

陈斐, 胡丽雅. 加油站地下水中甲基叔丁基醚污染特征[J]. 净水技术, 2024, 43(6):153-160.

CHEN F, HU L Y. Pollution characteristics of methyl tert-butyl ether in groundwater of gas stations[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6):153-160.

## 加油站地下水中甲基叔丁基醚污染特征

陈斐\*, 胡丽雅

(东方国际集团上海环境科技有限公司, 上海 200082)

**摘要** 为研究加油站地下水中甲基叔丁基醚(MTBE)的污染特征,对上海市14个行政区71个加油站周边地下水中的MTBE进行为期1年的系统监测及健康风险评估。结果表明,上海市各区加油站地下水中MTBE普遍有检出,检出质量浓度在ND~11 919  $\mu\text{g}/\text{L}$ (ND表示未检出),且各点位的MTBE浓度差别较大。在71个点位中,MTBE的检出点位数有59个,超标点位数有24个,总检出率、总超标率分别为83.1%、33.8%。从第1~4季度,MTBE的检出率和超标率都呈增长趋势,表明地下水中MTBE的污染程度逐渐增强。同时,地下水中MTBE浓度和石油烃浓度呈显著正相关关系,说明MTBE污染很可能源于油品存储、使用过程的泄漏。对24个MTBE超标点位进行健康风险评估结果显示,从第1~4季度,共计有11次MTBE的浓度已超健康风险临界值,可能对人体健康造成风险,有2次的MTBE浓度在临界值附近,需警惕。随着时间推移,MTBE对人体健康造成的风险正逐渐增加。此外,对地下水中MTBE浓度进行了风险评估,确定MTBE风险控制值为1.9  $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

**关键词** 甲基叔丁基醚 加油站 地下水 健康风险 吹扫捕集/气相色谱-质谱法

**中图分类号:** X832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)06-0153-08

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.018

## Pollution Characteristics of Methyl Tert-Butyl Ether in Groundwater of Gas Stations

CHEN Fei\*, HU Liya

(Orient International Holding Shanghai Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

**Abstract** In order to investigate the pollution characteristics of methyl tert-butyl ether (MTBE) in groundwater of gas station, one year system monitoring of MTBE in groundwater around 71 gas stations in 14 administrative regions of Shanghai was conducted. The monitoring results showed that MTBE was generally detected in the groundwater of gas stations in most districts of Shanghai. The detection mass concentration range of MTBE was ND~11 919  $\mu\text{g}/\text{L}$  (ND indicated not detected) and the MTBE concentration showed significant difference among various points. The total detection and the over-standard rate of MTBE was 83.1% and 33.8%, respectively. From the first quarter to the fourth quarter, the detection rate and the over-standard rate of MTBE showed an increasing trend, indicating that the pollution level of MTBE in groundwater was gradually increasing. At the same time, MTBE concentration in groundwater was highly positively correlated with petroleum hydrocarbon concentration, indicating that MTBE pollution may be caused by oil leak during storage and use process. The health risk assessment results of 24 MTBE exceeding standard points showed that, from the first quarter to the fourth quarter, the concentration of MTBE had exceeded the health risk threshold for 11 times, probably threatening to human health. The MTBE concentration got close to the critical value for two times, being a warning sign. The risk of MTBE to human health was gradually increasing over time. Also, a risk assessment was conducted on the MTBE concentration in groundwater, and the MTBE risk control value was determined to be 1.9  $\mu\text{g}/\text{L}$ .

**Keywords** methyl tert-butyl ether (MTBE) gas station groundwater human health risk purge and trap/gas chromatography-mass spectrometry

[收稿日期] 2023-07-06

[基金项目] 上海市2020年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(20dz1204500)

[通信作者] 陈斐,女,高级工程师,主要从事环境监测研究的工作,E-mail:sophieshen@163.com。

随着地下水资源开发利用量逐年增长,地下水环境质量问题也日益突出,尤其是浅层地下水,极易受到污染,并且污染后难以有效恢复,因此,地下水污染防治显得尤为重要。加油站因其储油罐系统泄

漏问题频繁发生,已成为地下水潜在污染源之一。贾小飞<sup>[1]</sup>对国内6个省市共计242座加油站进行污染调查发现,大约有48%的加油站曾发生泄漏并有污染物被检出,有污染物检出的加油站中,污染较为严重的加油站占比达到23%,污染较为轻微的占到25%。陈小华等<sup>[2]</sup>对上海市119家加油站进行渗漏污染潜势分析,有58个加油站的污染潜势值处于很高或较高水平。上海市现有近900座加油站,大部分加油站建站超过10年,加油站的储油罐、输油管道随着使用年限的增长,易发生油品渗漏,且渗漏通常较隐蔽,如缺乏长期监测,一旦发生泄漏则往往蔓延到较大范围,造成严重污染<sup>[3]</sup>。

国外对加油站渗漏污染问题的调查研究已有较长历史,并建立了针对加油站污染场地的风险评估方法。相比之下,国内在加油站污染防治方面的研究起步较晚,对加油站周边地下水污染状况和健康风险评估的系统研究较少<sup>[4-5]</sup>。已有文献报道中调查的加油站样本数量并不多,且监测持续时间短,大部分只反映某个时间点的污染情况,不能全面反映国内加油站渗漏污染水平。

