

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

赵丽^{1,2} 张韵² 郭劲松^{1*} 张丹² 邓春光²

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147)

摘要 为了解加油站运营对周边浅层地下水环境质量的影响, 随机选择了12个正常运营20年以上的加油站, 在加油站上游和下游共布设了27口地下水监测井, 对地下水中石油烃、苯系物、萘、1,2-二氯乙烷和甲基叔丁基醚开展了水质监测。结果表明, 石油烃在地下水中的检出率较高, 为96.3%, 检出浓度为4.2~544.7 μg/L, 检出组分主要为柴油烃中的C₂₆和C₂₀, 检出率分别达到了88.9%和77.8%; 汽油烃的有效组分C₆~C₉未检出, 作为汽油添加剂的1,2-二氯乙烷和甲基叔丁基醚在地下水中存在, 检出率分别为96.3%和22.2%, 检出浓度分别为1.7~30.9 μg/L和3.8~30.9 μg/L。其中, 11.1%的监测井中甲基叔丁基醚浓度超过了EPA推荐的饮用水安全的浓度限值(20 μg/L), 3.7%的监测井中1,2-二氯乙烷浓度超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中“集中式生活饮用水地表水源地特定项目标准限值”规定的30 μg/L。总体而言, 石油烃、苯系物、1,2-二氯乙烷和甲基叔丁基醚的含量远低于油品渗(泄)漏导致的污染水平。

关键词 加油站 石油烃 浅层地下水 污染特征

中图分类号 X523 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)01-0131-06

Investigation on pollution characteristics of petroleum hydrocarbon in shallow groundwater around gas stations

Zhao Li^{1,2} Zhang Yun² Guo Jingsong¹ Zhang Dan² Deng Chunguang²

(1. Faculty of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing 401147, China)

Abstract In order to monitor the organic pollution in shallow groundwater of gas stations in Chongqing, 27 groundwater sample sites around 12 gas stations which have been operated more than 20 years in western Chongqing were proposed. Total petroleum hydrocarbon (TPH), benzene, naphthalene, 1,2-dichloroethane (1,2-DCA) and methyl tert-butyl ether (MTBE) were monitored. The results show that major typical pollutants in the shallow groundwater of gas stations are TPH, 1,2-DCA and MTBE. The detection rate of TPH is 96.3% with concentration range from 4.2 μg/L to 544.7 μg/L, and the main chemical components of TPH are detected with n-alkanes of C₂₀ and C₂₆. 1,2-DCA is detected in 26 groundwater samples, accounting the rate for 96.3%. The concentration of 1,2-DCA is ranged from 1.7 μg/L to 30.9 μg/L. The concentrations of 1,2-DCA exceed the standard of centralized drinking water in Surface Water Environment Quality Standard (GB3838-2002) for 3%. MTBE is found in 6 shallow groundwater samples which accounting the rate for 22.2% with concentration varies from 3.8 μg/L to 30.9 μg/L. And the concentrations exceed the safe drinking water standard of EPA for 20 μg/L. Comparing with the results of other researches, the pollution status of TPH, BTEX, MTBE and naphthalene in shallow groundwater of Chongqing is lower than those caused by oil leakage.

Key words gas stations; petroleum hydrocarbon; shallow groundwater; pollution characteristics

作为典型的储油设施, 加油站储油罐和管线渗(泄)漏以及油品运输和销售过程中的跑、冒、滴、漏将会导致油品进入地下水, 造成石油烃污染。石油烃中含有多种具有致癌、致畸和致突变性的化学物质, 直接威胁着人体健康和生态环境安全^[1]。因此, 自20世纪80年代开始, 地下水石油烃污染便受

基金项目: 环保重大专项全国地下水基础环境状况调查评估 (2110302)

