



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.013

余璇, 康亭, 郑晓笛, 等. 陈家冲垃圾填埋场地下水环境健康风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 82-88. YU Xuan, KANG Ting, ZHENG Xiaodi, et al. Study on groundwater quality impacted by Chenjiachong sanitary landfill[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 82-88. (in Chinese)

# 陈家冲垃圾填埋场地下水环境健康风险评价

余璇<sup>1,2</sup>, 康亭<sup>1,2</sup>, 郑晓笛<sup>1,2</sup>, 宋柳霆<sup>1,2</sup>, 滕彦国<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 北京师范大学地下水污染控制与修复部工程研究中心, 北京 100875)

**摘要:** 垃圾填埋是目前国内处理城市生活垃圾的主要方式, 由垃圾渗滤液引发地下水环境污染已成为当前主要的水环境问题之一。选择武汉市陈家冲垃圾填埋场为研究对象, 通过对该区周边地下水布孔取样和监测, 分析了垃圾填埋场对其周围地下水环境的影响。结果表明: 研究区地下水的主要污染因子为 Pb、Cd 和 Fe, 且各污染物的浓度与采样深度、井距呈负相关关系。垃圾填埋场产生污染的影响范围主要在距离 800 m 以内、深度小于 5.5 m 的地下水。为进一步了解该区地下水对人体健康危害的风险程度, 对研究区地下水进行了水环境健康风险评价, 结果显示: 研究区各采样井地下水的总风险值在  $2.71 \times 10^{-4}/a \sim 7.12 \times 10^{-3}/a$ , 均超过国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受值  $5.0 \times 10^{-5}/a$ , 主要风险因子为基因毒物质 Cd 和 Cr(VI) 以及躯体毒物质硝态氮; 其中, Cd 和硝态氮所致的健康风险值超标率 100%, 而 Cr(VI) 的健康风险值超标率为 50%, 对暴露人群存在健康危害风险。此外, 对男性和女性健康风险值的研究显示, 研究区地下水环境中污染物的男性健康危害风险值普遍高于女性。

**关键词:** 垃圾填埋场; 渗滤液; 地下水水质; 污染评价; 健康风险评价

**中图分类号:** X824    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0082-07

## Study on groundwater quality impacted by Chenjiachong sanitary landfill

YU Xuan<sup>1,2</sup>, KANG Ting<sup>1,2</sup>, ZHENG Xiaodi<sup>1,2</sup>, SONG Liuting<sup>1,2</sup>, TENG Yanguo<sup>1,2</sup>

(1 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Landfill is currently the primary way to dispose the urban refuse in China. However, the groundwater quality will be deteriorated by landfill leachate, which has become one of the main sources of the current water pollution. In this study, a municipal landfill in Wuhan City was selected for research and its effects on the surrounding groundwater environment were investigated. Groundwater samples were collected from eight boreholes and these samples were analyzed to assess the current groundwater quality in the study area. The results showed that the groundwater samples were mainly polluted by Pb, Cd and Fe. The pollutant concentrations were negatively correlated with the sampling depth and the distance between the sampling well and landfill site. The groundwater pollution impacted by landfill leachate was mainly within a distance of 800 meters and a depth of 5.5 meters. The water environment health risk assessment was performed to further investigate the potential human health risk exposure to the polluted groundwater in the study area. The results showed that the total risk values of the groundwater samples were within a range of  $2.71 \times 10^{-4} a^{-1} \sim 7.12 \times 10^{-3} a^{-1}$ , higher than the maximum acceptable value  $5.0 \times 10^{-5} a^{-1}$  as recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). The human health risk was mainly induced by exposure to pollutants including Cd, Cr(VI) and nitrate nitrogen. The health risk values of Cd and nitrate nitrogen exceeded the ICRP recommended level in all the samples, and the health risk value of Cr(VI) exceeded the level in 50% of the samples. In addition, the

收稿日期: 2016-10-08    修回日期: 2017-03-30    网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1936.030.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41473086); 环保公益性行业科研基金(201509031)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41473086); Scientific Research Fund for Environmental Protection Public Welfare Professions(201509031)

作者简介: 余璇(1992-), 女, 湖北咸宁人, 主要从事污染物迁移与转化方面研究。E-mail: yuxuan421@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 宋柳霆(1982-), 女, 山东淄博人, 副教授, 博士, 主要从事重金属污染物迁移与模拟方面研究。E-mail: ltsong@bnu.edu.cn

results showed that the health risk values of the groundwater pollutants to men was generally higher than those to women