加油站泄漏造成的有机污染物主要组分为石油烃、甲基叔丁基醚(MTBE)、多环芳烃、苯系物等<sup>[6-7]</sup>。MTBE是用来增强汽油抗爆性能的高辛烷值汽油添加剂,2001年开始代替四乙基铅被广泛添加到汽油中。由于MTBE具有较低的吸附常数和辛醇-水分配系数,在土壤和地下水中的迁移速度很快,污染速度和范围比其他油品组分更快、更广,且MTBE在地下水中的半衰期可达2年,易在地下水中积累<sup>[8-9]</sup>。国外很早就有MTBE污染地下水的研究。1993年—1994年全美地质调查的水质评估项目对美国8个城市的210口浅水井和20个农业区的52口浅水井进行了采样分析,其中27.0%的城市浅水井和1.3%的农业浅水井都发现了MTBE<sup>[10]</sup>。Richard等<sup>[11]</sup>对美国德州地下水609个采样点的检测发现,73%地下水中MTBE质量浓度超过200 μg/L。在欧洲国家如德国、英国等水体污染监测中也检出了MTBE<sup>[12-13]</sup>。近年来MTBE在我国不同城市各类水体(地表水、地下水、饮用水)中都有检出。作为上海市水源地的青草沙水库中,MTBE的检出质量浓度中间值为0.48 μg/L,但最高值达到了369.00 μg/L<sup>[14]</sup>。北京市地表水、地下水、饮用水中MTBE检出质量浓度分别为0.33~0.99、

0.07~0.11、0.11~0.31 μg/L<sup>[15]</sup>。长春市居民区地表水MTBE平均质量浓度为0.12 μg/L,但洗车场、停车场附近的地表水中MTBE质量浓度可高达170.69 μg/L<sup>[16]</sup>。惠州市油库、炼油厂、加油站周边地下水MTBE质量浓度分别为1.74~18.42、3.60~4.68、0.13~3.48 μg/L<sup>[17]</sup>。我国各类水体中MTBE浓度整体尚处于较低水平,但油库、加油站、炼油厂、洗车场等场地附近的水体中MTBE浓度较高。因此,MTBE常被作为汽油泄漏区域环境调查中关键性的物质,是一种汽油泄漏的良好指示剂。我国发布的《加油站地下水污染防治技术指南(试行)》<sup>[18]</sup>已将MTBE列为加油站地下水监测特征指标。

已有研究<sup>[19-21]</sup>发现,MTBE不仅对人体健康可能造成一定损伤,例如对肝脏、肾脏等造成损害,同时也具有潜在致癌性。美国环境保护署已将MTBE列为可能致癌物质,认为水中MTBE可接受质量浓度为20~40 μg/L<sup>[22]</sup>。不少国家已采用相应政策禁用或限用MTBE,而我国目前尚未将MTBE列入现行的水质环境质量标准中。因此,研究加油站周边地下水中MTBE的污染特征,评估MTBE可能产生的健康风险影响,对加油站场地地下水的污染防治及监管修复有重大的指导意义。

本文对上海市14个行政区71个加油站周边地下水中的MTBE进行了为期1年的系统监测,并分析评估了MTBE产生的人体健康风险,以期对上海市加油站地下水污染防控提供基础数据和技术支持。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试剂与仪器

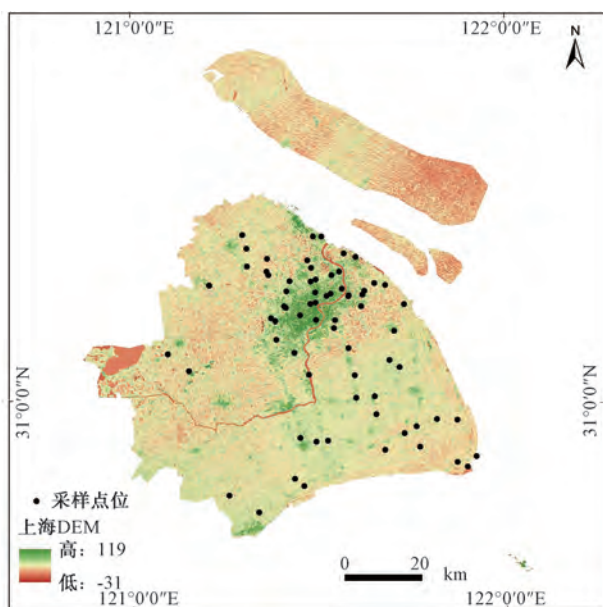
MTBE标准品购自北京Bepure;内标氟苯标准品购自美国o2si;溶剂甲醇为LC-MS级,德国默克;试验用水为超纯水。气相色谱-质谱联用仪(Agilent 7890B-5977B),美国安捷伦;DB-624色谱柱,60 m×0.25 mm×1.4 μm,美国安捷伦;吹扫捕集装置(Tekmar Atomx XYZ),美国安捷伦。

