

基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究

钟茂生^{1 2 3}, 姜林^{1 2 3*}, 姚珏君^{1 2 3}, 夏天翔^{1 2 3}, 朱笑盈^{1 2 3}, 韩丹^{1 2 3}, 张丽娜^{1 2 3}

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 污染场地风险模拟与修复北京市重点实验室, 北京 100037)

摘要: 对某有机化工厂地下水下游方向拟建设的地铁站所在区域土壤及地下水开展污染调查, 结果表明, 拟建地铁站区域深层土壤及地下水均被1,2-二氯乙烷污染, 其中, 土壤样品最高浓度104.08 mg·kg⁻¹, 位于地表以下8.6 m深处; 地下水样品最高浓度18 500 μg·L⁻¹. 污染主要由位于上游的有机化工厂生产排污所致. 本研究依据调查结果并结合地铁站的特殊结构设计构建了该场地特定的污染概念模型, 推导了相应的风险计算公式用于计算站内人员的健康风险, 并与基于通用污染概念模型建立的风险计算公式的评价结果进行比较. 两种模型计算结果均表明该区域土壤及地下水中污染对未来地铁站工作人员造成的致癌风险将远高于目前普遍接受的风险水平(1×10^{-6}), 但前者计算的土壤和地下水对未来地铁工作人员造成的致癌风险要比后者分别高2倍和1.5倍. 由此可见, 对于具体的场地评价项目, 应考虑场地的污染特性及未来建筑的结构特性对现有评估模型进行修正后进行健康风险评估, 以避免因直接套用现有导则中的计算模型使最终评估结果偏离客观实际.

关键词: 特定场地; 结构设计; 污染概念模型; 健康风险评估; 案例研究

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0647-06

Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model

ZHONG Mao-sheng^{1 2 3}, JIANG Lin^{1 2 3}, YAO Jue-jun^{1 2 3}, XIA Tian-xiang^{1 2 3}, ZHU Xiao-ying^{1 2 3}, HAN Dan^{1 2 3}, ZHANG Li-na^{1 2 3}

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Centre of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. Beijing Key Laboratory for Risk Modeling and Remediation of Contaminated Sites, Beijing 100037, China)

Abstract: Site investigation was carried out on an area to be redeveloped as a subway station, which is right downstream of the groundwater of a former chemical plant. The results indicate the subsurface soil and groundwater in the area are both polluted heavily by 1,2-dichloroethane, which was caused by the chemical plant upstream with the highest concentration was 104.08 mg·kg⁻¹ for soil sample at 8.6 m below ground and the highest concentration was 18 500 μg·L⁻¹ for groundwater. Further, a site-specific contamination conceptual model, giving consideration to the specific structure configuration of the station, was developed, and the corresponding risk calculation equation was derived. The carcinogenic risks calculated with models developed on the generic site conceptual model and derived herein on the site-specific conceptual model were compared. Both models indicate that the carcinogenic risk is significantly higher than the acceptable level which is 1×10^{-6} . The comparison result reveals that the risk calculated with the former models for soil and groundwater are higher than the one calculated with the latter models by 2 times and 1.5 times, respectively. The finding in this paper indicates that the generic risk assessment model may underestimate the risk if specific site conditions and structure configuration are not considered.

Key words: site-specific; configuration design; contamination conceptual model; health risk assessment; case study

近年来,由工业企业搬迁、停产和倒闭所遗留的场地已成为我国污染场地的主要类型,一些位于城市中心、生产历史长、生产工艺变革多的污染企业遗留场地对场地未来使用人群的健康可能产生不利影响^[1,2].因此,这类场地在重新开发利用前通常需要进行场地健康风险评估.

我国在污染场地管理领域起步相对较晚,目前还没有针对污染场地管理形成完整的法律法规和标准评价体系.同时,由于各部门之间的协调问题,在进行场地风险评估时大多数评估机构往往缺乏与场地规划及建筑设计部门的详细沟通,导致其在进行

风险评估时通常是机械地套用导则或指南中的评估模型.在模型参数选择时也往往是直接套用相关导则或指南中的推荐值,或只对部分参数进行本地化,并未结合场地的具体污染概念模型及未来建筑规划对相关模型及参数进行调整^[3-6].故评估结果与客观情况往往存在一定差异,难以为后续场地风险管理及控制方案的制定提供科学参考.