**Key words:** landfill; leachate; groundwater quality; contamination assessment; health risk assessment

随着我国社会经济的快速发展和城市化进程的不断加速,城市垃圾的增长量大幅度提高。据统计,目前我国垃圾年产量约为2亿t,而且正以每年10%的速度增长<sup>[1]</sup>。卫生填埋是目前处理城市生活垃圾的主要方式,可以避免因露天堆放而引起的环境问题,但是因为雨水冲刷、淋浴等,垃圾填埋场可能会沥出渗滤液。渗滤液中包含着填埋场内几乎所有的可溶物,对环境的影响有很长的时效性,如若管理不善,将会严重危及地表水体、地下水含水系统甚至人类生存<sup>[2-3]</sup>。国内外有关垃圾填埋场渗滤液污染地下水的事件屡有发生,如武夷山垃圾填埋场曾因雨水冲刷,渗滤液下渗,对地下水水质造成严重污染;吉林市某垃圾填埋场曾因坝体渗漏,导致渗滤液漫延渗入地下,使得周边地下水中的有机污染物和重金属严重超标<sup>[4]</sup>;北京、宁夏、成都等地也发生过类似的环境污染事件<sup>[5-7]</sup>。陈家冲垃圾填埋场是武汉市大型垃圾填埋场,肩负着处理武汉市大量生活垃圾的重任。近年来,随着垃圾产量的不断攀升,该垃圾场正面临着超量填埋的压力,且武汉市地处亚热带季风性湿润季候区,雨量充沛,使得陈家冲垃圾填埋场存在着很大的安全隐患<sup>[8-10]</sup>。因此,开展陈家冲垃圾填埋场渗滤液对周边地下水水环境的影响研究,十分必要。

本文通过钻孔取样和监测,对陈家冲垃圾填埋场周边地下水环境中硝态氮和重金属含量进行了调查研究。通过水质分析评价了该研究区水质污染程度,结合健康风险评估模型进一步分析了当地污染状况可能会对周边居民造成的危害,以期为该研究区地下水环境保护和管理提供一定的科学依据。

## 1 研究区概况及样品采集

### 1.1 填埋场概况

陈家冲垃圾填埋场位于武汉市新洲区阳逻半边山,距武汉市市区约40 km,距绕城公路约2 km,地面高程为22~68 m,半边山高程达62.8 m,地形波状起伏。填埋场周边地表水系十分发育,湖泊和堰塘均有分布,西部与北部沟渠纵横,北部为五一湖与长河贯通,最后汇入长江。

陈家冲垃圾填埋场一期于2007年建成并投入试运行,一期计划可填埋量为280万t,二期建成后总容量可使用20年以上<sup>[11]</sup>。然而,陈家冲垃圾填

埋场一期投入使用仅仅5年,填埋量已超过320万t,处于超填状态,垃圾堆积已高出地面约15 m,超出设计高度约5 m,给周边环境带来巨大隐患。

### 1.2 样品的采集

陈家冲垃圾填埋场地下水类型为卵砾石黏性土层中的滞水带<sup>[12]</sup>,主要由大气降水补给,属浅层地下水。因地形限制,采样点主要分布于垃圾场西侧和西南侧,共采集地下水样品8个(J<sub>1</sub>至J<sub>8</sub>),采样点位置见图1。J<sub>1</sub>至J<sub>8</sub>井的采样深度分别为3 m、4 m、4 m、5 m、5.5 m、6 m、8 m、8 m。

采用聚乙烯采样瓶,预先使用5%~10%稀硝酸浸泡24 h,再用超纯水冲洗干净。装样前预先用被采样水样润洗3遍,采集量为500 mL。样品采集后尽快运回实验室,4℃保存备用。

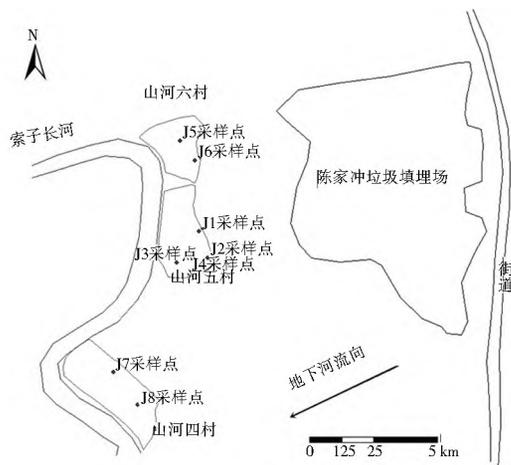


图1 研究区采样点分布

Fig. 1 Sampling points in the study area

## 2 材料与方法

### 2.1 水质检测方法

硝态氮的测定采用紫外分光光度法;六价铬的测定采用二苯碳酰二肼分光光度法(GB 7467-87);总汞的测定采用冷原子吸收分光光度法;镉、锌、铅、铜的测定采用原子吸收分光光度法(GB 7475-87);三价铁的测定采用邻菲罗啉分光光度法(GB/T 223.70-2008)。

### 2.2 水环境质量评价方法及标准

(1) 水体单项污染指数。

$$P_i = \frac{C_i}{c_0} \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为水体单项污染指数;  $c_i$  为污染物实测浓度;  $c_0$  为水环境质量标准。

