

泰安城区地下水中挥发性和半挥发性有机物特征与健康风险评价^{*}

刘 乾 孟令华[#]

(中化地质矿山总局山东地质勘查院, 山东 泰安 271000)

摘要 为查清泰安城区地下水有机污染现状,对《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中规定的 26 项挥发性和半挥发性有机物组分进行检测,并利用健康风险评价模型对饮水摄入、皮肤接触、洗浴呼吸吸入 3 种暴露途径产生的非致癌风险和致癌风险进行评价。研究结果表明:地下水样品中挥发性和半挥发性有机物检出率为 35.34%,15 项被检出的组分中,1,1,2-三氯乙烷检出率最高,为 16.38%,其次为四氯乙烯(12.07%)和三氯乙烯(6.90%)。与 GB/T 14848—2017 的Ⅲ类水标准限值相比,挥发性和半挥发性有机物总超标率为 5.17%,出现超标的组分为 1,1,2-三氯乙烷、三氯乙烯、苯并(a)芘,最大检出质量浓度分别为 26.90、149.00、0.024 μg/L,为标准值的 5.38、2.13、2.40 倍,表明研究区地下水已受到一定程度的有机污染。挥发性和半挥发性有机物非致癌风险指数介于 1.52×10^{-6} ~1.48,均值为 4.33×10^{-2} ,超限率仅为 0.86%,非致癌风险较低,对人体的健康危害程度小;致癌风险值介于 2.04×10^{-9} ~ 3.37×10^{-5} ,均值为 1.77×10^{-6} ,超限率为 6.90%,风险点呈点状分布,引起致癌风险的组分为 1,1,2-三氯乙烷、三氯甲烷、三氯乙烯,需重点关注和控制。非致癌风险和致癌风险的主要暴露途径均为饮水摄入,皮肤接触和洗浴呼吸吸入产生的风险可以忽略。研究成果对泰安城区地下水供水安全和有机污染防治具有指导意义。

关键词 地下水 挥发性和半挥发性有机物 健康风险评价 泰安

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.02.011

The characteristics and health risk assessment of volatile and semi-volatile organic pollutants in groundwater in Tai'an urban area LIU Qian, MENG Linghua. (Shandong Geological Prospecting Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Tai'an Shandong 271000)

Abstract: In order to investigate the current status of organic pollution in groundwater in Tai'an urban area, 26 volatile and semi-volatile organic pollutant components specified in the "Standard for groundwater quality" (GB/T 14848-2017) were tested, and a health risk assessment model was used to evaluate the non-carcinogenic and carcinogenic risks generated by three exposure pathways (drinking water intake, skin contact, and bathing breathing inhalation). The research results showed that the detection rate of volatile and semi-volatile organic pollutants in groundwater samples was 35.34%. Among the 15 detected components, 1, 1, 2-trichloroethane had the highest detection rate of 16.38%, followed by tetrachloroethylene (12.07%) and trichloroethylene (6.90%). Compared with the limit values of Class Ⅲ water standards in the GB/T 14848-2017, the total exceeding rate of volatile and semi-volatile organic compounds was 5.17%. The components that exceeded the standard were 1, 1, 2-trichloroethane, trichloroethylene and benzo(a)pyrene, with the maximum detected concentrations being 26.90, 149.00 and 0.024 μg/L respectively, which was 5.38, 2.13 and 2.40 times of the standard value, indicating that the groundwater in the study area had been polluted to a certain extent by organic pollutants. The non-carcinogenic risk index for volatile and semi-volatile organic pollutants ranged from 1.52×10^{-6} to 1.48, with a mean of 4.33×10^{-2} and a limit exceeding rate of only 0.86%, indicating a low non-carcinogenic risk and a low degree of harm to human health. The cancer risk value was 2.04×10^{-9} to 3.37×10^{-5} , with a mean of 1.77×10^{-6} and a limit exceeding rate of 6.90%, and the risk points were distributed in spots. The components that caused cancer risk were 1, 1, 2-trichloroethane, trichloromethane and trichloroethylene, which needed to be focused on and controlled. The main exposure pathway of non-carcinogenic risk and carcinogenic risk were through drinking water intake, while the risks arising from skin contact and bathing breathing inhalation could be ignored. The research results have guiding significance for the safety of groundwater supply and the prevention and control of organic pollution in the urban area of Tai'an.

Keywords: groundwater; volatile and semi-volatile organic pollutants; health risk assessment; Tai'an

第一作者:刘 乾,男,1984 年生,硕士,高级工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质等方面的研究。[#] 通讯作者。
^{*} 山东省泰安市财政项目(No.SDGP370900202002000094、No.SDGP370900202102000047)。

地下水是水资源的主要组成部分,目前全国约有 2/3 的城市仍以地下水为主要供水水源^[1],在城市经济和社会可持续发展中占有重要地位。随着城市现代化工农业的快速发展,工业“三废”、城市生活垃圾的无序排放及农业生产过程中化肥、农药的大量使用,导致地下水污染日益严重^{[2-4],[5]115-117,[6]}。地下水污染物中种类最多的是有机物,据世界卫生组织报道,世界水体中已检出 2 221 种化学物质,其中饮水中有机物达 765 种,包括致癌物 20 种,可疑致癌物 23 种。近年来,随着城市地下水污染防治工作的不断推进,有关城市水资源有机物调查与风险评价的研究越来越受到国内外学者的关注。例如,PARDAKHTI 等^[7]运用美国环境保护署(USEPA)推荐的评价模型对德黑兰地区地下水和地表水中三氯甲烷进行了污染分析和致癌风险评价;贾文娟^[8]对沈阳市地下水饮用水源中挥发性有机物进行风险评价,显示挥发性有机物无非致癌健康风险,致癌健康风险在可接受范围内;刘俊玲等^[9]运用 USEPA 健康风险评价模型对武汉市中心城区饮用水进行风险概率评价,显示武汉市城区饮用水存在一定的有机污染,其中一氯二溴甲烷和三氯甲烷是引起健康风险的主要因子。众多研究成果表明,健康风险评价可以将地下水有机污染问题与人体健康联系起来,以健康风险指数和风险值的量化形式反映地下水中不同有机物对人体健康的影响,对城市地下水有机污染防治具有积极意义。

