

加油站周边地下水1,2-二氯乙烷污染特征及风险评价

李 杰*

华北水利水电大学生态环境学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年12月30日; 录用日期: 2026年1月28日; 发布日期: 2026年2月5日

摘要

加油站作为城市能源供应中的重要基础设施, 在保障交通运行和居民生产生活方面发挥着不可替代的作用。一旦发生渗漏, 容易对周边地下水环境造成持续性污染, 进而对人体健康构成潜在风险。本研究以1,2-二氯乙烷为研究对象, 共设立9个采样点, 使用气相色谱法进行测定。并对地下水1,2-二氯乙烷的致癌风险和非致癌风险进行评价。结果显示: (1) 在研究区内地下水样本中检出率较高, 超标率达到88.89%, 浓度最高可达3.202 mg/L, 表面地下水已受到严重污染。(2) 最大值和95% UCL两种浓度所算得的致癌风险值与非致癌危害商, 均远远大于可接受风险水平。表明1,2-二氯乙烷对人体存在较大风险。本研究为加油站地下水环境风险管控和公众健康保护提供科学依据。

关键词

加油站, 地下水, 1,2-二氯乙烷, 健康风险评价

Pollution Characteristics and Risk Assessment of 1,2-Dichloroethane in Groundwater around Gas Stations

Jie Li*

School of Ecology and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: December 30, 2025; accepted: January 28, 2026; published: February 5, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李杰. 加油站周边地下水1,2-二氯乙烷污染特征及风险评价[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(2): 83-93.
DOI: 10.12677/aep.2026.162010

Abstract

Gas stations are important infrastructures in urban energy supply systems and play a vital role in supporting transportation and residents' daily activities. Leakage events may cause persistent groundwater contamination and pose potential risks to human health. In this study, 1,2-dichloroethane was selected as the target contaminant. Groundwater samples were collected from nine monitoring sites, and the concentrations of 1,2-dichloroethane were determined using gas chromatography. Carcinogenic and non-carcinogenic health risks were evaluated. The results showed that (1) 1,2-dichloroethane was widely detected in groundwater, with an exceedance rate of 88.89% and a maximum concentration of 3.202 mg/L, indicating severe contamination of groundwater; (2) the carcinogenic risk values and non-carcinogenic hazard quotients calculated using both the maximum concentration and the 95% upper confidence limit are far above the acceptable risk thresholds, indicating that 1,2-dichloroethane poses a substantial risk to human health. This study provides a scientific basis for groundwater environmental risk management at gas stations and for the protection of public health.

Keywords

Gas Station, Groundwater, 1,2-Dichloroethane, Health Risk Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地下水是重要的饮用水资源和生态环境要素，对于确保城市供水安全、维护人民身体健康有着不可取代的重要作用。但是由于城市功能用地集约化程度高，含有污染源风险的场所和生活区长时间并存，导致地下水环境安全形势严重恶化。加油站作为日常生活生产的重要场所之一，存在着风险高的地下油品储罐及其管道及设施等长期以来易产生渗漏情况，一旦流入水体就会造成较长时间的危害，不易及时被发现且难以得到解决，势必形成长期性的环境隐患[1]。1,2-二氯乙烷作为一种典型的 VOCs，具有较强的挥发和迁移特性，在地下水环境中具有较高的检出频率，对环境治理工作构成重大挑战，并可能引发潜在的健康风险[2]。现有研究证实，1,2-二氯乙烷不仅显示出显著的毒性效应，还经国际癌症研究机构(IARC)明确归类为可能引发癌症的物质。因此，我们系统分析了研究区地下水 1,2-二氯乙烷的污染特征及健康风险评价[3]。

目前，国内外关于加油站环境污染的研究多集中于 BTEX 等典型石油类污染物，对 1,2-二氯乙烷等高风险 VOCs 的系统关注仍显不足，尤其是在实际场地条件下开展的案例研究仍有待加强。本文以某加油站周边地下水为研究对象，选取 1,2-二氯乙烷作为目标污染物，通过现场采样与分析，系统分析其水质污染情况，并基于 USEPA 健康风险评价模型对地下水 1,2-二氯乙烷进行健康风险评价，为加油站污染场地地下水风险识别、分级管控及后续修复策略制定提供科学支撑。

2. 方法

2.1. 某加油站概况

研究区周边交通条件较为便利，靠近城市主干道路，车辆通行频繁，人流与物流活动强度较高。加油站周围分布有居民小区、学校及沿街商铺等居住与商业用地，人口相对密集，地下水一旦受到污染，