收稿日期: 2012-05-03; 修订日期: 2012-06-09

基金项目: 北京市科委重大项目(D08040900360804); 环境保护公益性行业科研专项(201009032)

作者简介: 钟茂生(1986~),男,硕士,主要研究方向为污染场地调查评估与修复, E-mail: zzmss1986@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jl-icp@vip.163.com

本研究以位于北京某有机化工厂附近某地铁站为例,根据该场地污染特性和地铁站的详细建筑设计建立了该场地的污染概念模型.在此基础上推导了风险计算公式并用于评估周围污染土壤及地下水对该地铁站内部工作人员产生的健康风险.同时,将结果与直接套用导则中的评估模型所计算的结果进行比较与分析,以期国内类似项目的评估提供参考与借鉴.

1 场地概况

1.1 场地特征

所研究的地铁站位于北京东四环外原北京市化工生产区.地铁站占地面积约 $6\,900\text{ m}^2$ ($300\text{ m} \times 23\text{ m}$).地层结构主要分为4层,其中 $0 \sim 1\text{ m}$ 为回填土层、 $1 \sim 6.5\text{ m}$ 为粉土层、 $6.5 \sim 9.5\text{ m}$ 为黏土层、 $9.5 \sim 18\text{ m}$ 为砂土层.区域地下水流向为自西北向

东南,埋深 $11 \sim 12\text{ m}$,属于潜水含水层.现场踏勘表明该地铁站位于北京某生产历史悠久的有机化工厂东南部(即该厂区地下水的下游方向).部分规划区域已落在该有机化工厂厂区内.前期场地环境评估结果显示,厂区土壤与地下水被含氯有机物严重污染,其中1,2-二氯乙烷在土壤中的最高浓度达到 $10\,600\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,地下水中最高浓度达到 $9\,800\,000\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,是厂区的主要和典型污染物之一.

1.2 污染特征

为详细了解该地铁站所在区域土壤与地下水污染状况及其对未来地铁站内工作人员的健康影响,课题组依据地铁建设单位提供的地铁站详细规划及建筑设计图、场地水文地质条件以及其地下水上游有机化工厂原厂址场地评价报告,对拟建地铁站的区域进行采样调查.共布置6个采样点,平面布置如图1所示.土壤及地下水样品分析方法见文献[7].

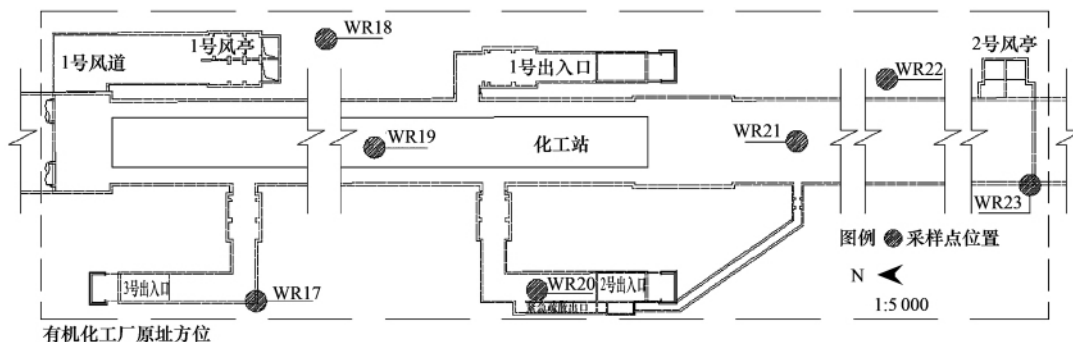


图1 采样点平面布置示意

Fig. 1 Layout of sampling locations

其中WR17及WR22采集不同深度土壤样品后建地下水监测并以采集该区域地下水样品,其余采样点仅采集不同深度的土壤样品.分析结果显示:WR17、WR20、WR21及WR23采样点纵剖面的5个土壤样品均检出1,2-二氯乙烷,最大浓度样品位于WR17号点的 8.6 m 处,达到 $104.08\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;WR18、WR22号采样点仅分别在 17.3 m 、 17.6 m 处检出1,2-二氯乙烷,分别为 $0.33\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.43\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;WR19号采样点纵剖面5个土壤样品均未检出1,2-二氯乙烷.WR17、WR20、WR21、WR23采样点污染物纵向分布如图2所示.

