

· 调查与评价 ·

垃圾填埋场地下水污染对居民健康的风险评价

段小丽,王宗爽,于云江,聂静,王菲菲,赵秀阁

(中国环境科学研究院,北京 100012)

摘要: 调查了某垃圾填埋场地下水和周边居民饮用水中的 As、Hg 等重金属和挥发酚等有机物的污染状况,运用美国环保部的健康风险计算模型,评估了该垃圾填埋场地下水对周边居民的潜在健康风险。结果表明,各类人群对 4 种有阈化合物的饮食和皮肤暴露的终身健康危险度在 $8.2 \times 10^{-11} \sim 1.3 \times 10^{-10}$ 之间,均低于可以接受的风险水平 10^{-6} ;对 As 的终身超额健康危险度在 $3.1 \times 10^{-7} \sim 4.9 \times 10^{-7}$ 之间,表明地下水中砷污染对居民潜在的致癌风险不明显。各类人群通过皮肤对 Hg、As、Cd 和挥发酚的暴露剂量比通过饮水暴露的剂量高 0.7 倍 ~ 14.5 倍,皮肤暴露将是地下水影响人体健康并构成潜在风险的重要途径。

关键词: 垃圾填埋场;地下水;污染物;健康风险;暴露剂量;危险度评估

中图分类号: X523 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-2009(2008)03-0020-05

Health Risk Assessment for Residents Exposure to Underground Water near a Landfill Site

DUAN Xiao-li, WANG Zong-shuang, YU Yun-jiang, NIE Jing, WANG Fei-fei, ZHAO Xiu-ge

(Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The pollution of heavy metals such as arsenic, mercury and volatile phenols were investigated on the underground water near a landfill site and drinking water. The potential risk assessments of the underground water and drinking water were estimated by US EPA health risk assessment model. The results showed that the lifetime health risks of research subjects through dietary intake and dermal exposure to 4 non-threshold compounds were $8.2 \times 10^{-11} \sim 1.3 \times 10^{-10}$, lower than the acceptable risk level 10^{-6} . Their excess lifetime risk to arsenic was $3.1 \times 10^{-7} \sim 4.9 \times 10^{-7}$. It was revealed from this study that the dermal exposure seems to a dominant exposure route for human health risk. The exposure doses of research subjects through cutaneous contact to mercury, arsenic, chromium and volatile phenols were 0.7 ~ 14.5 times to the doses through dietary intake.

Key words: Landfill site; Underground water; Pollutant; Health risk assessment; Exposure dose; Risk assessment

近年来随着我国城市化进程的加快,城市人口迅速增多,城市生活垃圾数量大幅度增加,但由于目前垃圾处理的技术和能力跟不上处理量的增长需求,造成了很多环境污染问题;同时,由于城市规模的不断扩大,原先位于城市郊区的垃圾处理场逐渐被城市建筑所包围,周边居住的人口数量也越来越多,受垃圾填埋场环境污染的影响而存在着潜在的健康隐患。垃圾填埋场对周边居民的健康影响评价问题成为近年来日益受到关注的主要科研热点问题之一。

垃圾填埋场除在运行过程中产生臭气会对人们日常生活产生干扰和影响之外,其通过污染地下水而使周边居民饮用水和生活用水的安全受到威胁是影响健康的主要途径。研究表明,垃圾填埋产生的大量含有有毒物质和各类病菌、病毒等的渗滤液容易通过地下水或地表水进入食物链而威胁人

收稿日期:2007-07-20;修订日期:2008-02-22

基金项目:科技部社会公益基金资助项目(2004D B1J042)