单项污染指数对应的水体污染评价等级见表 1。

表 1 单项污染指数水体污染评价等级

Tab.1 The water pollution evaluation grades of the single pollution index

等级	单项污染指数	污染等级
$\bar{N}$	$p_i \leq 0.4$	无污染
$\hat{0}$	$0.4 < p_i \leq 1.0$	轻污染
$\acute{0}$	$1.0 < p_i \leq 2.0$	中等污染
$\hat{0}$	$2.0 < p_i \leq 5.0$	重污染
$\bar{0}$	$p_i > 5.0$	严重污染

(2) 水体综合污染指数。

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中:  $P$  为综合污染指数;  $P_i$  为单项污染指数;  $n$  为污染物个数。

水体综合污染指数对应的污染等级见表 2。

表 2 水体综合污染指数与污染等级

Tab.2 The comprehensive pollution index and water pollution level

等级	水体综合污染指数	污染等级
$\bar{N}$	$P \leq 0.2$	清洁
$\hat{0}$	$0.2 < P \leq 0.4$	尚清洁
$\acute{0}$	$0.4 < P \leq 0.7$	轻度污染
$\hat{0}$	$0.7 < P \leq 1.0$	中度污染
$\bar{0}$	$1.0 < P \leq 2.0$	重污染
$\bar{0}$	$P > 2.0$	严重污染

## 2.3 地下水环境健康风险评价模型及参数

本研究以美国环境保护署(USEPA)提出的环境健康风险评价模型为基本框架,借助 SPSS 软件为分析工具,对陈家冲垃圾填埋场周边地下水环境健康风险状况进行评价<sup>[13-14]</sup>。

### 2.3.1 水环境健康风险评价模型

模型假设水环境中对人体有危害的化学物质分为基因毒物质和躯体毒物质两类<sup>[15]</sup>。其中基因毒物质主要指放射性污染物和化学致癌物,躯体毒物质主要指化学非致癌物<sup>[16]</sup>。

(1) 基因毒物质风险值的计算<sup>[17]</sup>。

当化学物处于低暴露剂量时,风险值的计算见式(3);当化学物处于高暴露剂量时,风险值的计算见式(4)。

$$R_i^c = \frac{D_i \times q_i}{S} \quad (R_i^c < 0.01) \quad (3)$$

$$R_i^c = \frac{(1 - \exp(-D_i q_i))}{S} \quad (R_i^c > 0.01) \quad (4)$$

$$R^c = \sum_{i=1}^I R_i^c \quad (5)$$

$$D_i = \frac{V_i \times C_i}{W} \quad (6)$$

式中:  $R^c$  表示基因毒物质中的化学致癌物的总风险值(1/a);  $q_i$  表示化学致癌物的致癌强度系数(mg/(kg·d));  $S$  表示该地区的人均寿命(a);  $D_i$  表示该化学物通过饮水途径所产生的日均暴露剂量(mg/(kg·d));  $V_i$  表示该地区的成人每天饮用水摄入量(L/d);  $C_i$  表示该物质在评价水体中的浓度(mg/L);  $W$  表示该地区的人体质量(kg)。

(2) 躯体毒物质风险值的计算<sup>[18]</sup>。

$$R_i^n = \frac{D_i \times 10^{-6}}{Rf D_i S} \quad (7)$$

$$R^n = \sum_{i=1}^I R_i^n \quad (8)$$

式中:  $R_i^n$  表示躯体毒物质化学非致癌物的风险值(1/a);  $R^n$  表示躯体毒物质化学非致癌物的总风险值(a);  $Rf D_i$  表示躯体毒物质的致癌强度系数(mg/(kg·d));  $S$  表示该地区的人均寿命(a);  $D_i$  表示该化学物通过饮水途径所产生的日均暴露剂量(mg/(kg·d))。

由于城市饮用水源水中各种物质的浓度均很低,无特殊混合物的情况下,可以假定各种物质对人体的危害作用是相对独立的,不考虑各种金属进入人体的相互作用及污染物的毒性差异。则水环境的总风险值就相当于各种物质风险值的累加<sup>[19]</sup>。

$$R_{\text{总}} = R^c + R^n \quad (9)$$

### 2.3.2 环境健康风险模型参数说明

在对陈家冲垃圾填埋场地下水的评价研究中,分别对男性和女性的饮用水环境健康风险值进行评价。所选取的参数值为男性体重  $W = 62.7$  kg,女性体重  $W = 54.40$  kg,男性日均饮水量  $V_i = 2.464$  L/d,女性日均饮水量  $V_i = 2.170$  L/d,男性寿命  $S = 72.68$  a,女性寿命  $S = 77.35$  a<sup>[20-21]</sup>。

