70%~130%,样品测定结果均在误差允许范围内。

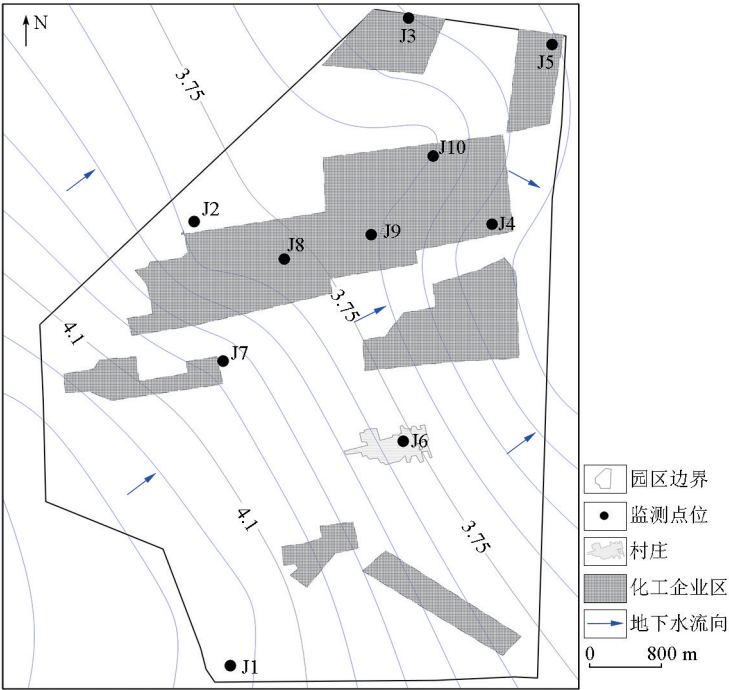


图 2 研究区平面布置及采样点位分布

Fig. 2 Layout plan of the study area and distribution of sampling sites

1.3 研究方法

1.3.1 描述性和多元统计

实验数据处理及相关参数统计采用 SPSS19.0 (IBM Inc. ,Armonk,NY,USA) 和 Origin2021b(Origin Lab Corporation. ,Northampton,MA,USA) ,图件制作采用 ArcGIS 10. 2(Esri, Redlands, CA, USA) 进行空间插值,图形处理采用 CorelDrawX8 (Corel, Ottawa, Canada) [21]。

1.3.2 水质污染现状评价

地下水水质污染现状评价反映地下水受人类活动影响的污染程度[22]。内梅罗综合污染指数是当前国内外进行环境质量指数计算最常用的方法之一[23-24]。该方法先计算出单因子的污染指数,然后计算出各单因子的平均值,取单因子指数最大值和平均值来计算出该因子综合污染指数,对研究区地下水重金属污染状况进行评价。考虑化工园区以外的活动对地下水造成的影响,对内梅罗指数法进行修正,以更准确地评价化工园区对地下水造成的污染,其表达式如下:

$$P_i = \frac{C_i - C_o}{S_i}, \tag{1}$$

$$P_{\text{综}} = \sqrt{(P_{\text{max}}^2 + P_{\text{ave}}^2)/2}, \tag{2}$$

式中: P_i 为重金属 i 的单项污染指数; C_i 为重金属 i 的实测浓度值; C_o 为上游地下水重金属 i 的对照

点; S_i 为重金属 i 的评价标准,该研究采用 GB 14848—2017 中Ⅲ类标准作为评价标准[25]。 $P_{\text{综}}$ 为重金属 i 的综合污染指数; P_{max}^2 为重金属 i 污染指数的最大值的平方; P_{ave}^2 为重金属 i 污染指数的平均值的平方。式中各参数取值见表 1。

表 1 参数取值含义

Table 1 Parameter value meaning

参数定义范围		含义
$P_i \leq 1.0$	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	无污染
$1.0 < P_i \leq 2.0$	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	轻微污染
$2.0 < P_i \leq 3.0$	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染
$3.0 < P_i \leq 5.0$	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染
$P_i > 5.0$	$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染

1.3.3 健康风险评价

健康风险评价是以地下水质量标准 and 风险评价的健康基准值为基础,通过把地下水污染和人体健康相联系,定量描述污染物对人体健康的危害概率,是非常有效的评价方法[26-27]。目前,美国国家环保署(USEPA)推荐的人体健康风险评估模型可运用于各种环境介质、多种污染物健康风险评价[28]。因此,本次研究采用 USEPA 水环境健康风险评价模型,对化工园区附近居民人体健康进行风险评价。地下水暴露途径主要为饮用和皮肤接触两种[29],暴露概念模型见图 3,评价内容主要分为暴露剂量计算和健康风险表征两部分。考虑到国外的模型与我国实际情况会有所不同,因此通过查阅相关资料对