作者简介:段小丽(1977—),女,山西交城人,助理研究员,博士,研究方向为环境污染物的暴露与健康风险评价。

体健康^[1-2]。

美国学者 20 世纪 80 年代对 Love Canal 地区垃圾填埋场周围低体重儿出生率升高的流行病学研究^[3-4], 促使美国国会于 1980 年通过了超级基金 (Superfund) 项目, 该项目通过在危险废弃场所危险度评估、清理等方面做的大量研究工作, 产生了巨大的环境和社会效益。欧盟近年来开展的 EUROHAZCON 项目也在垃圾填埋场对周围居民的健康影响方面作了系列的研究^[5-6]。而我国目前在垃圾填埋场对居民的健康影响的环境流行病学研究和健康危险度评价方面的研究相对较少。

现以北京市某垃圾填埋场为研究对象, 调查各类人群对地下水中重金属、氰化物和挥发酚的暴露剂量和健康风险分布特征, 评估地下水对周边居民健康的风险水平。为加强城市垃圾填埋场的环境管理提供一定的技术支持, 也可为健康风险评价的同类研究提供借鉴和参考的思路和方法。

1 调查方法

1.1 采样时间

2005 年底。

1.2 采样地点

某填埋场建立于 1996 年, 目前处理生活垃圾量约 30 万 t/a。填埋场的地下水采集样本按 5 点布设。填埋场地下水上游 30 m ~ 50 m 处设置本底井一眼为 1#; 填埋场两侧及下游 30 m ~ 50 m 处都各设置污染扩散井两眼分别为 2#、3#和 4#、5#; 在两处居民小区分别选择饮用水供应井 (约 70 m 深) 各一眼。

1.3 分析指标

pH 值、色度、 I_{Mn} 、 BOD_5 、总大肠菌群, 以及挥发酚、氰化物、 As 、 Hg 和 Cr_6 分析指标包括对于低于方法检出限的数值用 1/2 最低检出限代替。

1.4 检测方法

参照《生活垃圾填埋污染控制标准》(GB 16889 - 1997)《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164 - 2004)《生活饮用水标准检验法》(GB/T 5750 - 1985)。

1.5 居民问卷调查

对 1 km 处的 38 名居民和 2 km 处的 194 名居民开展了问卷调查, 调查内容包括个人信息、生活习惯和基本的健康状况。

1.6 暴露剂量的计算和参数的确定方法

周边人群对该地区地下水的暴露途径为“经口暴露”和“皮肤暴露”两种。其中, 经口暴露主要包括日常饮食摄水和洗浴过程中随机摄水, 计算公式如下。

$$ADD_{\text{dietary}} = \frac{CW \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

式中: ADD_{dietary} ^[7] ——经口暴露剂量, mg/kg · d;

CW ——水中污染物浓度; mg/L;

IR ——摄入率, L/d;

EF ——暴露频率, d/a;

ED ——暴露持续时间, a;

BW ——人体质量, kg;

AT ——平均时间, d。

$$ADD_{\text{dermal}} = \frac{CW \times SA \times PC \times ET \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (2)$$

式中: ADD_{dermal} ^[7] ——皮肤吸收剂量, mg/kg · d;

CW 、 IR 、 EF 、 ED 、 BW 、 AT 同公式 (1);

SA ——皮肤接触表面积, cm^2 ;

PC ——化学物质皮肤渗透常数, cm/h;

ET ——暴露时间, h/d;

CF ——体积转换因子, $10^{-3} L/cm^3$ 。

1.7 健康风险计算方法

将地下水中检测到的污染物分为有阈 (即非致癌性物质) 和无阈 (即致癌性物质) 两类, 计算公式如下。

$$R = \frac{ADD}{RfD} \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: R ——发生某种特定有害健康效应而造成等效死亡的终身危险度;

ADD ——有阈化学污染物的日均暴露剂量, mg/kg · d;

RfD ——化学污染物的某种暴露途径下的参考剂量, mg/kg · d;

10^{-6} ——与 RfD 相对应的假设可接受的危险度水平。

$$R = q(\text{人}) \times ADD \quad (4)$$

式中: R ——人群患癌终身超额危险度, 指 0 岁人群的期望寿命 70 a;

