

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019041101

周文武, 陈冠益, 穷达卓玛, 等. 拉萨市垃圾填埋场地下水水质的居民健康风险评价[J]. 环境化学, 2020, 39(6): 1513-1522.

ZHOU Wenwu, CHEN Guanyi, QIONG Dazhuoma, et al. Health risk assessment of groundwater quality in Lhasa landfill [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(6): 1513-1522.

## 拉萨市垃圾填埋场地下水水质的居民健康风险评价\*

周文武<sup>1</sup> 陈冠益<sup>1,2\*\*</sup> 穷达卓玛<sup>1</sup> 周鹏<sup>1</sup> 汪晶<sup>1</sup> 旦增<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 西藏大学理学院, 拉萨, 850000; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津, 300072)

**摘要** 对拉萨市垃圾填埋场地区地下水6个监测井中的 $\text{Cr}^{6+}$ 、As、Cd、Pb、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 指标采用美国环保局USEPA推荐的健康风险评价模型,按照不同人群进行健康风险评价.评价结果表明,通过暴露剂量计算,在饮水途径和皮肤接触途径下非致癌物暴露剂量一般高于致癌物暴露剂量;饮水途径暴露剂量高于皮肤接触途径下的暴露剂量.致癌污染物在饮水途径下风险值大于皮肤接触途径下的风险值,其中饮水途径下风险贡献为 $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd}$ , $\text{Cr}^{6+}$ 风险值超过USEPA的最大可接受水平 $1 \times 10^{-4}$ ;在皮肤接触途径下贡献为 $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd}$ , $\text{Cr}^{6+}$ 的风险值超过瑞典环保局、荷兰建设环保局、英国皇家协会和IAEA最大可接受风险水平;非致癌风险的污染物贡献最大的是 $\text{Cl}^-$ ,其通过饮水暴露途径在成人中风险值高于瑞典环保局( $1 \times 10^{-6}$ )、荷兰建设环保局( $1 \times 10^{-6}$ )、英国皇家协会( $1 \times 10^{-6}$ )和IAEA( $5 \times 10^{-7}$ )最大可接受水平.因此,致癌物中 $\text{Cr}^{6+}$ 成为主要的致癌物,人们在饮水中要将其去除,起到预防癌症和减少患癌的机率.

**关键词** 填埋场,地下水,健康风险评价,拉萨市.

## Health risk assessment of groundwater quality in Lhasa landfill

ZHOU Wenwu<sup>1</sup> CHEN Guanyi<sup>1,2\*\*</sup> QIONG Dazhuoma<sup>1</sup> ZHOU Peng<sup>1</sup>  
WANG Jing<sup>1</sup> DAN Zeng<sup>1,2\*\*</sup>

(1. School of Science, Tibet University, Lhasa, 850000, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

**Abstract:** In this paper, the indicators of  $\text{Cr}^{6+}$ , As, Cd, Pb,  $\text{NO}_3$ -N,  $\text{F}^-$ , and  $\text{Cl}^-$  in the 6 monitoring wells of groundwater in the Lhasa landfill site were evaluated through the health risk assessment model recommended by US Environmental Protection Agency's (USEPA), which allows the pollutants to be assessed for health risks according to different populations. The results evaluation show that the exposure dose of non-carcinogens through drinking water route and skin contact route is generally higher than that of carcinogen exposure by exposure dose calculation; The exposure dose of drinking water route is higher than that of skin contact route. The risk value of carcinogenic pollutants through the drinking water route is greater than the risk value through the skin contact route. Specifically, the risk contribution under of drinking water route is  $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd}$ , and the risk value of  $\text{Cr}^{6+}$  exceeds  $1 \times 10^{-4}$  the maximum acceptable level of USEPA; In skin contact, the contribution is  $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd}$ , and the risk value of  $\text{Cr}^{6+}$  exceeds the maximum acceptable risk level of

2019年4月11日收稿(Received: April 11, 2019).

\* 西藏自治区重点科技计划(Z2016C01G01106),西藏自治区地区自然科学基金(2016ZR-15-12)和西藏自治区青年创新支持计划(QCZ2016-01)资助.

**Supported by the** Key Science and Technology Program of Tibet Autonomous Region(Z2016C01G01106), the Natural Science Foundation of Tibet Autonomous Region(2016ZR-15-12) and Youth Innovation Support Program of Tibet Autonomous Region(QCZ2016-01).

\*\* 通讯联系人, Tel: 13512208049, E-mail: chen@tju.edu.cn; Tel: 13638988545, E-mail: yongzhong2008@163.com

**Corresponding author,** Tel: 13512208049, E-mail: chen@tju.edu.cn; Tel: 13638988545, E-mail: yongzhong2008@163.com

Swedish Environmental Protection Agency, Netherlands Construction Environmental Protection Agency, Royal Society and IAEA; Meanwhile, as the largest contributor to non-carcinogenic risk, the exposure of  $\text{Cl}^-$  in adults through drinking water is higher than that of maximum acceptable level of Swedish Environmental Protection Agency ( $1 \times 10^{-6}$ ), Netherlands Construction Environmental Protection Agency ( $1 \times 10^{-6}$ ), Royal Society ( $1 \times 10^{-6}$ ) and IAEA ( $5 \times 10^{-7}$ ). Finally, it is clear that  $\text{Cr}^{6+}$  is a major carcinogen. Therefore,  $\text{Cr}^{6+}$  in drinking water needs to be removed in order to reduce the risk of cancer.

**Keywords:** landfill site, groundwater, health risk assessment, Lhasa City.

随着拉萨市经济的发展和城市化进程的加快,城市生活垃圾的增长量大幅度提高.2017年拉萨市当年生活垃圾产量 35.052 万吨,填埋量 32.366 万吨,可见拉萨市垃圾处理主要是卫生填埋为主<sup>[1]</sup>.而卫生填埋在雨水的冲刷作用下,产生渗滤液对地下水有很大的污染,对人体健康有一定的影响.