基因毒物质致癌强度系数和躯体毒物质致癌强度系数的选取均参照由 IARC 和 WTO 编制的分类系统的数据。Cd 和 Cr(VI) 为基因毒物质致癌物,强度系数分别为 6.1 mg/(kg·d) 和 41 mg/(kg·d); 硝态氮、Hg、Pb 和 Fe 为躯体毒物质致癌物,强度系数分别为 1.6 mg/(kg·d)、0.0003 mg/(kg·d)、0.014 mg/(kg·d) 和 0.3 mg/(kg·d)<sup>[17,22-24]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 陈家冲垃圾填埋场附近地下水水质污染特征

对陈家冲垃圾填埋场附近采集的地下水样品中

硝态氮、Cr(VI)、Hg、Cd、Pb 和 Fe 含量进行了分析,结果见表 3。

表 3 陈家冲垃圾填埋场周边地下水硝态氮和重金属含量

Tab. 3 Groundwater nitrate nitrogen and heavy metal content around Chenjiachong landfill		mg/L							
项目	地下水质量标准(Ⅰ类)	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>	J <sub>7</sub>	J <sub>8</sub>
硝态氮	≤20	3.90	3.31	2.45	1.82	1.52	1.29	0.24	0.22
Cr(VI)	≤0.05	0.015	0.0126	0.0126	0.0101	0.0008	0.0008	0.0003	0.0003
Hg	≤0.001	0.00026	0.00013	0.00012	0.00012	0.00010	0.00008	0.00005	0.00003
Cd	≤0.01	0.01	0.005	0.007	0.008	0.001	0.001	0.0017	0.0007
Pb	≤0.05	0.435	0.386	0.386	0.385	0.372	0.367	0.367	0.340
Fe	≤0.3	0.289	0.189	0.189	0.171	0.165	0.154	0.148	0.142

从表 3 中可以看出,研究区地下水样品的硝态氮、Cr(VI)、Hg、Cd、Pb 和 Fe 等 6 项污染物均有检出,检出率为 100%。其中, J<sub>1</sub> 至 J<sub>8</sub> 八眼井地下水的 Pb 含量均较高,在 0.340~0.435 mg/L 之间,远超过地下水Ⅰ类质量标准(0.05 mg/L),超标率达 100%;而硝态氮、Cr(VI)、Hg、Cd 和 Fe 等含量分别在 0.22~3.90 mg/L、0.0003~0.015 mg/L、0.00003~0.00026 mg/L、0.0007~0.01 mg/L、0.142~0.289 mg/L 之间,均未超标。

为了考察垃圾填埋场对周围地下水环境的影响,分别利用采样井与垃圾场的距离、采样深度与污染物浓度进行了作图(图 2 和图 3)。从图 2 可以看出,硝态氮、Cr(VI)、Hg、Cd、Pb、Fe 均表现出随着与采样井距离的增大,污染物浓度明显降低的趋势。在距离垃圾场 600 m 到 800 m 之间,地

下水中各污染物的浓度随着距离的增大而迅速下降。其中,硝态氮和 Cr(VI) 含量在距离垃圾场 700 m 到 850 m 范围内,有明显的降低;而 Hg、Cd、Pb、Fe 含量值在距离垃圾场 700 m 范围内,有明显的降低。图 3 显示了污染物浓度与采样井深度的变化趋势。从图 3 可以看出,6 种污染物均呈现出随采样深度的增加而明显降低的趋势。在采样深度大于 5.5 m 的采样井中,硝态氮和 Cd 浓度下降幅度大,分别在 0.22~1.52 mg/L、0.0007~0.001 mg/L 之间。因此,与垃圾填埋场距离越远且采样深度越深,各污染物的浓度就越低,表明垃圾填埋场产生的污染对周围地下水环境造成了一定的影响:在距离上,其影响范围主要在 800 m 以内;在采样深度上,其影响范围主要在埋深小于 5.5 m 的地下水。

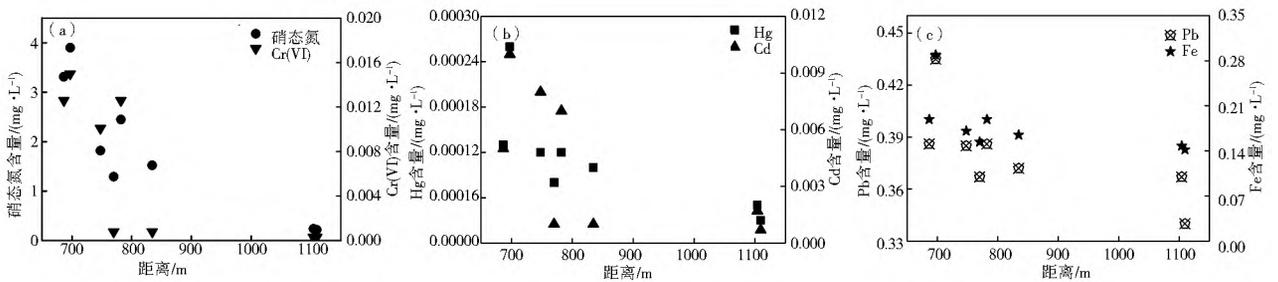


图 2 研究区地下水中污染物浓度与采样井距离的关系

Fig. 2 Relation between pollutant concentration in the groundwater and sampling well distance