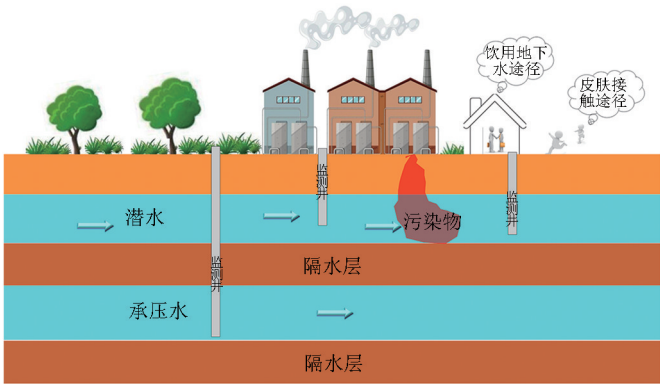


图 3 研究区污染物风险暴露概念模型

Fig. 3 Conceptual model of pollutant risk exposure in the study area

暴露参数进行了一定的修改,以便得到的结果能更好地反映研究区的真实情况^[30]。

1) 暴露剂量计算

暴露剂量分为非致癌性物质的暴露量和致癌性物质的暴露量,致癌性物质暴露剂量用终生日均暴露剂量 ($LADD$) 表示,非致癌性物质的暴露剂量用日均暴露剂量 (ADD) 表示。其表达式如下^[31]:

$$ADD_{der}/LADD_{der} =$$

$$\frac{C \times ED \times ET \times EF \times SA \times PC \times CF}{BW \times AT}, \quad (3)$$

$$ADD_{oral}/LADD_{oral} = \frac{C \times EF \times ED \times IR}{BW \times AT}, \quad (4)$$

式中: $LADD_{der}$ 和 ADD_{der} 分别表示皮肤暴露途径下的致癌和非致癌性污染的日均暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; $LADD_{oral}$ 和 ADD_{oral} 分别表示饮用途径下的致癌和非致癌性污染的日均暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。式中各参数取值见表 2。

表 2 健康风险评价暴露参数值

Table 2 Health risk assessment model parameter

参数符号及单位	参数含义	成人参考值	儿童参考值	参数来源
$C/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	污染物浓度	C_i	C_i	本次研究
ED/a	持续暴露时间	30	9	[32-33]
$ET/(\text{d} \cdot \text{a}^{-1})$	暴露时间	360	360	[32-33]
$EF/(\text{d} \cdot \text{a}^{-1})$	暴露频率	350	350	[32-33]
SA/cm^2	接触的皮肤表面积	16000	9300	[32-33]
$PC/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	皮肤渗透系数	0.0001(Fe)、0.0006(Cu)、0.0006(Zn)、 0.0018(As)、0.001(Cd)、0.000004(Pb)		[34]
$CF/(\text{L} \cdot \text{cm}^{-1})$	体积转换因子	0.001	0.001	[34]
$IR/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	每日平均饮用量	1.70	1.14	[32-33]
BW/kg	平均体重	57.00	23.80	[32-33]
AT/d	平均暴露时间	25500	25500	[32-33]

2) 健康风险表征

将化学物质按照其毒理学性质分为非致癌性物质 (Fe、Zn、Cu 和 Pb) 和致癌性物质 (As、Cd) 两类,健康风险评价模型表达式如下^[31]:

$$CR = q \times LADD, \quad (5)$$

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

$$HI = HQ_{oral} + HQ_{der}, \quad (7)$$

式中: CR 为人群终身超额危险度,无量纲; q 为重金

属的致癌强度系数, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; HQ 为非致癌物风险熵,无量纲; RfD 为非致癌物质在不同暴露途径下的日均参考剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; HI 为同一个体在不同暴露途径下的综合风险值。根据 USEPA 分级^[32],致癌性物质最大可接受风险值为 1×10^{-4} ,当 $CR < 1 \times 10^{-4}$ 时,则认为致癌风险在可接受范围内;当 $CR > 1 \times 10^{-4}$ 时,则认为可能存在潜在的致癌风险。 $HI < 1$ 时,说明非致癌风险在可接受范围内;当 $HI > 1$ 时,说明可能存在潜在的非致癌风险。式中各参数取值见表 3。

表 3 致癌强度系数(q)和日均参考剂量(RfD)
Table 3 Carcinogenic intensity coefficient (q) and daily average reference dose (RfD)

重金属	致癌强度系数 $q/(\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1})$		日均参考剂量 $RfD/(\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1})$		参数来源
	饮用途径	皮肤接触途径	饮用途径	皮肤接触途径	
Cd	6.1	0.38	0.0005	0.0005	[35-36]
As	1.5	3.66	0.0003	0.0001	[35-36]
Fe			0.3	0.0045	[35-36]
Cu			0.04	0.012	[35-36]
Zn			0.3	0.01	[35-36]
Pb			0.0014	0.0014 [*]	[35-36]