收稿日期: 2015-01-27; 修订日期: 2015-03-17

作者简介: 赵丽(1981—), 女, 博士研究生, 工程师, 主要从事水资源保护工作。E-mail: zhaolizd@126.com

* 通讯联系人 E-mail: Guo0768@126.com

到了世界各国的高度重视,欧美国家更是将其列为环境优先控制污染物,并开展了大量的调查和研究^[2-7]。我国石油烃污染研究虽然起步较晚,但也开展了大量的研究工作,取得了丰硕的成果^[9-12],多数研究聚焦于石油烃的迁移转化趋势及模拟和污染修复等方面,对于加油站运营产生的石油烃污染水平问题鲜有报道。近年来,由于油罐超龄、老化、腐蚀、地质变化等原因,我国加油站漏油导致的地下水污染问题开始显现,部分城市地下水中,石油烃类污染物已广泛存在^[13-15]。由于地下水污染具有发现难、危害重、治理难度大、费用高的特点,现阶段地下水保护工作的重点在于防范,因此开展加油站运营对地下水环境影响的调查分析,对加强加油站周边地下水石油烃污染防范有着至关重要的现实意义。以 $C_6 \sim C_9$ 、 $C_{10} \sim C_{28}$ 、甲基叔丁基醚(MTBE)、1,2-二氯乙烷(DCA)、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘等为汽油、柴油的指示指标,开展浅层地下水中石油烃污染现状调查,以期揭示加油站运行对周边地下水的影响,为保护加油站周边地下水环境质量提供技术支撑。

1 研究区概况

根据已有研究得出的经验,油罐和管线一般会在20年左右因锈蚀和腐蚀而产生渗漏^[2-5],在重庆市随机选择了12个建站20年及以上的民营加油站进行调查研究,12个加油站均由加油岛、办公区和油罐区组成,周边没有类似污染源,从销售量和储油规模判断都属于三级加油站。储油罐材质为单层钢材,内层无保护,罐体外由玻璃纤维或沥青涂层包裹,输油管线为吸取式,材质为无缝钢管,外层由玻璃纤维或沥青涂层包裹,无其他防漏措施。现场调查和走访发现加油站均未发生过明显的泄露事故。

研究对象主要分布在重庆市主城区和渝西片区,属亚热带季风湿润气候,年均降雨量为970~1080 mm。地形高低悬殊,地貌以低山和丘陵为主。地层出露较齐全,自青白口系至第四系均有出露,以沉积岩为主,主要类型为碳酸盐岩类和碎屑岩类。从钻孔信息看,地下水为基岩裂隙水,岩层主要为泥岩和砂岩。

2 研究方法

2.1 采样点布设

由于加油站所在区域为丘陵地带,地下水受地形地貌影响显著,流场相对复杂,且有局部流场存

在,因此,在进行布点前逐一开展详细的水文地质调查,科学判断地下水流向,保证布点的合理性。为了同时兼顾储油罐、管线渗漏和油品跑、冒、滴、漏产生的影响,以加油站整体作为研究对象,在加油站上游布设一口背景监测井,下游分设1~3口污染监控井,12个加油站共设27口地下水监测井。

2.2 样品采集及分析

加油站主营产品为汽油和柴油,汽油的主要成份是 $C_4 \sim C_{12}$ 脂肪烃和环烃类,柴油的主要成分是 $C_{10} \sim C_{22}$ 链烷烃、环烷烃和芳烃。根据汽油、柴油以及添加剂的主要组分,筛选出对人体健康威胁大、在地下水中能够长期稳定存在、具有特征性、敏感性和实用性的污染物作为石油烃污染研究的指示指标,选择石油烃(TPH,含汽油烃类 $C_6 \sim C_9$ 和柴油烃类 $C_{10} \sim C_{28}$)、甲基叔丁基醚(MTBE)、1,2-二氯乙烷(DCA)、苯系物、萘为监测因子。

地下水样品的采集过程和方法参照我国污染场地环境监测技术导则(征求意见稿),地下水样品的保存方法参照《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 166)中的相关内容。地下水样品中的 $C_6 \sim C_9$ 、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、萘、1,2-二氯乙烷(DCA)、甲基叔丁基醚(MTBE)采用吹扫捕集-气相色谱/质谱法(EPA8260C)分析检测, $C_{10} \sim C_{28}$ 采用气相色谱-氢火焰离子化检测器法(EPA8015C)进行实验室分析。