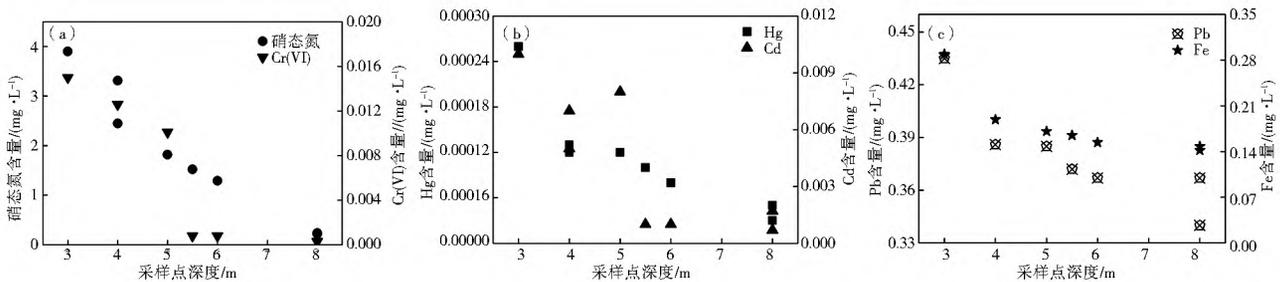


图 3 研究区地下水中污染物浓度与采样深度的关系

Fig. 3 Relation between pollutant concentration in the groundwater and sampling depth

### 3.2 陈家冲垃圾填埋场周边地下水水质污染评价

结合地下水水质Ⅰ类标准,对陈家冲垃圾填埋

场附近各采样点地下水水质进行了污染评价,结果见表 4。

表 4 陈家冲垃圾填埋场附近地下水水质污染指数计算结果

Tab. 4 Calculation results of groundwater quality pollution index around Chenjiachong landfill

项目	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>	J <sub>7</sub>	J <sub>8</sub>
硝态氮	0.195	0.166	0.123	0.091	0.076	0.065	0.012	0.011
Cr(VI)	0.300	0.252	0.252	0.202	0.016	0.016	0.006	0.006
Hg	0.260	0.130	0.120	0.120	0.100	0.080	0.050	0.030
Cd	1.000	0.500	0.700	0.800	0.100	0.100	0.170	0.070
Pb	8.700	7.720	7.720	7.700	7.440	7.340	7.340	6.800
Fe	0.960	0.630	0.630	0.570	0.550	0.510	0.490	0.470
P	1.903	1.566	1.591	1.581	1.380	1.352	1.345	1.231

根据表 4 所示的计算结果可知, 研究区 8 眼采样井地下水中 Pb 的单项污染指数在 6 800~ 8 700 之间, 均超过 5.0, 属于 Ⅴ 类水体, 达到了严重污染水平; Fe 的浓度虽未超过 Ⅳ 类标准, 但其单项污染指数在 0.470~ 0.960 之间, 属于轻度污染。Cd 的单项污染指数在 0.500~ 1.000 之间, 达到轻度污染水平。在调查范围内, 各采样井地下水的硝态氮、Cr(VI) 和 Hg 的单项污染指数均低于 0.4, 处于未污染水平。整体而言, 采样深度小于 5 m 的采样井 (J<sub>1</sub>、J<sub>2</sub>、J<sub>3</sub> 和 J<sub>4</sub>) 主要污染因子为 Pb、Cd 和 Fe, 而采样深度大于 5 m 的采样井 (J<sub>5</sub>、J<sub>6</sub>、J<sub>7</sub> 和 J<sub>8</sub>) 主要污染因子为 Pb 和 Fe。研究区各采样井地下水水质的综合污染指数在 1.231~ 1.903 之间, 处于重度污染水平 (1.0~ 2.0), 属于 Ⅴ 类水体, 不能直接用于生活及

农业生产。

### 3.3 陈家冲垃圾填埋场周边地下水水质健康风险评价

对陈家冲垃圾填埋场周边地下水水质进行了健康风险值的计算, 结果列于表 5 中。从表 5 可以看出, J<sub>1</sub> 至 J<sub>8</sub> 采样井男性总风险值在  $4.07 \times 10^4/a \sim 7.12 \times 10^3/a$  之间, 女性总风险值在  $2.71 \times 10^4/a \sim 6.81 \times 10^3/a$  之间。其中, J<sub>7</sub> 井的女性总风险值最小 ( $2.71 \times 10^4/a$ ), 与 ICRP 推荐的最大可接受水平  $5.0 \times 10^5/a$  相比, J<sub>7</sub> 井各污染物所致健康危害的年总风险值是 ICRP 推荐值的 5.42 倍。