注：“*”表示无皮肤接触途径的参数,以饮用途径参数替代^[35]。

2 结果与讨论

2.1 重金属描述性统计分析

研究区 6 种重金属浓度调查结果见表 4,可以看出,重金属的浓度差异性较大,Fe、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的平均值分别为 0.133、0.277、0.196、0.003 8、0.001 和 0.005 4 mg/L,均高于山东省浅层地下水背景值^[37]。除 Fe 和 Pb 外,其余重金属偏度均大于

0,属于正偏斜。变异系数是反映各监测点地下水中重金属空间分布离散程度,变异系数越大,离散程度越大;小于 20%属于低变异度;20%~50%属于中等变异度;50%~100%属于高变异度^[38]。研究区所有监测点的变异系数均大于 50%,其中 Zn 的变异系数最大,为 130.1%。所有重金属均为高度变异,离散程度较大,说明重金属受研究区工业生产活动影响较明显,不同重金属之间的污染途径及污染物来源可能不同。

表 4 地下水重金属浓度分析统计
Table 4 Analysis of heavy metal concentration in groundwater

元素	最小值 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	最大值 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	平均值 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	背景值 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	标准差 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	变异系 数/%	偏度	峰度	超标率 /%	国家Ⅲ类 标准
Fe	0.003	0.294	0.133	0.049	0.107	70.9	-0.499	-1.362	0.00	0.3
Cu	0.005	0.756	0.277	0.003	0.268	96.8	0.639	-0.702	0.00	1.00
Zn	0.003	0.762	0.196	0.019	0.255	130.1	1.74	1.946	0.00	1.00
As	0.0005	0.0094	0.0038	0.00057	0.0028	73.7	1.36	0.961	0.00	0.01
Cd	0.00005	0.00245	0.0010	0.00004	0.00082	82.0	0.409	-1.105	0.00	0.005
Pb	0.0005	0.0098	0.0054	0.0009	0.0033	61.1	-0.399	-1.275	0.00	0.01

2.2 污染评价及空间分布特征

采用修正的内梅罗污染指数法对研究区地下水重金属污染状况进行评价(图 4),计算其单因子污染指数和综合污染指数,其中 J1 位于园区上游,可作为对照点。由单因子污染指数评价数据可知,评

价区地下水中 Fe、Pb、Cu、As、Zn、Cd 重金属元素均为无污染。Fe、Pb、Cu、As、Zn 和 Cd 单因子污染指数范围分别为 0.36~0.76、0.26~0.78、0.01~0.76、0.01~0.70、0.35~0.55 和 0.01~0.48;综合污染指数分别为 0.68、0.66、0.58、0.53、0.50 和 0.37。

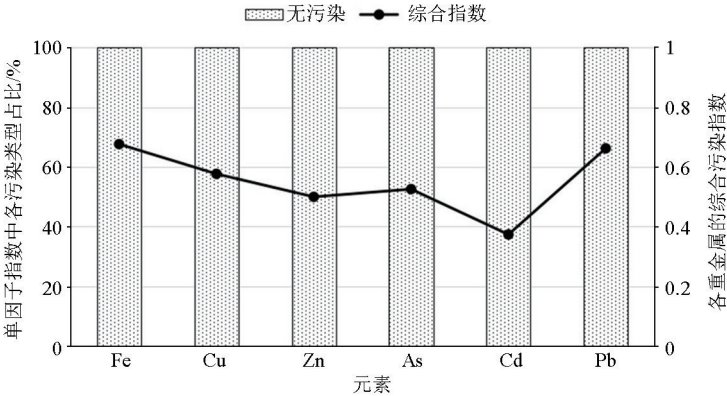


图 4 单因子污染指数与综合污染指数评价地下水重金属

Fig. 4 Evaluation of heavy metals in groundwater by single factor pollution index and comprehensive pollution index