由图2可知,除WR23号采样点外,其余采样点最高浓度主要出现在含水层土壤及其上方的黏土弱透水层土壤中.同时,WR17、WR22号监测井地下水样品1,2-二氯乙烷检测浓度分别为 $18\,500\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5.7\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.由于本研究区域土壤及地下水中污染物与其地下水上游某有机化工厂土壤与地

下水中典型污染物种类一致,可初步推断研究区污染可能是该化工厂中的污染物随地下水迁移至研究区域所致.

2 污染概念模型

2.1 通用污染概念模型

在对污染场地进行健康风险评价时,建立正确的场地污染概念模型至关重要.对于挥发性有机物(VOCs)污染场地,污染物主要通过挥发与受体接触,之后在受体的呼吸作用下进入人体内继而对健康造成危害^[5,8,9].因此,在这类场地的污染概念模型中,需清晰描绘污染物与受体的相对位置、在环境介质中的迁移方式、最终进入受体的途径以及场地上未来建筑物的详细结构,其通用概念模型如图3所示^[12,14].

以上概念模型的重要假设之一是场地上未来建筑位于污染土壤及地下水的垂直上方.污染物通过

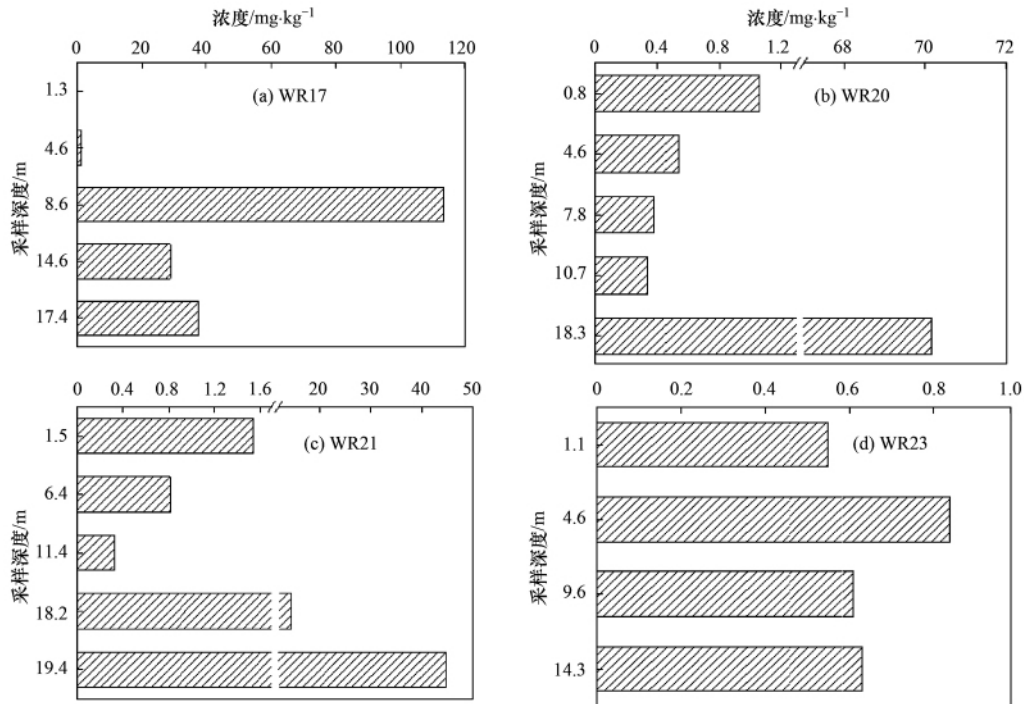


图2 土壤中污染物纵向浓度分布

Fig. 2 Vertical concentration profile in soil

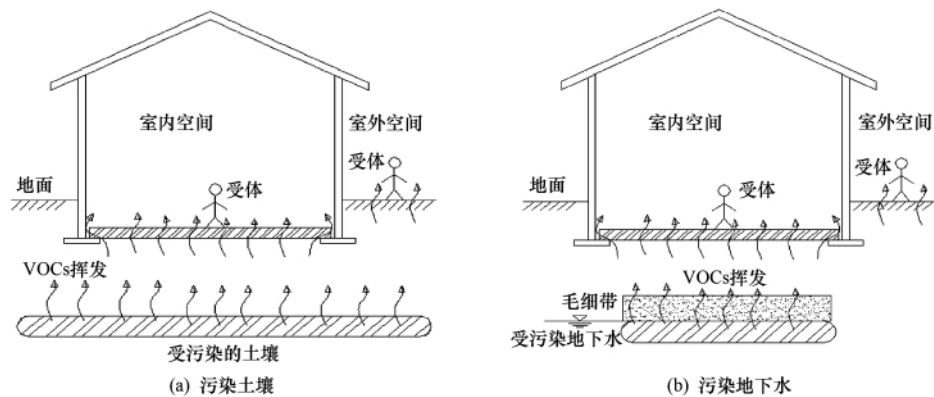


图3 VOCs 污染场地呼吸暴露途径通用概念模型

Fig. 3 Generic conceptual model for inhalation exposure pathway in VOCs contaminated sites