### 1.2 样品采集

根据《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164—2020)<sup>[23]</sup>,于2021年3月、6月、8月、11月,每季度采集上海市14个行政区的71个加油站地下水监测点,采样点信息如表1和图1所示。

表1 加油站地下水采样点分布  
Tab. 1 Distribution of Groundwater Sampling Points in Gas Stations

行政区	点位数量	点位名称	行政区	点位数量	点位名称
宝山区	7	BS	闵行区	3	MH
奉贤区	8	FX	浦东新区	26	PD
虹口区	3	HK	普陀区	3	PT
黄浦区	1	HP	青浦区	1	QP
嘉定区	6	JD	松江区	1	SJ
金山区	2	JS	杨浦区	4	YP
静安区	3	JA	长宁区	3	CN



注:DEM为数字高程模型。

图1 加油站地下水采样点分布

Fig. 1 Distribution of Groundwater Sampling Points in Gas Stations

### 1.3 样品分析

吹扫捕集条件:吹扫流量、温度和时间分别为40 mL/min、140 °C和11 min;脱附流量、温度和时间分别为300 mL/min、250 °C和2 min;取样体积为5 mL。色谱条件:柱流量为1.0 mL/min,柱温从40 °C升至200 °C并保持1 min(升温速率为15 °C/min)。质谱条件:EI源,全扫描(Scan)模式,离子源温度为230 °C,四级杆温度为150 °C。MTBE定量离子  $m/z=73$ ,辅助离子  $m/z=55,57$ ;内标氟苯定量离子  $m/z=96$ ,辅助离子  $m/z=70,50$  [24]。

### 1.4 质量控制

MTBE通过内标法定量,优化条件下的检出限为0.3 μg/L。每批样品分析时采取空白样、空白加

标样和平行样等质控措施,MTBE的空白加标回收率在80%~120%,平行样相对标准偏差小于20%。

## 2 结果和讨论

### 2.1 MTBE 检出率和浓度水平

表2列出了各季度MTBE的检出率和浓度水平。在3月、6月、8月、11月4次监测中,MTBE检出质量浓度分别为ND~240、ND~3 566、ND~11 919、ND~7 326 μg/L;检出率分别为49.3%、53.5%、63.4%、62.0%;超标率分别为4.2%、11.3%、18.3%、25.4%(超标限值以20 μg/L计)。然而,各个季度中MTBE的检出范围波动较大,平均值分别为7.9、63.7、188.9、125.0 μg/L,中位值分别为ND、1.4、1.9、2.0 μg/L,平均值远高于中位值,说明各点位的MTBE浓度差别较大。同时,从第1~4季度,MTBE的检出率和超标率都呈增长趋势,表明地下水中MTBE的污染程度日益加重。进一步地,71个加油站地下水监测点中,有59个点位在1年中存在MTBE检出的情况,总检出率达83.1%,有24个点位在1年中存在MTBE超标的情况,总超标率为33.8%。由此可见,地下水中MTBE的污染较为普遍,可推测各加油站在油品存储、使用等过程中存在汽油泄漏的情况。

表2 各季度MTBE检出率

Tab. 2 Detection Rates of MTBE in Four Seasons

参数	1季度 (3月)	2季度 (6月)	3季度 (8月)	4季度 (11月)
检出范围/(μg·L <sup>-1</sup> )	ND~240	ND~3 566	ND~11 919	ND~7 326
平均值/(μg·L <sup>-1</sup> )	7.9	63.7	188.9	125.0
中位值/(μg·L <sup>-1</sup> )	ND	1.4	1.9	2.0
检出率	49.3%	53.5%	63.4%	62.0%
超标率	4.2%	11.3%	18.3%	25.4%

注:ND表示未检出。

图2是24个超标点位MTBE的浓度水平,在1年4个季度的监测中,超标1次的点位有12个,超标2次的点位有7个,超标3次的点位有4个,超标4次的点位有1个。由此可见,浅层地下水中MTBE污染超标情况较普遍。由于MTBE不易被土壤吸附,当渗入土壤时,使其极易穿透场地包气带迁移至地下水,并随地下水的流动而扩散蔓延。作为油品添加剂,地下水中MTBE的高检出率和超标率也预示着多数加油站存在较高的油品泄漏风险。

