

中国甲基叔丁基醚污染现状及防治对策研究

石丕星^{1,2} 李凯华^{1#} 胡清^{1,2} 黄珏瑛¹ 丁苏苏¹ 陈丹¹

(1.南方科技大学工程技术创新中心,北京 100083;2.北京环丁环保大数据研究院,北京 100083)

摘要 甲基叔丁基醚(MTBE)因作为汽油添加剂大量使用而广泛存在于不同环境介质中。通过调研中国部分城市大气、土壤和水体环境介质中的 MTBE 污染情况,分析了中国目前 MTBE 的污染现状及影响。结果显示,中国城市区域附近不同环境介质中普遍存在 MTBE 污染,一般区域 MTBE 污染程度较轻,加油站周边环境 MTBE 污染相对较重。部分加油站区域大气中的 MTBE 浓度已经超过可接受的健康风险水平;加油站周边地下水中的 MTBE 检出率较高,对地下水水质安全具有一定威胁。最后,对中国 MTBE 污染防治工作进行了总结并给出了相关建议。

关键词 甲基叔丁基醚 大气 土壤 水体 污染现状 对策

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.10.024

Research on the pollution status and control countermeasures of methyl tert-butyl ether in China SHI Pixing^{1,2}, LI Kaihua¹, HU Qing^{1,2}, HUANG Jueying¹, DING Susu¹, CHEN Dan¹. (1. Engineering Innovation Center of SUSTC, Beijing 100083; 2. Beijing Huanding Environmental Big Data Institute, Beijing 100083)

Abstract: Methyl tert-butyl ether (MTBE) is widely present in different environmental media due to its extensive use as a gasoline additive. Based on the investigation of MTBE pollution in air, soil and water environmental media in some cities of China, the paper analyzed the current situation and impact of MTBE pollution in China. The results showed that MTBE pollution was prevalent in different environmental media near urban areas in China. Generally, the MTBE pollution in ordinary areas was relatively light, and the MTBE pollution in the surrounding environment of the gas station was relatively serious. The concentration of MTBE in the atmosphere of some gas stations had exceeded the health risk level that the workers could accept. Moreover, MTBE detection rate of groundwater around the gas station were also high, which seriously threatened the safety of groundwater quality. In addition, this paper summarized the pollution prevention work of MTBE in China and gave some relevant suggestions.

Keywords: MTBE; air; soil; water; pollution status; countermeasures

甲基叔丁基醚(MTBE)是一种高辛烷值的汽油添加剂,能够有效提高汽油的辛烷值,显著增强汽油的抗爆性能。然而,随着 MTBE 的广泛使用,其在环境介质中,尤其是加油站周边的地下水中被频繁检出。1993—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,在 60 种可检测到的挥发性有机物中,MTBE 检出率仅次于三氯甲烷^[1];1999 年美国环境保护署(USEPA)蓝带小组针对增氧剂广泛使用地区的饮用水供应系统调查发现,MTBE 的检出率超过 5%^[2];2001 年加州环保主管机构对 432 个在用加油站地下储罐周边地下水及地表水展开检测,87% 的样品 MTBE 浓度超过 3 $\mu\text{g/L}$ ^[3]。鉴于 MTBE 被频繁检出,美国各州

政府及相关科学组织对 MTBE 污染影响进行了一系列研究论证,自 2001 年起 USEPA 将 MTBE 列入污染物名录,并要求在地下水和地表水样品检测中均需将 MTBE 列为检测指标。考虑到 MTBE 对水质的污染以及随后陆续发现的潜在生物毒害作用,从 2004 年起美国各州陆续开始禁用 MTBE 调和汽油。

同样,在 2001 年我国含铅汽油被禁用后,随着 MTBE 调和汽油的大量使用,我国不同环境介质中也开始有 MTBE 检出。徐志强^[4]对长春市不同区域土壤中 MTBE 污染情况进行调查,发现加油站和道路两侧土壤中 MTBE 检出率为 100%,而农田土壤中同样也有 MTBE 检出。潘海燕等^[5]对淮安市区地下水进行调查,在一些老旧洗车场区域的地下水中发现有 MTBE 检出。