泰安市位于泰山脚下,城区—旧县一带地下水资源较丰富,是泰安市重要的供水水源地,目前开发利用方式主要包括集中供水水源地开采、农村分散式开采两种方式。地下水系统地层以新生界第四系和古生界寒武系、奥陶系为主,城区北部和西部则为新太古界变质岩及侵入岩,地下水类型主要为第四系孔隙水、岩溶水和基岩裂隙水。自 20 世纪 80 年代以来,随着泰安市社会经济的快速发展,城市用水量不断增加,地下水多年超量开采,导致了城区地下水水质劣化等环境地质问题的不断发生^[10],但目前有关泰安市地下水有机污染特征调查评价的研究鲜见报道。本研究系统采集泰安市地下水样品进行挥发性和半挥发性有机物检测,研究地下水多年超量开采等人类活动影响下,现状地下水有机污染特征,并以 USEPA 推荐的健康风险评价方法为基础,开展人体健康风险评价,为泰安城区地下水供水安全和有机污染防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 水样采集与测试

为掌握地下水有机污染现状,依托“山东省泰安市城区城市地质调查”项目的地下水环境质量调查工作,于 2021 年 1 月和 11 月平水期对研究区地下水进行了系统采样。共采集地下水样品 116 件,采样点相对均匀地分布于整个研究区,其中包括孔隙水 34 件(样品编号 S22~S27、S31~S58,采样点深度 7~24 m)、岩溶水 43 件(样品编号 S11~S21、S88~S119,采样点深度 35~270 m)、基岩裂隙水 39 件(样品编号 S01~S10、S59~S87,采样点深度 23~230 m),各采样点位置见图 1。地下水样品的采集、保存和送检均经过了严格的质量控制,参照《地下水环境监测技术规范》(HJ 164—2020)和《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)执行。

本次样品检测单位为山东省鲁南地质工程勘察院实验测试中心,挥发性和半挥发性有机物检测指标分为 5 类 26 项,均为 GB/T 14848—2017 中规定的指标,其中包括卤代烃类 13 项、氯代苯类 4 项、单环芳烃类 5 项、多环芳烃类 1 项和有机氯农药 3 项,测试仪器为 Agilent 7890B/5977 气相色谱/质谱联用仪。

1.2 健康风险评价方法

本研究以 USEPA 推荐的健康风险评价模型^[11-12]为基础,并参考《地下水污染健康风险评估工作指南》(环办土壤函[2019]770 号),对研究区地下水进行有机污染物健康风险评价。

1.2.1 健康风险评价模型

根据 USEPA 风险评价体系,有机污染物对人体造成的健康风险分非致癌风险和致癌风险两部分。计算公式见式(1)和式(2)。

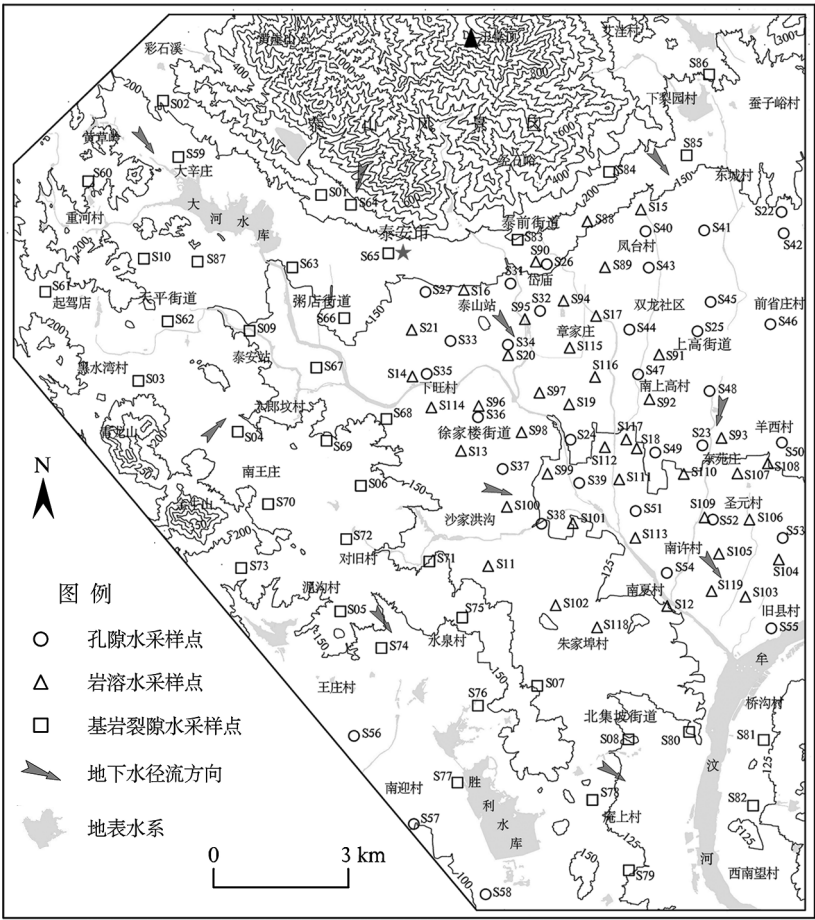
$$H_1 = C/R_{\text{ID}} \quad (1)$$

$$R_{\text{isk}} = C \times S_F \quad (2)$$

式中: H_1 为非致癌风险指数; R_{isk} 为致癌风险值; C 为长期日摄入剂量,mg/(kg·d); R_{ID} 为非致癌参考剂量,mg/(kg·d); S_F 为致癌斜率因子,kg·d/mg。