对地下水进行健康风险评价,主要是将污染物和人体健康联系起来进行定量描述<sup>[2]</sup>.国际上健康风险评价采用较多的主要是美国国家科学院和美国环保局的健康风险评价模型<sup>[2]</sup>.美国国家科学院还提出健康风险评价四步骤:危险鉴定、剂量反应评估、暴露评估、风险表征<sup>[3]</sup>.美国环保局在 1989 年提出了类似的步骤,即数据收集、数据评估、毒性评估、暴露评估、风险表征<sup>[2]</sup>.对于地下水健康风险评价的主要污染物有无机物和重金属,也有对有机物的评价:如马进军等人对再生水景观瀑布的挥发性有机物进行了健康风险评价<sup>[4]</sup>;章霖之等对废弃农药生产场地地下水挥发性有机物进行健康评价<sup>[5]</sup>.

由于地下水是人类的主要饮用水及关系着人体健康.因此本文对拉萨填埋场地下水监测指标进行详细分析和调查,以美国环保局 USEPA 推荐的健康风险评价模型为基础,同时借鉴其他学者的研究,评价了监测指标对拉萨市填埋场周围的暴露人群造成的健康风险.为拉萨填埋场地区的地下水的污染防治和管理提供科学依据.

## 1 实验部分 (Experimental section)

### 1.1 填埋场概况

拉萨市卫生填埋场位于拉萨市曲水县聂当乡尼浦,尼浦谷地属于拉萨河北侧一级支谷,靠近 318 国道公路.填埋场建设使用年限 20 年(2001—2020),库容量设计为  $190.28 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,日填埋垃圾量  $172\text{—}411 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,主要填埋场范围为拉萨市区及周边县区域的城市生活垃圾.曲水县主要为松散岩类孔隙水<sup>[6]</sup>,其埋深大于 15 m,张丰述<sup>[6]</sup>、安红梅等<sup>[7]</sup>在其文中提到拉萨市地下水位埋深为 10—30 m,水量贫乏.填埋场北支沟上游基岩泉水流量为  $0.114 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ;距离拉萨河约 3.5 km,西侧的尼浦为季节性溪流,和其余支谷为临时性洪流;其补给来源主要有大气降水、冰雪融水、山区基岩裂隙补给和地表水季节性补给<sup>[6-8]</sup>.

### 1.2 样品采集及数据来源分析

依照《环境监测技术规范》采取地下水,按照环境保护相关规定和要求,在该填埋场场址周围的 6 个监测井进行监测,分别为 J1、J2、J3、J4、J5、J6,而 J1 长期无水,J4 被异物堵住.4 个监测点按枯水期、平水期和丰水期分别于 2017 年 11 月、2018 年 5 月、8 月采样 3 次,取样 1 d,每次取 3 个样计平均值.采集样品由西藏自治区环境监测中心站进行数据分析,按照《地下水环境监测技术规范》相关要求中地下水常规指标和《地下水质量标准》中规定的指标,确定主要监测的指标有 pH 值、电导率、DO、氨氮、COD、石油类、挥发酚、 $\text{Cr}^{6+}$ 、 $\text{CN}^-$ 、阴离子表面活性剂、As、Hg、Se、Cd、Pb、TDS、总硬度、 $\text{F}^-$ 、Cu、Zn、 $\text{Cl}^-$ 、硝酸盐、高锰酸盐指数、亚硝酸盐.

地下水的背景值为填埋场建设时地下水监测值,渗滤液数据由西藏自治区环境监测中心站监测分析渗滤液原样所得.

### 1.3 评价指标确定

依照国际癌症研究中心(IARC)对化学物分类显示,有对人体致癌证据充分和对人体致癌证据有限

而对动物致癌证据充分的化学物质为化学致癌物,其他为非致癌化学有毒物质<sup>[9]</sup>.据此,根据地下水中具有检出值的污染物,确定了主要有化学致癌物 Cr<sup>6+</sup>、As、Cd 和非致癌物 Pb、硝酸盐、F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>.对这些污染物按致癌物和非致癌物进行健康风险评价.

#### 1.4 风险评估

健康风险评价主要是污染物通过多种途径进入人体产生健康风险<sup>[10]</sup>.采用 USEPA 推荐的计算方法和借鉴国内外的研究经验,对填埋场地下水采样点进行健康风险评价<sup>[11-14]</sup>.

##### 1.4.1 非致癌风险

非致癌风险通常用 HI 表示,采用杨莉霞<sup>[15-16]</sup>提到得计算公式:

$$HI = (CDI/RfD) \times 10^{-6} / 68.2 \quad (1)$$

式中,HI 为通过饮水、皮肤接触途径的非致癌风险指数,CDI 为人体日均暴露剂量,mg·(kg·d)<sup>-1</sup>;RfD 为某个污染物非致癌参考剂量,mg·(kg·d)<sup>-1</sup>;68.2 为西藏人均寿命<sup>[17]</sup>.

##### 1.4.2 致癌风险

致癌风险一般为终身致癌风险值,在低剂量暴露下,与人体致癌风险呈线性关系<sup>[9]</sup>.致癌风险表示在正常情况下人一生中暴露在这种污染物下导致的癌症发病率,用风险值 Risk 表示,计算公式<sup>[15-16]</sup>:

$$\text{低剂量 Risk} = (CDI \times SF) / 68.2 \quad (2)$$

$$\text{高剂量 Risk} = [-\exp(-CDI \times SF)] / 68.2 \quad (\text{低剂量计算值} > 0.01) \quad (3)$$

式中,Risk 为致癌风险,表示癌症发生的可能性;CDI 为人体日均暴露剂量,mg·(kg·d)<sup>-1</sup>;SF 为污染物致癌率因子,[mg·(kg·d)<sup>-1</sup>]<sup>-1</sup>;68.2 为西藏人均寿命.

在计算多种物质、多途径的非致癌物和致癌物累积效应,一般非致癌风险和致癌风险分别加和计算<sup>[18]</sup>.

根据国际癌症研究机构 IARC、美国环境保护署 USEPA、世界卫生组织 WHO 的分类系统、和文献 [2,10,19-22] 来确定致癌物斜率因子和非致癌物参考剂量如表 1.