第一作者:石丕星,男,1986 年生,博士,工程师,研究方向为土壤环境科学。# 通讯作者。

考虑到 MTBE 的生产使用现状以及对人体和环境的影响,我国逐渐开始重视 MTBE 的污染风险。然而,目前仍未见对我国 MTBE 整体污染情况进行系统调查的报道。为此,本研究对我国不同区域不同介质中 MTBE 的污染情况进行了初步调查和总结,可为进一步评估我国 MTBE 污染程度和影响及制定相关决策提供参考。

1 中国 MTBE 生产使用情况

近年来,我国 MTBE 产能、产量及表观消费量(产量与进出口量差值之和)持续增长,目前已然成为世界第一大 MTBE 生产国^[6]。据相关学者研究成果及行业统计数据^[7],2009—2018 年我国 MTBE 产能、产量和表观消费量的变化见图 1。由图 1 可见,我国 2009—2012 年 MTBE 产能年均增长率为 16.7%;2013—2016 年 MTBE 产能年均增长率超过 20%;截至 2016 年,国内 MTBE 总产能已达到 1 719 万 t;然而,从 2016 年开始,国内产能、产量增长率下降趋势明显,2018 年产能增长率仅为 0.3%。

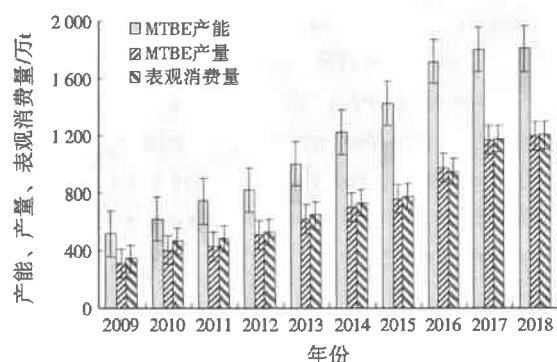


图 1 中国 2009—2018 年 MTBE 产能、产量及表观消费量
Fig.1 China MTBE capacity, production and apparent consumption during 2009-2018

随着产能的增加,国内 MTBE 的产量也在增长,但与产能相比,MTBE 产量增长幅度相对较低,且与产能差距较大。2018 年我国 MTBE 产量及表观消费量均在 1 200 万 t 左右。我国生产的 MTBE 主要用于内供,进出口量均较小,整体上进口量高于出口量。2018 年我国 MTBE 进口总量为 9.53 万 t,较 2017 年大幅减少 53.79%;MTBE 出口量在 8.46 万 t,较 2017 年增加 11.33%,由于产能相对过剩,预计未来我国 MTBE 出口量极可能出现继续增长趋势。

目前国内 MTBE 主要用于石油行业作为汽油添加剂使用,约占 MTBE 总消费量的 90%~95%。部分 MTBE 也应用于化工行业,可用于制取异丁

烯、丁基橡胶、丙烯酸类树脂(MMA)等,约占 MTBE 消费总量的 5%~10%。

2 MTBE 污染现状

MTBE 污染主要来源于调和汽油的生产使用,因此环境中 MTBE 污染程度与加油站及汽车使用量情况具有较好的相关性。一般情况下,城市市区的加油站密度和车用量相对较高,由此导致其环境中的 MTBE 含量也较高,而郊区、农村和其他未开发利用区域污染程度相对较低。

2.1 大气中的 MTBE 污染

研究表明,泄露进入到大气环境中的 MTBE 比进入土壤和水体中的多。欧盟研究显示,有 93.9% 的 MTBE 释放在大气中^[8];1995 年全美有 1 579.9 t MTBE 泄漏,其中 1 535.5 t 释放到大气中,6.9 t 进入地下水,1.8 t 释放到土壤中,35.6 t 释放到地表水中,进入大气中的 MTBE 占 MTBE 泄漏总量的 97.2%^[9]。