1.2.2 暴露评价模型

根据当地居民生活习惯,地下水中的有机物进入人体造成健康风险的途径主要包括饮水摄入、皮肤接触、洗浴呼吸吸入 3 种途径。本研究采用荷兰国家公共卫生及环境研究院(RIVM)研发的 CSOIL 模型^{[13]932,[14]39}来计算以上 3 种暴露途径的有机物长期日摄入量,计算公式见式(3)至式(5)。



注:图中标注了等高线,数值单位为 m。

图 1 研究区位置及地下水采样点分布

Fig.1 Location of the research area and distribution of groundwater sampling points

$$C_{\text{饮水}} = \frac{C_W \times T_F \times I_R \times E_F \times E_D \times f}{B_W \times A_T} \tag{3}$$

$$C_{\text{皮肤}} = A_{sd} \times F \times k \times T_E \times (1 - K_{wa}) \times C_W \times f / B_W \tag{4}$$

$$C_{\text{洗浴}} = \frac{0.005 \times C_W \times K_{wa} \times U \times T_E \times E_F \times E_D \times 1\,000}{B_W \times A_T} \tag{5}$$

式中: $C_{\text{饮水}}$ 、 $C_{\text{皮肤}}$ 、 $C_{\text{洗浴}}$ 分别为有机物经饮水摄入、皮肤接触和洗浴呼吸吸入途径的长期日摄入量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; C_W 为地下水中有有机物的实测质量浓度, mg/L ; T_F 为将水高温煮沸后的有机物残留比, 与有机物种类和浓度有关, 三氯乙烯等挥发性有机物取 0.15^{[15]35}, 苯并(a)芘等半挥发性有机物取 0.5^[16]; I_R 为日饮水量, 取 2 L/d^[17]; E_F 为暴露频率, 取 365 d/a; E_D 为暴露延时, 非致癌风险取 30 a, 致癌风险取 70 a^[18]; f 为肠道吸附比率, 取 1; B_W 为人的平均体重, 取 61.8 kg; A_T 为平均暴露时间, 非致癌风险取 10 950 d, 致癌风险取 25 550 d^[19]; A_{sd} 为人体暴露表面积, 取 1.8 m²; F 为皮肤暴露分数,

取 0.4^{[13]933}; k 为有机物皮肤吸附速率, 取 0.005 L/(cm² · h)^[20]; T_E 为洗澡时间, 取 0.25 h/d; K_{wa} 为有机物挥发因子; U 为洗浴中呼吸速率, 取 0.6 m³/h^{[14]40}。

K_{wa} 计算公式见式(6)至式(9)。

$$K_{wa} = \frac{H_T \times K_L \times K_G \times t_f}{H_T \times K_G + R \times T_{sh} \times K_L} \times 6\,000 \tag{6}$$

$$H_T = \frac{\exp[\ln(H' \times R \times T) + 0.024 \times (T_{sh} - T)]}{R \times T_{sh}} \tag{7}$$

$$K_L = K_1 \times \sqrt{44/M} / 3\,600 \tag{8}$$

$$K_G = K_g \times \sqrt{18/M} / 3\,600 \tag{9}$$

式中: H_T 为温度 T 下的亨利常数; K_L 为污染物在水中的质量传输系数, m/s; K_G 为污染物在水蒸气中的质量传输系数, m/s; t_f 为水滴落下的时间, 取 1 s; R 为气体常数, 取 8.314 4 Pa · m³/(mol · K); T_{sh} 为洗浴用水的温度, 取 313 K; H' 为常温下的亨利常数; T 为室内日常温度, 取 283 K; K_1 为液相交

换速率,取 0.2 m/h; K_g 为气相交换速率,取 29.88 m/h^{[13]933}; M 为有机物的分子摩尔质量, g/mol。

1.2.3 健康风险评估参数

饮水摄入途径的非致癌参考剂量和致癌斜率因子采用《地下水污染健康风险评估工作指南》推荐的 USEPA 综合风险信息系统和 USEPA 临时性同行审定毒性数据发布的参数值。皮肤接触途径和洗浴呼吸吸入途径的非致癌参考剂量和致癌斜率因子按照式(10)至式(13)由计算得出,结果见表 1。

$$R_{fDd}=R_{fDo}\times A_{BSgi} \tag{10}$$

$$S_{Fd}=S_{Fo}/A_{BSgi} \tag{11}$$

$$R_{fDi}=R_{fDc}\times D_{AIR}/B_W \tag{12}$$

$$S_{Fi}=I_{UR}\times B_W/D_{AIR} \tag{13}$$

式中: R_{fDd} 、 R_{fDo} 、 R_{fDi} 为皮肤接触、饮水摄入、洗浴呼吸吸入途径非致癌参考剂量, mg/(kg·d); A_{BSgi} 为消化道吸收效率因子,取 1; S_{Fd} 、 S_{Fo} 、 S_{Fi} 分别为皮肤接触、饮水摄入、洗浴呼吸吸入致癌斜率因子, kg·d/mg; R_{fDc} 为呼吸吸入参考质量浓度, mg/m³; D_{AIR} 为每日空气呼吸量,取 14.5 m³/d; I_{UR} 为呼吸吸入单位致癌因子, m³/mg。

2 结果与分析

2.1 地下水挥发性和半挥发性有机物特征分析

对泰安城区 116 件地下水样品中挥发性和半挥发性有机物种类进行统计分析,检出及超标情况见表 2。在 116 件地下水样品中,检出挥发性和半挥发性有机物的样品有 41 件,其中检出 1 项挥发性和半挥发性有机物的样品有 23 件,检出 2 项的有 8 件,检出 3 项的有 4 件,检出 4 项的有 5 件,检出 5