可能通过饮用水或其他暴露途径对周边人群健康产生潜在影响，影响范围主要集中在地下水径流下游及人口聚集区域。加油站东侧邻近河流，地表水与地下水联系较为密切，对污染物的迁移具有一定促进作用。地下水总体沿地势自西南向东北，局部受开采活动影响，流场发生偏转，研究区地下水主要呈单一方向径流特征。加油站目前处于正常运营状态，站内设置有地下储油系统，包括汽油罐和柴油罐，并配套多台加油机及加油枪，地面均为硬化处理。作为长期运行的成品油储运与销售场所，其潜在渗漏风险对周边地下水环境具有一定影响。

2.2. 点位布设

为准确评估加油站周边地下水 1,2-二氯乙烷的污染状况，综合分析了加油站平面布局、区域地质条件及水文地质流场特征。参照《地下水环境状况调查评价工作指南》的布设要求，本研究共设置 9 个监测点位。一个对照点位设在地下水流向上游 35 m 处；在储油罐区、输油管线及地块角落边缘共布设 6 个重点监测点，以表征潜在污染源的影响；2 个扩散监测点分别位于地下水流向下游的 30 m、50 m 处。各监测井按深度梯度采集表层(0 m~6 m)、中层(6 m~12 m)和深层(1 m~18 m)地下水样品。本次调查采用一次性采样方式，采样时间为 2023 年 9 月，研究区地下水水位埋深约为 3.2 m~4.3 m，两天内完成所有点位的采样。采样前严格开展洗井操作。为确保检测数据的准确性和可重复性，本研究在采样、保存和检测过程进行一系列质控措施，设置方法空白样和 4 个平行样，平行样的相对标准偏差在 1.29%~3.25% 之间。水样采集后密封于玻璃容器中并低温保存，随后及时送至实验室进行分析。

2.3. 样品检测与分析

2.3.1. 样品检测方法

1,2-二氯乙烷的测定方法为液液萃取-气相色谱法[4] [5]。测定前需要进行预处理，取 100 mL 待测水样置于分液漏斗中，加入 10 mL 经纯化的正己烷，振荡萃取 5 min 收集有机相。上述萃取过程重复两次，合并全部有机相以提高回收率，并加入无水硫酸钠进行脱水处理，净化后的萃取液用于仪器分析。气相色谱测定选用 HP-5 毛细管柱进行分离，载气流速控制在 1.0 mL/min，进样口温度和检测器温度分别设定为 200℃ 和 300℃，柱温程序设为初始 40℃ 保持 5 min，以 10℃/min 升温至 150℃ 并保持 2 min。采用外标法进行定量。1,2-二氯乙烷属于强挥发性有机物，在样品转移和萃取过程中可能存在一定的挥发损失风险。因此本研究在样品采集与前处理过程中采取快速密封、低温保存和缩短操作时间等措施。尽量减小挥发损失的风险。该方法测得 1,2-二氯乙烷的加标回收率为 91.93%。

2.3.2. 地下水环境质量评价标准

本研究以《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017) [6] 中 III 类(30.0 μg/L)限值作为评价标准，对各采样点地下水中的 1,2-二氯乙烷进行比较分析。

2.3.3. 健康风险评价方法

本研究采用美国环境保护署(USEPA)的健康风险评价“四步法”对研究区地下水中的污染物对人体健康的潜在风险进行系统评估。为评估地下水中的污染物浓度取值对健康风险评价结果的影响，本研究在采用最大浓度值进行风险评价的基础上，引入 95% 置信水平下的上置信限浓度作为替代浓度参数，对不同浓度取值下的健康风险结果进行对比分析。

3. 结果与分析

3.1. 检测结果分析

1,2-二氯乙烷在不同深度中的浓度分布如图 1 所示。W1 点位位于地下水流向上游，检测浓度未检出，

另外几个点位均有检出。比较图(a)~图(c)的浓度可以看出, 表层地下水(0 m~6 m)中 1,2-DCA 最高, 浓度处于 0.067~3.202 mg/L 范围, 反映出加油站渗漏对浅层含水层的直接影响。该水层靠近污染源, 污染物易通过土壤渗透进入含水层。1,2-二氯乙烷属于典型的重质非水相液体, 密度大于水, 因此会由于重力作用出现垂直迁移的现象, 因此表层并未表现出明显富集特征。中层地下水(6 m~12 m)中 1,2-DCA 浓度整体比表层较低。该水层为垂向迁移过程中的主要通道。在重力驱动下, 1,2-DCA 可穿过浅层含水层, 在中层含水层发生短暂的滞留与溶解, 从而导致该层地下水中的污染物维持在较高的浓度。深层地下水(12 m~18 m)中仍可检测到 1,2-DCA, 且浓度与中层差值不是很大, 表明该污染物已迁移到浅层、中层含水层并进入深层含水层。这一现象与 1,2-DCA 在地下水中的垂向迁移能力密切相关。同时, 表明该加油站的泄露发生在很长时间之前, 可能是多年的低强度泄露导致。