依据 EPA 推荐的健康风险评价模型, 水环境中对人体有危害的化学物质分为基因毒物质和躯体毒物质两类, 其中, Cr(VI) 和 Cd 属于基因毒物质; 硝

表 5 陈家冲垃圾填埋场附近地下水水质健康风险值计算结果

Tab. 5 Groundwater quality health risk values around Chenjiachong landfill

1/a

井号	基因毒物质健康风险值			躯体毒物质健康风险值					总风险	
	Cr(VI)	Cd	总计	硝态氮	Hg	Pb	Fe	总计		
J <sub>1</sub>	男	3.33 E-4	3.37 E-3	3.70 E-3	3.37 E-3	4.22 E-11	3.29 E-6	4.69 E-5	3.42 E-3	7.12 E-3
	女	3.17 E-4	3.22 E-3	3.54 E-3	3.22 E-3	4.02 E-11	3.14 E-6	4.48 E-5	3.27 E-3	6.81 E-3
J <sub>2</sub>	男	2.79 E-4	2.87 E-3	3.15 E-3	2.87 E-3	2.11 E-11	2.92 E-6	3.06 E-5	2.90 E-3	6.05 E-3
	女	2.66 E-4	2.73 E-3	2.99 E-3	2.73 E-3	2.01 E-11	2.79 E-6	2.92 E-5	2.76 E-3	5.75 E-3
J <sub>3</sub>	男	2.79 E-4	2.12 E-3	2.40 E-3	2.12 E-3	1.95 E-11	2.92 E-6	3.06 E-5	2.15 E-3	4.55 E-3
	女	2.66 E-4	2.02 E-3	2.29 E-3	2.02 E-3	1.86 E-11	2.79 E-6	2.92 E-5	2.05 E-3	4.34 E-3
J <sub>4</sub>	男	2.24 E-4	1.58 E-3	1.80 E-3	1.58 E-3	1.95 E-11	2.91 E-6	2.78 E-5	1.61 E-3	3.41 E-3
	女	2.14 E-4	1.51 E-3	1.72 E-3	1.51 E-3	1.86 E-11	2.78 E-6	2.65 E-5	1.54 E-3	3.26 E-3
J <sub>5</sub>	男	1.77 E-5	1.32 E-3	1.34 E-3	1.32 E-3	1.62 E-11	2.82 E-6	2.68 E-5	1.35 E-3	2.69 E-3
	女	1.69 E-5	1.26 E-3	1.28 E-3	1.26 E-3	1.55 E-11	2.69 E-6	2.56 E-5	1.29 E-3	2.57 E-3
J <sub>6</sub>	男	1.77 E-5	1.11 E-3	1.13 E-3	1.11 E-3	1.30 E-11	2.78 E-6	2.49 E-5	1.14 E-3	2.27 E-3
	女	1.69 E-5	1.06 E-3	1.08 E-3	1.06 E-3	1.24 E-11	2.65 E-6	2.37 E-5	1.09 E-3	2.17 E-3
J <sub>7</sub>	男	6.65 E-6	2.10 E-4	2.17 E-4	2.10 E-4	8.11 E-12	2.78 E-6	2.39 E-5	2.37 E-4	4.54 E-4
	女	6.34 E-6	1.20 E-4	1.26 E-4	1.20 E-4	7.74 E-12	2.65 E-6	2.28 E-5	1.45 E-4	2.71 E-4
J <sub>8</sub>	男	6.65 E-6	1.87 E-4	1.94 E-4	1.87 E-4	4.87 E-12	2.57 E-6	2.30 E-5	2.13 E-4	4.07 E-4
	女	6.34 E-6	1.79 E-4	1.85 E-4	1.79 E-4	4.64 E-12	2.45 E-6	2.19 E-5	2.03 E-4	3.88 E-4

态氮、Hg、Pb 和 Fe 属于躯体毒物质。由表 5 可知, 研究区地下水中基因毒物质总风险值范围为  $1.20 \times 10^{-4}/a \sim 3.70 \times 10^{-3}/a$ , 而躯体毒物质总风险值范围为  $1.45 \times 10^{-4}/a \sim 3.42 \times 10^{-3}/a$ , 均超过了 ICRP 推荐的致癌风险最大可接受值  $5.0 \times 10^{-5}/a$ 。其中, 研究区 8 眼井地下水样品 Cd 的健康风险度均超过 ICRP 推荐值, J<sub>1</sub> 至 J<sub>4</sub> 井地下水中 Cr(VI) 的健康风险值也超过致癌风险最大可接受值  $5.0 \times 10^{-5}/a$ , 且因 Cr(VI) 对人体的危害性较大, 也应引起当地水环境管理部门的重视。而对于躯体毒物质, 仅硝态氮所致的健康风险值在  $1.20 \times 10^{-4}/a \sim 3.37 \times 10^{-3}/a$  之间, 超过 ICRP 推荐的致癌风险最大可接受值  $5.0 \times 10^{-5}/a$ , Hg、Pb 和 Fe 均未超标, 按照健康风险值从高到低排序依次为: 硝态氮 > Fe > Pb > Hg (表 5)。另外, 分别对男性和女性健康风险值进行了计算, 得出同一采样井、同一污染因子, 男性的健康风险值均高于女性的结论(表 5)。而段小丽<sup>[25]</sup>等人对北京市某垃圾填埋场地下水环境健康风险值进行研究, 结果显示在同一种暴露途径下, 女性的健康风险值均高于男性。这与本文结论有明显不同, 主要是由于二者采用不同的健康风险评估模型及参数所致。