项的有 1 件,地下水样品挥发性和半挥发性有机物总检出率为 35.34%。挥发性和半挥发性有机物共检出 4 类 15 项,其中卤代烃类检出最多(11 项)。15 项检出的挥发性和半挥发性有机物组分中,1,1,2-三氯乙烷检出率最高,达 16.38%,其次为四氯乙烯(12.07%)、三氯乙烯(6.90%)、三氯甲烷(5.17%)、1,2-二氯乙烷(5.17%)、1,2-二氯乙烯(4.31%),其他指标的检出率均低于 4%。

研究区 116 件地下水样品中仅有 6 件样品挥发性和半挥发性有机物超过标准值,总超标率为 5.17%,出现超标的组分为 1,1,2-三氯乙烷、三氯乙烯、苯并(a)芘。其中 1,1,2-三氯乙烷有 4 件样品超标,超标率为 3.45%,最大检出质量浓度为 26.90 μg/L,为标准值的 5.38 倍,位于岱岳区粥店街道大辛庄一带(S59),处于城乡结合部及泮河附近,可能与居民生活垃圾及污水排放有关;三氯乙烯、苯并(a)芘分别有 1 件样品出现超标,最大检出质量浓度分别为 149.00、0.024 μg/L,分别为标准值的 2.13、2.40 倍,分别位于岱岳区粥店街道下旺村(S35)和泰山区上高街道魏家庄村(S25),处于地表水体附近,可能与地表水的渗漏有关。

与山东省淄博市大武水源地地下水^{[14]22}进行相比发现,大武水源地地下水 1,1,2-三氯乙烷超标率为 10.56%,明显高于本区;区内除 1,1,1-三氯乙烷、三溴甲烷、三氯苯及苯并(a)芘外,其余组分的最大检出浓度均明显低于大武水源地地下水。这说明泰安城区地下水虽然已受到一定程度的有机污染,但整体上污染程度相对较轻,仅个别点位的 1,1,2-三氯乙烷、三氯乙烯、苯并(a)芘含量偏高。

表 1 主要挥发性和半挥发性有机物的毒性参数¹⁾
Table 1 Toxicity parameters of main volatile and semi-volatile organic pollutants

组分	非致癌参考剂量/[mg/(kg·d)]			致癌斜率因子/(kg·d/mg)		
	饮水摄入	皮肤接触	洗浴呼吸吸入	饮水摄入	皮肤接触	洗浴呼吸吸入
三氯甲烷	1.00×10 ⁻²	1.00×10 ⁻²	2.30×10 ⁻²	3.10×10 ⁻²	3.10×10 ⁻²	9.80×10 ⁻⁵
四氯化碳	4.00×10 ⁻³	4.00×10 ⁻³	2.35×10 ⁻²	7.00×10 ⁻²	7.00×10 ⁻²	2.56×10 ⁻⁵
1,2-二氯乙烷	6.00×10 ⁻³	6.00×10 ⁻³	1.64×10 ⁻³	9.10×10 ⁻²	9.10×10 ⁻²	1.11×10 ⁻⁴
1,1,1-三氯乙烷	2.00	2.00	1.17	—	—	—
1,1,2-三氯乙烷	4.00×10 ⁻³	4.00×10 ⁻³	4.69×10 ⁻⁵	5.70×10 ⁻²	5.70×10 ⁻²	2.43×10 ⁻¹
1,2-二氯丙烷	4.00×10 ⁻²	4.00×10 ⁻²	9.40×10 ⁻⁴	3.70×10 ⁻²	3.70×10 ⁻²	1.58×10 ⁻⁵
三溴甲烷	2.00×10 ⁻²	2.00×10 ⁻²	—	7.90×10 ⁻³	7.90×10 ⁻³	4.69×10 ⁻⁶
1,1-二氯乙烯	5.00×10 ⁻²	5.00×10 ⁻²	4.69×10 ⁻²	—	—	—
1,2-二氯乙烯	2.00×10 ⁻³	2.00×10 ⁻³	—	—	—	—
三氯乙烯	5.00×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁻⁴	4.69×10 ⁻⁴	4.60×10 ⁻²	4.60×10 ⁻²	1.75×10 ⁻⁵
四氯乙烯	6.00×10 ⁻³	6.00×10 ⁻³	9.39×10 ⁻³	2.10×10 ⁻³	2.10×10 ⁻³	1.11×10 ⁻⁶
甲苯	8.00×10 ⁻²	8.00×10 ⁻²	1.17	—	—	—
苯并(a)芘	3.00×10 ⁻⁴	3.00×10 ⁻⁴	4.69×10 ⁻⁷	1.00	1.00	2.56×10 ⁻³

注:1)“—”表示无相关参数,表 2 和表 3 同。

表 2
 研究区地下水中挥发性和半挥发性有机物的检出及超标情况¹⁾

Table 2 Detection and exceeding standards of volatile and semi-volatile organic pollutants in groundwater in the research area									
种类	组分	样品检 出个数	检出率/ %	检出质量浓度/(μg/L)			标准值/ (μg/L)	超标样 品数	超标率/ %
				最小值	最大值	平均值			
卤代烃	三氯甲烷	6	5.17	1.20	26.20	8.67	60	—	—
	四氯化碳	4	3.45	0.20	0.40	0.28	2	—	—
	1,2-二氯乙烷	6	5.17	0.20	2.00	0.88	30	—	—
	1,1,1-三氯乙烷	1	0.86	0.60	0.60	0.60	2 000	—	—
	1,1,2-三氯乙烷	19	16.38	0.10	26.90	3.94	5	4	3.45
	1,2-二氯丙烷	4	3.45	0.20	0.80	0.50	5	—	—
	三溴甲烷	3	2.59	0.20	0.30	0.23	100	—	—
	1,1-二氯乙烯	2	1.72	0.60	2.00	1.30	30	—	—
	1,2-二氯乙烯	5	4.31	0.10	2.30	0.90	50	—	—
	三氯乙烯	8	6.90	0.10	149.00	20.45	70	1	0.86
	四氯乙烯	14	12.07	0.10	4.00	1.00	40	—	—
	氯代苯	三氯苯	1	0.86	0.40	0.40	20	—	—
单环芳烃	甲苯	1	0.86	0.90	0.90	0.90	700	—	—
	二甲苯	1	0.86	0.80	0.80	0.80	500	—	—
多环芳烃	苯并(a)芘	1	0.86	0.024	0.024	0.024	0.01	1	0.86