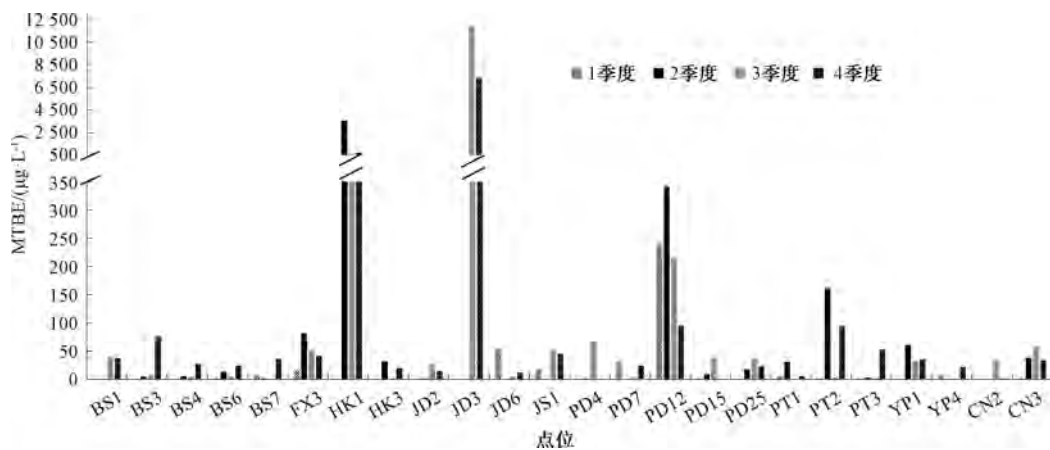


图2 24个超标点位 MTBE 浓度水平

Fig. 2 MTBE Concentrations of 24 Exceeding Standard Samples

加油站渗漏的油品主要有汽油(主要成分  $C_4 \sim C_{12}$  烃类)和柴油(主要成分  $C_{10} \sim C_{22}$  的烃类)两大类,为了分析 MTBE 的污染来源,在 3 月的监测过程中,随机选取了浦东新区、奉贤区、金山区、普陀区、宝山区 5 个区共计 23 个点位,检测分析了 MTBE 浓度和总石油烃(TPH)浓度。TPH 的浓度由  $C_{10} \sim C_{40}$  (可萃取性石油烃)<sup>[25]</sup> 和  $C_6 \sim C_9$  (挥发性石油烃)<sup>[26]</sup> 的测定值加和得到。如图 3 所示,采用 SPSS 分析软件对地下水中 MTBE 和 TPH 的浓度进行相关性分析,相关系数为 0.903,并且呈现出  $p < 0.01$  水平的显著性,因而说明 MTBE 和 TPH 之间有着显著的正相关关系,这也进一步印证了地下水中 MTBE 污染来自于存储、使用过程中的油品泄漏。表 3 列出了文献中报道的北京、重庆、成都、淮安、上海等城市加油站周边地下水中 MTBE 污染情况。上述几个城市的加油站地下水样本数均低于 30 个,然而 MTBE 的检出率在 22.2%~94.0%,MTBE 最高检出质量浓度

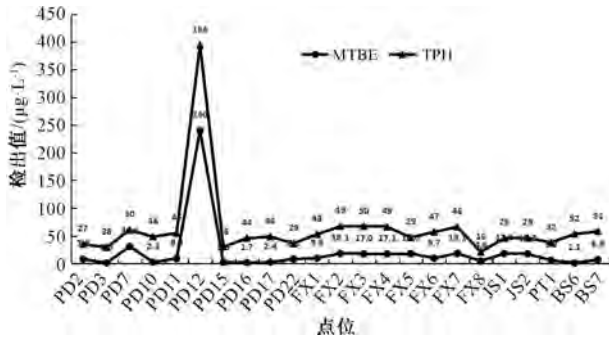


图3 地下水中 MTBE 和 TPH 浓度关系

Fig. 3 Relationship between MTBE and TPH Concentrations in Groundwater

达到了 2 820  $\mu\text{g/L}$ ,说明地下水中 MTBE 污染情况较严重,部分地下水中的 MTBE 已严重超标,这些已有研究结果与本项目的调查结果相匹配。这说明加油站油品渗漏污染广泛存在,已经造成地下水污染并影响地下水的饮用安全。

表3 我国部分省市加油站周边地下水中 MTBE 污染

Tab. 3 MTBE Pollution in Underground Water around Gas Stations in Some Cities in China

省市	地下水点位数量/个	MTBE 检出率	MTBE 质量浓度/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	文献来源
北京	16	94.0%	ND~2 820	[27]
重庆	27	22.2%	3.8~30.9	[28]
成都	6	37.5%	/	[29]
上海	20	50.0%	ND~1 790	[4]
淮安	5	80.0%	ND~6.23	[30]
上海	71	83.1%	ND~11 919	本研究

## 2.2 MTBE 健康风险评估

健康风险评估是一个评价污染物对人体健康危害途径和概率的过程。根据《地下水污染健康风险评估工作指南》<sup>[31]</sup>(以下简称《指南》),MTBE 目前暂未列入饮用水相关标准,因此,地下水中只要有检出 MTBE,即需开展健康风险评估工作。同时,加油站属于城市工业用地,暴露人群主要是成人,暴露途径为经口摄入、经皮肤接触以及吸入室内外气态污染物 4 种。根据《指南》中推荐的暴露评估模型,选取研究区 24 个 MTBE 超标点位,MTBE 致癌风险和危害商计算过程中所涉及的理化性质参数和毒性参数参考《指南》和美国环保局区域筛选值<sup>[32]</sup>的推荐值,MTBE 的致癌风险(以 CR 表示)和非致癌危害

