

某储油库地下水有机污染健康风险评价

李政红¹⁾, 张 胜¹⁾, 毕二平²⁾, 于 娟¹⁾, 王文中¹⁾, 马丽莎¹⁾,
马琳娜¹⁾, 何 泽¹⁾, 张翼龙¹⁾

1)中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061;

2)中国地质大学(北京), 北京 10083

摘 要: 本文以 USEPA 推荐使用的污染场地健康风险评价方法为基础, 结合污染场地实际情况, 分析、评价了某储油库地下水有机污染对场址内暴露人群造成的健康风险。评价结果表明: 该储油库地下水有机污染物为 1,2-二氯乙烷、苯、三氯甲烷和甲苯。污染场址内的工人和居民受到的非致癌风险均小于 1, 在可接受范围; 而污染对场址内的工人和居民产生的致癌风险较大, 分别为 1.7×10^{-4} 、 9.0×10^{-3} , 是不可接受的。产生致癌风险的主要污染物为 1, 2-二氯乙烷, 占总致癌风险的 99.80%, 可致人产生多种形态的肿瘤, 并具有潜在的遗传毒性。主要暴露途径是吸入吸收, 占总致癌风险比例大于 70%, 其次为口入吸收。皮肤接触暴露途径产生的致癌风险较小, 占总致癌风险比例小于 1%。

关键词: 健康风险评价; 地下水; 有机污染; 储油库

中图分类号: X523; X503.1; X508 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2010)02-258-05

The Health Risk Assessment of Groundwater Organic Pollution at a Certain Oil Depot

LI Zheng-hong¹⁾, ZHANG Sheng¹⁾, BI Er-ping²⁾, YU Juan¹⁾, WANG Wen-zhong¹⁾,
MA Li-sha¹⁾, MA Lin-na¹⁾, HE Ze¹⁾, ZHANG Yi-long^{1)*}

1) *Institute of Hydrogeology & Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061;*

2) *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

Abstract: Based on the evaluation method for health risks of contaminated sites recommended by USEPA, in combination with the actual situation of the contaminated site, the authors analyzed and evaluated the health risk of groundwater organic pollution at a certain oil depot. The result shows that the organic pollutants in groundwater of the oil depot include 1,2-dichloroethane, benzene, chloroform and toluene. The non-carcinogenic risk suffered by the workers and residents in the contaminated site is less than 1, which is in the acceptable range. Nevertheless, the workers and residents in the contaminated site suffered a relatively high cancer risk, being 1.7×10^{-4} and 9.0×10^{-3} , respectively, which are unacceptable. The 1,2-dichloroethane is a major pollutant of carcinogenic risk, accounting for 99.80% of the total cancer risk. It may cause many forms of cancer, and has the potential genetic toxicity. The main exposure way is the inhalation absorption, which accounts for more than 70% of the total cancer risk, followed by oral absorption. The carcinogenic risk via the dermal pathway is negligible, which is less than 1% of the total cancer risk.

Key words: health risk assessment; groundwater; organic pollution, oil depot

本文由中国地质大调查项目“地下水污染调查技术方法与信息系统建设”(编号: 1212010634610)资助。

收稿日期: 2010-03-03; 改回日期: 2010-04-09。

第一作者简介: 李政红, 女, 1970 年生。助理研究员。主要从事环境地质、微生物地球化学研究。通讯地址: 050061, 河北石家庄石岗大街 406 号。电话: 0311-87703654。E-mail: lzhhb@sina.com。

通讯作者: 张翼龙, 男, 1965 年生。博士, 教授高工。主要从事水文地质研究。通讯地址: 050061, 河北石家庄石岗大街 406 号。电话: 0311-88027015。E-mail: zyl51832@vip.sina.com。