ADD ——日均暴露剂量, mg/kg · d;

$q(\text{人})$ ——有动物推算出来人的致癌强度系数, $(mg/kg \cdot d)^{-1}$ 。

在计算各类人群对污染物的暴露剂量的基础

上,根据暴露剂量和污染物的参考剂量或致癌强度系数计算健康危险度。

2 结果与讨论

2.1 垃圾填埋场地下水和周边居民饮用水的分析结果

填埋场场区地下水和周边居民饮用水中的所监测的各指标均低于《地下水环境质量标准》(GB/T 14848 - 1993) 类和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749 - 2006)中的规定限值,且含量没有显著性差异。说明无论是填埋场场区的地下水还是周边居民饮用的地下水,受垃圾填埋场渗滤液的影响都不明显。

2.2 暴露剂量的计算结果

根据美国 EPA的手册^[8],经口暴露的 IR,成年人为 2.0 L/d,儿童为 0.87 L/d,青少年为 1.1 L/d; 饮用水暴露频率 EF为 365 d/a。皮肤表面积儿童为 0.830 m² (男)和 0.815 m² (女),青少年为

1.467 m² (男)和 1.413 m² (女),成年人为 1.94 m² (男)和 1.69 m² (女)。PC为具体化学物质皮肤渗透常数,As、Hg、Cr、挥发酚(以苯酚代替)的 PC 分别为 1×10^{-3} cm/h、 1.8×10^{-3} cm/h、 2×10^{-3} cm/h、 8×10^{-3} cm/h,由于没有氰化物的 PC,因此这里将不予计算。每天淋浴时间 12 min。

按照对致癌物质的暴露,经口 ED 按照 70 a 计算,游泳按照 50 a 计算。根据世界卫生组织提供的数据,成年男性 70 kg,成年女性 58 kg,平均为 64 kg; 根据中国卫生年鉴城市青少年和儿童的平均体重男性分别为 52 kg和 20 kg,女性平均分为 42 kg和 19 kg^[9]。

计算得出垃圾填埋场周边的儿童、青少年和成年男性和女性的经口和皮肤对地下水中 Hg、As、Cr 和挥发酚的暴露剂量。由于两处居民区饮用水中汞的浓度不同,计算时取二者的平均值。计算得到各类人群的经口饮水暴露剂量见表 1,各类人群对地下水的皮肤暴露剂量见表 2。

表 1 各类人群经口饮水暴露剂量

μg/kg·d

调查人群	Hg		As		Cr		酚		氰化物	
	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性	女性
成年人	0.0037	0.0044	0.143	0.173	0.0286	0.0345	0.0286	0.0345	0.0572	0.0690
青少年	0.0027	0.0033	0.107	0.131	0.0214	0.0261	0.0315	0.0306	0.0428	0.0522
儿童	0.0056	0.0058	0.218	0.226	0.0436	0.0451	0.0670	0.0726	0.0872	0.0902

表 2 各类人群对地下水的皮肤暴露剂量

μg/kg·d

调查人群	Hg		As		Cr		挥发酚	
	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性	女性
儿童	0.0106	0.0108	0.748	0.760	0.166	0.169	0.665	0.676
青少年	0.0073	0.0086	0.513	0.603	0.114	0.134	0.456	0.536
成年人	0.0071	0.0075	0.499	0.525	0.111	0.117	0.443	0.467

由表 1和表 2可见:

(1)无论是通过经口饮水还是皮肤暴露途径,各类人群对 As的暴露剂量都最高,其中经口饮水暴露途径 As的暴露剂量分别是 Hg、Cr、酚和氰化物的 39.0倍、5.0倍、4.9倍和 2.5倍,皮肤暴露途径 As的暴露剂量分别是 Hg、Cr和酚的 70.3倍、4.3倍和 1.1倍;