2.3 数据处理

$C_6 \sim C_9$ 、 $C_{10} \sim C_{28}$ 、TPH为复合参数,其中 $C_6 \sim C_9$ 为汽油类石油烃指示指标,是指 C_6 、 C_7 、 C_8 、 C_9 4个子指标浓度的总和; $C_{10} \sim C_{28}$ 为柴油类石油烃的指示指标,是指 C_{10} 、 C_{12} 、 C_{14} …… C_{26} 、 C_{28} 10个子指标的总和,而TPH是 $C_6 \sim C_9$ 和 $C_{10} \sim C_{28}$ 两个复合浓度的总和。在复合参数计算时,未检出的指标按照检出限的1/2计算,如若所有子指标均未检出,则加和时按照未检出计。

3 结果与分析

3.1 水位与储油罐的位置关系

于2013年11月—12月对研究对象周边的地下水水位进行了测量,共计测量水位点68个,水位分布在0.2~12.9 m之间,波动较大,体现了丘陵地区地下水流场复杂的特征,水位空间分布情况详见图1。由图1可以看出,单个加油站附近的水位差异显著,以水位波动最大的1[#]加油站为例,最低水位为12.9 m,最高位为0.2 m,水位差异非常显著。

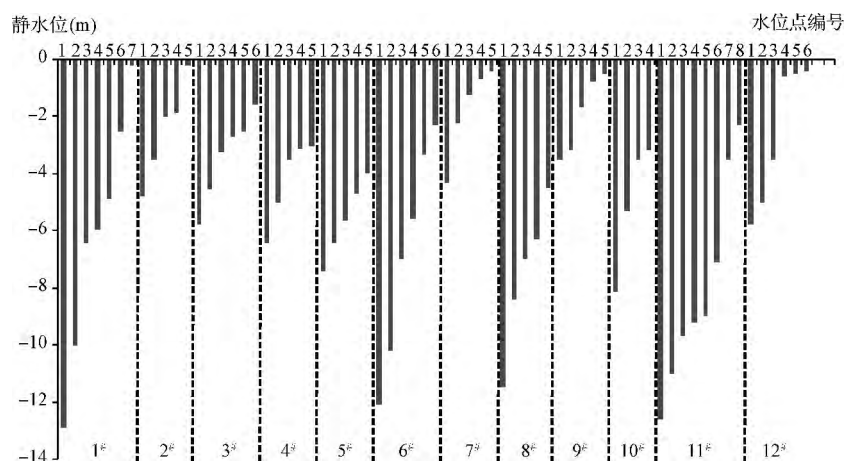


图 1 加油站地下水水位空间分布图

Fig. 1 Fluctuation of groundwater level around 12 gas stations

相关性分析结果显示,地下水水位与地面高程具有显著相关性,相关系数为 0.981,说明地下水水位和流向主要受地形地貌的影响。调查发现,12 个加油站的储罐区均处于场地内地势较高处,罐底高程位于最高水位线之上,根据近年来《重庆市地质环境公报》发布的地下水水位常年变化小于 1 m 的幅度,假设丰水期水位均在本次调查水位的基础上上升 1 m(小于 1 m 的不计入),储油罐仍在最高水位线之上,不会受到地下水的直接侵蚀。

3.2 污染物在地下水中的分布

3.2.1 TPH

图 2 给出了 TPH 在加油站周边地下水中的检出结果(不含最高值),TPH 在 27 个地下水监测井中的检出率为 96.3%,检出浓度范围为 4.2 ~ 544.7 $\mu\text{g/L}$,平均浓度为 30.4 $\mu\text{g/L}$,最高值出现 12#加油站下游,除此之外,其余监测井中的检出浓度均不