表 1 化学致癌污染物的斜率因子和参考剂量

Table 1 Slope factor and reference dose of chemical carcinogenic pollutants

污染物 Pollutants	Cr <sup>6+</sup>	As	Cd	Pb	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>
SF/[mg·(kg·d) <sup>-1</sup> ] <sup>-1</sup>	41	15	6.1				
RfD/mg·(kg·d) <sup>-1</sup>	3×10 <sup>-3</sup>	3×10 <sup>-4</sup>		0.0014	1.6	0.1	0.06

##### 1.4.3 暴露评估

各污染物在进入人体中主要通过饮水、皮肤和呼吸接触.文中主要计算途径为饮水和皮肤接触为主,公式如下:

(1) 饮水途径暴露计算公式<sup>[5,15]</sup>:

$$CDI = (\rho \times IR \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (4)$$

(2) 皮肤接触途径暴露计算公式<sup>[5,15]</sup>:

$$CDI = (I \times SA \times EV \times EF \times ED) / (BW \times AT \times f) \quad (5)$$

$$I = 2 \times 10^{-3} \times \kappa \times \rho \times \sqrt{\frac{6 \times \tau \times TE}{\pi}} \quad (6)$$

式中参数取值参考 USEPA 推荐符号含义和文献 [23-26],见表 2. USEPA 推荐的成人日均饮水量 IR 为 2 L·d<sup>-1</sup>,由于研究地区位于高原地区,根据郑婵娟等<sup>[23]</sup>关于饮水量的研究,取成年人平均饮水量 3525 mL·d<sup>-1</sup>.其中成人体重 BW 采用宋雁等<sup>[24]</sup>研究中对于西藏等地区调查所得体重,男性 67.3 kg,女性 57.2 kg.

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 垃圾填埋场地下水分析结果

地下水背景值为拉萨垃圾填埋场一期项目环评报告中环境质量现状地下水质量现状数据,监测项

目共 15 项,结果见表 3.背景值中铅、镉、汞等 3 项水质指标呈未检出状态,其余 11 项指标均未超标,仅 1 项总大肠菌群超标.

表 2 评价参数名称、单位、符号及参考数值

Table 2 Names, units, symbols and reference values of evaluation parameters

参数名称及单位 Name and unit of parameters			符号 Unit	参考数值 Reference value	参考文献 Reference
水中化合物的质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )			$\rho$	实测值	
日饮水量/( $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$ )	成人		IR	3.525	[23]
	青少年			1.1	[25]
	儿童			0.87	[25]
暴露频率/( $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ )			EF	365	[25]
暴露延时/a	致癌		ED	70	[26]
	非致癌			40	
体重/kg	成人	男性	BW	67.3	[24-25]
		女性		57.2	
	青少年	男性		52	
		女性		42	
	儿童	男性		20	
		女性		19	
平均暴露时间/d	致癌	AT	25550	[26]	
	非致癌		10950		
每次洗澡单位体面积的吸附量/( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{次}^{-1}$ )			$I$	计算值	公式(6)
身体表面积/ $\text{cm}^2$	成人	男性	SA	19400	[25]
		女性		16900	
	青少年	男性		14670	
		女性		14130	
	儿童	男性		8300	
		女性		8150	
清洗、洗澡频率/( $\text{次}\cdot\text{d}^{-1}$ )			EV	0.3	[26]
肠道吸附比率(无量纲)			$f$	1	
皮肤吸附参数/( $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ )			$\kappa$	0.001	
延滞时间/h			$\tau$	1	
洗澡时间/h			TE	0.4	
圆周率(无量纲)			$\pi$	3.14	

表 3 地下水水质现状监测结果统计

Table 3 Statistics of monitoring results of groundwater quality

监测项目 Monitoring items	监测值 Monitoring value	《地下水质量标准》Ⅲ类 National Quality Standard for Groundwater Class III	监测项目 Monitoring items	监测值 Monitoring value	《地下水质量标准》Ⅲ类 National Quality Standard for Groundwater Class III
色度	10 度		Cu	0.5	$\leq 1.0$
浑浊度	<3 度		Pb	ND	$\leq 0.01$
嗅和味	无		Zn	0.8	$\leq 1.0$
pH	7.5	6.5—8.5	Cd	ND	$\leq 0.005$
总硬度	26.52	$\leq 450$	Fe	0.3	$\leq 0.3$
硫酸盐	5.4	$\leq 250$	Hg	ND	$\leq 0.001$
$\text{Cl}^-$	4.4	$\leq 250$	总大肠菌群	230	$\leq 3.0$
硝酸盐	0.24	$\leq 20$			

注:单位: $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,除 pH、色度、浑浊度、嗅和味外

Note: Unit: $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , except pH, chroma, turbidity, smell and taste.

垃圾填埋场地下水的监测指标按照《地下水质量标准》Ⅲ类的规定限值为标准值,结果表 4 中仅 pH、高锰酸盐指数、Pb 和  $F^-$  有超标,而 Pb 超标主要是 J2<sup>[27]</sup>.pH 值高表明垃圾填埋场地下水水质偏碱性,安红梅<sup>[7]</sup>等研究表明拉萨市地下水偏碱性. $Cr^{6+}$  和 As 指标有检出,但均未出现超标现象.

从表 5 渗滤液的监测项目色度、pH、 $COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$ 、悬浮物、 $NH_3-N$ 、粪大肠菌群数、 $Cr^{6+}$ 、As、TN、TP,看出渗滤液监测项目全部超标.将渗滤液监测数据与表 4 地下水监测数据进行相关性分析,从结果表 6 看出渗滤液与监测井之间的呈现不显著相关性.由此,说明地下水受渗滤液影响较小.