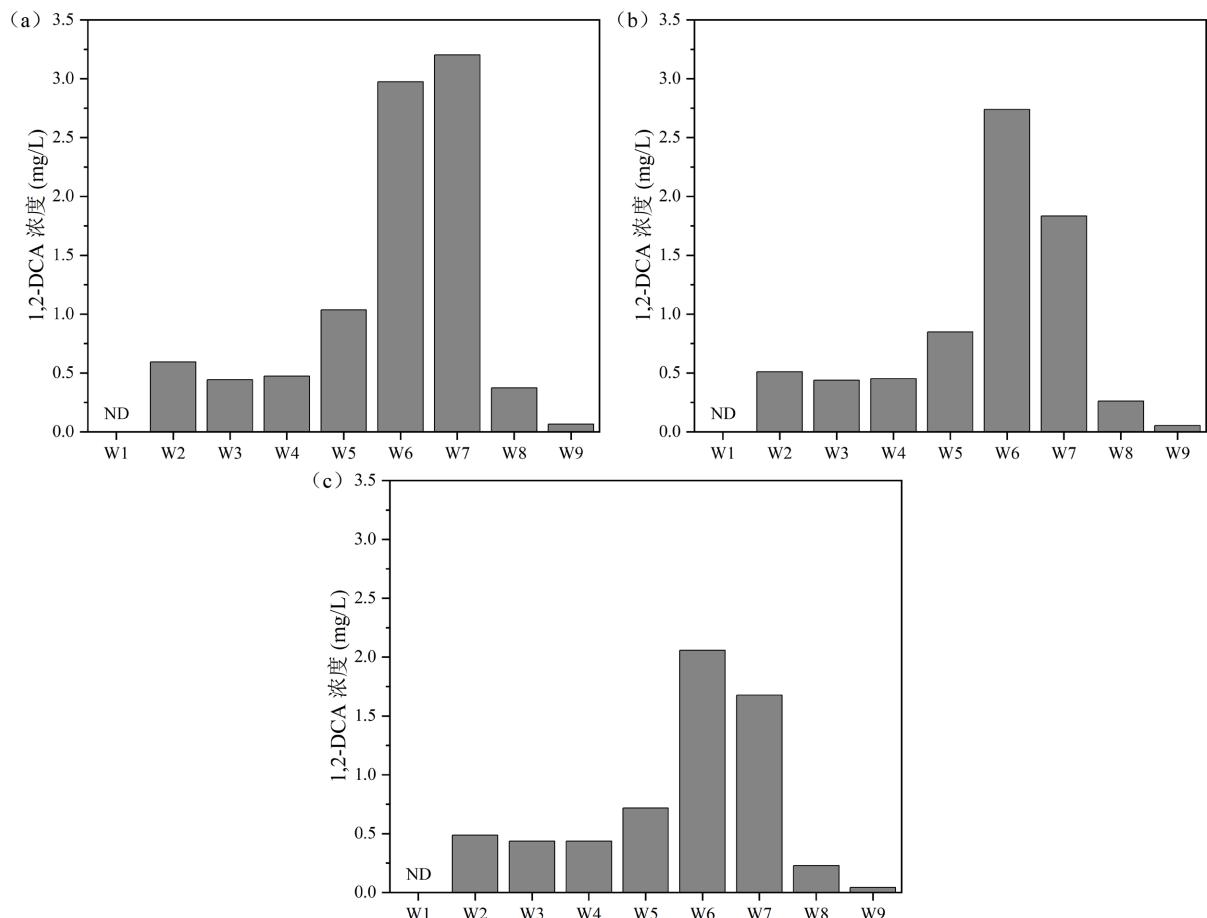


Figure 1. Concentration distribution of 1,2-dichloroethane in groundwater at different depths: (a) 0 m~6 m; (b) 6 m~12 m; (c) 12 m~18 m (Note: ND indicates concentrations below the method detection limit)

图 1. 地下水中 1,2-二氯乙烷在不同深度的浓度分布: (a) 0 m~6 m; (b) 6 m~12 m; (c) 12 m~18 m (注: ND 表示浓度低于方法检出限)