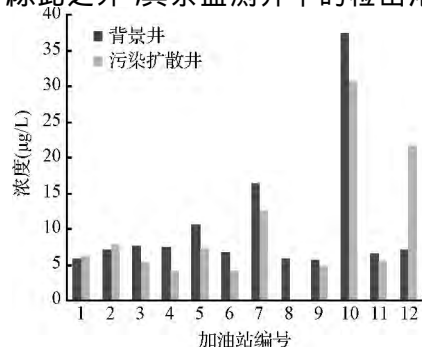
图 2 TPH 在加油站周边地下水中的分布情况
(最高检出值除外)

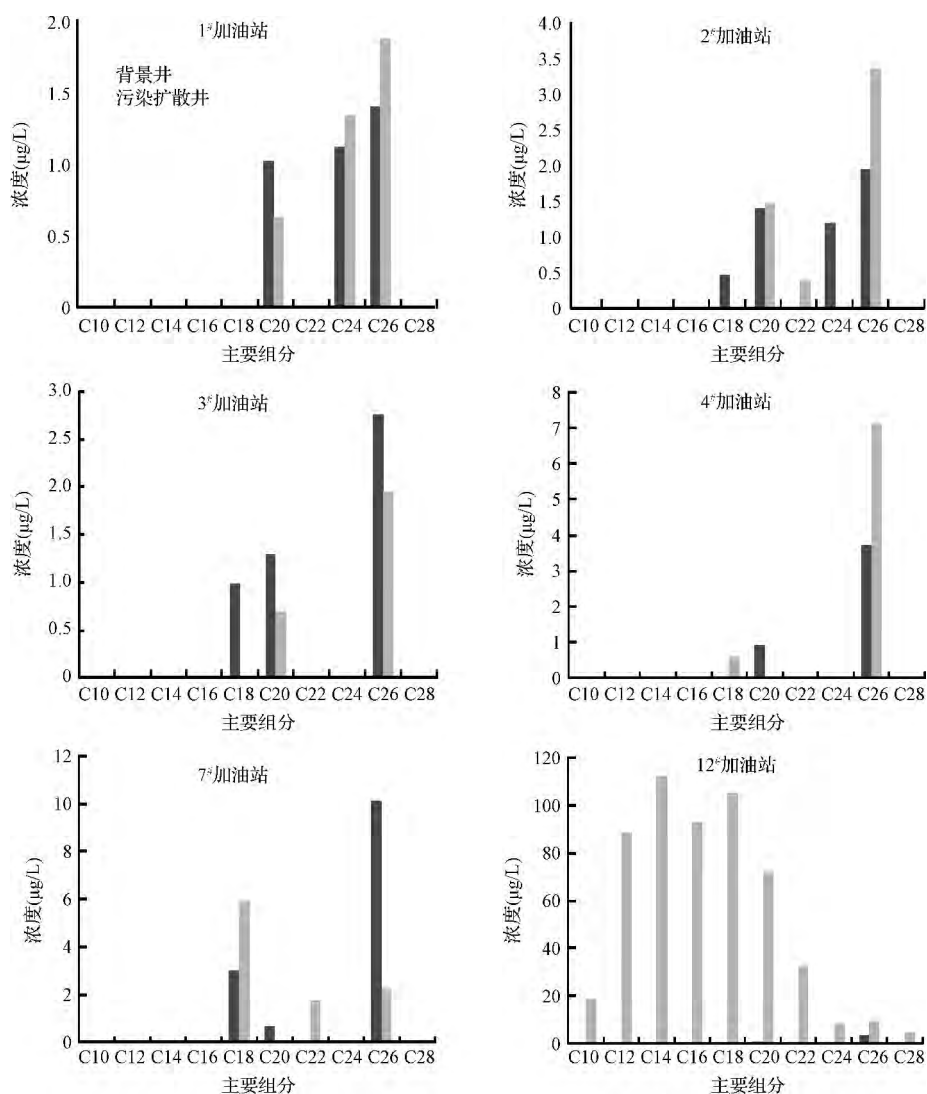
Fig. 2 Spatial distribution of TPH in groundwater around gas stations(exclude the peak value)