表 4 地下水污染物检测结果<sup>[27]</sup>

Table 4 Test results of groundwater pollutants

污染物 Pollutants	监测数 Monitoring number	平均值 Average value				超标率 Exceeding standard rate/%	《地下水质量标准》Ⅲ类 National Quality Standard for Groundwater Class Ⅲ
		J2	J3	J5	J6		
pH 值(无量纲)	12	7.9633	8.6333	8.2200	8.2433	16.67	6.5—8.5
电导率( $\mu S \cdot cm^{-1}$ )	12	337.0000	320.6667	326.3333	333.3333	0	
DO	12	6.3633	6.0533	6.4800	6.4133	0	
高锰酸盐指数	12	1.0333	2.1000	1.5333	1.7667	16.67	$\leq 3.0$
氨氮	12	—	—	—	—	0	$\leq 0.5$
COD	12	—	—	—	—	0	$\leq 3.0$
石油类	12	—	—	—	—	0	
挥发酚	12	—	—	—	—	0	$\leq 0.002$
$Cr^{6+}$	12	0.0070	0.0165	—	0.0060	0	$\leq 0.05$
$CN^-$	12	—	—	—	—	0	$\leq 0.05$
阴离子表面活性剂	12	0.1700	0.1700	0.1600	0.1500	0	$\leq 0.3$
As	12	0.0015	0.0058	—	—	0	$\leq 0.01$
Hg	12	—	—	—	—	0	$\leq 0.001$
Se	12	—	—	—	—	0	$\leq 0.01$
Cd	12	0.0002	—	—	—	0	$\leq 0.005$
Pb	12	0.0160	0.0060	0.0040	0.0040	8.33	$\leq 0.01$
TDS	12	164.6667	242.6667	171.3333	158.6667	0	$\leq 1000$
总硬度	12	146.3333	108.2333	106.6333	140.0000	0	$\leq 450$
硝酸盐	12	3.3367	0.8400	0.5933	1.7850	0	$\leq 20.0$
亚硝酸盐	12	—	—	—	—	0	$\leq 1.00$
$F^-$	12	0.4500	0.9350	0.6100	0.2500	8.33	$\leq 1.0$
Cu	12	—	—	—	—	0	$\leq 1.0$
Zn	12	—	—	—	—	0	$\leq 1.0$
$Cl^-$	12	6.9900	81.5000	4.9900	35.5000	0	$\leq 250$

注:“—”表示检测结果低于方法检出限;单位: $mg \cdot L^{-1}$ ,除 pH、电导率外.

Note: “—” means that the detection result is lower than the detection limit of the method; Unit:  $mg \cdot L^{-1}$ , except pH and electrical conductivity.

表 5 填埋场渗滤液监测数据

Table 5 Landfill leachate monitoring data

项目 Items	色度 (稀释倍数) Chroma (Dilution multiple)	pH	$COD_{Cr}$	$BOD_5$	悬浮物 Suspended material	$NH_3-N$	粪大肠菌群数 FCcount/ ( $cfu \cdot L^{-1}$ )	$Cr^{6+}$	As	TN	TP
监测平均值	616.67	7.38	$2.01 \times 10^4$	$4.24 \times 10^3$	440.56	726.06	$7.79 \times 10^5$	0.28	0.11	730.33	16.92
排放浓度限值	40		100	30	30	20	10000	0.05	0.1	40	3

注:单位: $mg \cdot L^{-1}$ ,除色度、pH、粪大肠菌群数.

Note: Unit:  $mg \cdot L^{-1}$ , except chroma, pH, fecal coliform count.

表 6 渗滤液与监测井相关性分析

Table 6 Correlation analysis between leachate and monitoring wells

渗滤液 Leachate	J2	J3	J5	J6	
渗滤液	1				
J2	-0.104	1			
J3	-0.104	1.000 **	1		
J5	-0.104	1.000 **	1.000 **	1	
J6	-0.104	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

Note: \* \* Significant correlation at 0.01 level (bilateral)

## 2.2 暴露剂量计算结果

根据暴露评估公式(4)、(5)、(6),采用污染物平均值计算出各人群饮水和皮肤暴露途径的日暴露剂量结果见表 7 和表 8.

(1)在饮水暴露途径和皮肤暴露途径下非致癌物暴露剂量范围要高于致癌物的暴露剂量范围,则非致癌物暴露剂量较高;饮水途径范围普遍高于皮肤暴露途径,这说明经口暴露是人体接触污染物质的主要暴露途径,吕利等<sup>[28]</sup>在其文章中也提到.其中,两种途径下污染物  $\text{Cl}^-$  的暴露剂量最高,在经口饮水途径下超过 1;污染物 Cd 的暴露剂量最低,可能由于评价的污染物 Cd 低于方法检出限值,也对其进行评价.

(2)在两种途径暴露下,成人、青少年、儿童不同人群中,女性暴露剂量一般高于男性.可能是由于女性的体重和皮肤表面积低于男性的原因,造成评价中暴露剂量高于男性.在饮水暴露途径下,各人群暴露剂量大小依次是成人>儿童>青少年;皮肤暴露途径下,各人群暴露剂量大小依次是儿童>青少年>成人,可能的原因是成人和青少年的皮肤表面积大于儿童,但是儿童的体重比成人和青少年的体重低很多,所以儿童皮肤暴露剂量最大<sup>[29]</sup>.

表 7 各人群饮水暴露剂量(单位: $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ )Table 7 Exposure dose of drinking water for groups of population (unit: $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ )

污染物 Pollutants	成人 Adult		儿童 Children		青少年 Teenager		范围 Range
	男性 Male	女性 Female	男性 Male	女性 Female	男性 Male	女性 Female	
致癌物	$\text{Cr}^{6+}$	$5.45\times 10^{-4}$	$6.41\times 10^{-4}$	$4.52\times 10^{-4}$	$4.76\times 10^{-4}$	$2.20\times 10^{-4}$	$2.72\times 10^{-4}$
	As	$1.91\times 10^{-4}$	$2.25\times 10^{-4}$	$1.59\times 10^{-4}$	$1.67\times 10^{-4}$	$7.72\times 10^{-5}$	$9.56\times 10^{-5}$
	Cd	$1.05\times 10^{-5}$	$1.23\times 10^{-5}$	$8.70\times 10^{-6}$	$9.16\times 10^{-6}$	$4.23\times 10^{-6}$	$5.24\times 10^{-6}$
非致癌物	Pb	$5.24\times 10^{-4}$	$6.16\times 10^{-4}$	$4.35\times 10^{-4}$	$4.58\times 10^{-4}$	$2.12\times 10^{-4}$	$2.62\times 10^{-4}$
	$\text{NO}_3^-$ -N	$1.19\times 10^{-1}$	$1.40\times 10^{-1}$	$9.88\times 10^{-2}$	$1.04\times 10^{-1}$	$4.81\times 10^{-2}$	$5.95\times 10^{-2}$
	$\text{F}^-$	$4.23\times 10^{-2}$	$4.98\times 10^{-2}$	$3.51\times 10^{-2}$	$3.70\times 10^{-2}$	$1.71\times 10^{-2}$	$2.12\times 10^{-2}$
	$\text{Cl}^-$	2.25	2.65	1.87	1.97	$9.09\times 10^{-1}$	1.13