## 4 结论

陈家冲垃圾填埋场周边地下水环境中硝态氮、Cr(VI)、Hg、Cd、Pb 和 Fe 等 6 项污染物均有检出, 其中 Pb 超标率 100%。研究区地下水的主要污染因子为 Pb、Cd 和 Fe, 且各污染物的浓度与井深、井距呈负相关关系。垃圾填埋场产生污染的影响范围主要在距离 800 m 以内, 井深小于 5.5 m 的地下水。研究区各采样井地下水的健康风险值在  $2.71 \times 10^{-4} \sim 7.12 \times 10^{-3}/a$ , 均超过 ICRP 推荐的最大可接受值  $5.0 \times 10^{-5}/a$ , 主要风险因子为基因毒物质 Cd 和 Cr(VI) 以及躯体毒物质硝态氮; 并且, 研究区地下水环境中污染物的男性健康危害风险值普遍高于女性。因此, 陈家冲垃圾填埋场已经对周边地下水造成污染, 建议当地环境管理部门加强该区地下水环境污染监测, 督促垃圾场管理部门改进渗滤液收排系统, 加强对该区的地下水环境的管理和保护。

### 参考文献(References):

[1] 张志强, 田西昭, 单强, 等. 唐山市某垃圾填埋场对浅层地下水水质的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 79-82. (ZHANG Zhiqiang, TIAN Xizhao, SHAN Qiang, et al.

Effects of municipal landfill on the shallow groundwater quality in Tangshan [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 79-82. (in Chinese) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.06079

[2] 何小松, 余红, 席北斗, 等. 填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1399-1406. (HE Xiaosong, YU Hong, XI Beidou, et al. Difference of contaminant composition between landfill leachates and groundwater and its reasons [J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1399-1406. (in Chinese) DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.028

[3] 蒋海涛, 周恭明, 高廷耀. 城市垃圾填埋场渗滤液的水质特性[J]. 环境保护科学, 2002, 28(3): 11-13. (JIANG Haitao, ZHOU Gongming, GAO Tingyao. The characteristics of MSW landfill leachate [J]. Environmental Protection Science, 2002, 28(3): 11-13. (in Chinese))

[4] 赵勇胜, 洪梅, 董军. 城市垃圾填埋场地下水环境污染及控制对策[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2007, 28(S1): 136-141. (ZHAO Yongsheng, HONG Mei, DONG Jun. Study on underground environment pollution and containment measures in landfill site [J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 28(S1): 136-141. (in Chinese) DOI: 10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2007.s1.040

[5] 蒋惠忠, 李建萍, 张洁, 等. 生活垃圾填埋场渗滤液对潜层地下水污染的实验模拟分析—以北京北天堂垃圾填埋场为例[J]. 世界地质, 2001, 20(4): 374-378. (JIANG Huizhong, LI Jianping, ZHANG Jie, et al. Modeling analysis of leachate pollution of sanitary fill on underground water in the southern area of Beijing Western Suburb [J]. World Geology, 2001, 20(4): 374-378. (in Chinese))

[6] 杨兴一. 宁夏灵武生活垃圾填埋场地下水污染与预测研究[D]. 西安: 长安大学, 2015. (YANG Xingyi. Study and forecast on groundwater pollution in Lingwu Landfill of Ningxia [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese))

[7] 涂培. 成都长安垃圾填埋场周边土壤重金属污染现状分析及评价[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013. (TU Pei. Current situation analysis and evaluation on heavy metal pollution for the soil around Chang'an Landfill site [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2013. (in Chinese))

[8] 董志高, 李枫, 吴继敏, 等. 垃圾填埋场对周边地质环境影响与防治对策[J]. 地质灾害与环境, 2010, 21(1): 15-20. (DONG Zhigao, LI Feng, WU Jimin, et al. Geological environment pollution around landfill and its control strategies [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(1): 15-20. (in Chinese))