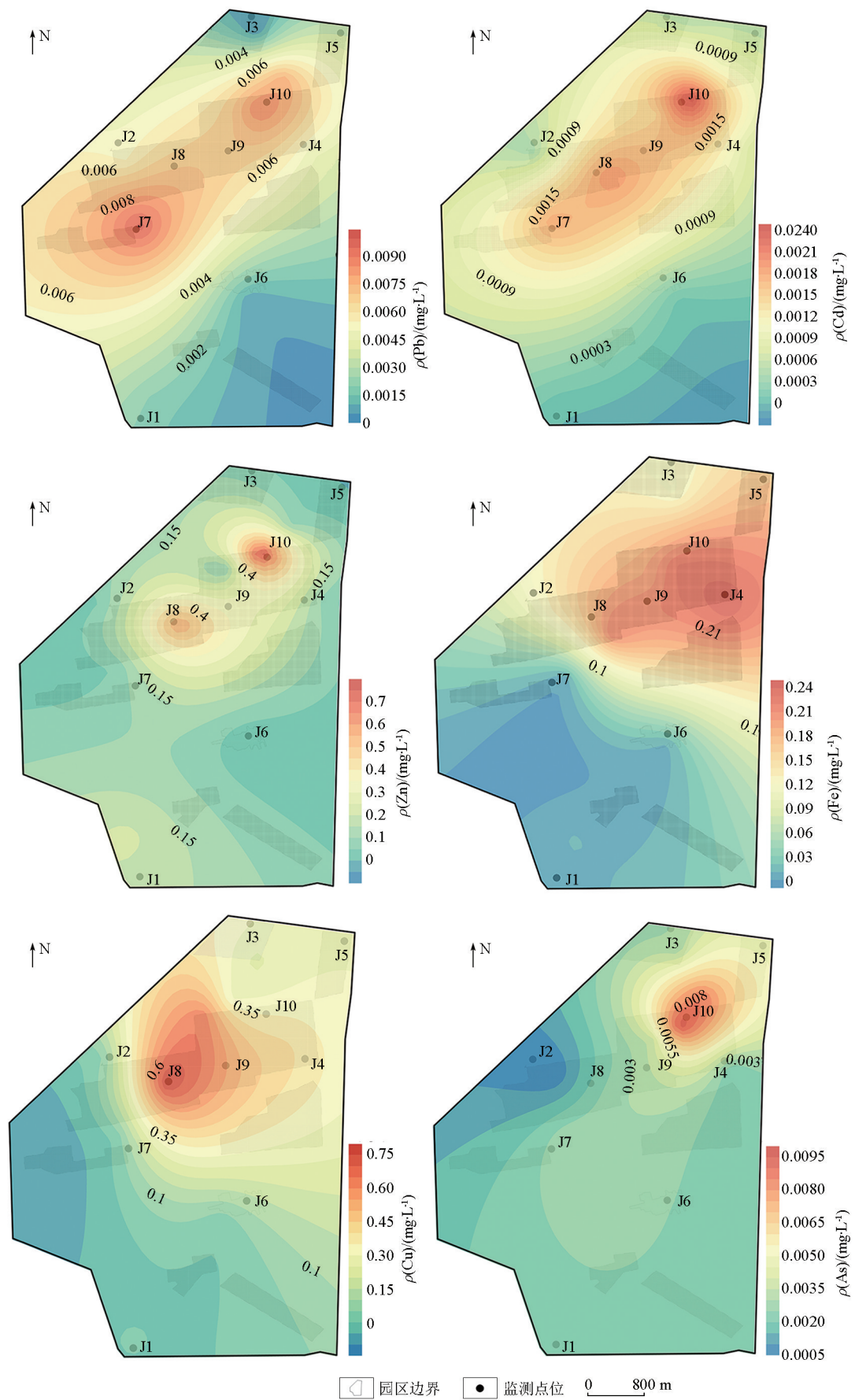


图 5 研究区地下水重金属浓度空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of groundwater heavy metal concentration in the study area

采用 ArcGIS 10.2 反距离权重插值法对研究区 10 个采样点的重金属进行插值,来分析地下水重金属含量空间分布特征(图 5)。由图 5 可以看出:①Zn、Cd 和 As 空间分布具有一定的相似性,高值区采样点主要位于 J10,扩散趋势从西南向东北逐渐加重。根据现场调查可知,J10 位于企业(行业类型为染料制造)试验装置区北,地下水流向下游,该功能区主要对研制的颜料进行试生产,该区域包含了厂区全部原材料和生产工艺,生产工艺及原辅材料较复杂,生产装置有腐蚀痕迹,地面颜色异常,且地面存在破损,推测企业生产活动在一定程度上增大了该区域重金属浓度;②Pb 高值区采样点主要位于 J7,扩散趋势沿西南向递减。该企业行业类型为其他电池制造,主要生产铅酸蓄电池,原辅材料使用大量的铅粉,判断 Pb 主要受该企业生产活动影响;③Fe 高值区采样点主要位于 J4、J10,面积较广,扩散趋势沿东北方向递增。J4 位于企业(行业类型为炼铁)烧结车间东,该功能区用矿粉、生石灰、菱镁粉、焦粉等烧结生产成品烧结矿,产生的废气主要为颗粒物、铁粉、铅尘等,废水主要为含氧化铁皮和少量油,部分设备存在“跑、冒、滴、漏”现象,可能是引起