商(以 HQ 表示)计算结果如表 4 所示。关于污染物可接受风险,《指南》中规定单一污染物的 CR 值 $\leq 1 \times 10^{-6}$ , HQ 值 $\leq 1$ ,即为可接受。在第 1~4 季度,CR 值 $> 1 \times 10^{-6}$ 且 HQ 值 $> 1$ 的点位数为 1、3、3、4 个。此外,第 2 季度和第 4 季度各有 1 个点位的 CR 值刚超过临界值( $1.11 \times 10^{-6}$ 和  $1.03 \times 10^{-6}$ )但 HQ 值 $< 1$ 。CR 值 $> 1 \times 10^{-6}$ 且 HQ 值 $> 1$ 说明 MTBE 浓度

已可能对人体健康造成风险。CR 值刚超过临界值但 HQ 值 $< 1$ 说明 MTBE 的健康风险需要警惕。24 个点位全年共计有 11 次 MTBE 浓度已超健康风险临界值,2 次 MTBE 浓度在临界值附近。由此可见,随着时间推移,具有 MTBE 健康风险的地下水点位数量呈增长趋势,MTBE 对人体健康造成的风险正逐渐增加。

表 4 24 个超标点位第 1~4 季度 MTBE 健康风险评估

Tab. 4 MTBE Health Risks of 24 Exceeding Standard Samples from Q1 to Q4 of the Year

点位名称	第 1 季度			第 2 季度			第 3 季度			第 4 季度		
	MTBE/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	CR	HQ	MTBE/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	CR	HQ	MTBE/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	CR	HQ	MTBE/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	CR	HQ
BS1	ND	/	/	ND	/	/	39.6	$5.4 \times 10^{-7}$	0.43	37.7	$5.1 \times 10^{-7}$	0.41
BS3	ND	/	/	5.4	$7 \times 10^{-8}$	0.06	7.9	$1.1 \times 10^{-7}$	0.09	76.1	$1.03 \times 10^{-6}$	0.83
BS4	ND	/	/	5.8	$8 \times 10^{-8}$	0.06	3.9	$5 \times 10^{-8}$	0.04	28.0	$3.8 \times 10^{-7}$	0.30
BS6	1.1	$1 \times 10^{-8}$	0.01	13.3	$1.8 \times 10^{-7}$	0.14	5.3	$7 \times 10^{-8}$	0.06	24.3	$3.3 \times 10^{-7}$	0.26
BS7	6.9	$9 \times 10^{-8}$	0.07	0.8	$1 \times 10^{-8}$	0.01	ND	/	/	36.6	$5 \times 10^{-7}$	0.40
FX3	17.0	$2.3 \times 10^{-7}$	0.18	81.8	$1.11 \times 10^{-6}$	0.89	51.8	$7 \times 10^{-7}$	0.56	41.6	$5.6 \times 10^{-7}$	0.45
HK1	ND	/	/	3 566.0	$4.838 \times 10^{-5}$	38.70	703.0	$9.54 \times 10^{-6}$	7.63	728.0	$9.88 \times 10^{-6}$	7.90
HK3	ND	/	/	32.0	$4.3 \times 10^{-7}$	0.35	1.6	$2 \times 10^{-8}$	0.02	20.0	$2.7 \times 10^{-7}$	0.22
JD2	ND	/	/	1.6	$2 \times 10^{-8}$	0.02	28.8	$3.9 \times 10^{-7}$	0.31	15.0	$2 \times 10^{-7}$	0.16
JD3	ND	/	/	ND	/	/	11 919.0	$1.6169 \times 10^{-4}$	129.35	7 326.0	$9.938 \times 10^{-5}$	79.51
JD6	54.5	$7.4 \times 10^{-7}$	0.59	ND	/	/	4.5	$6 \times 10^{-8}$	0.05	11.8	$1.6 \times 10^{-7}$	0.13
JS1	17.8	$2.4 \times 10^{-7}$	0.19	ND	/	/	51.4	$7 \times 10^{-7}$	0.56	45.0	$6.1 \times 10^{-7}$	0.49
PD4	ND	/	/	1.4	$2 \times 10^{-8}$	0.02	68.1	$9.2 \times 10^{-7}$	0.74	ND	/	/
PD7	30.6	$4.2 \times 10^{-7}$	0.33	ND	/	/	3.2	$4 \times 10^{-8}$	0.03	24.2	$3.3 \times 10^{-7}$	0.26
PD12	240.0	$3.26 \times 10^{-6}$	2.60	341.0	$4.63 \times 10^{-6}$	3.70	215.0	$2.92 \times 10^{-6}$	2.33	94.9	$1.29 \times 10^{-6}$	1.03
PD15	1.9	$3 \times 10^{-8}$	0.02	9.2	$1.2 \times 10^{-7}$	0.10	38.4	$5.2 \times 10^{-7}$	0.42	ND	/	/
PD25	ND	/	/	18.3	$2.5 \times 10^{-7}$	0.20	36.9	$5 \times 10^{-7}$	0.40	23.8	$3.2 \times 10^{-7}$	0.26
PT1	5.9	$8 \times 10^{-8}$	0.06	30.9	$4.2 \times 10^{-7}$	0.34	ND	/	/	6.0	$8 \times 10^{-8}$	0.07
PT2	1.5	$2 \times 10^{-8}$	0.02	162.0	$2.2 \times 10^{-6}$	1.76	2.8	$4 \times 10^{-8}$	0.03	93.9	$1.27 \times 10^{-6}$	1.02
PT3	1.3	$2 \times 10^{-8}$	0.01	2.9	$4 \times 10^{-8}$	0.03	2.6	$4 \times 10^{-8}$	0.03	53.1	$7.2 \times 10^{-7}$	0.58
YP1	ND	/	/	61.0	$8.3 \times 10^{-7}$	0.66	33.0	$4.5 \times 10^{-7}$	0.36	35.8	$4.9 \times 10^{-7}$	0.39
YP4	6.8	$9 \times 10^{-8}$	0.07	ND	/	/	1.3	$2 \times 10^{-8}$	0.01	21.5	$2.9 \times 10^{-7}$	0.23
CN2	ND	/	/	ND	/	/	33.8	$4.6 \times 10^{-7}$	0.37	0.8	$1 \times 10^{-8}$	0.01
CN3	1.4	$2 \times 10^{-8}$	0.02	38.5	$5.2 \times 10^{-7}$	0.42	58.1	$7.9 \times 10^{-7}$	0.63	34.1	$4.6 \times 10^{-7}$	0.37