高,为 4.2 ~ 37.5 $\mu\text{g/L}$ 。这一结果远低于葛佳等^[16]、杨青等^[17]对发生油品渗漏加油站周边浅层地下水中 TPH 的调查结果(见表 1),说明这 12 个加油站的运营虽然已经对周边浅层地下水产生了不同程度的污染,但污染程度远低于发生油品渗(泄)漏造成的石油烃污染。

从检出物组成看,主要检出组分是柴油烃类,而汽油烃类在所有样品中均未检出,说明相较于极易挥发的汽油而言挥发性较差的柴油更容易滞留在地下水中,造成地下水污染。图 3 列出了部分加油站地下水中柴油烃类的检测结果,从中可以看出,柴油烃中的 C_{26} 和 C_{20} 检出率相对较高,检出率分别为 88.9% 和 77.8%,其次为 C_{18} 和 C_{24} ,检出率分别为 33.3% 和 14.8%,说明含碳原子越多污染物越容易残留在地下水中。而在 TPH 检出浓度最高的 12#加油站的下流, $C_{10} \sim C_{28}$ 各组分均被检出,检出浓度主要分布在 $C_{10} \sim C_{22}$,浓度分布基本与慕山等^[18]对 20#柴油进行的成分分析结果相吻合,说明柴油中各组分在地下水中的残留浓度与其在柴油中的含量有关。综合上述两种现象,柴油烃在地下水中的残留一方面与各组分在柴油中的含量有关,另一方面也与其自身的特性有关。

对比分析各组分在背景监测井和污染扩散井中的分布规律可知,检出组分和检出浓度在空间分布上都没有表现出明显的规律性,说明地下水中 TPH 的存在可能不是由于油品渗漏导致的,而是与加油过程中的跑、冒、滴、漏通过湿沉降或者冲洗地面的含油废水通过地面入渗有关。

图 3 还可以看出,检出组分最多和检出浓度最

图3 加油站周边地下水中 $C_{10} \sim C_{28}$ 各组分的检出情况Fig. 3 Main chemical components of $C_{10} \sim C_{28}$ in groundwater around gas stations

高的点位均位于12[#]加油站的下游,通过反推法排除了该加油站油品渗(泄)漏的可能。监测井位于加油站下游150 m处,钻孔信息显示,该处上层为粉质粘土,下层为泥岩,渗透系数为 $2.0 \sim 4.5 \times 10^{-6}$ cm/s,假设油罐或管线发生了油品泄露,按照最大渗透系数计算,加油站泄露的油品需要105年方可达到该监测井,而加油站仅仅运营了二十余年,显然假设不成立。走访调查发现,12[#]加油站每天冲洗地面,产生的地面冲洗水经过隔油池(隔油池的填充物为河沙,且近2~3年未更换)吸收后直接排入了位于其下游的水田中,水田中常年有水,与地下水之间的具有直接的水力联系,污染物可以通过地表入渗直接进入地下水中,造成下水石油烃污染。因此,加油站地表冲洗水对地下水的影响不容忽视,需加

强地面冲洗水的管理,杜绝不当排放,强化隔油设施的管理,定期更换填充物。

3.2.2 挥发性有机物

苯、甲苯、乙苯、邻-二甲苯、间(对)-二甲苯、萘在所有样品中均未检出,这可能存在两方面的原因:一方面,这些挥发性有机物在进入地下水的过程中被土壤吸附或截留,并未真正进入地下水中;另一方面,进入地下水的少量污染物通过包气带挥发、地下水稀释或者微生物的降解得以去除和降低至检测限之下。

1,2-DCA作为汽油的减震添加剂,在27口地下水监测井中的检出率为96.3%,检出浓度为1.7~30.7 μg/L,平均浓度为6.9 μg/L。其中1,2-DCA在6#加油站下游监测井中的浓度超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中“集中式生活饮用