地下水 Fe 富集的主要原因。④Cu 高值区采样点主要位于 J8,扩散趋势沿东北向递减。J8 位于企业(行业类型为基础化学原料制造)污水处理东,污水处理站对全厂生产的污水进行处理,为全厂污染风险最大的地方,且污水处理站周边存在砖铺地面,气味异常,周边硬化有破损迹象,推测企业生产活动是引起地下水 Cu 富集的主要原因。

2.3 人体健康风险评价

根据美国国家环保署推荐的健康风险评价模型,计算出该典型化工园区地下水中 Fe、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等重金属元素通过饮用和皮肤接触途径下的健康风险。由图 6a、b 可知,在皮肤接触途径下,儿童和成人的非致癌物质的平均健康风险熵变化趋势一致,其大小顺序均为 $Cu > Zn > Fe > Pb$,其中儿童平均风险值范围为 $1.75 \times 10^{-5} \sim 2.56 \times 10^{-2}$,成人平均风险值范围为 $4.18 \times 10^{-5} \sim 3.8 \times 10^{-2}$;在饮用水径下,儿童和成人的非致癌物质的平均健康风险值变化趋势一致,其大小顺序均为 $Cu > Pb > Zn > Fe$,其中儿童平均风险值范围为 $2.63 \times 10^{-3} \sim 7.56 \times 10^{-2}$,成人平均风险值范围为 $5.44 \times 10^{-3} \sim 1.57 \times 10^{-1}$ 。两种途径下非致癌物质风险熵均为成人 $>$ 儿童,从暴露

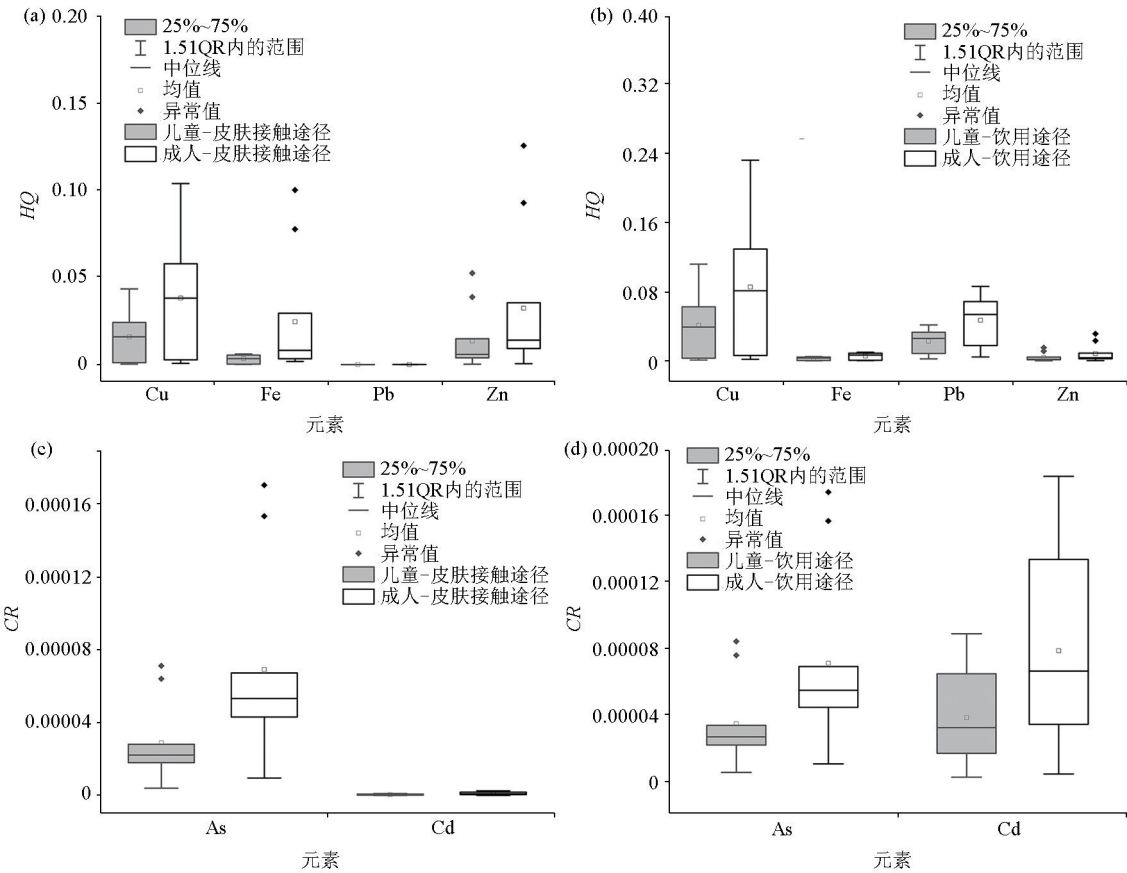


图 6 两种途径下地下水重金属对儿童和成人的健康风险值箱式图

Fig. 6 Box chart of health risk value of heavy metals in groundwater to children and adults under two ways