表 8 各人群皮肤暴露剂量(单位: $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ )Table 8 Skin exposure doses of groups of population (unit: $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ )

污染物 Pollutants	成人 Adult		儿童 Children		青少年 Teenager		范围 Range
	男性 Male	女性 Female	男性 Male	女性 Female	男性 Male	女性 Female	
致癌物	$\text{Cr}^{6+}$	$1.57\times 10^{-6}$	$1.61\times 10^{-6}$	$2.26\times 10^{-6}$	$2.34\times 10^{-6}$	$1.54\times 10^{-6}$	$1.84\times 10^{-6}$
	As	$5.52\times 10^{-7}$	$5.66\times 10^{-7}$	$7.95\times 10^{-7}$	$8.21\times 10^{-7}$	$5.40\times 10^{-7}$	$6.44\times 10^{-7}$
	Cd	$3.02\times 10^{-8}$	$3.105\times 10^{-8}$	$4.35\times 10^{-8}$	$4.50\times 10^{-8}$	$2.96\times 10^{-8}$	$3.53\times 10^{-8}$
非致癌物	Pb	$1.51\times 10^{-6}$	$1.55\times 10^{-6}$	$2.18\times 10^{-6}$	$2.25\times 10^{-6}$	$1.48\times 10^{-6}$	$1.76\times 10^{-6}$
	$\text{NO}_3^-$ -N	$3.44\times 10^{-4}$	$3.52\times 10^{-4}$	$4.95\times 10^{-4}$	$5.11\times 10^{-4}$	$3.36\times 10^{-4}$	$4.01\times 10^{-4}$
	$\text{F}^-$	$1.22\times 10^{-4}$	$1.25\times 10^{-4}$	$1.76\times 10^{-4}$	$1.82\times 10^{-4}$	$1.20\times 10^{-4}$	$1.43\times 10^{-4}$
	$\text{Cl}^-$	$6.50\times 10^{-3}$	$6.66\times 10^{-3}$	$9.36\times 10^{-3}$	$9.67\times 10^{-3}$	$6.36\times 10^{-3}$	$7.59\times 10^{-3}$

### 2.3 健康风险评价结果

研究人群健康风险值经口和皮肤暴露下致癌物和非致癌物健康风险值如表 9 和表 10.在按照表 11 中部分机构推荐的最大可接受风险水平和忽略风险水平进行风险判断,最大接受风险在  $5 \times 10^{-7}$ — $1 \times 10^{-4}$ ,可忽略风险水平在  $1 \times 10^{-8}$ — $1 \times 10^{-7}$ .

通过表 9 中经口和皮肤暴露致癌健康风险结果,可以看出在饮水途径中  $\text{Cr}^{6+}$  的致癌风险值在不同人群中风险值均超过了表 11 中各推荐机构的最大可接受水平.As 在成人和儿童人群中的风险值仅低于表 11 中 USEPA 最大可接受风险水平  $1 \times 10^{-4}$ ;在青少年人群中的风险值仅低于 USEPA 和 ICRP 最大可接受水平.Cd 在成人和儿童人群中的风险值低于 USEPA 和 ICRP 最大可接受风险水平;在青少年人群中的风险值超过 IAEA 最大可接受水平  $5 \times 10^{-7}$ .在饮水途径中  $\text{Cr}^{6+}$ 、As 和 Cd 的致癌风险值在不同人群中的大小次序为成人>儿童>青少年.因此,可以看出  $\text{Cr}^{6+}$  在饮水途径中是最大风险的金属致癌物,这与黄磊等人<sup>[2]</sup>研究表明  $\text{Cr}^{6+}$  是最大风险重金属结果相一致.

在皮肤暴露途径中, $\text{Cr}^{6+}$  的风险值仅低于 USEPA ( $1 \times 10^{-4}$ ) 和 ICRP ( $5 \times 10^{-5}$ ) 的最大可接受风险水平;As 在皮肤暴露途径下的风险值仅超过英国皇家协会的忽略可水平  $1 \times 10^{-7}$ ;Cd 在皮肤暴露途径下的风险值低于可忽略的水平下.

表 9 经口和皮肤暴露途径下致癌健康风险评价结果

Table 9 Results of cancer risk assessment under oral and skin exposure routes

途径 Route of transmission	污染物 Pollutants	成人 Adult		儿童 Children		青少年 Teenager		总健康风险 Total health risk		
		男性 Male	女性 Female	男性 Male	女性 Female	男性 Male	女性 Female	成人 Adult	儿童 Children	青少年 Teenager
饮水暴露途径	$\text{Cr}^{6+}$	$3.27 \times 10^{-4}$	$3.85 \times 10^{-4}$	$2.72 \times 10^{-4}$	$2.86 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-4}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$7.13 \times 10^{-4}$	$5.58 \times 10^{-4}$	$2.96 \times 10^{-4}$
	As	$4.20 \times 10^{-5}$	$4.95 \times 10^{-5}$	$3.49 \times 10^{-5}$	$3.68 \times 10^{-5}$	$1.70 \times 10^{-5}$	$2.10 \times 10^{-5}$	$9.15 \times 10^{-5}$	$7.17 \times 10^{-5}$	$3.80 \times 10^{-5}$
	Cd	$9.37 \times 10^{-7}$	$1.10 \times 10^{-6}$	$7.78 \times 10^{-7}$	$8.19 \times 10^{-7}$	$3.78 \times 10^{-7}$	$4.69 \times 10^{-7}$	$2.04 \times 10^{-6}$	$1.60 \times 10^{-6}$	$8.47 \times 10^{-7}$
皮肤暴露途径	$\text{Cr}^{6+}$	$9.45 \times 10^{-7}$	$9.69 \times 10^{-7}$	$1.36 \times 10^{-6}$	$1.41 \times 10^{-6}$	$9.25 \times 10^{-7}$	$1.10 \times 10^{-6}$	$1.91 \times 10^{-6}$	$2.77 \times 10^{-6}$	$2.03 \times 10^{-6}$
	As	$1.21 \times 10^{-7}$	$1.24 \times 10^{-7}$	$1.75 \times 10^{-7}$	$1.81 \times 10^{-7}$	$1.19 \times 10^{-7}$	$1.42 \times 10^{-7}$	$2.46 \times 10^{-7}$	$3.55 \times 10^{-7}$	$2.60 \times 10^{-7}$
	Cd	$2.70 \times 10^{-9}$	$2.77 \times 10^{-9}$	$3.89 \times 10^{-9}$	$4.03 \times 10^{-9}$	$2.65 \times 10^{-9}$	$3.16 \times 10^{-9}$	$5.48 \times 10^{-9}$	$7.92 \times 10^{-9}$	$5.80 \times 10^{-9}$