(2)成年人、青少年和儿童通过皮肤暴露途径对 Hg、As、Cr、酚的暴露剂量依次增加,儿童的暴露剂量是成年人和青少年的 1.3倍 ~ 1.5倍,尽管成

年人和青少年的皮肤表面积都比儿童的明显大,但由于儿童的体重比成年人和青少年低得多,所以儿童的皮肤暴露剂量仍然是最高的;

(3)各类人群通过皮肤对 Hg、As、Cr和挥发酚的暴露剂量都比通过经口饮水暴露途径的暴露剂量大。经过皮肤对 Hg的暴露是经口饮水的 1.7倍 ~ 2.7倍,对 As的暴露为 3.0倍 ~ 4.8倍,对 Cr的暴露为 3.4倍 ~ 5.3倍,对挥发酚的暴露剂量差别最大,为 6.4倍 ~ 23.2倍,可见皮肤暴露途径是人体接触地下水体污染物的重要暴露途径。

2.3 人体健康风险评价结果

根据美国 EPA 综合风险数据库 (RIS) 数据资料^[10-14], As 为具有致癌风险的无阈化合物, 而 Hg、挥发酚、氰化物为非致癌性的有阈化合物。尽管已

有数据表明通过呼吸途径暴露铬具有致癌性, 但目前没有文献表明经口暴露 Cr⁺⁶ 具有致癌性, 因此这里将 Cr⁺⁶ 归为有阈化合物。砷的致癌强度系数 q 和 Hg、挥发酚、Cr 氰化物的参考剂量见表 3。

表 3 经口有阈化合物参考剂量和无阈化合物

项目	有阈化合物 / [mg · (kg · d) ⁻¹]				q(无阈化合物) / [mg · (kg · d) ⁻¹] ⁻¹
	Hg	Cr	挥发酚 (以苯酚代替)	氰化物	As
参考剂量 (美国)	0.0003	0.003	0.3	0.02	0.5
不确定因子 (UF)	3	300	300	100	—
修正因子 (MF)	1.5	1	1	5	—

根据选定的参数、各类人群对污染物的暴露剂量以及公式 (3) 和 (4), 计算得到各类人群对各种

污染物的暴露风险, 结果见表 4 和表 5。

表 4 经口暴露终身健康危险度

调查人群	有阈化合物								无阈化合物	
	Hg		Cr		酚		氰化物		As	
	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性	女性
儿童	1.9 × 10 ⁻¹¹	1.9 × 10 ⁻¹¹	1.5 × 10 ⁻¹¹	1.5 × 10 ⁻¹¹	2.2 × 10 ⁻¹³	2.4 × 10 ⁻¹³	4.4 × 10 ⁻¹²	4.5 × 10 ⁻¹²	1.1 × 10 ⁻⁷	1.1 × 10 ⁻⁷
青少年	9.1 × 10 ⁻¹²	1.1 × 10 ⁻¹¹	7.1 × 10 ⁻¹²	8.7 × 10 ⁻¹²	1.0 × 10 ⁻¹³	1.0 × 10 ⁻¹³	2.1 × 10 ⁻¹²	2.6 × 10 ⁻¹²	5.3 × 10 ⁻⁸	6.5 × 10 ⁻⁸
成年人	1.2 × 10 ⁻¹¹	1.5 × 10 ⁻¹¹	9.5 × 10 ⁻¹¹	1.2 × 10 ⁻¹¹	9.5 × 10 ⁻¹⁴	1.2 × 10 ⁻¹³	2.9 × 10 ⁻¹²	3.5 × 10 ⁻¹²	7.1 × 10 ⁻⁸	8.6 × 10 ⁻⁸