注：¹⁾标准值为 GB/T 14848—2017 的Ⅲ类水标准限值；三氯苯包括 1,2,3-三氯苯、1,2,4-三氯苯、1,3,5-三氯苯，二甲苯包括邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯。三氯苯和二甲苯作为多种污染物的集合，缺乏毒性参数。

2.2 健康风险评价

对检出挥发性和半挥发性有机物的 41 件样品，分别计算检出点的非致癌风险指数和致癌风险值，结果见表 3。

在评价非致癌风险时，一般认为当非致癌风险指数≤1 时，非致癌风险低，属于风险可接受范围；而当非致癌风险指数>1 时，则认为对人体产生非致癌效应^[21]；非致癌风险指数越大，对人体健康产生的危害就越大。泰安城区地下水挥发性和半挥发性有机物检出点中，非致癌风险指数介于 1.52×10⁻⁶~1.48，均值为 4.33×10⁻²，仅有 1 个采样点的非致癌风险指数大于 1，非致癌风险超限率仅为 0.86%，引起风险的组分为三氯乙烯，且风险是由饮水摄入途径引起。其余采样点的非致癌风险指数不超过 6.12×10⁻²，总体上看，研究区地下水中的挥发性和半挥发性有机物在 3 种暴露途径下产生的非致癌风险较低，对人体的健康危害程度小，在可接受范围之内。泰安城区非致癌风险指数远低于淄博大武水源地地下水有机物非致癌风险指数(0~36.1，均值 2.15)^[22]，而与同样为旅游城市和历史文化名城的济南市岩溶地下水有机物非致癌总风险指数(0.018 1~0.423 0)^{[15]35}大体相当。

根据《化学物质环境健康风险评估技术指南》(WS/T 777—2021)，选用 1×10⁻⁶作为最大可接受

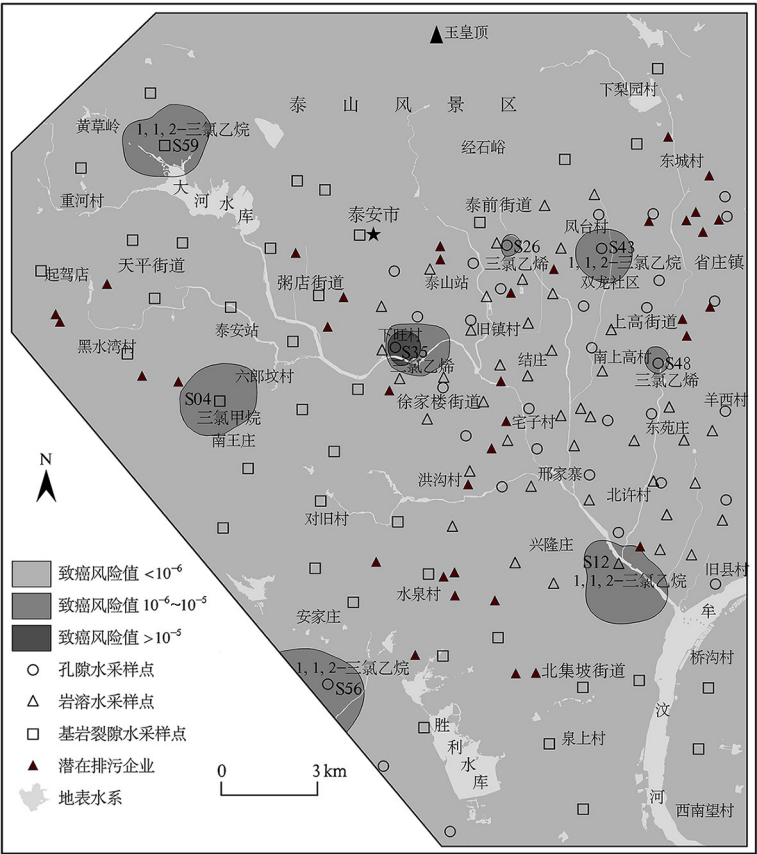
致癌风险值。研究区地下水挥发性和半挥发性有机物检出点中，挥发性和半挥发性有机物致癌风险值介于 2.04×10⁻⁹~3.37×10⁻⁵，均值为 1.77×10⁻⁶。有 8 个采样点的致癌风险值(介于 1.28×10⁻⁶~3.37×10⁻⁵)超过了最大可接受风险值，致癌风险超限率为 6.90%，会对人体健康造成一定的致癌风险，需要引起关注。引起致癌风险的挥发性和半挥发性有机物为 1,1,2-三氯乙烷、三氯甲烷、三氯乙烯，引起致癌风险的暴露途径为饮水摄入。其余采样点的致癌风险值不超过 9.35×10⁻⁷。各致癌风险点中，除 S35 外，其他采样点的致癌风险值数量级均为 10⁻⁶，这明显低于淄博市临淄区化工企业密集区岩溶地下水有机物的致癌风险值(1.8×10⁻⁶~2.0×10⁻⁴)^[23]，而与济南市东部地区(1.07×10⁻⁵~4.87×10⁻⁵)^{[15]36}相对较接近，且引起风险的有机物同样为 1,1,2-三氯乙烷、三氯甲烷和三氯乙烯。与工业型城市不同的是，研究区受致癌风险影响的多是浅层孔隙水，深层地下水受影响较轻。