石油及其产品在生产、运输、储存等环节发生的逸散、泄漏等对空气、土壤和地下水造成污染, 生活在污染环境中的人群的健康受到严重危害。近年来, 污染场地健康风险评价日益受到各国的重视。本文以美国环境保护署(USEPA)推荐使用的污染场地健康风险评价方法为基础, 并结合污染场地及周围情况, 评价了某储油库地下水有机污染对场址内暴露人群造成的健康风险, 为我国建立典型污染场址地下水污染健康风险评价体系提供了实际案例和科学依据。

1 危害识别

1.1 污染场址概况

该储油库建于 1993 年, 主要储存汽油、柴油, 储存能力为 20 万吨。库区周边多为汽车修理厂、预制板厂等小型企业和农田。该地地层具有典型的冲洪积成因特点, 颗粒上细下粗, 二元结构明显。地下水水位埋深 30 m, 地下水开采井井深多为 60 m。该地四季变化明显, 降水量多集中在 6-8 月份, 年平均降水量为 456 mm, 年平均蒸发量为 1305 mm, 降水季节变化大, 夏季降水占全年降水量的 60%-70%, 且主要集中在 7、8 月份。

1.2 污染现状

地下水污染调查结果表明, 该储油库对库区及周围地下水已造成污染。2008 年 11 月在库区及周围

采取地下水样品 8 组(图 1), 并由上海澳实分析检测有限公司采用 USEPA 8260B 等方法进行了有机组分的检测分析, 检测结果显示: 三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、苯和甲苯有检出, 含量分别为 0.00045 mg/L、0.3 mg/L、0.00068 mg/L、0.19 mg/L。因此, 我们以这 4 种有机物为目标污染物开展健康风险评价。

1.3 致癌毒性及非致癌毒性判定

依据国际癌症研究署(IARC)和美国环境署综合风险信息数据库(IRIS)的致癌性分类标准(IARC, 2006; USEPA, 2008), 4 种目标污染物致癌性判定结果为: 三氯甲烷、1,2 - 二氯乙烷、苯为致癌物, 甲苯为非致癌物。

2 剂量-效应评价

通过查询美国环境署和世界卫生组织等国际上具有权威性的化学物质毒理数据库获得了目标污染物的毒性数据(IARC, 2006; USEPA, 2002、2008)见表 1。

3 暴露评价

3.1 暴露情形分析

根据污染场址及周边环境情况, 确定该储油库污染区属于住宅区与工商业区环境, 环境介质为地下水, 暴露受体主要为厂区工人和常住居民(均视为成年人), 污染场址内的工人人数约 50 人, 居民人数

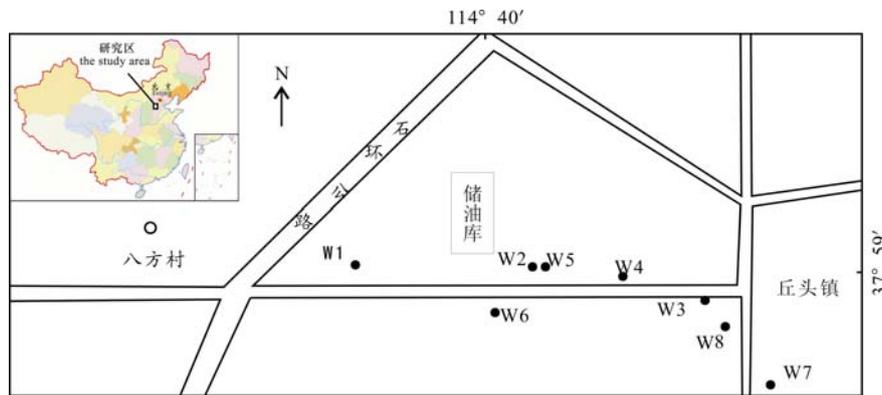


图 1 取样点位置示意图

Fig. 1 Sampling location

表 1 目标污染物的毒性数据表

Table 1 The toxicity data of the objective contaminants

指标	非致癌参考剂量(mg/(kg · d))			致癌斜率因子(1/mg · (kg · d) ⁻¹)		
	RfDo 口入	RfDi 吸入	RfDd 皮肤接触	CSFo 口入	CSFi 吸入	CSFd 皮肤接触
三氯甲烷	1.00E-02	1.4E-02	1.00E-02	3.1E-02	8.10E-02	3.1E-02
1,2 - 二氯乙烷	2.0E-02	7.00E-01	2.0E-02	9.10E-02	9.10E-02	9.10E-02
苯	4.00E-03	8.6E-03	4.00E-03	5.5E-02	2.7E-02	5.5E-02
甲苯	8.00E-02	1.40E+00I	8.00E-02	—	—	—