鉴于部分地下水中的 MTBE 浓度已可能造成人体健康风险,而《指南》规定,当某污染物含量超过限值,可能会对身体健康产生危害时,需要进行风险评估,计算地下水污染物的浓度限值,即风险控制值。因此,根据《指南》提供的风险评估方法,对第

1~4 季度中 CR 值 $> 1 \times 10^{-6}$ 的点位,分别计算了基于所有暴露途径的 MTBE 综合致癌风险控制值,结果如表 5 所示。风险控制值反映了剂量-效应关系,也是污染地下水的修复目标值,一般选择较小值作为风险控制值,因此,地下水中 MTBE 的风险控制

值最终确定为  $1.9 \mu\text{g/L}$ 。

表 5 MTBE 致癌风险控制值

Tab. 5 Carcinogenic Risk Control Value of MTBE

CR	致癌风险控制值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$
$1.03\times 10^{-6}$	1.9
$1.11\times 10^{-6}$	2.0
$4.838\times 10^{-5}$	87.1
$1.6169\times 10^{-4}$	291.0
$4.63\times 10^{-6}$	8.3
$2.20\times 10^{-6}$	4.0
$9.54\times 10^{-6}$	17.2
$9.88\times 10^{-6}$	17.8
$9.938\times 10^{-5}$	178.9
$3.26\times 10^{-6}$	5.9
$2.92\times 10^{-6}$	5.3
$1.29\times 10^{-6}$	2.3
$1.27\times 10^{-6}$	2.3

### 3 结论

本文对上海市 14 个行政区共计 71 个加油站地下水样品进行了 MTBE 浓度水平调查、污染来源分析以及健康风险评估。在 4 个季度监测过程中,上海市各区加油站地下水中 MTBE 普遍有检出,检出质量浓度在  $\text{ND}\sim 11\ 919 \mu\text{g/L}$ ,总检出率和超标率分别为 83.1%和 33.8%。同时,研究发现地下水中 MTBE 浓度和 TPH 浓度密切相关,表明 MTBE 污染可能源于油品使用、存储过程的泄漏。从第 1~4 季度,对 24 个 MTBE 超标点位进行健康风险评估结果显示,有 11 次 MTBE 的浓度已超健康风险临界值,有 2 次 MTBE 的浓度在临界值附近,MTBE 对人体健康造成的风险正逐渐增加。本研究较系统全面地反映了上海市加油站周边地下水中 MTBE 污染状况和健康风险水平,可为加油站地下水污染防治和修复提供借鉴。

### 参考文献

- [ 1 ] 贾小飞. 中国不同地区加油站土壤和地下水污染状况调查研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.  
JIA X F. Investigation and study of the soil and groundwater contamination of service stations in different parts of China[D]. Jiangsu: Suzhou University of Science and Technology, 2017.
- [ 2 ] 陈小华, 杨青, 孙从军, 等. 典型地下水浅埋区加油站渗漏污染潜势分析及高潜势验证[J]. 环境科学研究, 2013, 26(11): 1171-1177.

CHEN X H, YANG Q, SUN C J, et al. Leaking potential analysis of gas stations and monitoring of high-potential-value stations in a typical shallow water-table area[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(11): 1171-1177.