污染情况汇总如表 1 所示。仅有 3 个样品的检测值低于标准限值, 其余样品中 1,2-二氯乙烷浓度均不同程度超出 III 类标准要求, 整体超标比例为 88.89%。其中, 最高超标倍数达到 106.7。赵丽等人对 12 家加油站中 1,2-二氯乙烷进行调查, 研究结果显示检出浓度为 1.7~30.9 $\mu\text{g/L}$ [7]; 在北卡罗来纳州的一个研究中, 共采集地下水样品 80 个, 测得 1,2-二氯乙烷最高浓度也仅有 106.7 $\mu\text{g/L}$ [8]。相比之下, 本研究

区的浓度显著偏高,表明该区域地下水受1,2-二氯乙烷污染程度较高,潜在环境风险不容忽视。

Table 1. Pollution status of 1,2-dichloroethane in groundwater

表 1. 地下水中1,2-二氯乙烷污染情况

污染物名称	检出限 (mg/L)	筛选值 (mg/L)	样品数 (个)	污染物浓度(mg/L)			95% UCL (mg/L)	超标率 (%)
				最大值	最小值	平均值		
1,2-二氯乙烷	0.0004	0.03	27	3.202	0.0425	0.932	1.265	88.89%

3.2. 1,2-二氯乙烷的潜在污染来源分析

1,2-二氯乙烷的浓度在W6和W7点位最高,由于这两个点位位于储油罐区和输油管线旁边,表明污染可能与加油站内部设施运行状况有关。结合加油站长期运营背景及地下储油系统工艺,推测可能由于运行年限较长,1,2-DCA的管线受腐蚀、老化等因素发生泄漏,随成品油或相关溶剂进入地下水。一旦发生缓慢、长期的低强度泄漏,1,2-DCA可凭借其较强的迁移性和稳定性在地下水巾持续存在。本研究未同步开展BTEX或MTBE等典型石油类污染物的监测,在一定程度上限制了对污染源类型的共源污染分析。后续研究中,将结合多种石油类特征污染物的协同监测,通过相关性分析进一步提高污染源解析的准确性。

3.3. 风险评估

3.3.1. 暴露途径

暴露途径描述了地下水巾污染物经迁移、转化后到达敏感受体,并以饮用、皮肤接触等形式被人体或其他受体吸收的具体方式。其核心在于在特定暴露情景下,对污染物经不同路径进入人体的机制及暴露强度进行定量表征。暴露途径的确定主要受污染源特性、地块功能属性以及受体人群活动行为特征等因素的共同影响。1,2-二氯乙烷属于典型挥发性有机物,具有一定水溶性和较强挥发性,在地下水环境中可通过多种途径迁移并进入人体。结合研究地块为加油站周边区域的实际利用现状,地下水巾1,2-二氯乙烷可能通过饮用地下水摄入、皮肤接触地下水以及由地下水挥发进入室外空气和室内空气吸入等途径对人体健康产生潜在危害。因此,本研究选取饮用摄入、皮肤接触、室外空气吸入和室内空气吸入四种暴露途径,对地下水巾1,2-二氯乙烷的人体暴露水平进行系统评估[9]。潜在暴露途径如图2所示。

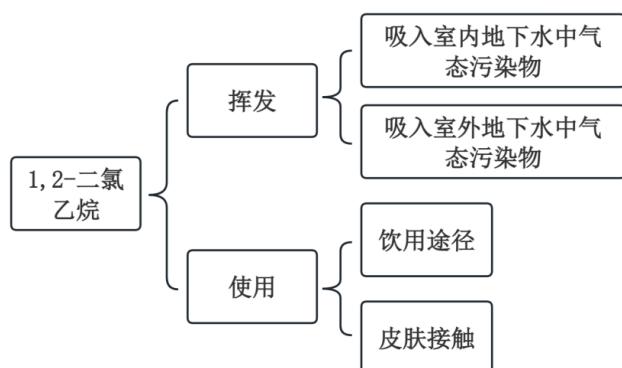


Figure 2. Potential exposure pathways of groundwater contaminants in the study area