约 20 人。受体暴露于污染物的可能途径有 4 条: 途径 1: 饮用受污染地下水并由口服吸收; 途径 2: 使用受污染地下水作为洗澡用途, 水中有害物质汽化后经吸入吸收; 途径 3: 使用受污染地下水作为日常清洗用途, 水中有害物质汽化后经吸入吸收; 途径 4: 使用受污染地下水作为洗澡或日常清洗用途, 水中有害物质经皮肤接触吸收。由于没有该场址的污染监测历史资料, 因此, 假设自 1993 年建库以来, 平均每天的有机污染物泄露量为一常数, 即可将本次的调查结果视为该储备库的平均污染状况。

3.2 暴露量计算

3.2.1 暴露量计算参数及取值

暴露量分析计算过程中参数取值情况: 一部分是参照 USEPA 给定的值; 一部分和生活习惯相关的参数是根据当地居民生活习惯的估计值, 不是准确的统计值。具体取值为: 饮水量(IRW_o): 居民为 2 L/d, 工人为 1 L/d; 暴露频率(EF): 居民为 304 d/y, 工人为 84 d/y; 暴露持续时间(ED): 居民为 70 y, 工人为 35 y; 体重(BW)70 kg, 暴露发生的平均时间(AT): 致癌的 25550 d, 非致癌的 $ED \times 365$ d; 呼吸速率(B)1 m^3/h ; 每次淋浴时间和日常清洗时间(t_1)0.5 h; 淋浴后仍在浴室的时间(t_2)0.2 h; 呼吸速率(IR_{inh})17.14 m^3/d ; 身体表面积(SA): 脸 400 cm^2 , 手 900 cm^2 , 前臂 1100 cm^2 , 全身 18000 cm^2 ; 淋浴次数(EV)1 d^{-1} ; 日常清洗次数(EV)4 d^{-1} (USEPA, 1989、1998、2002、2004, 韩冰等, 2006)。

3.2.2 暴露量计算方法

不同途径暴露量计算公式(USEPA, 1992):

途径 1: 饮用受污染地下水并由口服吸收;

$$Intake_{oral} = \frac{C_{water} \times IRW_o \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

途径 2: 使用受污染地下水作为洗澡用途, 水中有害物质汽化后经吸入吸收;

$$Intake_{inh(shower)} = \frac{([C_{a1} \times B \times t_1] + [C_{a2} \times B \times t_2]) \times EV \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

途径 3: 使用受污染地下水作为日常清洗用途, 水中有害物质汽化后经吸入吸收;

$$Intake_{inh(wash)} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

途径 4: 使用受污染地下水作为洗澡或日常清洗用途, 水中有害物质经皮肤接触吸收。

$$Intake_{deraml} = \frac{DA_{event} \times EV \times SA \times ED \times EF}{BW \times AT} \quad (4)$$

公式(1)~(4)中: $Intake_{oral}$ 、 $Intake_{inh}$ 、 $Intake_{deraml}$ 分别为口服吸收暴露量、吸入吸收暴露量、皮肤接触吸收暴露量, 单位: $mg/(kg \cdot d)$ 。 C_{a1} 、 C_{a2} 分别为淋浴时、淋浴后空气中污染物浓度(mg/m^3)。 C_{air} 空气中污染物浓度(mg/m^3)。 DA_{event} 为每次暴露剂量(mg/cm^2), 其余参数的意义见上文。