表 10 经口和皮肤暴露途径下非致癌健康风险结果结果中,可以看出在 Pb、 $\text{NO}_3^-$ -N 在饮水暴露途径中低于荷兰建设环保局可忽略水平  $1 \times 10^{-8}$ . $\text{F}^-$  饮水暴露途径下在青少年人群中低于可忽略水平; $\text{F}^-$  在成人和儿童人群中风险值高于荷兰建设环保局可忽略水平,但是低于英国皇家协会的可忽略水平  $1 \times 10^{-7}$ .而  $\text{Cl}^-$  通过饮水暴露途径在成人中风险值仅低于 USEPA 和 ICRP 最大可接受水平;在儿童中风险值仅大于表 11 推荐机构 IAEA ( $5 \times 10^{-7}$ ) 可接受水平;在青少年人群中风险值中低于各推荐机构的最大风险可接受水平,但大于英国皇家协会可忽略水平  $1 \times 10^{-7}$ .可见在饮水途径下,非致癌健康风险值最大的是  $\text{Cl}^-$ .而在皮肤暴露途径下,Pb、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{F}^-$  的风险值在各人群中均低于荷兰建设环保局可忽略水平  $1 \times 10^{-8}$ .

表 10 经口和皮肤暴露途径下非致癌健康风险评价结果

Table 10 Results of non-carcinogenic health risk assessment under oral and skin exposure routes

途径 Route of transmission	污染物 Pollutants	成人 Adult		儿童 Children		青少年 Teenager		总健康风险 Total health risk		
		男性 Male	女性 Female	男性 Male	女性 Female	男性 Male	女性 Female	成人 Adult	儿童 Children	青少年 Teenager
饮水暴露途径	Pb	$5.49 \times 10^{-9}$	$6.45 \times 10^{-9}$	$4.56 \times 10^{-9}$	$4.80 \times 10^{-9}$	$2.22 \times 10^{-9}$	$2.74 \times 10^{-9}$	$1.19 \times 10^{-8}$	$9.35 \times 10^{-9}$	$4.96 \times 10^{-9}$
	$\text{NO}_3^-$ -N	$1.09 \times 10^{-9}$	$1.28 \times 10^{-9}$	$9.06 \times 10^{-10}$	$9.53 \times 10^{-10}$	$4.40 \times 10^{-10}$	$5.45 \times 10^{-10}$	$2.37 \times 10^{-9}$	$1.86 \times 10^{-9}$	$9.86 \times 10^{-10}$
	$\text{F}^-$	$1.03 \times 10^{-8}$	$1.22 \times 10^{-8}$	$8.59 \times 10^{-9}$	$9.04 \times 10^{-9}$	$4.18 \times 10^{-9}$	$5.17 \times 10^{-9}$	$2.25 \times 10^{-8}$	$1.76 \times 10^{-8}$	$9.34 \times 10^{-9}$
	$\text{Cl}^-$	$5.50 \times 10^{-7}$	$6.47 \times 10^{-7}$	$4.57 \times 10^{-7}$	$4.81 \times 10^{-7}$	$2.22 \times 10^{-7}$	$2.75 \times 10^{-7}$	$1.20 \times 10^{-6}$	$9.38 \times 10^{-7}$	$4.97 \times 10^{-7}$
皮肤暴露途径	Pb	$1.58 \times 10^{-11}$	$1.62 \times 10^{-11}$	$2.28 \times 10^{-11}$	$2.36 \times 10^{-11}$	$1.55 \times 10^{-11}$	$1.85 \times 10^{-11}$	$3.21 \times 10^{-11}$	$4.64 \times 10^{-11}$	$3.40 \times 10^{-11}$
	$\text{NO}_3^-$ -N	$3.15 \times 10^{-12}$	$3.23 \times 10^{-12}$	$4.53 \times 10^{-12}$	$4.68 \times 10^{-12}$	$3.08 \times 10^{-12}$	$3.67 \times 10^{-12}$	$6.38 \times 10^{-12}$	$9.22 \times 10^{-12}$	$6.76 \times 10^{-12}$
	$\text{F}^-$	$2.98 \times 10^{-11}$	$3.06 \times 10^{-11}$	$4.30 \times 10^{-11}$	$4.44 \times 10^{-11}$	$2.92 \times 10^{-11}$	$3.48 \times 10^{-11}$	$6.04 \times 10^{-11}$	$8.74 \times 10^{-11}$	$6.40 \times 10^{-11}$
	$\text{Cl}^-$	$1.59 \times 10^{-9}$	$1.63 \times 10^{-9}$	$2.29 \times 10^{-9}$	$2.36 \times 10^{-9}$	$1.55 \times 10^{-9}$	$1.85 \times 10^{-9}$	$3.22 \times 10^{-9}$	$4.65 \times 10^{-9}$	$3.41 \times 10^{-9}$

表 11 机构推荐的最大可接受水平和可忽略水平<sup>[30]</sup>Table 11 Maximum acceptable level and negligible level recommended by several organizations<sup>[30]</sup>

标准机构 Standard institution	USEPA	瑞典环保局 Swedish Environmental Protection Bgency	荷兰建设环保局 Netherlands Environmental Protection Bureau	英国皇家协会 Royal Society	IAEA	ICRP
最大接受风险	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-5}$
可忽略水平	/	/	$1 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-7}$	/	/

注:IAEA: 国际原子能机构(International Atomic Energy Agency);ICRP: 国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection).