大气中 MTBE 最主要的来源为机动车尾气排放,MTBE 的沸点为 55.2 °C,由于部分 MTBE 在汽油燃烧过程中无法完全燃烧,以气态的形式随机动车尾气排放到空气中引起大气污染。ACHTEN 等^[10]在洛杉矶隧道中进行的 MTBE 试验表明,每使用 1 L 含 10% (质量分数) MTBE 的汽油,排放到大气中的 MTBE 达 155 mg。另外,油库泄漏、车辆加油泄露、汽油油箱的挥发损失也会造成 MTBE 向大气排放。

对北京市、深圳市不同功能区大气中 MTBE 污染情况进行分析^[11-12],结果分别见图 2、图 3。结合图 2、图 3 可知,两个城市大气中均含有不同浓度的 MTBE,且检出浓度与点位所在功能区域有关。人口活动密集的商住区和文化旅游区及工业区的 MTBE 浓度总体上高于背景区,反映出大气中 MTBE 浓度与机动车尾气排放的密切相关性。由于 MTBE 可随汽车尾气排放进入大气环境,而我国汽车分布有城市集中的特点,因此推断我国城市大气中可能普遍存在 MTBE 污染。此外,冬季的 MTBE 浓度总体上高于夏季,这是由于不同温度下大气中·OH 浓度不同造成的。大气中·OH 的存在对 MTBE 的光解反应具有重要作用,温度升高会增加大气中·OH 的浓度。温度从 5 °C 增至 25 °C 后,·OH 浓度增加 4 倍^[13],由此导致大气中 MTBE 的浓度下降 52.9%。

另外,调研发现加油站区域大气中的 MTBE 浓度远高于城市内一般区域。深圳市部分加油站区域

大气中 MTBE 平均质量浓度为 25.94~73.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,是一般区域的 14~40 倍。进一步对其进行风险评估,发现加油站区域人群的致癌风险大于 10^{-6} ,加油站工人经过呼吸途径暴露 MTBE 的健康风险已经超过人群可接受水平^[14];南宁市市区和郊区加油站区域大气中 MTBE 的平均质量浓度分别为 853、431 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;而市区和郊区加油站办公区大气中 MTBE 的平均质量浓度分别为 175、69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。同样,风险评估结果表明,部分加油站工人经过呼吸途径暴露 MTBE 的健康风险也已经超过了人群可接受水平^[15]。

目前,我国暂未制定相关大气中 MTBE 的排放标准和职业接触限值。而英国规定的 MTBE 职业接触限值为 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,大多数欧洲国家规定的 MTBE 职业接触限值为 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。对比欧洲职业接触限值可以看到,我国城市一般区域大气中 MTBE 的污染程度相对较轻,而某些加油站区域大气中 MTBE 浓度则已远超欧洲部分国家制定的职业接触限值。因此,加油站区域范围内的工作人员和其他常住人员可能存在由于较高 MTBE 暴露导致的人体健康风险。

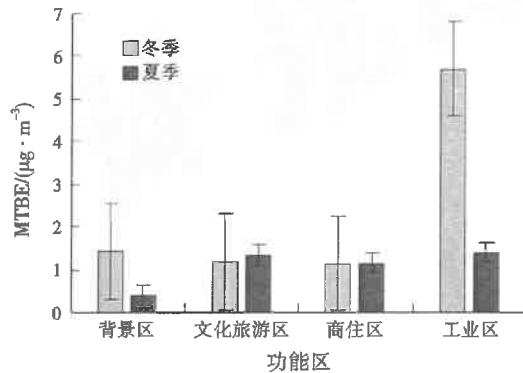


图 2 北京市不同功能区大气中 MTBE 污染情况
 Fig.2 Atmospheric MTBE pollution in various functional areas in Beijing