研究区致癌风险呈点状零星分布，致癌风险点的分布与潜在排污企业无明显相关关系(见图 2)，而是主要分布于城区泮河、奈河、梳洗河流域人类活动密集区及水库周边，说明研究区地下水有机污染的来源与城区人类活动密切相关，主要源于地表水渗漏及居民生活垃圾无序排放，这与本研究区地下

表 3 检出点非致癌风险指数和致癌风险值计算结果
Table 3 Calculation results of non-carcinogenic risk index and carcinogenic risk value at the detection points

检出点	非致癌风险指数				致癌风险值			
	饮水摄入	皮肤接触	洗浴呼吸吸入	总计 ¹⁾	饮水摄入	皮肤接触	洗浴呼吸吸入	总计 ¹⁾
S03	5.83×10^{-4}	1.74×10^{-6}	1.30×10^{-6}	5.86×10^{-4}	1.81×10^{-7}	5.41×10^{-10}	2.92×10^{-12}	1.81×10^{-7}
S04	1.27×10^{-2}	3.81×10^{-5}	2.83×10^{-5}	1.28×10^{-2}	3.94×10^{-6}	1.18×10^{-8}	6.39×10^{-11}	$3.95 \times 10^{-6} *$
S06	8.09×10^{-4}	2.09×10^{-6}	4.31×10^{-6}	8.15×10^{-4}	3.79×10^{-7}	1.08×10^{-9}	7.87×10^{-13}	3.80×10^{-7}
S12	4.26×10^{-2}	1.28×10^{-4}	3.01×10^{-3}	4.58×10^{-2}	8.84×10^{-6}	2.65×10^{-8}	3.42×10^{-8}	$8.90 \times 10^{-6} *$
S13	1.12×10^{-3}	3.34×10^{-6}	2.49×10^{-6}	1.12×10^{-3}	3.46×10^{-7}	1.04×10^{-9}	5.61×10^{-12}	3.47×10^{-7}
S25	1.29×10^{-3}	1.17×10^{-6}	1.10×10^{-7}	1.30×10^{-3}	3.88×10^{-7}	3.50×10^{-10}	1.32×10^{-16}	3.89×10^{-7}
S26	6.02×10^{-2}	1.80×10^{-4}	8.28×10^{-4}	6.12×10^{-2}	1.38×10^{-6}	4.13×10^{-9}	6.79×10^{-12}	$1.39 \times 10^{-6} *$
S32	1.62×10^{-4}	4.85×10^{-7}	1.08×10^{-6}	1.63×10^{-4}	8.83×10^{-8}	2.65×10^{-10}	1.96×10^{-13}	8.86×10^{-8}
S35	1.45	4.33×10^{-3}	1.99×10^{-2}	1.47 *	3.36×10^{-5}	1.00×10^{-7}	1.64×10^{-10}	$3.37 \times 10^{-5} *$
S39	1.21×10^{-4}	3.64×10^{-7}	1.14×10^{-5}	1.33×10^{-4}	2.77×10^{-8}	8.30×10^{-11}	1.29×10^{-10}	2.79×10^{-8}
S42	3.64×10^{-4}	1.09×10^{-6}	3.41×10^{-5}	3.99×10^{-4}	8.30×10^{-8}	2.49×10^{-10}	3.88×10^{-10}	8.36×10^{-8}
S43	8.23×10^{-3}	2.47×10^{-5}	6.35×10^{-4}	8.89×10^{-3}	2.47×10^{-6}	7.40×10^{-9}	6.99×10^{-9}	$2.48 \times 10^{-6} *$
S48	5.53×10^{-2}	1.65×10^{-4}	7.61×10^{-4}	5.63×10^{-2}	1.27×10^{-6}	3.80×10^{-9}	6.25×10^{-12}	$1.28 \times 10^{-6} *$
S56	1.37×10^{-2}	4.10×10^{-5}	9.83×10^{-4}	1.47×10^{-2}	3.47×10^{-6}	1.04×10^{-8}	1.10×10^{-8}	$3.49 \times 10^{-6} *$
S57	3.64×10^{-4}	1.09×10^{-6}	3.41×10^{-5}	3.99×10^{-4}	8.30×10^{-8}	2.49×10^{-10}	3.88×10^{-10}	8.36×10^{-8}
S59	5.02×10^{-2}	1.50×10^{-4}	3.29×10^{-3}	5.37×10^{-2}	7.82×10^{-6}	2.35×10^{-8}	3.48×10^{-8}	$7.88 \times 10^{-6} *$
S63	4.85×10^{-4}	1.46×10^{-6}	4.54×10^{-5}	5.32×10^{-4}	1.11×10^{-7}	3.32×10^{-10}	5.18×10^{-10}	1.12×10^{-7}
S65	3.24×10^{-4}	9.63×10^{-7}	4.18×10^{-6}	3.29×10^{-4}	4.08×10^{-9}	1.21×10^{-11}	4.35×10^{-14}	4.09×10^{-9}
S67	1.21×10^{-3}	3.64×10^{-6}	2.92×10^{-5}	1.25×10^{-3}	5.85×10^{-7}	1.76×10^{-9}	2.60×10^{-10}	5.87×10^{-7}
S68	2.43×10^{-4}	7.28×10^{-7}	2.27×10^{-5}	2.66×10^{-4}	5.53×10^{-8}	1.66×10^{-10}	2.59×10^{-10}	5.58×10^{-8}
S71	6.07×10^{-4}	1.82×10^{-6}	5.68×10^{-5}	6.65×10^{-4}	1.38×10^{-7}	4.15×10^{-10}	6.47×10^{-10}	1.39×10^{-7}
S75	9.71×10^{-5}	2.91×10^{-7}	1.67×10^{-5}	1.14×10^{-4}	1.44×10^{-7}	4.30×10^{-10}	2.48×10^{-13}	1.44×10^{-7}
S83	6.21×10^{-3}	1.86×10^{-5}	4.70×10^{-5}	6.28×10^{-3}	9.33×10^{-7}	2.79×10^{-9}	1.40×10^{-11}	9.35×10^{-7}
S87	5.46×10^{-5}	1.63×10^{-7}	3.90×10^{-8}	5.48×10^{-5}	—	—	—	—
S88	2.43×10^{-4}	2.18×10^{-7}	—	2.43×10^{-4}	3.83×10^{-8}	3.45×10^{-11}	3.54×10^{-15}	3.84×10^{-8}
S89	3.56×10^{-3}	1.06×10^{-5}	1.44×10^{-4}	3.71×10^{-3}	4.56×10^{-7}	1.37×10^{-9}	1.30×10^{-9}	4.59×10^{-7}
S90	3.28×10^{-3}	9.75×10^{-6}	3.95×10^{-5}	3.33×10^{-3}	1.39×10^{-7}	4.11×10^{-10}	1.58×10^{-12}	1.39×10^{-7}
S91	4.39×10^{-3}	1.31×10^{-5}	2.77×10^{-4}	4.68×10^{-3}	6.76×10^{-7}	2.03×10^{-9}	2.85×10^{-9}	6.81×10^{-7}
S92	4.85×10^{-4}	1.45×10^{-6}	2.27×10^{-5}	5.10×10^{-4}	5.53×10^{-8}	1.66×10^{-10}	2.59×10^{-10}	5.58×10^{-8}
S94	1.78×10^{-3}	5.30×10^{-6}	2.30×10^{-5}	1.81×10^{-3}	2.24×10^{-8}	6.67×10^{-11}	2.39×10^{-13}	2.25×10^{-8}
S95	3.72×10^{-3}	1.11×10^{-5}	8.72×10^{-5}	3.82×10^{-3}	1.51×10^{-7}	4.53×10^{-10}	5.18×10^{-10}	1.52×10^{-7}
S99	1.62×10^{-4}	4.82×10^{-7}	2.09×10^{-6}	1.64×10^{-4}	2.04×10^{-9}	6.07×10^{-12}	2.18×10^{-14}	2.04×10^{-9}
S101	4.13×10^{-3}	1.23×10^{-5}	7.61×10^{-5}	4.21×10^{-3}	1.45×10^{-7}	4.33×10^{-10}	2.59×10^{-10}	1.45×10^{-7}
S105	1.62×10^{-4}	1.46×10^{-7}	—	1.62×10^{-4}	2.56×10^{-8}	2.30×10^{-11}	2.36×10^{-15}	2.56×10^{-8}
S108	1.46×10^{-6}	4.33×10^{-9}	5.45×10^{-8}	1.52×10^{-6}	—	—	—	—
S109	2.43×10^{-4}	7.19×10^{-7}	1.24×10^{-6}	2.45×10^{-4}	6.80×10^{-8}	2.01×10^{-10}	7.93×10^{-13}	6.82×10^{-8}
S110	4.85×10^{-4}	1.44×10^{-6}	6.27×10^{-6}	4.93×10^{-4}	6.12×10^{-9}	1.82×10^{-11}	6.53×10^{-14}	6.13×10^{-9}
S112	1.01×10^{-3}	3.01×10^{-6}	3.86×10^{-5}	1.05×10^{-3}	2.21×10^{-7}	6.58×10^{-10}	3.90×10^{-10}	2.22×10^{-7}
S115	1.54×10^{-3}	4.60×10^{-6}	9.82×10^{-5}	1.64×10^{-3}	2.28×10^{-7}	6.85×10^{-10}	1.04×10^{-9}	2.30×10^{-7}
S116	9.30×10^{-4}	2.78×10^{-6}	6.10×10^{-5}	9.94×10^{-4}	1.42×10^{-7}	4.27×10^{-10}	6.47×10^{-10}	1.44×10^{-7}
S117	2.43×10^{-4}	7.22×10^{-7}	3.13×10^{-6}	2.47×10^{-4}	3.06×10^{-9}	9.10×10^{-12}	3.27×10^{-14}	3.07×10^{-9}