表 5 皮肤暴露终身健康危险度

调查人群	有阈化合物						无阈化合物	
	Hg		Cr		酚		As	
	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性	女性
儿童	3.5 × 10 ⁻¹¹	3.6 × 10 ⁻¹¹	5.5 × 10 ⁻¹¹	5.6 × 10 ⁻¹¹	2.2 × 10 ⁻¹²	5.6 × 10 ⁻¹³	3.7 × 10 ⁻⁷	3.8 × 10 ⁻⁷
青少年	2.4 × 10 ⁻¹¹	2.9 × 10 ⁻¹¹	3.8 × 10 ⁻¹¹	4.5 × 10 ⁻¹¹	1.5 × 10 ⁻¹²	4.5 × 10 ⁻¹³	2.6 × 10 ⁻⁷	3.0 × 10 ⁻⁷
成年人	2.4 × 10 ⁻¹¹	2.5 × 10 ⁻¹¹	3.7 × 10 ⁻¹¹	3.9 × 10 ⁻¹¹	1.5 × 10 ⁻¹²	3.9 × 10 ⁻¹³	2.5 × 10 ⁻⁷	2.6 × 10 ⁻⁷

由表 4 和表 5 可见:

(1) 对各种有阈化合物经口暴露和经皮肤暴露的终身健康总危险度, 儿童、青少年和成年人都低于可以接受的风险水平 10⁻⁶。皮肤暴露剂量都高于经口暴露的剂量, 且呈现出汞 > 铬 > 氰化物 > 酚的特征。

(2) 对于具有致癌性的砷的两种暴露途径终身超额健康总风险, 儿童、青少年、成年人男性也均低于可接受的风险水平 10⁻⁶。

(3) 儿童的致癌风险度是青少年和成年人的 1.3 倍 ~ 1.6 倍; 女性的健康危险度是男性的 1.0 倍 ~ 1.2 倍。因此, 3 类人群中的儿童及女性的健康风险值得关注。

2.4 不确定性分析

2.4.1 污染物种类和浓度的不确定性

所选择评价的化合物有限, 还有很多致癌物类的物质在研究中没有分析和讨论。随着今后垃圾填埋量的进一步增多, 某些年份降水量异常增大, 而且渗滤液处理系统一旦出现故障或者处理能力不能满足需求都导致地下水中的上述污染物浓度可能会因受到渗滤液的影响而增加, 各类人群的暴露剂量率和潜在的健康风险也随之增加。另一方面, 随着经济的发展, 对垃圾填埋场二次污染控制日趋严格, 或者年际降水量逐渐偏低, 这都将会减少地下水中的污染物浓度, 健康风险也将进一步降低。

2.4.2 季节饮水量不确定性

在计算各类人群的经口暴露剂量时, 日均饮水

量是设定不变的均值,但是由于四季分明,季节温度变化明显,各季节人体生理活动强度不同,不同的季节各类人群饮水量存在差别,在其他条件不变的情况下,饮水多的季节,暴露剂量就高,相应的健康危险度就较高,饮水少的季节则相反。

2.4.3 暴露评价和健康风险评价参数的不确定性

由于我国没有经口饮水和皮肤暴露剂量计算相关参数的报道,评价中引用了美国的参数,但美国人和中国人体征和生活习惯不同,因此上述参数与中国实际相比较,可能存在偏大或偏小的误差,这将会造成计算出来的风险比实际风险偏大或偏小。

2.4.4 监测结果准确性的影响

某些监测指标的检测结果低于检出限时,用 1/2 检出限替代。由于低于检出限的分析结果在一定程度上是不准确的,所以暴露剂量和健康风险的结果也具有一定的不确定性。在今后的研究中应注意提高方法的灵敏度,降低检出限,保证监测数值的准确性。另一方面,由于所测定的各数值都低于我国标准,该评价结果可以从一个侧面说明当居民暴露低于国家标准的饮用水时的健康风险的大致水平。