途径来看,无论儿童还是成人,非致癌物质从饮水途径下摄入是该研究区主要的暴露途径。由非致癌物风险熵可知,地下水中重金属对成人和儿童在不同暴露途径下的综合风险值 HI 贡献率主要为 Cu ,分别为 55.8%和 55.1%,其中成人 HI 为 0.224,儿童 HI 为 0.102,两者 HI 均小于 1,说明非致癌风险都在可接受范围之内;成人的 HI 是儿童的两倍,说明地下水重金属污染对成人非致癌健康危害性更大。

由图 6c、d 可知,在皮肤接触途经下,儿童致癌物质 As 风险值范围为 $4.01\times10^{-6}\sim7.11\times10^{-5}$, Cd 风险值范围为 $2.17\times10^{-8}\sim1.06\times10^{-6}$;在饮用途经下,儿童致癌物质 As 风险值范围为 $4.72\times10^{-6}\sim8.38\times10^{-5}$, Cd 风险值范围为 $1.80\times10^{-6}\sim8.84\times10^{-5}$;两者均低于美国环境保护署推荐的最大可接受风险水平 1.0×10^{-4} ,说明儿童在两种暴露途径下致癌风险均在可接受范围之内。在皮肤接触途经下,成人致癌物质 As 风险值范围为 $9.59\times10^{-6}\sim1.7\times10^{-4}$, Cd 风险值范围为 $5.2\times10^{-8}\sim2.55\times10^{-6}$;在饮用途经下,成人致癌物质 As 风险值范围为 $9.80\times10^{-6}\sim1.74\times10^{-4}$, Cd 风险值范围为 $3.75\times10^{-6}\sim1.84\times10^{-4}$,其中, As 在两种不同暴露途径下均出现有 2 件样品致癌风险值大于 1.0×10^{-4} , Cd 在饮用途经下有 4 件样品致癌风险值大于 1.0×10^{-4} ,表明对成人存在轻微的致癌风险。

总的来说,无论是致癌物质还是非致癌物质,其对成人的健康风险危害要大于儿童;无论儿童还是成人,通过饮用途径健康风险值均大于通过皮肤接触途径的健康风险值。因此,应该加强关注该区域通过饮用水途径对成人造成的健康风险。

3 结论

1)研究区地下水中重金属元素的平均浓度排序为: $Cu>Zn>Fe>Pb>Cd>As$, Fe 、 Cu 、 Zn 、 As 、 Cd 、 Pb 浓度均低于《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中Ⅲ类水质标准。

2)研究区地下水中重金属元素单因子污染指数排序为: $Fe>Pb>Zn>Cu>As>Cd$;综合污染指数变化范围为 0.37~0.78,所有监测点位重金属元素均为无污染。

3)研究区地下水重金属浓度空间分布特征与园区内重点企业分布区域基本吻合,说明企业的生产活动等外在因素影响了地下水重金属的空间分布特征。

4)人体健康风险评估结果说明,研究区地下水

重金属非致癌风险在不同暴露途径下对不同人群均处于可接受水平,致癌物质 As 和 Cd 对成人存在轻微的致癌风险。因此,加强对研究区重点企业生产活动的监督,对存在疑似污染的企业进行全面排查,杜绝“跑、冒、滴、漏”现象的发生,切断污染迁移途径,才能有效地控制并逐步降低地下水污染对人体造成的健康风险。

参考文献 (References):

[1] 沈洪艳,安冉,师华定,等. 湖南省某典型流域农用地土壤重金属污染及影响因素[J]. 环境科学,2021,34(3):715-724.
Shen H Y, An R, Shi H D, et al. Heavy metal pollution and influencing factors of agricultural land in a typical watershed in Hunan Province [J]. Environmental Science Research, 2021, 34 (3): 715-724.

[2] 师环环,潘羽杰,曾敏,等. 雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学,2021,42(9):4246-4256.
Shi H H, Pan Y J, Zeng M, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in groundwater of Leizhou Peninsula [J]. Environmental Science, 2021, 42 (9): 4246-4256.

[3] You D, Zhou J, Wang J, et al. Analysis of relations of heavy metal accumulation with land utilization using the positive and negative association rule method[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2011, 54(3/4):1005-1009.

[4] Rommel S H, Stinshoff P, Helmreich B. Sequential extraction of heavy metals from sorptive filter media and sediments trapped in stormwater quality improvement devices for road runoff[J]. Science of the Total Environment, 2021, 782:146875

[5] 秦承刚,王旭东,徐海峰,等. 鲁南化工高科技园区地下水污染调查与分析[J]. 山东化工,2016,45(12):184-187.
Qin C G, Wang X D, Xu H F, et al. Groundwater pollution investigation and analysis of Lunan chemical high-tech industry zone [J] Shandong Chemical Industry, 2016, 45 (12): 184-187

[6] Wang T, Yuan Z, Yao J. A combined approach to evaluate activity and structure of soil microbial community in long-term heavy metals contaminated soils [J]. Environmental Engineering Research, 2017, 23(1):62-69.