- [ 3 ] 周迅. 苏南地区加油站地下水储油罐渗漏污染研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.  
ZHOU X. Study on leakage pollution of groundwater storage tank in gas station in southern Jiangsu [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2007.
- [ 4 ] 葛佳. 加油站的油品渗漏污染调查及健康风险评估[D]. 上海: 东华大学, 2013.  
GE J. Investigation on oil leakage contamination and health risk assessment of gas station[D]. Shanghai: Donghua University, 2013.
- [ 5 ] 石丕星, 李凯华, 胡清, 等. 中国甲基叔丁基醚污染现状及防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(10): 1310-1314.  
SHI P X, LI K H, HU Q, et al. Research on the pollution status and control countermeasures of methyl tert-butyl ether in China [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(10): 1310-1314.
- [ 6 ] 张宏凯, 左锐, 王金生, 等. 加油站泄漏污染物的迁移分布规律[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1532-1539.  
ZHANG H K, ZUO R, WANG J S, et al. The underground migration and distribution of petroleum contamination at a gas station[J]. Chinese Environmental Science, 2018, 38(4): 1532-1539.
- [ 7 ] 郝丽虹, 刘桂青, 张世晨, 等. 城市加油站场地典型有机污染物空间分布特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2175-2184.  
HAO L H, LIU G Q, ZHANG S C, et al. Spatial distribution characteristics of typical organic pollutants in urban petrol station [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(11): 2175-2184.
- [ 8 ] 梁增强, 杨菁. 甲基叔丁基醚环境污染特性及修复技术研究进展[J]. 环境与发展, 2020, 32(1): 9-10.  
LIANG Z Q, YANG J. Research progress on environmental pollution characteristics and remediation technology of methyl tert-butyl ether[J]. Environment and Development, 2020, 32(1): 9-10.
- [ 9 ] BRADLEY P M, CHAPPELLE F H, LANDMEYER J E. Methyl t-butyl ether mineralization in surface-water sediment microcosms under denitrifying[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2001, 64(4): 1975-1978.
- [ 10 ] BRUCE B W, MCMAHON P B. Shallow ground-water quality beneath a major urban center: Denver, Colorado, USA [J]. Journal of Hydrology, 1996, 186(1/2/3/4): 129-151. DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03031-4.
- [ 11 ] RICHARD W G, MARK W L. Occurrence of MTBE in drinking

- water sources[J], Journal American Water Works Association, 2000, 92(1): 100-107.
- [12] KLINGER J, STIELER C, SACHER F, et al. MTBE (methyl tertiary-butyl ether) in groundwaters: Monitoring results from Germany[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2002, 4(2): 276-279.
- [13] CARLOS G, BAYONA J, READMAN J. Sources, distribution and behaviour of methyl tert-butyl ether (MTBE) in the Tamar Estuary, UK[J]. Chemosphere, 2004, 57(6): 429-437.
- [14] 李琰, 周志俊, 宁文吉, 等. 上海市闵行区居民供水系统中挥发性有机物分析[J]. 复旦学报(医学版), 2017, 44(5): 644-651.
- LI Y, ZHOU Z J, NING W J, et al. Analysis of volatile organic compounds in water supply system of Minhang District of Shanghai[J]. Fudan University Journal of Medical Sciences, 2017, 44(5): 644-651.
- [15] 梁林涵. 北京市汽油添加剂甲基叔丁基醚环境污染特征、人群健康分析评估及环境管理对策研究[D]. 南宁: 广西医科大学, 2015.
- LIANG L H. Environmental pollution characteristics, human health risk assessment and environmental management measures strategy of methyl tert-butyl ether in Beijing[D]. Nanning: Guangxi Medical University, 2015.
- [16] 陈井影. 甲基叔丁基醚(MTBE)在地表水中的环境行为及影响因素的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2004.
- CHEN J Y. Research on influencing factors and environmental behavior of methyl tert-butyl ether (MTBE) in surface water[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2004.
- [17] 王希在, 奉夏平, 闻环. 固相微萃取-GC-MS-SIM 法监测惠州市地表水中 MTBE 的污染状况[J]. 光谱实验室, 2009, 26(6): 1398-1403.
- WANG X Z, FENG X P, WEN H. Determination of methyl tert-butyl ether in surface water of Huizhou City using the method of SPME-headspace-GC-MS-SIM [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2009, 26(6): 1398-1403.
- [18] 国家环境保护部. 加油站地下水污染防治技术指南(试行)[EB/OL]. (2017-03-09)[2023-07-06]. [http://stj.xingtai.gov.cn/attachment/cms/item/2018\\_06/26\\_16/83cb1a2986b24e2d.pdf](http://stj.xingtai.gov.cn/attachment/cms/item/2018_06/26_16/83cb1a2986b24e2d.pdf).
- National Ministry of Environmental Protection. Technical guide for prevention and control of groundwater pollution in gas stations (Trial) [EB/OL]. (2017-03-09)[2023-07-06]. [http://stj.xingtai.gov.cn/attachment/cms/item/2018\\_06/26\\_16/83cb1a2986b24e2d.pdf](http://stj.xingtai.gov.cn/attachment/cms/item/2018_06/26_16/83cb1a2986b24e2d.pdf).
- [19] BUS J S, GOLLAPUDI B B, HARD G C. Methyl-tert-butyl ether (MTBE): Integration of rat and mouse carcinogenicity data with mode of action and human and rodent bioassay dosimetry and toxicokinetics indicates MTBE is not a plausible human carcinogen[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, 2022, 25(4): 135-161.
- [20] GUO M X, LI M D, CHEN L, et al. Glutaminase 1 isoform up-regulation associated with lipid metabolism disorder induced by methyl tertiary-butyl ether in male rats[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 255: 114763. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.114763.
- [21] 贺中汉, 叶伟国, 方道奎, 等. 汽油添加剂甲基叔丁基醚对 DNA 聚合酶  $\beta$  低表达的 16HBE 细胞所致 DNA 损伤分析[J]. 毒理学杂志, 2020, 34(4): 296-299.
- HE Z H, YE W G, FANG D K, et al. Analysis on DNA damage induced by methyl tert-butyl ether in human bronchial epithelial cells with low level of DNA polymerase beta [J]. Journal of Toxicology, 2020, 34(4): 296-299.
- [22] United States Environmental Protection Agency. Drinking water standards and health advisories tables [R]. Washington D. C.: EPA, 2018.
- [23] 生态环境部. 地下水环境监测技术规范: HJ/T 164—2020 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical specifications for environmental monitoring of groundwater: HJ/T 164—2020 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2020.
- [24] 胡丽雅. 上海市加油站地下水中甲基叔丁基醚污染状况调查及健康风险评估[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(12): 1652-1656.
- HU L Y. Investigation and health risk assessment of methyl tert-butyl ether pollution in groundwater of gas stations in Shanghai [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(12): 1652-1656.
- [25] 生态环境部. 水质 可萃取性石油烃( $C_{10}-C_{40}$ )的测定 气相色谱法: HJ 894—2017 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality—Determination of extractable petroleum hydrocarbons ( $C_{10}-C_{40}$ )—Gas chromatography: HJ 894—2017 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017.
- [26] 生态环境部. 水质 挥发性石油烃( $C_6-C_9$ )的测定 吹扫捕集/气相色谱法: HJ 893—2017 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality—Determination of volatile petroleum hydrocarbons ( $C_6-C_9$ )—Purge and trap/gas chromatography: HJ 893—2017 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017.
- [27] 宋炜. 北京市典型加油站地下水污染评估与分级防控研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- SONG W. Study on groundwater pollution assessment and classification of typical gas stations in Beijing City [D]. Changchun: Jilin University, 2016.