水地表水源地特定项目标准限值”规定的 $30 \mu\text{g/L}$, 详见图 4。1,2-DCA 主要使用于 2000 年以前的含铅汽油, 距今含铅汽油已退出市场 10 年有余, 仍可在地下水中检测到该污染物, 甚至出现超标现象, 可见该污染物一旦进入地下水将在很长时期内难以降解, 造成持久性的影响。对比 1,2-DCA 加油站周边地下水中的浓度分布可以看出, 1,2-DCA 在下游的污染扩散井浓度略高于上游的背景监测井, 说明 1,2-DCA 的迁移趋势与地下水流向基本一致。

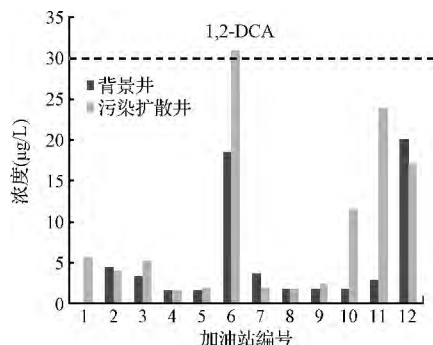


图 4 1,2-DCA 在加油站周边地下水中的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of 1,2-DCA in groundwater around gas stations

MTBE 作为汽油添加剂于 1997 年正式代替铅在我国投入使用, 在 27 口地下水监测井中的检出率较 1,2-DCA 低, 为 22.2%, 检出浓度为 $4.8 \sim 30.9 \mu\text{g/L}$, 平均浓度为 $3.8 \mu\text{g/L}$, 检出情况详见图 5。其中 3 个监测井中 MTBE 的浓度超过了 EPA 推荐的饮用水含量限值 $20 \mu\text{g/L}$, 占检出点位的 50%。分析其超标的原因发现, 一方面 MTBE 具有相对较高的蒸气压, 在 25°C 时为 $(3.27 \sim 3.35) \times 10^4 \text{ Pa}$, MTBE 大量使用导致其在大气中积累^[19, 20], 另一方面 MTBE 水溶性强 ($42\,000 \text{ mg/L}$)^[16, 17], 且不易被土壤

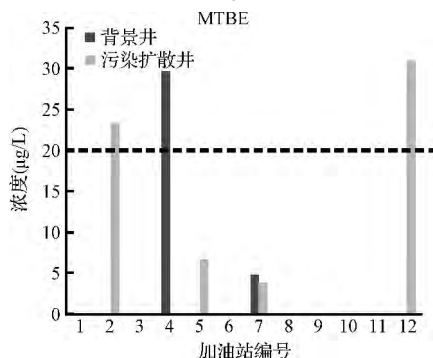


图 5 MTBE 在加油站周边地下水中的空间分布情况

Fig. 5 Spatial distribution of MTBE in groundwater around gas stations

吸附, 在大气中积累的 MTBE 极易通过湿沉降进入地下水, 造成地下水污染。

3.3 污染水平分析

为了直观说明 12 个加油站周边地下水石油烃污染的严重程度, 将本项目的调查结果与已有研究获得的调查结果进行对比, 详见表 1。可以看出, TPH、BTEX、苯和 MTBE 的含量都明显低于发生油品渗(泄)漏时地下水中的含量。有机物作为一类特殊的污染物, 在地下水中本不应存在, 所以检出即为污染, 而 1,2-DCA 和 MTBE 在地下水中还出现了超标现象, 因此, 12 个加油站的运营虽未对周边地下水造成油品渗(泄)漏级别的石油烃污染, 但已严重影响了地下水的饮用安全。

表 1 石油烃特征污染物最高含量对比表

Table 1 Peak values of TPHs in groundwater around gas stations from different studies ($\mu\text{g/L}$)

来源	污染物			
	TPH	BTEX	苯	MTBE
渗(泄)漏加油站 1 ^[16]	6 632	298	24.3	1 790
渗(泄)漏加油站 2 ^[17]	>4 000	>250	>80	>250
渗(泄)漏加油站 3 ^[21]	—	91.7	0.7	—
本项目	544.7	未检出	未检出	30.9