## 2.4 不确定分析

### (1) 指标和模型不完善

完整的健康风险评价应包括自然界中的大气、水、土壤和食物这几种介质携带污染物通过口服、呼吸和皮肤 3 种暴露途径进入人体产生的健康危害<sup>[30-31]</sup>,然而本文只对地下水中污染物通过口服和皮肤接触对健康的危害;并且在计算模型中没有考虑污染物质在煮沸中损失和自然衰减的变化,因此在结论上有一定的差异;检测的指标重金属不全面,使得致癌物和非致癌物的健康风险值偏小.

### (2) 参数的不确定性

致癌物也具有非致癌危害效应<sup>[2]</sup>,在计算中参数选择不确定.本文中参数的选取基本上是参考其他学者研究参数和 USEPA 推荐参数,对于西藏地区人群的饮水量、体重、寿命、皮肤接触没有进行详细的调查研究.

### (3) 操作误差

样品的采集和检测分析中也存在检测方法和人员操作等方面的人为失误,造成一定的误差.

### (4) 没有进行敏感性分析

文中也没有对健康风险评价的结果进行必要的敏感性分析,因此不能了解到暴露参数的变化对污染物产生的风险影响,影响越大则越容易产生风险影响<sup>[32]</sup>.

## 3 结论(Conclusion)

(1) 垃圾填埋场地下水监测指标中  $\text{Cr}^{6+}$ 、As 和 Cd 的监测均未超过《地下水质量标准》Ⅲ类标准值,但垃圾渗滤液对人体健康的风险不可忽视,因此有必要增加监测指标和提高检测方法的精准度.

(2) 文中对均值进行暴露剂量的计算,在饮水途径和皮肤接触途径下非致癌物暴露剂量一般高于致癌物暴露剂量;在饮水途径暴露剂量要高于皮肤接触途径下的暴露剂量,这也表明饮水途径下最容易受到污染物的危害.在饮水途径下,污染物暴露剂量大小次序为成人>儿童>青少年;皮肤暴露途径下,各人群暴露剂量大小依次是儿童>青少年>成人.

(3) 致癌风险的污染物在饮水途径下风险值大于皮肤接触途径下的风险值,其中饮水途径下风险贡献为  $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd}$ ,其中  $\text{Cr}^{6+}$  风险值超过 USEPA 的最大可接受水平  $1 \times 10^{-4}$ ;在皮肤接触途径下贡献为  $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd}$ , $\text{Cr}^{6+}$  的风险值仅低于 USEPA 和 ICRP 的最大可接受风险值.非致癌风险的污染物  $\text{Cl}^-$  在饮水暴露途径下成人的贡献为最大,仅低于 USEPA 和 ICRP 的最大可接受风险值.

(4) 由于拉萨市位于青藏高原,生态脆弱、水源涵养区,地下水作为重要的水源,要加强填埋场区防渗层检修和实时监测地下水水环境,防止渗滤液出现渗漏污染地下水;要因地制宜的提出合适的科学管理方案,防止水质恶化带来严重的影响.

## 参考文献(References)

[1] 拉萨市人民政府.2017 年拉萨市固体废物管理及拉萨市固体废物污染防治信息公告[EB/OL]. [2018-08-06].<http://www.lasa.gov.cn>

Lhasa Municipal People's Government. 2017 Lhasa Municipal Solid Waste Management and Lhasa Municipal Solid Waste Pollution