在分子扩散作用依次通过地下水及污染土壤上方的清洁非饱和土层进入地表呼吸层与受体接触,或依次通过清洁的非饱和土层及建筑物底板进入室内空间与受体接触(不考虑污染物在非饱和土壤中横向迁移通过建筑物墙壁进入室内)^[5,10]。基于此概念模型,现有评估导则或指南中已建立了相应风险计算模型^[11~14]。具体计算公式如式(1)~(2)所示。其中,IR1为土壤污染导致的呼吸致癌风险,IR2为地下水污染导致的呼吸致癌风险,其余参数的定义见3.1节中表1的描述。

$$IR1 = c_s \times \frac{H \times \rho}{\theta_{ws} + K_s \times \rho + H \times \theta_{as}} \times$$

$$\frac{D_s^{eff} \times \eta}{D_s^{eff} \times \eta + L_{cr} \times ER \times L_b} \times \frac{EF \times ED \times URF}{AT_c \times 365} \quad (1)$$

$$IR2 = c_w \times H \times \frac{D_s^{eff} \times \eta}{D_s^{eff} \times \eta + L_{cr} \times ER \times L_b} \times \frac{EF \times ED \times URF}{AT_c \times 365} \quad (2)$$

2.2 地铁站污染概念模型

结合地铁站的建筑设计详图及污染土壤与地下水埋深发现,以上通用概念模型与地铁站的实际污染概念模型(图4)并不完全相符。最大的差异在于,

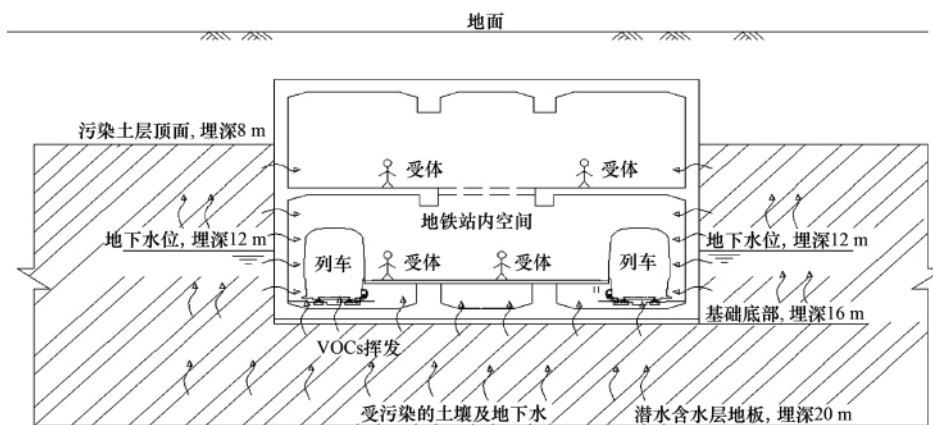


图4 地铁站污染概念模型

Fig. 4 Conceptual model for the contamination in subway station

与通用概念模型假设未来建筑位于污染土壤及地下水垂直正上方不同,未来地铁站管理人员的主要活动空间在地表以下,整个空间大部分被污染土壤及地下水包围。因此,除地铁站建筑垂直下方的土壤及地下水中的污染物可通过建筑底板裂隙进入内部空间并进而影响站内工作人员健康外,与墙壁直接接触的土壤及地下水中的污染物,也可通过建筑墙壁中的裂隙进入室内空间。因此,直接套用现有导则或指南中的计算公式由于未能考虑从墙壁进入地铁站室内的污染物,其结果很可能低估地铁站内未来工作人员的健康风险。

3 风险评估

3.1 评估模型推导

根据图4中地铁站场地污染概念模型,结合土壤及地下水中污染物进入地铁站室内的主要途径,可推导应用于这一特定污染概念模型的风险计算公式。具体过程如下:

首先,由于目前场地风险评价过程中一般忽略污染物生物降解、吸附等过程,认为源强在评估周期内恒定,因此可根据通量连续性原则建立土壤中污染物与室内空气中对应污染物的关系^[15~20],如式(3)所示。

$$\text{Flux} \times (L \times B + 2 \times L \times h) = \text{ER} \times L \times B \times L_b \times c_2 \quad (3)$$

式中,Flux为污染物挥发通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; L为地铁站沿行驶方向的长度, m; c_2 为室内空气中污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 其余符号参见表1。

一般认为VOCs主要在浓度梯度的作用下通过分子扩散作用穿越混凝土底板或墙壁,因此可根据

费克扩散定律计算VOCs的挥发通量^[5,17,18],如式(4)所示。

$$\text{Flux} = D_s^{\text{eff}} \times \frac{c_1 - c_2}{L_{\text{cr}}} \quad (4)$$

$$D_s^{\text{eff}} = D_a \times \frac{\theta_{\text{as}}^{3.33}}{\theta_{\text{t}}^2} + \frac{D_w}{H} \times \frac{\theta_{\text{ws}}^{3.33}}{\theta_{\text{t}}^2} \quad (5)$$

式中, c_1 为底板下土壤气中污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; D_s^{eff} 为VOCs在土壤中的有效扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 其余符号参见表1。

对于底板下土壤气中污染物浓度 c_1 的计算,当仅有污染土壤时,可通过三相平衡计算^[5,16,21],如式(6)~(7)所示。

$$c_{1s} = c_s \times \frac{H \times \rho}{\theta_{\text{ws}} + K_s \times \rho + H \times \theta_{\text{as}}} \quad (6)$$

$$K_s = K_{\text{oc}} \times f_{\text{oc}} \quad (7)$$

式中, c_{1s} 为仅存在土壤污染时土壤气中VOCs的浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 其余符号参见表1。

当存在污染地下水时,采用式(8)计算地下水上层非饱和土壤层土壤气中来自地下水中的污染物浓度。

$$c_{1w} = c_w \times H \quad (8)$$

式中, c_{1w} 为仅存在地下水污染时土壤气中VOCs的浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 其余符号参见表1。

联立式(3)~(8),可求解地铁站室内空气中污染物的浓度,如式(9)~(10)所示。其中,式(9)用于计算土壤污染进入室内空气中污染物的浓度,式(10)用于计算地下水污染进入室内空气中污染物的浓度。

$$c_{2s} = c_s \times \frac{H \times \rho}{\theta_{\text{ws}} + K_s \times \rho + H \times \theta_{\text{as}}} \times$$

$$\frac{D_s^{\text{eff}} \times (B + 2h) \times \eta}{D_s^{\text{eff}} \times \eta \times (B + 2h) + L_{\text{crack}} \times \text{ER} \times B \times L_b} \quad (9)$$

$$c_{2w} = c_w \times H \times \frac{D_s^{\text{eff}} \times (B + 2h) \times \eta}{D_s^{\text{eff}} \times \eta \times (B + 2h) + L_{\text{cr}} \times \text{ER} \times B \times L_b} \quad (10)$$

式中 c_{1s} 、 c_{2w} 分别为自污染土壤及地下水中进入室内的污染物浓度 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 其余符号参见表 1.

依据受体的暴露特性及剂量-效应关系,可建立地铁站内工作人员所受致癌风险与土壤或地下水中污染物的关系,如式(11)~(12)所示.其中,式(11)用于计算土壤污染导致的致癌风险 IR3,式(12)用于计算地下水污染导致的致癌风险 IR4.

$$\text{IR3} = c_{2s} \times \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times \text{URF}}{\text{AT}_c \times 365}$$

$$= c_s \times \frac{H \times \rho}{\theta_{\text{ws}} + K_s \times \rho + H \times \theta_{\text{as}}} \times \frac{D_s^{\text{eff}} \times (B + 2h) \times \eta}{D_s^{\text{eff}} \times \eta \times (B + 2h) + L_{\text{cr}} \times \text{ER} \times B \times L_b} \times \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times \text{URF}}{\text{AT}_c \times 365} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{IR4} &= c_{2w} \times \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times \text{URF}}{\text{AT}_c \times 365} \\ &= c_w \times H \times \frac{D_s^{\text{eff}} \times (B + 2h) \times \eta}{D_s^{\text{eff}} \times \eta \times (B + 2h) + L_{\text{cr}} \times \text{ER} \times B \times L_b} \times \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times \text{URF}}{\text{AT}_c \times 365} \quad (12) \end{aligned}$$

以上模型计算所需参数的定义及取值如表 1 所示.