3 结论和建议

(1) 垃圾填埋场地下水及周边居民区饮用水的主要监测指标挥发酚、氰化物、As、Hg、Cd 等均未超过《地下水环境质量标准》(GB/T 14848 - 1993) 和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749 - 1985)。受垃圾填埋场渗滤液的影响不明显,但对人群的健康风险仍然不容忽视,有必要在提高方法检测方法灵敏度、增加检测指标的前提下,开展进一步的深入探讨。

(2) 3 类人群对 As 的暴露剂量最高,经口饮水暴露是 Hg、Cr 酚和氰化物的 2.5 倍 ~ 39.0 倍,皮肤暴露途径是其 1.1 倍 ~ 70.3 倍;3 类人群通过皮肤对 Hg、As、Cd 和挥发酚的暴露剂量都比通过经口饮水途径的暴露剂量大,皮肤暴露可能是影响人体健康并构成潜在风险的重要途径,在日常生活中要予以注意。

(3) 3 类人群对四种有阈化合物经口暴露的终身健康总危险度均低于可以接受的风险水平 10^{-6} ; 3 类人群对具有致癌性砷的两种暴露途径终

身超额健康总危险度不明显。但为了有效防止对人体健康的影响,仍然要进一步加强垃圾填埋场地下水防渗漏等工程的建设,以减少对周边环境和人群健康的影响;同时也要从严对人体健康有害的污染物(如 As) 等的环境质量和饮用水卫生标准的规定。

(4) 由于我国目前尚没有关于健康风险评价的技术导则以及相关参数的手册,评价中参数选择方面对结果造成了一定的不确定性。建议今后在环境健康暴露研究中加强基础数据的调查,有关部门应加强暴露和健康风险评价导则和参数手册的建设。

[参考文献]

- [1] 方满,朱俊林,刘洪海,等. 垃圾填埋场底土层污染状况调查[J]. 环境监测管理与技术, 2000, 13(1): 23 - 25.
- [2] OLGA B, JM UW. A generic comparison of the airborne risks to human health from landfill and incinerator disposal of municipal solid waste[J]. The Environmentalist, 2000, 20(4): 325 - 334.
- [3] 闵一珏,朱韶峰. 城市垃圾卫生填埋场废气产生量及主要污染因子的确定[J]. 环境污染与防治, 2000, 12(3): 33 - 34.
- [4] 汤庆合,丁振华,黄仁华,等. 垃圾填埋场及周边水系中汞污染调查[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 116(6): 15 - 17.
- [5] 李广科,赵由才. 垃圾填埋场渗滤液诱发小鼠骨髓细胞微核效应[J]. 中国环境科学, 2004, 24(1): 37 - 40.
- [6] 陈家军,张俊丽,裴照滨. 垃圾填埋二次污染的危害与防治[J]. 安全与环境学报, 2002, 12(3): 27 - 30.
- [7] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (Part A) [S]. EPA/540/1 - 89/002, 1989.
- [8] U. S. EPA. Exposure factors handbook [S]. EPA/600/P - 95/002 1997.
- [9] 中华人民共和国卫生部. 2006 中国卫生统计年鉴 [M]. 北京:中国协和医科大学出版社, 2006.
- [10] U S EPA. Phenol (CASRN 108 - 95 - 2) [EB/OL]. [2007 - 07 - 26]. <http://www.epa.gov/iris/subst/0088.htm>.
- [11] U S EPA. Cyanide, free (CASRN 57 - 12 - 5) [EB/OL]. [2007 - 07 - 26]. <http://www.epa.gov/iris/subst/0031.htm>.
- [12] U S EPA. Arsenic, inorganic (CASRN 7440 - 38 - 2) [EB/OL]. [2007 - 07 - 26]. <http://www.epa.gov/iris/subst/0278.htm>.
- [13] U S EPA. Chromium (VI) (CASRN 18540 - 29 - 9) [EB/OL]. [2007 - 07 - 26]. <http://www.epa.gov/iris/subst/0144.htm>.
- [14] U S EPA. Superfund public health evaluation manual [S]. EPA/540/186060, 1986.