[7] Diagomanolin V, Farhang M, Ghazi-khansari M, et al. Heavy metals (Ni, Cr, Cu) in the Karoon waterway river, Iran [J]. Toxicology Letters, 2004, 151(1):63-67.

[8] Azevedo J S, Serafim A, Company R, et al. Biomarkers of exposure to metal contamination and lipid peroxidation in the benthic fish *Cathorops spixii* from two estuaries in South America, Brazil [J]. Ecotoxicology, 2009, 18(8):1001-1010.

[9] 谷阳光,高富代. 我国省会城市土壤重金属含量分布与健康风险评价[J]. 环境化学,2017,36(1):62-71.
Gu Y G, Gao F D. Spatial distribution and health risk assessment of heavy metals in provincial capital cities, China [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1):62-71.

[10] 常亮. 重金属元素镉、铬、钴、铅、锰、铊在人体骨与血中含量与年龄变化的关系探究[D]. 南京:南京大学,2018:14-19.
Chang L. Study on the relationship between age and the content of

- heavy metal elements such as cadmium, chromium, cobalt, lead, manganese and thallium in human bone and blood [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018; 14–19.
- [11] 赵玉. 渭河干流浅层地下水与地表水中重金属 Cd 污染特征及风险评价[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(2): 267–277.
- Zhao Y. Characteristics and risk assessment of heavy metal Cd pollution of shallow groundwater and surface water in main stream of Weihe River, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(2): 267–277.
- [12] 杨婷婷, 王璐, 尚宏鑫, 等. 大连地区海洋生物中重金属 Pb 和 Cd 对人体健康的潜在风险评价[J]. 水产养殖, 2018, 39(7): 15–19.
- Yang T T, Wang L, Shang H X, et al. Potential risk assessment of heavy metals (Pb and Cd) to health form marine life in Dalian region [J]. Aquaculture, 2018, 39(7): 15–19.
- [13] 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 & Health, 2014, 36(1): 169–182.
- [14] 倪彬, 王洪波, 李旭东, 等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2010, 23(1): 74–79.
- Ni B, Wang H B, Li X D, et al. Water environment health risk assessment in lake sources of drinking water [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(1): 74–79.
- [15] Chotpantarat S, Wongsasuluk P, Siritwong 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 & Ecological Risk Assessment An International Journal, 2014, 20(3/4): 689–703.
- [16] 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.
- [17] Zhang Y, Li F, Li J, et al. Spatial distribution, potential sources, and risk assessment of trace metals of Groundwater in the North China Plain [J]. Human & Ecological Risk Assessment An International Journal, 2015, 21(3/4): 726–743.
- [18] Cheng X, Qi W, Danek T, et al. Heavy metal contamination of surface water and groundwater in and Around Gejiu Tin Mine, Southwest China [J]. Inzynieria Mineralna, 2016, 17(1): 93–98.
- [19] 生态环境部. 化工园区地下水环境状况调查评估技术方案[S].
- Ministry of Ecology and Environment. Technical scheme for investigation and evaluation of groundwater environmental status in Chemical Park [S].
- [20] HJ 168—2020 环境监测分析方法标准制定技术导则[S].
- HJ 168—2020 Technical guidelines for the development of environmental monitoring analysis method standards [S].
- [21] 于林松, 万方, 范海印, 等. 姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2020, 43(8): 4199–4211.
- Yu L S, Wan F, Fan H Y, et al. Spatial distribution, source apportionment, and ecological risk assessment of soil heavy metals in Jianghugongmi producing area, Shandong Province [J]. Environmental Science, 2020, 43(8): 4199–4211.
- [22] Brady J P, Ayoko G A, Martens W N, et al. Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(5): 306.
- [23] Teng Q, Zhang D M, Deng F C, et al. Divergent patterns of heavy metal accumulation in paddy fields affect the dietary safety of rice: A case study in Maoming City, China [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(38): 53533–53543.
- [24] 罗杰, 张敏, 罗密密, 等. 某离子型稀土矿不同功能区土壤退化特征[J]. 中国稀土学报, 2022, 40(2): 329–338.
- Luo J, Zhang Q, Luo M M, et al. Degradation characteristics of soil in different functional areas of an ion-type rare earth mine [J]. Journal of Rare Earths, 2022, 40(2): 329–338.
- [25] GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S].
- GB/T 14848—2017 Standard for groundwater quality [S].
- [26] 李政红, 毕二平, 张胜, 等. 地下水污染健康风险评估方法[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(6): 47–51.
- Li Z H, Bi E P, Zhang S, et al. Method for health risk assessment of groundwater pollution [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(6): 47–51.
- [27] 艾提业古丽·热西提, 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, 2019, 14(2): 251–259.
- Atiyagul R, Mamattursun E, Wang W W, et al. The human health risk assessment of heavy metal pollution from groundwater in Bosten Lake Basin [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(2): 251–259.
- [28] Bian B, Zhou L J, Li L, et al. Risk assessment of heavy metals in air, water, vegetables, grains, and related soils irrigated with biogas slurry in Taihu Basin, China [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22: 7794–7807.
- [29] US EPA. Regionnal screening levels [EB/OL]. 2010 [2022-03-13]. Http://www.epa.gov.
- [30] 刘蕊, 张辉, 勾轩, 等. 健康风险评估方法在中国重金属污染中的应用及暴露评估模型的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1239–1244.
- Liu R, Zhang H, Gou X, et al. Preliminary risk assessment of trace metal pollution in surface water from Yangtze River in Nanjing section, China [J]. Journal of Ecology and Environment, 2014, 23(7): 1239–1244.
- [31] 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.
- [32] 段小丽, 赵秀阁. 中国人群暴露参数手册 (成人卷) 概要 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- Duan X L, Zhao X G. Highlights of the Chinese exposure factors handbook (adult) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.
- [33] 段小丽, 赵秀阁. 中国人群暴露参数手册 (儿童卷) 概要 [M].