- [28] 赵丽, 张韵, 郭劲松, 等. 重庆市加油站周边浅层地下水中石油烃污染调查与特征分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 131-136.  
ZHAO L, ZHANG Y, GUO J S, et al. Investigation on pollution characteristics of petroleum hydrocarbon in shallow groundwater around gas stations [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1): 131-136.
- [29] 张小凤, 刘文超, 苏子艺, 等. 成都平原社会加油站地下储油罐渗漏有机污染物监测[J]. 环境工程, 2015, 33(7): 127-130.  
ZHANG X F, LIU W C, SU Z Y, et al. Characteristics of pollutants from underground storage tank leakage in social gas station in Chendu Plain [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 33(7): 127-130.
- [30] 潘海燕, 过伟. 淮安市地表水和地下水中残留 MTBE(甲基叔丁基醚)的调查[J]. 仪器仪表与分析监测, 2007(4): 45-46.  
PAN H Y, GUO W. An investigation on MTBE residue in surface and ground water of Huai'an [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2007(4): 45-46.
- [31] 中华人民共和国环境保护部. 地下水污染健康风险评估工作指南(试行)[R]. 北京: 环境保护部, 2014.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Guidelines for health risk assessment of groundwater pollution (Trial) [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2014.
- [32] United States Environmental Protection Agency. Regional screening levels (RSL) summary table [EB/OL]. (2023-12-11) [2023-07-06]. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>.

## (上接第 79 页)

- [13] 李璞, 李红卫, 吕谋, 等. 供水管网节点水龄变化规律研究[J]. 青岛理工大学学报, 2014, 35(2): 66-71.  
LI P, LI H W, LÜ M, et al. Research of some rules on node age change in water supply network [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2014, 35(2): 66-71.
- [14] LEE B H, DEININGER R A. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system [J]. Journal of Environmental Engineering, 1992, 118(1): 4-16.
- [15] LEE B H, DEININGER R A, CLARK R M. Locating monitoring stations in water distribution systems [J]. Journal American Water Works Association, 1991, 83(7): 60-66.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [17] 全重臣, 员建, 苑宏英, 等. 饮用水处理中氯化消毒副产物三卤甲烷和卤代乙酸研究进展[J]. 净水技术, 2012, 31(2): 6-11.  
TONG Z C, YUAN J, YUAN H Y, et al. Advances in research of trihalomethanes and haloacetic acids of chlorination disinfection by-products in drinking water treatment [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(2): 6-11.
- [18] 曾磊, 刘海燕, 贺珊珊, 等. 饮用水卤代烃污染及其防治去除研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(3): 21-25, 31.  
ZENG L, LIU H Y, HE S S, et al. Research progress of control and removal of halogenated hydrocarbon pollution in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(3): 21-25, 31.
- [19] 李岚泊. 基于遗传算法的给水管网优化设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
LI L B. Optimal design of water supply system based on improved genetic algorithm[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [20] 黄雅芳. 城市配水管网二次加氯的优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.  
HUANG Y F. A study on optimizing rechlorination in water distribution systems [D]. Changsha: Hunan University, 2005.