图 2. 研究区地下水污染物潜在暴露途径

3.3.2. 暴露量计算

(1) 室外空气吸入途径

考虑成人暴露所产生的终生风险评估。由于室外空气吸入的暴露量采用公式(1~10)进行计算:

$$IOVER_{ca3} = VF_{gwoa} \times \frac{DAIR_a \times EFOa \times EDa}{BWa \times ATca} \quad (1)$$

$$IOVER_{nc3} = VF_{gwoa} \times \frac{DAIR_a \times EFOa \times EDa}{BWa \times ATnc} \quad (2)$$

$$VF_{gwoa} = \frac{1}{\left(1 + \frac{DF_{oa} \times L_{gw}}{D_{gws}^{eff}}\right) \times \frac{1}{H'}} \times 10^3 \quad (3)$$

$$DF_{oa} = \frac{U_{air} \times W \times \delta_{air}}{A} \quad (4)$$

$$D_{gws}^{eff} = \frac{L_{gw}}{\frac{h_{cap}}{D_{cap}^{eff}} + \frac{h_v}{D_s^{eff}}} \quad (5)$$

$$D_{cap}^{eff} = D_a \times \frac{\theta_{acap}^{3.33}}{\left(\theta_{acap} + \theta_{wcap}\right)^2} + D_w \times \frac{\theta_{acap}^{3.33}}{H' \times \left(\theta_{acap} + \theta_{wcap}\right)^2} \quad (6)$$

$$D_s^{eff} = D_a \times \frac{\theta_{as}^{3.33}}{\theta^2} + D_w \times \frac{\theta_{ws}^{3.33}}{H' \times \theta^2} \quad (7)$$

$$\theta = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (8)$$

$$\theta_{ws} = \frac{\rho_b \times \rho_{ws}}{\rho_w} \quad (9)$$

$$\theta_{as} = \theta - \theta_{ws} \quad (10)$$

式中, $IOVER_{ca3}$ 、 $IOVER_{nc3}$ ——因室外空气吸入的地下水暴露量(致癌效应、非致癌效应), $L \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; VF_{gwoa} ——扩散系数, $L \cdot m^{-3}$; DF_{oa} ——室外气态污染物的扩散因子, $(g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}) / (g \cdot cm^{-3})$; D_{gws}^{eff} ——地下水到土壤的扩散系数, $cm^2 \cdot s^{-1}$; D_{cap}^{eff} ——毛细管层中气态污染物的扩散系数, $cm^2 \cdot s^{-1}$; D_s^{eff} ——土壤中气态污染物的扩散系数, $cm^2 \cdot s^{-1}$; θ 、 θ_{ws} 、 θ_{as} ——土壤中总孔隙、孔隙水、孔隙空气体积比, 无量纲。

(2) 室内空气吸入途径

考虑成人暴露所产生的终生风险评估。由于室内空气吸入的暴露量采用公式(11~15)进行计算:

$$IIVER_{ca2} = VF_{gwia} \times \frac{DAIR_a \times EFla \times EDa}{BWa \times ATca} \quad (11)$$

$$IIVER_{nc2} = VF_{gwia} \times \frac{DAIR_a \times EFla \times EDa}{BWa \times ATnc} \quad (12)$$

$$VF_{gwia} = \frac{1}{\frac{1}{H'} \times \left(1 + \frac{D_{gws}^{eff}}{DF_{ia} \times L_{gw}} + \frac{D_{gws}^{eff} \times L_{crack}}{D_{crack}^{eff} \times L_{gw} \times \eta}\right) \times \frac{DF_{ia} \times L_{gw}}{D_{gws}^{eff}}} \times 10^3 \quad (13)$$

$$DF_{ia} = L_B \times ER \times \frac{1}{86400} \quad (14)$$

$$D_{crack}^{eff} = D_a \times \frac{\theta_{acrack}^{3.33}}{(\theta_{acrack} + \theta_{wcrack})^2} + D_w \times \frac{\theta_{wcrack}^{3.33}}{H' \times (\theta_{acrack} + \theta_{wcrack})^2} \quad (15)$$

式中, $IWER_{ca2}$ 、 $IWER_{nc2}$ ——因室内空气吸入的地下水暴露量(致癌效应、非致癌效应), $L \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; VF_{gwia} ——扩散系数, $L \cdot m^{-3}$; DF_{ia} ——室内气态污染物的扩散因子, $(g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1})/(g \cdot cm^{-3})$; D_{crack}^{eff} ——地基与墙体裂隙中的有效扩散系数, $cm^2 \cdot s^{-1}$ 。

(3) 皮肤接触地下水途径

考虑成人暴露所产生的终生风险评估。由于皮肤直接接触地下水所产生的暴露量采用公式(16~18)进行计算:

$$IDGWER_{ca} = \frac{SAE_a \times EF_a \times ED_a \times E_v \times DA_{ea}}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (16)$$

$$IDGWER_{nc} = \frac{SAE_a \times EF_a \times ED_a \times E_v \times DA_{ea}}{BW_a \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (17)$$

$$DA_{ea} = K_p \times C_{gw} \times t_a \times 10^{-3} \quad (18)$$

式中, $IDGWER_{ca}$ 、 $IDGWER_{nc}$ ——因皮肤接触途径的地下水暴露剂量(致癌效应、非致癌效应), $L \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; DA_{ea} ——皮肤暴露的吸收剂量, $mg \cdot cm^{-2}$ 。