北京:中国环境科学出版社,2016.

Duan X L,Zhao X G. Highlights of the Chinese exposure factors handbook (children) [M]. Beijing:China Environmental Science Press,2016.

[34] US EPA. Exposure factors handbook (EPA/600/P-95/002) [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1997:104-126.

[35] US EPA. Integrated risk information system [EB/OL]. [2022-03-14]. Http: www. epa. gov/iris.

[36] U. S. Department of energy the risk assessment information system [EB/OL]. [2022-03-14]. Http: //rais. orn1. gov.

[37] 庞绪贵,李秀章,滕兆令,等. 山东省黄河下游地区浅层地下水地球化学特征 [J]. 岩矿测试,2007,26 (4):298-304.

Pang X G,Li X Z,Teng Z L,et al. Geochemical characteristics of the shallow groundwater in downstream area of the Yellow River in Shandong Province [J]. Rock or Mine Testing,2007,26 (4):298-304.

[38] Stoeva N,Berova M,Zlatev Z. Effect of arsenic on some physiological parameters in bean plants [J]. Biologia Plantarum, 2005, 49 (2):293-296.

Heavy metal pollution and health risk assessment of groundwater in a typical chemical industry park in northwestern Shandong, China

FAN Hai-Yin^{1,2}, SONG Rui-Rui^{1,2}, YU Lin-Song^{1,2}, TENG Yong-Bo^{1,2},
WAN Fang^{1,2}, ZHANG Xiu-Wen^{1,2}, LI Sheng-Yu^{1,2}, ZHAO Chuang^{1,2}

(1. Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Jinan 250013, China; 2. Shandong Engineering Research Center for High Precision Detection of Underground Resources and Environment, Jinan 250013, China)

Abstract: This study aims to ascertain the heavy metal pollution of groundwater in a typical chemical industry park in northwestern Shandong. According to the investigation and evaluation requirements for groundwater environments in chemical industry parks, this study collected 10 groundwater samples to analyze the concentrations and spatial distributions of eight heavy metals, namely Fe, Cu, Zn, Al, Cd and Pb. Furthermore, it conducted the health risk assessment of groundwater for different populations. The results indicate that: (1) except Mn and Al, all heavy metals in the groundwater of the chemical industry park showed concentrations lower than the class III water quality standard stated in the Standard for Groundwater Quality (GB/T 14848—2017), with a comprehensive pollution index ranging from 0.37 to 0.78. The monitoring points for heavy metal elements are all pollution-free; (2) the overall spatial distributions of heavy metals are roughly consistent with the distribution areas of key enterprises in the chemical industry park. This consistency indicates that external factors such as the production activities of enterprises affect the spatial distributions of heavy metals in groundwater; (3) the health risks are lower for children than for adults and lower via skin contact than via drinking. The non-carcinogenic risks under different exposure routes are acceptable for different populations. Carcinogens As and Cd have slight carcinogenic risks for adults. Local authorities should strengthen the supervision of the production activities of enterprises and thoroughly inspect enterprises with suspected pollution. Only in this way can we effectively control and then gradually reduce the risks to human health caused by groundwater pollution.

Key words: heavy metal; groundwater; spatial distribution; health risk; chemical industry park

(本文编辑:蒋实)