3.2.3 暴露量计算结果

(1) 污染场址内工人暴露量

污染场址内工人暴露于污染物的可能途径有: 途径 1、途径 2 和途径 4。不同途径暴露量计算结果见表 2。

(2) 污染场址内居民暴露量

污染场址内居民暴露于污染物的可能途径有: 途径 1、途径 2、途径 3 和途径 4。不同途径暴露量计算结果见表 3。

4 风险表征

风险计算分为致癌风险与非致癌风险计算。因致癌污染物同样具有非致癌危害效应(孙冬, 2004), 因此在计算非致癌风险时也计算了致癌污染物对受体产生的非致癌风险。

致癌风险计算: 首先是将某一特定污染物所通过的口服、吸入、皮肤接触各不同吸收途径的暴露量分别相加, 然后乘以相应吸收途径的致癌斜率, 计算得出该污染物各不同吸收途径的致癌风险。然后, 将各不同吸收途径的致癌风险相加, 得到该污染物的各暴露途径的总致癌风险, 最后将各种暴露途径的总致癌风险相加, 得到受体一生中因暴露于

表 2 污染场址内工人不同暴露途径的暴露量计算结果 单位: $mg/(kg \cdot d)$

Table 2 The exposure doses of workers from different channels at the contaminated site

污染物	暴露途径	三氯甲烷	1,2-二氯乙烷	苯	甲苯
致 癌	途径 1, 口服	7.4×10^{-7}	4.9×10^{-4}	1.1×10^{-6}	—
	途径 2, 吸入	2.0×10^{-6}	1.3×10^{-3}	3.0×10^{-6}	—
	途径 4, 皮肤接触	4.2×10^{-8}	1.5×10^{-5}	1.1×10^{-7}	—
非 致 癌	途径 1, 口服	1.5×10^{-6}	9.9×10^{-4}	2.2×10^{-6}	6.2×10^{-4}
	途径 2, 吸入	1.9×10^{-6}	1.3×10^{-3}	3.0×10^{-6}	1.7×10^{-3}
	途径 4, 皮肤接触	4.2×10^{-8}	1.5×10^{-5}	1.1×10^{-7}	1.4×10^{-4}

表 3 污染场址内居民不同暴露途径的暴露量计算结果 单位: mg/(kg · d)

Table 3 The exposure doses of residents from different channels at the contaminated site

污染物	暴露途径	三氯甲烷	1,2-二氯乙烷	苯	甲苯
致癌	途径 1, 口服	1.1×10^{-5}	7.1×10^{-3}	1.6×10^{-5}	—
	途径 2, 吸入	6.6×10^{-5}	4.4×10^{-2}	1.0×10^{-4}	—
	途径 3, 吸入	7.1×10^{-5}	4.7×10^{-2}	1.1×10^{-4}	—
	途径 4, 皮肤接触	1.4×10^{-6}	5.0×10^{-4}	3.5×10^{-6}	—
非致癌	途径 1, 口服	1.1×10^{-5}	7.1×10^{-3}	1.6×10^{-5}	4.5×10^{-3}
	途径 2, 吸入	6.6×10^{-5}	4.4×10^{-2}	1.0×10^{-4}	2.8×10^{-2}
	途径 3, 吸入	7.1×10^{-5}	4.7×10^{-2}	1.1×10^{-4}	3.0×10^{-2}
	途径 4, 皮肤接触	1.4×10^{-6}	5.0×10^{-4}	3.5×10^{-6}	2.2×10^{-3}

各种污染物中所致的总致癌风险。

非致癌风险的计算: 非致癌风险又称为风险指数, 其计算方法为: 首先是将某一特定污染物所通过的口服、吸入、皮肤接触各不同吸收途径的暴露量分别相加, 然后除以相应吸收途径的参考剂量, 计算得出该污染物各不同吸收途径的风险指数。然后, 将各不同吸收途径的风险指数相加, 得到该污染物的各暴露途径的总风险指数, 最后将各种暴露途径的总风险指数相加, 得到受体一生中因暴露于各种污染物中所致的总风险指数。