从表 1 还可以看出, 发生明显渗(泄)漏的加油站, 地下水中能够检出苯、甲苯等苯系物和苯, 未发生明显渗(泄)漏的加油站可能无法检出此类污染物。柴油烃 $\text{C}_{10} \sim \text{C}_{28}$ 和汽油添加剂 1,2-DCA、MTBE 在加油站周边地下水中的检出率较高, 可以作为研究加油站运营对地下水影响的稳定指示指标。

4 结 论

(1) 12 个加油站均未发生过泄露事故, 油罐在最高水位线之上, 地下水未直接侵蚀油罐和管线。

(2) TPH 在加油站周边地下水中检出率较高, 达到了 96.3%, 检出浓度为 $4.2 \sim 544.7 \mu\text{g/L}$, 主要检出组分为柴油烃中的 C_{26} 和 C_{20} , 检出率分别达到了 88.9% 和 77.8%。

(3) 汽油类石油烃 $\text{C}_6 \sim \text{C}_9$ 虽未检出, 但作为汽油添加剂使用的 1,2-DCA 和 MTBE 在地下水中被检出, 检出率分别达到了 96.3% 和 22.2%, 检出浓度分别为 $1.7 \sim 30.9 \mu\text{g/L}$ 和 $3.8 \sim 30.9 \mu\text{g/L}$, 部分地下水中的含量超过了饮用水安全的限值。

(4) 与已发生明显油品渗(泄)漏加油站造成的

污染对比,BTEX、萘、TPH和MTBE的含量远低于发生油品渗(泄)漏时地下水中的含量。

(5)对于为发生明显渗(泄)漏的加油站,稳定性强的 $C_{10} \sim C_{28}$ 和汽油添加剂1,2-DCA、MTBE更适合作为柴油和汽油污染的指示指标。