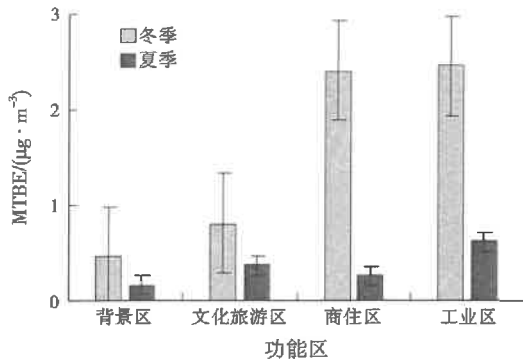


图 3 深圳市不同功能区大气中 MTBE 污染情况
 Fig.3 Atmospheric MTBE pollution in various functional areas in Shenzhen

2.2 土壤中的 MTBE 污染

目前,国内对土壤中 MTBE 污染情况的研究相对较少,国内部分城市土壤中 MTBE 污染情况对比见表 1^[16]。我国部分城市土壤中已有不同浓度的 MTBE 检出,但参考美国场地土壤 MTBE 的筛选标准限值 220 mg/kg ^[17],我国城市区域周边的土壤环境中 MTBE 的污染程度相对较低。

表 1 中国部分城市土壤中 MTBE 的污染情况
 Table 1 Pollution of MTBE in soils of some cities in China
 mg/kg

土壤类型	北京市	深圳市	南宁市
主干道	0.011 7	0.015 3	<0.04
旱地	0.012 1	0.021 7	<0.04
水田			<0.04
加油站		0.018 9	<0.04

2.3 水体中的 MTBE 污染

USEPA 认为水中 MTBE 可接受质量浓度为 20~40 $\mu\text{g}/\text{L}$ ^[18],而国内 2017 年发布的《加油站地下水污染防治技术指南》(试行)中规定,若加油站位于地下水饮用水水源保护区和准保护区,则地下水中 MTBE 的控制和治理目标采用美国饮用水健康建议值 20 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

学者们对我国部分城市水体中的 MTBE 污染情况进行了调研^[19-21]。表 2 反映了我国不同类型水体中的 MTBE 污染情况。整体上除加油站、停车场、洗车场等特殊区域外,我国不同城市各类水体中 MTBE 的污染程度通常较低,部分城市的水源地或饮用水中已经出现 MTBE 污染,但检出平均质量浓度远低于 20 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。然而,李琰等^[22]对上海市闵行区居民供水水源地中挥发性有机物进行调查研究,发现黄浦江和青草沙中 MTBE 质量浓度中间值虽然仅为 0.78、0.48 $\mu\text{g}/\text{L}$,但最高值分别达到 213.00、369.00 $\mu\text{g}/\text{L}$,需引起重视和关注。

加油站是 MTBE 污染的重要来源,加油站储罐及管线的泄漏会严重威胁到其周边地下水的环境质量安全,尤其是处于地下水饮用水源地范围内的加油站,其泄漏带来的危害性更高。由于 MTBE 具有较低的吸附常数及低辛醇/水分配系数和高水溶性,在土壤和地下水中的迁移速度很快,且会在地下环境中长时间停留,故可将 MTBE 作为汽油泄漏区域环境调查关键性的物质并作为汽油泄漏的良好指示剂。对不同区域加油站地下水进行调查,可进一步分析我国加油站泄漏对地下水环境造成的污染现状和影响。

我国不同区域加油站周边地下水中的 MTBE 污

表 2 不同城市各类水体中 MTBE 的污染情况
Table 2 Pollution of MTBE in various water bodies in various cities

地区	水体类别	范围		平均值	
		夏季	冬季	夏季	冬季
深圳市	地表水、地下水、自来水	0.04~1.07	0.07~1.15	0.34	0.23
北京市	地表水、饮用水、地下水	<0.07~1.16	<0.07~2.70	0.18	0.46
长春市	加油站、停车场、洗车场、交通路口附近地表水	17.2~43.24	4.44~15.15	30.22	9.80
惠州市	石化工业区附近地表水	0.36~17.08	0.13~18.42	4.64	4.57
南宁市	饮用水	<0.07~0.33	<0.07~0.28	0.12	0.11