- Prevention and Control Information Bulletin [EB/OL].[2018-08-06].<http://www.lasa.gov.cn>(in Chinese).
- [2] 黄磊,李鹏程,刘白薇.长江三角洲地区地下水污染健康风险评价[J].安全与环境工程,2008,15(2):26-29.  
HUANG L, LI P C, LIU B W. Health risk assessment of pollution in groundwater—A case study in Changjiang Delta [J]. Safety and Environmental Engineering, 2008, 15(2):26-29(in Chinese).
- [3] 汪珊,孙继朝,李政红.长江三角洲地区地下水环境质量评价[J].水文地质工程地质,2005,32(6):30-33.  
WANG S, SUN J C, LI Z H. Groundwater quality evaluation in the delta area of the Yangtze River [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(6):30-33(in Chinese).
- [4] 马进军,朱宏亮,赵三平等.某再生水景观瀑布的挥发性有机物健康风险评价[J].环境与健康杂志,2008,25(7):604-608.  
MA J J, ZHU H L, ZHAO S P, et al. Health risk assessment of volatile organic compounds emission from reclaimed water used artificial water fall sight [J]. Journal of Environment and Health, 2008, 25(7):604-608(in Chinese).
- [5] 章霖之,丁倩,戴玄吏等.某废弃农药生产场地地下水挥发性有机物污染健康风险评价[J].环境监测管理与技术,2014,26(5):24-27.  
ZHANG L Z, DING Q, DAI X L, et al. Health risk assessment of volatile organic compounds pollution in groundwater of an abandoned pesticide production site [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2014,26(5):24-27(in Chinese).
- [6] 张丰述.拉萨市城市环境地质评价[D].成都:成都理工大学,2011.  
ZHANG F S. The Evaluation of urban environmental geology in Lhasa City [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011(in Chinese).
- [7] 安红梅,邓利君,赵矿等.西藏地下水水化学特征及水质评价[J].水利规划与设计,2018,24(8):45-47.  
AN H M, DENG L J, ZHAO K, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of groundwater in Tibet [J]. Water Resources Planning and Design, 2018,24(8):45-47(in Chinese).
- [8] 吴凤芝.论拉萨市地下水开发利用及保护措施探讨[J].西藏科技,2012,24(1):36-37.  
WU F Z. Discussion on the exploitation and protection of groundwater in Lhasa City [J]. Tibet Science and Technology, 2012,24(1):36-37(in Chinese).
- [9] 胡二邦.环境风险评价实用技术和方法[M].北京:中国环境科学出版社,2000.  
HU E B. Practical technology and method for environmental risk assessment [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2000(in Chinese).
- [10] 黄艳红,常薇,何振宇.武汉市农村地区地下水健康风险评价[J].环境与健康杂志,2010,27(10):892-894.  
HUANG Y H, CHANG W, HE Z Y. Health risk assessment of rural groundwater in Wuhan, Hubei [J]. Journal of Environment and Health, 2010, 27(10):892-894(in Chinese).
- [11] 张晟,黎莉莉,张勇等.三峡水库135 m蓄水前后水体重金属环境健康风险评价[J].环境污染与防治,2006,28(11):865-867.  
ZHANG S, LI L L, ZHANG Y, et al. Health risk assessment of heavy metals in water body of the Three Gorges Reservoir before and after the water level reached 135 meters [J]. Environmental Pollution & Control, 2006, 28(11):865-867(in Chinese).
- [12] 王静,刘铮铮,许行义等.浙江省饮用水源有机毒物污染特征及健康风险研究[J].环境污染与防治,2010,32(7):29-33.  
WANG J, LIU Z Z, XU X Y, et al. Study on pollution pattern and health risk of organic toxicants in Zhejiang source water [J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(7):29-33(in Chinese).
- [13] USEPA. Superfund public health evaluation manual [R]. Washington DC: Office of Research and Development U. S. EPA, EPAP540P1286P060, 1986.
- [14] USEPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (part B) [R]. EPA/540/R-89/003, 1991.
- [15] 杨莉霞,王琳,姜朴等.淮河流域某地区地下水污染健康风险评价[J].环境化学,2011,30(9):1599-1603.  
YANG L X, WANG L, JIANG P, et al. Health risk assessment of pollution in groundwater of Huaihe River Basin [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(9):1599-1603(in Chinese).
- [16] 陈卫平,彭程伟,杨阳等.北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价[J].环境科学,2018,39(1):117-122.  
CHEN W P, PENG C W, YANG Y, et al. Health risk evaluation of organochlorine and organophosphorous pesticides in groundwater in Beijing [J]. Environmental Science, 2018, 39(1):117-122(in Chinese).
- [17] 中国西藏网.西藏秘密:平均多活32.7岁,为什么?[EB/OL].[2016-01-31][//www.tibet.cn](http://www.tibet.cn)  
TIBET CN. Tibet secret: live an average of 32.7 years longer, why? [EB/OL].[2016-01-31][//www.tibet.cn](http://www.tibet.cn)(in Chinese).
- [18] 张海林,林广奇,马河宽等.济南东部岩溶水有机污染健康风险评价[J].山东国土资源,2018,34(11):32-37.  
ZHANG H L, LIN G Q, MA H K, et al. Health assessment of organic pollution of karst water in Eastern Jinan [J]. Shandong Land and Resources, 2018,34(11):32-37(in Chinese).
- [19] Office of Research and Development, USEPA. Health Effect Assessment Summary Tables, Annual FY-1991 [R]. Washington D C, 1991.
- [20] 吴军年,赵军平,刘小晖.河西走廊中段某地区地下水污染的健康风险评价[J].安全与环境工程,2013,20(3):66-68.  
WU J N, ZHAO J P, LIU X H. Health risk assessment of the groundwater pollution of a region in the middle of Hexi Corridor [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(3):66-68(in Chinese).
- [21] 徐斌,张艳.泾惠渠灌区浅层地下水硝酸盐污染特征及健康风险评价[J].干旱区资源与环境,2018,32(7):70-75.

- XU B, ZHANG Y. Contamination characteristics and human health risk assessment of nitrate in shallow groundwater at Jinghui irrigation district in Shaanxi province, China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(7):70-75 (in Chinese).
- [22] 孟春芳, 宋孝玉, 赵文举, 等. 新乡市农村浅层地下水健康危害及污染源识别[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(5):2024-2030.  
MENG C F, SONG X Y, ZHAO W J, et al. Health risk assessment and the pollutant source identification of the shallow groundwater in Xinxiang rural areas [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(5):2024-2030 (in Chinese).
- [23] 郑婵娟, 赵秀阁, 黄楠, 等. 我国成人饮水摄入量研究[J]. *环境与健康杂志*, 2014, 31(11):967-970.  
ZHENG C J, ZHAO X G, HUANG N, et al. Investigation of drinking water intake rate of adults in China [J]. *Journal of Environment and Health*, 2014, 31(11):967-970 (in Chinese).
- [24] 宋雁, 刘爱东, 刘飒娜, 等. 我国西藏等地区成年人边销茶消费量调查分析[J]. *中国茶叶加工*, 2016, 25(1):42-45.  
SONG Y, LIU A D, LIU S N, et al. Adults border-selling tea consumption survey of Tibet and Other Regions in China [J]. *China Tea Processing*, 2016, 25(1):42-45 (in Chinese).
- [25] U.S.EPA. Exposure factors handbook [S]. EPA/600/P-95/002, 1997.
- [26] United States Environmental Protection Agency. Exposure factors handbook [R]. Washington DC: Office of Research and Development, U.S.EPA, 1989.
- [27] 周文武, 陈冠益, 旦增, 等. 垃圾填埋场区域地下水铅的修复方案比选——以拉萨市为例[J]. *环境工程*, 2020, 38(6):163-168.  
ZHOU W W, CHEN G Y, DAN Z, et al. Comparison and selection of rehabilitation schemes for groundwater lead in landfill area: A case study of Lhasa [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(6):163-168 (in Chinese).
- [28] 吕利, 吴勇, 孙先锋, 等. 四川德阳地区地下水环境健康风险评价[J]. *地下水*, 2012, 34(1):98-101.  
LV L, WU Y, SUN X F, et al. Environmental health risk assessment of groundwater in Deyang Area, Sichuan Province [J]. *Ground Water*, 2012, 34(1):98-101 (in Chinese).
- [29] 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价[J]. *环境监测管理与技术*, 2008, 20(3):20-24.  
DUAN X L, WANG Z S, YU Y J, 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):20-24 (in Chinese).
- [30] 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).
- [31] 余彬. 泾惠渠灌区浅层地下水中重金属的健康风险评价[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
YU B. Health risk assessment of heavy metals in groundwater in jinghuiqu irrigation district [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010 (in Chinese).
- [32] 杨彦, 于云江, 魏伟伟, 等. 常州市浅层地下水重金属污染对城区、城郊居民健康风险评价[J]. *环境化学*, 2013, 32(2):202-211.  
YANG Y, YU Y J, WEI W W, et al. Health risk assessment of heavy metals in shallow groundwater in urban and suburban areas of Changzhou [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(2):202-211 (in Chinese).