(4) 饮用摄入地下水途径

考虑成人暴露所产生的终生风险评估。由于直接饮用摄入地下水所产生的暴露量采用公式(19~20)计算:

$$CGWER_{ca} = \frac{GWCR_a \times EF_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \quad (19)$$

$$CGWER_{nc} = \frac{GWCR_a \times EF_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{nc}} \quad (20)$$

式中, $CGWER_{ca}$ 、 $CGWER_{nc}$ ——饮用摄入地下水途径暴露量(致癌效应、非致癌效应), $L \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ 。

各参数数值见表 2、表 3。

Table 2. Exposure parameters for health risk assessment

表 2. 健康风险评价暴露参数

参数名称	符号	单位	取值
成人暴露期	EDa	a	24
成人暴露频率	EFa	$d \cdot a^{-1}$	350
成人平均体重	BWa	kg	65.5
致癌效应平均时间	ATca	d	27,740
非致癌效应平均时间	ATnc	d	2190
每日皮肤接触事件频率	Ev	$次 \cdot d^{-1}$	1
成人每日空气呼吸量	DAIRa	$m^3 \cdot d^{-1}$	16.4
成人室内暴露频率	EFIa	$d \cdot a^{-1}$	187.5

续表

成人室外暴露频率	EFOa	$d \cdot a^{-1}$	62.5
成人暴露皮肤表面积	SAE _a	cm^2	17,000
皮肤渗透系数	K _p	cm/hr	0.001
成人性经皮肤接触的时间	t_a	h	0.58
成人每日饮水量	GWCR _a	$L \cdot d^{-1}$	1.5

注：BW_a 和 DAIR_a 参数来源于中国人群暴露参数手册(成人卷)，其他参数均来源于 HJ 25.3-2019。

Table 3. Building parameters

表 3. 建筑物参数

名称	符号	单位	取值
地下水埋深	L_{gw}	cm	2100
亨利常数	H'	无量纲	0.0482
混合区大气流速风速	U_{air}	$cm \cdot s^{-1}$	188
混合区高度	δ_{air}	cm	200
污染源区面积	A	cm^2	16,000,000
污染源区宽度	W	cm	4000
地下水土壤交界处毛细管层厚度	h_{cap}	cm	5
非饱和土层厚度	h_y	cm	295
空气中扩散系数	D_a	$cm^2 \cdot s^{-1}$	0.0857
水中扩散系数	D_w	$cm^2 \cdot s^{-1}$	0.000011
毛细管层土壤中孔隙空气体积比	θ_{acap}	无量纲	0.038
毛细管层土壤中孔隙水体积比	θ_{wcap}	无量纲	0.342
土壤颗粒密度	ρ_s	$kg \cdot dm^{-3}$	2.65
土壤容重	ρ_b	$kg \cdot dm^{-3}$	1.5
土壤含水率	ρ_{ws}	$kg \cdot water \cdot kg^{-1}$ 土壤	0.2
水的密度	ρ_w	$kg \cdot dm^{-3}$	1
地基裂隙中空气体积比	θ_{acrack}	无量纲	0.26
地基裂隙中水体积比	θ_{wcrack}	无量纲	0.12
室内地基厚度	L_{crack}	cm	35
空间体积与污染物入渗面积之比	L _B	cm	300
室内空气交换速率	ER	$次 \cdot d^{-1}$	20
地基和墙体裂隙表面积所占面积	η	无量纲	0.0005

注： L_{gw} 、 U_{air} 参数为地块内水文地质勘查中心实测近三年的平均值， H' 来源于美国环保局“化学品性质参数估算工具包”数据，其他参数均来源于 HJ 25.3-2019。