表 1 参数定义及取值
Table 1 Definition of parameters and assigned values

参数	定义	取值	来源	参数	定义	取值	来源
B	地铁空间垂直于行驶方向的宽度 μm	15.6	a ¹⁾	θ_{as}	土壤中空气含量,无量纲	0.26	实测
h	与墙壁直接接触的污染土厚度 μm	8	a ¹⁾	θ_t	土壤总孔隙度,无量纲	0.32	实测
L_{cr}	封闭空间地下基础或墙的厚度 μm	0.8	a ¹⁾	K_s	土壤-水吸附系数,无量纲	3.86×10^{-3}	b ²⁾
L_b	地铁室内空间高度 μm	13.3	a ¹⁾	f_{oc}	土壤有机碳含量,无量纲	2.22×10^{-4}	实测
D_a	物质在空气中的扩散系数 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	1.04×10^{-5}	[13]	K_{oc}	碳水分配系数,无量纲	17.4	[13]
D_w	物质在水中的扩散系数 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	9.9×10^{-10}	[13]	η	基础裂缝比例,无量纲	0.01	[11]
ER	地铁站室内空气换气率 s^{-1}	1.3×10^{-4}	[22]	EF	暴露频率 $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	300	[11]
H	亨利常数,无量纲	5.32×10^{-2}	[13]	ED	暴露周期 a	25	[11]
ρ	土壤密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.59×10^3	实测	AT _c	平均致癌作用时间 a	70	[11]
θ_{ws}	土壤中水分含量,无量纲	0.06	实测	URF	单位致癌因子 $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$	2.6×10^{-5}	[11]
c_s	土壤污染物浓度 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	实测	—	c_w	地下水污染物浓度 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	实测	—

1) a 表示该参数主要来源该地铁站结构设计资料 b 表示该参数为过程参数,通过文中相应公式计算获得

3.2 评估结果

根据 3.1 节中推导的评估模型,可计算地铁站室内工作人员因呼吸含 1,2-二氯乙烷的空气而导致的致癌风险.其中, c_s 以所有样品检测浓度的 95% 置信上限浓度代替^[23],即 $47.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.由于地下水样品量较少,本研究将地下水样品检测的最大浓度 $18\,500 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 作为其代表浓度 c_w 代入模型进行风险计算.同时,以目前普遍接受的 1×10^{-6} 作为最大可接受风险^[11,13,24,25],可利用模型(11)、(12)反推该场地土壤及地下水中 1,2-二氯乙烷的最大允许浓度(即土壤及地下水的修复目标).为比较采用基于通用污染概念模型建立的风险评估公式与基于目标地铁站特定污染概念模型建立的风险评估公式计算结果的差异,本研究同时也采用式(1)、(2)对该场地风险与修复目标进行了计算,相应参数的取值如表 1 所示.评估结果如表 2 所示.

由表 2 可知,无论采用基于通用概念模型还是

表 2 评估结果¹⁾

Table 2 Assessment results				
介质	风险 1	风险 2	修复目标 1 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	修复目标 2 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
土壤	2.9×10^{-4}	6.0×10^{-4}	0.16	0.08
地下水	1.3×10^{-5}	2×10^{-5}	1.4	0.9

1) 风险 1 及修复目标 1 采用现有导则中的计算公式计算,风险 2 及修复目标 2 采用本研究推导模型计算

目标地铁站特定污染概念模型推导的风险计算公式.结果均显示该区域土壤及地下水中 1,2-二氯乙烷污染对地铁站内未来工作人员造成的致癌风险将高于 1×10^{-6} .表明,如不采取相应污染物消除或风险控制措施,地铁站周围土壤及地下水 1,2-二氯乙烷污染将对未来地铁站管理人员造成不可接受的致癌风险.其次,比较发现,采用基于通用概念模型建立的风险计算公式计算的土壤及地下水风险结果分别低于基于目标地铁站特定污染概念模型建立的风