注：¹⁾ * 表示非致癌风险指数或致癌风险值超标。



注:图中标注了引起致癌风险的挥发性和半挥发性有机物组分。

图 2 研究区致癌风险分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of carcinogenic total risk in the study area

水重金属 Pb 和 Cr(VI)的来源基本一致^{[5]117}。另外,在地下水径流方向上,挥发性和半挥发性有机物含量及致癌风险值无增大趋势,这也说明了挥发性和半挥发性有机物呈点状近源污染特征。因此,建议采取河流生态环境治理、生活垃圾无害化处理、环境保护宣传等措施,同时加强致癌风险点周边饮用水中 1,1,2-三氯乙烷、三氯甲烷、三氯乙烯等监测和处理,有效控制并逐步降低地下水有机物的健康风险。

另外,通过计算得出,研究区经饮水摄入途径产生的非致癌风险占总非致癌风险的 97.98%,皮肤接触和洗浴呼吸吸入产生的非致癌风险合计仅占 2.02%。经饮水摄入途径产生的致癌风险占总致癌风险的 99.56%,皮肤接触和洗浴呼吸吸入产生的致癌风险仅占 0.44%。因此,饮水摄入途径为研究区地下水中挥发性和半挥发性有机物非致癌风险和致癌风险的主要暴露途径。

泰安市位于泰山脚下,依山而建,山城一体,是著名的风景旅游城市 and 历史文化名城。对泰安城区地下水进行挥发性和半挥发性有机物健康风险评价,不仅对保障地下水安全与居民健康具有重要意

义,对于其他同类型城市的地下水有机污染与防护治理也有一定的参考价值。但需要说明的是,采用 USEPA 推荐的健康风险评价模型及 RIVM 研发的 CSOIL 模型,部分参数参照相关文献,没有针对研究区内人群进行暴露参数研究,另外未考虑重金属等其他污染物存在的潜在健康风险,会存在一定的误差,但这并不影响本次健康风险评价的有效性,存在的缺陷需要在今后的工作中进一步完善。