3.4. 风险表征

本次健康风险评价考虑室外空气吸入、室内空气吸入、皮肤接触地下水以及饮用摄入地下水这4种暴露途径下的致癌风险值和非致癌危害商。

3.4.1. 致癌风险评估

4种暴露途径的致癌风险值计算模型如公式(21~25):

$$CR_{iov3} = IOVER_{ca3} \times C_{gw} \times SF_i \quad (21)$$

$$CR_{iiv2} = IIVER_{ca2} \times C_{gw} \times SF_i \quad (22)$$

$$CR_{d_{gw}} = DGWER_{ca} \times SF_d \quad (23)$$

$$CR_{cgw} = CGWER_{ca} \times C_{gw} \times SF_0 \quad (24)$$

$$CR_n = CR_{iov3} + CR_{iiv2} + CR_{d_{gw}} + CR_{cgw} \quad (25)$$

式中, CR_{iov3} 、 CR_{iiv2} 、 $CR_{d_{gw}}$ 、 CR_{cgw} : 分别表示四种暴露途径(室外空气吸入途径、室内空气吸入途径、皮肤接触地下水途径和饮用摄入地下水途径)的致癌风险, 无量纲; C_{gw} : 地下水中污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。
 CR_n : 总致癌风险值, 无量纲。

3.4.2. 非致癌风险评估

4种暴露途径的非致癌危害商计算模型如公式(26~30):

$$HQ_{iov3} = \frac{IOVER_{nc3} \times C_{gw}}{RfD_i \times WAF} \quad (26)$$

$$HQ_{iiv2} = \frac{IIVER_{nc2} \times C_{gw}}{RfD_i \times WAF} \quad (27)$$

$$HQ_{d_{gw}} = \frac{DGWER_{nc}}{RfD_d} \quad (28)$$

$$HQ_{cgw} = \frac{CGWER_{nc} \times C_{gw}}{RfD_o \times WAF} \quad (29)$$

$$HQ = HQ_{iov3} + HQ_{iiv2} + HQ_{d_{gw}} + HQ_{cgw} \quad (30)$$

式中, HQ_{iov3} 、 HQ_{iiv2} 、 $HQ_{d_{gw}}$ 、 HQ_{cgw} : 分别表示四种暴露途径(室外空气吸入途径、室内空气吸入途径、皮肤接触地下水途径和饮用摄入地下水途径)的非致癌危害商, 无量纲; WAF : 分配系数, 取值 0.5。

HQ : 总非致癌危害商, 无量纲。

各参数数值见表 4。

Table 4. Reference dose (RfD) and cancer slope factor (SF)

表 4. 参考剂量(RfD)和致癌斜率因子(SF)

暴露途径	室外空气吸入		室内空气吸入		皮肤接触		饮用摄入	
参数	SF_i $/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	$RfD_i / \text{mg}/\text{kg} \cdot \text{d}$	SF_i $/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	$RfD_i / \text{mg}/\text{kg} \cdot \text{d}$	SF_d $/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	$RfD_d / \text{mg}/\text{kg} \cdot \text{d}$	SF_0 $/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	$RfD_d / \text{mg}/\text{kg} \cdot \text{d}$
1,2-二氯乙烷	1.04×10^{-1}	1.75×10^{-3}	1.04×10^{-1}	1.75×10^{-3}	9.10×10^{-2}	6.00×10^{-3}	9.10×10^{-2}	6.00×10^{-3}

注: 所有参数均是根据 HJ25.3-2019 模型公式推导获得。

3.4.3. 风险表征结果统计

基于健康风险评价模型的定量计算结果(表 5), 系统评估了地块地下水中超标污染物引发的致癌与非致癌健康风险。研究结果表明, 最大值与 95% UCL 所计算的 1,2-二氯乙烷的总致癌风险为 6.71×10^{-3} 和 2.65×10^{-3} , 显著高于 1.0×10^{-4} 的风险控制水平, 表明该区域存在较为严重的致癌风险隐患[10]。同时, 其总非致癌风险商也远超 1 的风险限值, 存在严重的潜在健康风险[11]。以 95% UCL 作为参数进行的健康风险评价, 与最大值情景下的风险判定结果保持一致, 表明该地区很大程度上出现严重的健康风险。

Table 5. Risk assessment results

表 5. 风险评价结果

浓度(mg/L)	类型	饮用摄入途径	皮肤接触途径	室外吸入途径	室内吸入途径	风险表征结果	风险是否可接受
3.202	致癌风险	6.70×10^{-3}	5.26×10^{-11}	4.90×10^{-7}	9.26×10^{-6}	6.71×10^{-3}	不可接受
	非致癌风险	9.33×10^1	1.59×10^{-7}	2.24×10^{-2}	4.24×10^{-1}	9.37×10^1	不可接受
1.265	致癌风险	2.65×10^{-3}	2.08×10^{-11}	1.94×10^{-7}	3.66×10^{-6}	2.65×10^{-3}	不可接受
	非致癌风险	3.69×10^1	6.28×10^{-8}	8.85×10^{-3}	1.68×10^{-1}	3.70×10^1	不可接受