通过计算, 该储油库污染场址对场址内居民和工人造成的非致癌风险分别为 6.8×10^{-1} 和 3.9×10^{-2} , 均未超过 1, 说明非致癌风险在可接受范围内; 而造成的致癌风险(表 4)分别为 1.7×10^{-4} 、 9.0×10^{-3} 均超过了 10^{-6} , 由此表明, 污染对场址内居民和工人造成不可接受的致癌风险。其中产生致癌风险的主要污染物均为 1, 2-二氯乙烷, 其产生的风险占总风险的 99.80%。受体接受风险的主要暴露途径为吸入吸收, 是受体使用受污染地下水作为洗澡和日常清洗

用途时, 水中的污染物汽化后经吸入吸收产生的致癌风险, 该途径造成的风险占总风险的 71.96%~92.29%。其次是口入暴露途径, 是受体使用受污染地下水作为饮用水时, 经口服吸收产生的致癌风险, 该途径造成的风险占总风险的 7.21%~27.20%。皮肤接触暴露途径产生的致癌风险较小, 占总风险的比例不足 1%(见图 2)。

5 结论与建议

通过对某储油库地下水污染调查和污染场地健康风险分析, 评价了某储油库地下水有机污染对场址内暴露人群造成的健康风险, 得到以下结论和建议:

- (1) 该储油库已对地下水造成有机污染, 有机污染物有: 三氯甲烷、1,2 - 二氯乙烷、苯、甲苯。
- (2) 暴露于污染场址内的工人和居民受到的非致癌风险均在可接受范围内, 但致癌风险都在不可接受范围, 致癌风险分别为 1.7×10^{-4} 、 9.0×10^{-3} (大于 10^{-6} 即为不可接受范围)。
- (3) 产生致癌风险的主要污染物为 1, 2-二氯乙

表 4 致癌风险评价结果表
Table 4 The results of carcinogenic risk assessment

受体	污染物	R _{oral} 口入	R _{inh} 吸入	R _{dermal} 皮肤接触	各污染物不同暴露途径造成的风险总和	各污染物所造成的风险比例 (%)
居民	三氯甲烷	3.3×10^{-7}	1.1×10^{-5}	4.3×10^{-8}	1.1×10^{-5}	0.13
	1,2-二氯乙烷	6.4×10^{-4}	8.3×10^{-3}	4.5×10^{-5}	9.0×10^{-3}	99.80
	苯	8.9×10^{-7}	5.6×10^{-6}	1.9×10^{-7}	6.7×10^{-6}	0.07
	各暴露途径的风险	6.5×10^{-4}	8.3×10^{-3}	4.6×10^{-5}	—	—
	各暴露途径的风险比例(%)	7.21	92.29	0.51	—	—
	受体的总暴露风险	9.0×10^{-3}				
工人	三氯甲烷	2.3×10^{-8}	1.6×10^{-7}	1.3×10^{-9}	1.8×10^{-7}	0.11
	1,2-二氯乙烷	4.5×10^{-5}	1.2×10^{-4}	1.4×10^{-6}	1.6×10^{-4}	99.80
	苯	6.1×10^{-8}	8.0×10^{-8}	5.9×10^{-9}	1.5×10^{-7}	0.09
	各暴露途径的风险	4.5×10^{-5}	1.2×10^{-4}	1.4×10^{-6}	—	—
	各暴露途径的风险比例(%)	27.20	71.96	0.84	—	—
	受体的总暴露风险	1.7×10^{-4}				

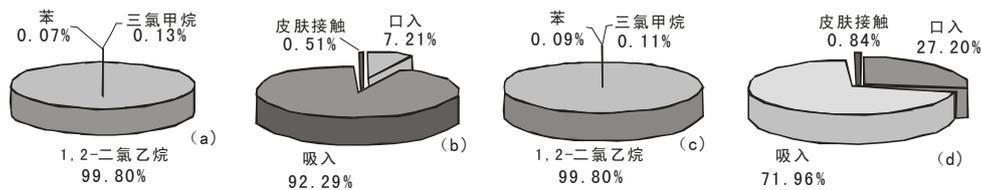


图2 地下水有机污染健康风险评价结果饼图

Fig. 2 The result of the health risk assessment on organic pollution of groundwater