3 结 论

1) 对泰安城区 116 件地下水样品进行挥发性和半挥发性有机物分析测试,检出挥发性和半挥发性有机物的样品共有 41 件,检出率为 35.34%。在 26 项挥发性和半挥发性组分中,1,1,2-三氯乙烷检出率最高,达 16.38%,其次为四氯乙烯(12.07%)、三氯乙烯(6.90%)、三氯甲烷(5.17%)、1,2-二氯乙烷(5.17%)。

2) 与 GB/T 14848—2017 的Ⅲ类水标准限值相比,样品挥发性和半挥发性有机物总超标率为 5.17%,出现超标的组分为 1,1,2-三氯乙烷、三氯乙烯、苯并(a)芘,最大检出质量浓度分别为 26.90、

149.00、0.024 μg/L,分别为标准值的 5.38、2.13、2.40倍,表明泰安城区地下水已受到一定程度的有机污染,但均为点状污染,污染程度相对较轻。

3) 根据健康风险评价,挥发性和半挥发性有机物非致癌风险指数介于 $1.52 \times 10^{-6} \sim 1.48$,均值为 4.33×10^{-2} ,非致癌风险超限率仅为 0.86%,产生非致癌风险的组分为三氯乙烯,总体上非致癌风险较低;致癌风险值介于 $2.04 \times 10^{-9} \sim 3.37 \times 10^{-5}$,均值为 1.77×10^{-6} ,有 8 个采样点的致癌风险值为 $1.28 \times 10^{-6} \sim 3.37 \times 10^{-5}$,超过了最大可接受风险值,致癌风险超限率为 6.90%,引起致癌风险的组分为 1,1,2-三氯乙烷、三氯甲烷、三氯乙烯,需重点关注和控制。非致癌风险和致癌风险的主要暴露途径均为饮水摄入,皮肤接触和洗浴呼吸吸入产生的风险可以忽略。

参考文献:

[1] 王琼,谭秀益,陈峻峰.中国地下水污染现状分析及研究进展[J].环境科学与管理,2012,37(增刊 1):52-56.

[2] VODYANITSKII Y N, YAKOVLEV A S. Contamination of soils and groundwater with new organic micropollutants: a review[J]. Eurasian Soil Science, 2016, 49(5): 560-569.

[3] ZENG Y Y, ZHOU J L, ZHOU Y Z, et al. Assessment and causes of groundwater organic pollution in typical plain areas in Xinjiang, China[J]. Exposure and Health, 2016, 8(3): 401-417.

[4] 李玲,周金龙,邵龙美,等.和田河流域绿洲区地下水有机污染特征与健康风险评估[J].新疆地质,2021,39(2):319-322.

[5] 孟令华,孔德金,王磊,等.泰安市城区地下水重金属含量及健康风险评价[J].干旱区资源与环境,2022,36(12).

[6] 孟令华.泰安市城区地下水“三氯”污染特征与健康风险评价[J].城市地质,2023,18(2):153-159.

[7] PARDAKHTI A R, NABI BIDHENDI G R, TORABIAN A, et al. Comparative cancer risk assessment of THMs in drinking water from well water sources and surface water sources[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 179: 499-507.

[8] 贾文娟.沈阳市地下水饮用水源挥发性有机物分布特征及风险

评价[J].湖南生态科学学报,2022,9(3):65-70.

[9] 刘俊玲,潘锋,孙言凤,等.武汉市饮用水中有机污染物风险影响评价[J].现代预防医学,2019,46(13):2343-2346.

[10] 高宗军,孙文广,唐蒙生,等.泰安—旧县水源区岩溶水开采与地质环境的关系[J].山东地质,2001,17(3/4):86-91.

[11] U.S. Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund. Volume 1, human health evaluation manual (part A): interim final[R]. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 1989.

[12] National Research Council. Risk assessment in the federal government: managing the process[M]. Washington, D.C.: National Academies Press, 1983.

[13] 李丽君,王海娇,马健生.下辽河平原地下水中挥发性有机物的污染特征及健康风险评价[J].岩矿测试,2021,40(6).

[14] 鲁统民.淄博市大武水源地地下水有机污染特征及健康风险评价[D].青岛:山东科技大学,2020.

[15] 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).

[16] 王若师,张娴,许秋瑾,等.东江流域典型乡镇饮用水源地有机污染物健康风险评价[J].环境科学学报,2012,32(11):2874-2883.

[17] 张坤锋,赵少延,孙兴滨,等.海拉尔河及傍河地下水饮用水源中挥发性有机物的污染特征与风险[J].河南师范大学学报(自然科学版),2021,49(5):74-82.

[18] 饶志,储小东,颜春,等.鄱阳湖平原浅层地下水有机污染物含量特征与健康风险评价[J].地球与环境,2019,47(5):662-670.

[19] 马添翼,李硕,苏杰,等.吉林省某垃圾填埋场地下水有机污染风险评价[J].环境污染与防治,2019,41(2):348-350.

[20] 韩冰,何江涛,陈鸿汉,等.地下水有机污染人体健康风险评价初探[J].地学前缘,2006,13(1):224-229.

[21] 张春艳,高柏,郭亚丹,等.鄱阳湖区域地下水有机污染物特征与风险评价[J].生态毒理学报,2016,11(2):524-530.

[22] 杨丽芝,朱恒华,刘治政,等.淄博大武水源地地下水健康风险评价[J].干旱区资源与环境,2021,35(12):106-113.

[23] 郭永丽,全洗强,吴庆.北方喀斯特地区地下水 VOCs 污染特征及健康风险——以山东省淄博市临淄区为例[J].广西师范大学学报(自然科学版),2020,38(6):102-113.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2023-05-16)