3.4.4. 风险管控与管理建议

通过对地下水中 1,2-二氯乙烷的污染及健康风险进行结果评价, 提出全方位的风险管控措施以有效减小和消解潜在的危害。加强对地下水的精细化管理, 设置警戒标识, 严禁用污染地下水作饮用水或生活用水, 严防因人类直接饮用或间接饮用被污染的地下水而引起的健康风险, 从源头上减少人群接触; 加大对污染较严重区域的排查力度, 对加油站地下储油罐、输油管线以及其相关附属设施进行全面检查, 发现问题及时报批, 处理到位, 严防由于泄漏或渗漏而产生二次污染地下水问题[12]; 同时, 在距离污染源近侧地下水外延的地区建设自动监测井, 密切监控污染物扩散情况, 当确认对环境构成重大威胁后, 应及时予以相对治理措施, 针对重点区域落实重点整治任务, 完善污染识别, 按照场地特点综合采用抽提、原位化学氧化和生物修复等技术方法[13], 可因地制宜使用组合工艺, 加强多技术协同修复, 并科学指导分区分布规划, 如遇不可抗力困难可通过土地利用和空间规划等方式充分考虑并引入地下水污染与健康风险评估结果, 防止居民区位于高危区域内。

4. 结论

该研究重点分析了加油站附近地下水环境质量及可能面临的潜在健康风险问题, 运用地下水环境质量评价指标体系的判断准则——《地下水质量标准》, 对 1,2-二氯乙烷这一挥发性有机物污染物进行评价, 在研究区内地下水样本中检出率较高, 超标率达到 88.89%, 浓度最高可达 3.202 mg/L, 超过 III 类限值 106.7 倍, 地下水受到严重污染, 且可能存在较大风险隐患。采用最大值和 95% UCL 两种浓度取值进行暴露模型的计算, 尽管风险数值存在差异, 但总体风险等级判定结果保持一致, 均远远大于可接受水平。因此, 该研究区地下水中 1,2-二氯乙烷对人群存在健康风险。

参考文献

- [1] 何炜, 孙长虹, 陈大地, 等. 加油站埋地储罐渗漏检测与地下水污染监测[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(S1): 198-202.
- [2] 赵江涛, 周金龙, 李巧, 等. 新疆焉耆盆地平原区地下水有机污染特征初步分析[J]. 环境化学, 2015, 34(8): 1506-1513.
- [3] 郑姝倩, 金崇崇, 蒋辉, 等. PVC 管道胶水中 1,2-二氯乙烷检测及其健康风险评估[J]. 广州化工, 2024, 52(7): 125-

- 127.
- [4] 杨宗政, 刘朔羽, 王浪, 等. 改性玉米芯生物炭负载 nZVI 去除土壤中 1,2-二氯乙烷的研究[J]. 现代化工, 2025, 45(3): 208-214.
 - [5] 杨宗政, 刘朔羽, 唐立娜, 等. 改性生物炭负载纳米零价铁去除水中 1,2-二氯乙烷[J]. 天津科技大学学报, 2025, 40(6): 53-59.
 - [6] 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T14848-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
 - [7] 赵丽, 张韵, 郭劲松, 等. 重庆市加油站周边浅层地下水石油烃污染调查与特征分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 131-136.
 - [8] Hynes, J.M., Beattie, R.E., Blackwood, A.D., Clerkin, T., Gallard-Góngora, J. and Noble, R.T. (2024) Using a Combination of Quantitative Culture, Molecular, and Infrastructure Data to Rank Potential Sources of Fecal Contamination in Town Creek Estuary, North Carolina. *PLoS ONE*, **19**, e0299254.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299254>
 - [9] Yang, M., Fei, Y., Ju, Y., Ma, Z. and Li, H. (2012) Health Risk Assessment of Groundwater Pollution—A Case Study of Typical City in North China Plain. *Journal of Earth Science*, **23**, 335-348.
<https://doi.org/10.1007/s12583-012-0260-7>
 - [10] 赵新建, 邵红霞. 工作场所溶剂型胶粘剂中 1,2-二氯乙烷的健康风险评估[J]. 中国胶粘剂, 2010, 19(6): 60-61.
 - [11] 张雯宇, 高昇, 张晨光, 等. 2021 年内蒙古自治区城市生活饮用水 8 种化学物健康风险评价[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(11): 1283-1289.
 - [12] 贺斐, 周丽漫. 我国地下水污染防治现状与对策分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(14): 103-105.
 - [13] 王琼. 地下水污染监测网设计模拟的优化技术研究[J]. 资源节约与环保, 2024(2): 68-73.