参考文献

- [1] Lesage S., Xu H., Kent S. N. Distinguishing natural hydrocarbons from anthropogenic contamination in ground water. *Groundwater* **1997**, 35(1): 149-160
- [2] Dharmavaram S., Piskin K., Hootor T. J., et al. A profile and management of the US Army's underground storage tanks. *Environmental Management* **1989**, 13(3): 333-338
- [3] Weaver J. W., Jordan L., Hall D. B. Predicted ground water soil and soil gas impacts from US gasoline(2004): First analysis of the autumnal data. EPA/600/R-05/032. Washington, D. C.: United States Environmental Protection Agency **2005**
- [4] Borden R. C., Gomez C. A., Becker M. T., et al. Geochemical indicators of intrinsic bioremediation. *Groundwater*, **1995**, 33(2): 180-189
- [5] Lee C. H., Lee J. Y., Jang W. Y., et al. Evaluation of air injection and extraction tests at a petroleum contaminated site, Korea. *Water, Air and Soil Pollution* **2002**, 135(1-4): 65-91
- [6] Vazquez D., Mansoori G. A. Identification and measurement of petroleum precipitates. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2000**, 26(1-4): 49-55
- [7] Wang Zhendi, Li K., Fingas M., et al. Characterization and source identification of hydrocarbons in water samples using multiple analytical techniques. *Journal of Chromatography A* **2002**, 971(1-2): 173-184
- [8] 李洪. 甲基叔丁基醚在地下环境中迁移过程研究. 天津: 天津大学博士学位论文 **2007**
Li Hong. Transport process of MTBE in underground surroundings. Tianjin: Doctor Dissertation of Tianjin University **2007**(in Chinese)
- [9] 庄志东. 浅议地下贮油库(罐)的防泄漏安全措施和地下水的污染防治. *水文地质工程地质* **1999**, (5): 30-32
- [10] 吕华, 马振民. 某研究区地下水石油类污染的调查与预测. *有色金属* **2005**, 57(2): 145-149
Lü Hua, Ma Zhenmin. Investigation and prediction on groundwater oil pollutes of a target area. *Nonferrous Metals* **2005**, 57(2): 145-149(in Chinese)
- [11] 侯杰. 大庆市地下水石油类污染系统形成机制研究. *中国岩溶* **1999**, 18(4): 361-366
Hou Jie. Researches on the formation mechanism of the oil pollution system in groundwater in Daqing City. *Carsologica Sinica* **1999**, 18(4): 361-366(in Chinese)
- [12] 黄廷林, 任磊. 黄土地区石油类污染物的径流污染模拟及模型预测. *中国环境科学* **2000**, 20(4): 345-348
Huang Tinglin, Ren Lei. Simulating and modeling of the runoff pollution of petroleum pollutants in loess plateau. *China Environmental Science* **2000**, 20(4): 345-348(in Chinese)
- [13] 何伟, 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. *环境科学与技术* **2012**, 35(61): 198-202
He Wei, Sun Changhong, Chen Dadi, et al. Leak detection for gas station USTs and monitoring of pollution. *Environmental Science & Technology* **2012**, 35(61): 198-202(in Chinese)
- [14] 张宝良. 油田土壤石油污染与原位生物修复技术研究. 大庆: 大庆石油学院博士研究生学位论文 **2007**
Zhang Baoliang. Research on in-situ bioremediation for oil-contaminated soil in oilfields. Daqing: Doctor Dissertation of Daqing Petroleum Institute **2007**(in Chinese)
- [15] 高庆然. 齐鲁石化公司地下水石油污染现状及污染模拟研究. 苏州: 苏州大学硕士学位论文 **2007**
Gao Qingran. Simulation study on actuality and pollution of oil in groundwater in Qilu petrochemical company. Suzhou: Master Dissertation of Suzhou University **2007**(in Chinese)
- [16] 葛佳, 刘振鸿, 杨青, 等. 加油站的油品渗漏污染调查及健康风险评估. *安全与环境学报* **2013**, 13(2): 97-101
Ge Jia, Liu Zhenhong, Yang Qing, et al. Investigation and assessment: Oil leakage contamination at a gas station and the health hazards due to its contamination. *Journal of Safety and Environment* **2013**, 13(2): 97-101(in Chinese)
- [17] 杨青, 陈小华, 孙从军, 等. 地下水浅埋区某加油站特征污染物空间分布. *环境工程学报* **2014**, 8(1): 98-104
Yang Qing, Chen Xiaohua, Sun Congjun, et al. Spatial distribution of typical pollutants of gas stations in shallow water-table areas. *Chinese Journal of Environmental Engineering* **2014**, 8(1): 98-104(in Chinese)
- [18] 慕山, 许端平, 陈洪, 等. 大庆贴不贴泡周边土壤及地下水石油烃污染规律. *环境科学研究* **2006**, 19(2): 16-19
Mu Shan, Xu Duanping, Chen Hong, et al. Contamination of petroleum hydrocarbons in soils and groundwater around Tiebutie pool in Daqing. *Research of Environmental Sciences* **2006**, 19(2): 16-19(in Chinese)
- [19] Pankow J. F., Thomson N. R., Johnson R. L., et al. The urban atmosphere as a non-point source for the transport of MTBE and other volatile organic compounds(VOCs) to shallow groundwater. *Environmental Science & Technology* **1997**, 31(10): 2821-2828
- [20] 刘杰民, 温美娟, 程慧琼, 等. 甲基叔丁基醚(MTBE)对环境的污染及其对我国汽油生产的影响. *环境污染治理技术与设备* **2002**, 3(3): 7-11
Liu Jiemin, Wen Meijuan, Cheng Huiqiong, et al. The environmental pollution of MTBE and its influence for gasoline production in China. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control* **2002**, 3(3): 7-11(in Chinese)
- [21] 罗炳佳, 杨胜元, 罗维, 等. 岩溶地下水有机污染特征分析——以贵阳市某加油站为例. *地球学报* **2014**, 35(2): 255-261
Luo Bingjia, Yang Shengyuan, Luo Wei, et al. Analysis of organic pollution characteristics of karst groundwater: A case study of a gas station in Guiyang. *Acta Geoscientica Sinica* **2014**, 35(2): 255-261(in Chinese)