(a) 各污染物对居民造成致癌风险比例; (b) 不同暴露途径对居民造成致癌风险比例;

(c) 各污染物对工人造成致癌风险比例; (d) 不同暴露途径对工人造成致癌风险比例

(a) Proportions of cancer-causing risks of various pollutants to residents; (b) Proportions of cancer-causing risks of various exposure channels to residents; (c) Proportions of cancer-causing risks of various pollutants to workers; (d) Proportions of cancer-causing risks of various exposure channels to workers

烷, 占总致癌风险的 99.80%。1, 2-二氯乙烷的毒性靶点为免疫系统、中枢神经系统、肝和肾, 可致人产生多种形态的肿瘤(包括相对较少见的血管肉瘤), 并具有潜在的遗传毒性(WHO, 2005)。

(4) 产生致癌风险的主要暴露途径是吸入吸收, 占总致癌风险比例大于 70%, 其次为口入吸收, 占总致癌风险比例为 7.2%-27.2%, 皮肤接触暴露途径产生的致癌风险小于 1%。

(5) 介于场址内地下水中的主要污染物均为易挥发的有机物, 因此, 建议污染场址内的人群应注意室内通风(尤其是洗浴时); 尽量不饮用已受污染的地下水(尤其是未经煮沸的生水), 以减少风险。

(6) 评价中使用的一些和生活习惯相关的参数为估计值, 或是参照 USEPA 给定的值, 不是准确的统计值, 可能会造成风险的高估或低估, 是否适用, 有待今后进一步调查、验证。

参考文献:

- 韩冰, 何江涛, 陈鸿汉, 谌宏伟, 史敬华. 2006. 地下水有机污染人体健康风险评价初探[J]. 地学前缘, 13(1): 224-229.
- 孙冬, 王玉才, 谢春梅. 2004. 垃圾焚烧烟气中污染物对人体健康风险评价[J]. 环境卫生工程, 12(3): 144-166.

References:

- HAN Bing, HE Jiang-tao, CHEN Hong-han, CHEN Hong-wei, SHI Jing-hua. 2006. Primary study of health-based risk

assessment of organic pollution in groundwater[J]. Earth Science Frontiers, 13(1): 224-229(in Chinese).

IARC. 2006. Complete List of Agents evaluated and their classification[OL]. [2009-10-28]. <http://www.iarc.fr/>.

SUN Dong, WANG Yu-cai, XIE Chun-mei. 2004. Health risk assessment on harmful substances in flue from municipal solid waste incineration[J]. Environmental sanitation engineering, 12(3): 144-166(in Chinese).

U.S.EPA. 1989. Exposure Factors handbook. Office of Health and Environmental Assessment[OL]. [2009-10-28]. <http://www.epa.gov>.

U.S.EPA.1992.Guidelines for Exposure Assessment. Risk Assessment Forum and U.S Environmental Protection Agency[OL]. EPA/600/Z-92/001. <http://www.epa.gov>.

U.S.EPA. 1998. Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities Volume II, Office of Solid Waste and Emergency Response and USEPA Region 6 Office[OL]. [2009-10-28]. <http://www.epa.gov>.

U.S.EPA. 2002. United States Environmental Protection Agency Region IX[OL]. [2009-10-28]. <http://www.epa.gov/region09/>.

U.S.EPA. 2004. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment[OL]. Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC, <http://www.epa.gov>.

U.S.EPA. 2008. Integrated Risk Information System (IRIS) [OL]. [2009-10-28]. <http://www.epa.gov/iris/>.

WHO. 2005. Guidelines for Drinking Water Quality, (3rd edition) [OL]. [2009-10-28]. http://www.who.int/water_sanitation_health.