[9] 曹小雪. 1961-2012年武汉市气候变化特征分析[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015. (CAO Xiaoxue. Analysis of characteristics of climate change in Wuhan City from 1961-2012 [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015. (in Chinese))

[10] 韩智勇, 许模, 刘国, 等. 生活垃圾填埋场地下水污染物识别与质量评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2843-2852. (HAN Zhiyong, XU Mo, LIU Guo, et al. Pollutant identification and quality assessment of groundwater near municipal solid waste landfills in China [J]. China Environmental Sci

- ence, 2015, 35(9): 2843-2852. (in Chinese)
- [11] 实习生陈仪记者孙滨通讯员. 陈家冲垃圾填埋场昨起试运营: 湖北日报 [Z]. 2007. 1. (Intern reporter CHEN Yi and the correspondent SUN Bin. Trial operation Chen jiachong landfill site yesterday: Hubei daily [Z]. 2007. 1. (in Chinese))
- [12] 雷继威, 夏永全. 武汉阳逻陈家冲垃圾卫生填埋场岩土工程勘察的难点分析及技术总结 [J]. 中国科技纵横, 2013(11): 13-14. (LEI Jiwei, XIA Yongquan. Technical difficulties and analysis summary geotechnical engineering in Wuhan Yangluo Chen jiachong waste sanitary landfill site [J]. China Science & Technology Overview, 2013(11): 13-14. (in Chinese))
- [13] 刘增超, 何连生, 董军, 等. 简易垃圾填埋场地下水污染风险评估 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(7): 833-839. (LIU Zengchao, HE Liansheng, DONG Jun, et al. Risk assessment of groundwater pollution for simple waste Landfill [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(7): 833-839. (in Chinese) DOI: 10.13198/j.res.2012.07.106.liuzch.017)
- [14] 洪梅, 张博, 李卉, 等. 生活垃圾填埋场对地下水污染的风险评价——以北京北天堂垃圾填埋场为例 [J]. 环境污染与防治, 2011, 33(3): 88-95. (HONG Mei, ZHANG Bo, LI Hui, et al. Risk assessment of leachate pollution of sanitary fill on underground water in the southern area of Beijing western suburb [J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(3): 88-95. (in Chinese) DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2011.03.020)
- [15] 杨昱, 姜永海, 席北斗, 等. 生活垃圾填埋场地下水污染风险分级方法研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1704-1709. (YANG Yu, JIANG Yonghai, XI Beidou, et al. Study on the risk classification methodology of groundwater pollution near landfill sites [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1704-1709. (in Chinese) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2010.07.015)
- [16] 梁丽华, 王新科, 郑现明, 等. 西安市黑河水源地下水环境健康风险评估 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 140-144. (LIANG Lihua, WANG Xinke, ZHENG Xianming, et al. Environmental health risk assessment on drinking water source of Heihe River for the Xi'an [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(10): 140-144. (in Chinese))
- [17] U. S. EPA. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment [R]. Washington DC: Risk Assessment Forum, 2005.
- [18] U. S. EPA. Handbook for Non-cancer Health Effects Valuation [R]. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2000.
- [19] 刘增超. 简易垃圾填埋场地下水污染风险评估方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013. (LIU Zengchao. Research for groundwater contamination risk assessment methodology of uncontrolled landfill site [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese))
- [20] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评估中我国居民暴露参数探讨 [J]. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1164-1170. (WANG Zongshuang, DUAN Xiaoli, LIU Ping, et al. Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(10): 1164-1170. (in Chinese) DOI: 10.13198/j.res.2009.10.54.wangzsh.006)
- [21] 段小丽, 王宗爽, 李琴, 等. 基于参数实测的水中重金属暴露的健康风险研究 [J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1329-1339. (DUAN Xiaoli, WANG Zongshuang, LI Qin, et al. Health risk assessment of heavy metals in drinking water based on field measurement of exposure factors of Chinese People [J]. Environmental Science, 2011, 32(5): 1329-1339. (in Chinese) DOI: 10.13227/j.hjxx.2011.05.031)
- [22] U. S. EPA. Superfund public health evaluation manual [Z]. EPA/540/F86/060, 1986.
- [23] 张芳. 农村地下水重金属特征及健康风险评估研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2013. (ZHANG Fang. Characteristics and health risk assessment of heavy metals of groundwater in a rural areas, a case study in Ping-yi County, Shandong province, China [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2013. (in Chinese))
- [24] U. S. EPA. Risk assessment guidance for Superfund. Volume I. Human Health Evaluation Manual. Part A. Interim report (Final) [Z]. EPA/540/R/99/005, 1989.
- [25] 段小丽, 王宗爽, 于云江, 等. 垃圾填埋场地下水污染对居民健康的风险评估 [J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(3): 20-22. (DUAN Xiaoli, WANG Zongshuang, YU Yunjiang, et al. Health risk assessment for residents exposure to underground water near a landfill site [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2008, 20(3): 20-22. (in Chinese))