险计算公式的计算结果,采用前者反推的修复目标分别高于后者2倍、1.5倍。其主要原因在于前者假设污染土壤及地下水仅位于未来建筑物的垂直下方,污染物只通过建筑底板进入室内。但是,由于地铁站规划为一个全地下式结构,其周围大部分区域均被污染土壤及地下水包围,污染物不仅可通过建筑底板进入室内,也可通过建筑墙壁进入室内。因此,本研究中,直接套用前者相当于低估了污染物进入室内空间的量,最终导致评估结果偏低。

4 结论

分别直接套用现有评估技术导则中基于通用VOCs污染场地概念模型建立的风险计算公式及采用本研究基于目标地铁站特定污染概念模型建立的风险计算公式计算地铁站土壤及地下水1,2-二氯乙烷污染对站内工作人员产生的致癌健康风险均超过目前可接受的 1×10^{-6} 。而且,前者土壤计算结果低于后者约2倍,地下水结果低于后者约1.5倍。可见,风险评估过程中需根据具体场地的污染概念模型对风险计算公式进行相应修正,避免直接套用导则中的公式低估人群的实际健康风险。

参考文献:

- [1] 孙俊,陈晓东,常文越,等. 搬迁企业环境遗留问题分析及修复对策研究[J]. 环境保护科学, 2003, 29: 40-42.
- [2] 张军. 某污染企业搬迁替代方案的优化选择[J]. 中国公共卫生, 2005, 21(5): 600-601.
- [3] 郭观林,王世杰,施烈焰,等. 某废弃化工场地VOC/SVOC污染土壤健康风险分析[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 397-402.
- [4] 余世清,唐伟,卢滨. 某农药厂废弃场地六六六和滴滴涕污染分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2645-2653.
- [5] 武晓峰,谢磊. Johnson & Ettinger模型和Volasoil模型在污染物室内挥发风险评价中的应用和比较[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 984-991.
- [6] 谌宏伟,陈鸿汉,刘菲,等. 污染场地健康风险评价的实例研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 230-235.
- [7] US EPA. Volatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) [S]. Washington DC: US EPA, 2006.
- [8] 武晓峰,谢磊,赵洪阳. 土壤及地下水污染点不同暴露途径的健康风险比较[J]. 中国环境科学, 2012, 32(2): 345-350.
- [9] Fan C H, Wang G S, Chen Y C, et al. Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in groundwater in Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(7): 2165-2174.
- [10] USEPA. User's guild for evaluating subsurface vapor intrusion into buildings [M]. Massachusetts: Industrial Economics Incorporated, 2004.
- [11] 姜林,李立新,黄海林,等. DB11T-656-2009 场地环境评价导则[S]. 北京: 北京市质量监督局, 2009.
- [12] 姜林,龚宇阳,张丽娜,等. 场地与生产设施环境风险评价及修复验收手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [13] 环境保护部. 污染场地风险评估技术导则(征求意见稿)[R]. 北京: 环境保护部, 2009.
- [14] ASTM. Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2010.
- [15] 陈炼钢,武晓峰. 地下水中VOCs挥发因子模型的研究[J]. 环境化学, 2007, 26(6): 810-814.
- [16] 姜林,钟茂生,夏天翔,等. 基于土壤气中实测苯浓度的健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 717-723.
- [17] 陈炼钢. 土壤地下水污染治理健康风险分析系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [18] 赵洪阳. 土壤地下水污染现场健康风险评价技术对比研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [19] Paul F S. Influence of bio-attenuation on vapor intrusion into buildings-model simulations using semi-analytical one-dimensional model [R]. New Jersey: New Jersey Department of Environmental Protection, 2006. 9-10.
- [20] GSI. Bio-Vapor-A 1-D vapor intrusion model with oxygen-limited aerobic biodegradation [R]. Texas: GSI Environmental Inc., 2010.
- [21] Park H S. A method for assessing soil vapor intrusion from petroleum release sites: multi-phase/multi-fraction partitioning [J]. Global Nest, 1999, 1(3): 195-204.
- [22] 施仲衡,张弥,王新杰,等. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. 405-406.
- [23] USEPA. Calculation of upper confidence limits for exposure point concentrations at hazardous waste sites [S]. Washington DC: OSWER, 2002. 6-10.
- [24] Friebe E, Nadebaum P. Health screening levels for petroleum hydrocarbons in soil and groundwater part 1: technical development document [M]. South Australia: CRC-CARE (Cooperative Research Centre for Contamination Assessment and Remediation of the Environment), 2011. 59.
- [25] DEFRA. Assessing risk from contaminated land-a proportionate approach[S]. London: Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2006.