染情况如表 3 所示。可以看出,我国加油站周边地下水中 MTBE 的检出率较高,综合检出率超过 50%。尤其是北京市,所选加油站建站时间均超过 10 年,且都为单层储罐,加油站周边地下水中 MTBE 检出率高达 94%,超标率达 31.3%。

表 3 部分省市加油站周边地下水中 MTBE 污染情况
Table 3 MTBE pollution in groundwater around gas stations in some provinces and cities

省市	加油站 样本/个	MTBE 检出率/%	MTBE 超标率/%	数据 来源
北京市	16	94	31.3	文献[23]
重庆市	12	22	11.1	文献[24]
成都市	6	38		文献[25]
四川省	6	50		
江苏省	19	67		文献[26]
重庆市	15	33		

3 MTBE 污染防治对策和建议

我国 MTBE 污染主要集中于加油站附近区域,加油站周边地下水是重要的受影响地区,MTBE 污染防治应主要围绕加油站展开。加油站导致的 MTBE 污染主要来源于储罐和管线泄漏,特别是由于单层储罐和管线使用导致。单层钢罐使用寿命一般只有 7~10 年^[27],单层管线发生泄漏的平均年限为 11 年^[28]。针对加油站泄漏污染,一方面可采取更换双层储罐、双层管线,修建防渗池,建设储罐泄漏监测系统和地下水监测井进行常规监管等进行综合防治;另一方面,鼓励推广使用更加清洁环保的乙醇、甲醇燃料汽油和新能源汽车,从源头上降低 MTBE 进入环境的风险。

我国 2018 年加油站数量及隶属关系统计见表 4。可以看出,2018 年我国有 106 661 座加油站,按每个加油站平均设有 4 个储罐计算,则全国约有 42.6 万个加油站储罐。据生态环境部资料,我国目前约有 78% 的加油站储罐已完成防渗改造工作,仍有 22% 的储罐处于正在改造或未改造状态。另外,截至 2017 年,乙醇汽油试点已经覆盖至 11 个省份,乙醇汽油消费量已占同期全国汽油消费总量的 1/5。

生物燃料乙醇年消费量近 260 万 t,产业规模跃居世界第三位。

表 4 中国 2018 年加油站隶属关系及数量情况
Table 4 Affiliation and quantity of gas stations in 2018 in China

项目	加油站数量/座	占比/%
中石化加油站	30 661	28.75
中石油加油站	21 800	20.44
民营加油站	50 000	46.87
中外合资加油站	4 200	3.94
合计	106 661	100.00

针对我国目前 MTBE 的生产使用和污染现状,以及目前已采取的 MTBE 污染防治措施,建议从以下 3 个方面进一步加强我国 MTBE 的污染防治工作:(1)做好 MTBE 污染源头防控。一是控制污染源,逐步降低 MTBE 调和汽油的生产使用量,并加快乙醇汽油、甲醇汽油和新能源汽车的推广速度;二是实施污染防治措施,在现有技术基础上开发应用防渗性能更好、使用寿命更长的储罐和管线,并根据储罐特性和所处水文地质条件等因素确定储罐及管线更换频率。(2)重视 MTBE 污染环境监测。目前,国内对环境中 MTBE 的调查数据相对较少,特别是地表水或地下水水源地等可能直接威胁人体健康的环境介质中的 MTBE 污染情况尚需进一步明确。建议加油站尤其是水源地内加油站在进行常规监测的过程中适当增加 MTBE 的监测频率,以便更好地了解掌握加油站泄漏风险情况,降低污染风险。另外,重要水源地及自来水厂在进行常规监测过程中也应考虑 MTBE 监测。(3)落实加油站防渗改造工作。我国加油站防渗改造工作多以城市为单位开展,建议优先开展水源地内加油站的改造工作,降低 MTBE 污染对居民饮用水安全的威胁;并在加油站改造过程中做好安全风险管控工作,选择专业人员按照规定流程施工,并对施工人员进行安全和技能培训,同时做好应急和监管工作。

4 结 语

我国目前 MTBE 生产使用量超过 1 200 万 t,

已成为世界第一大 MTBE 生产国。我国 MTBE 有 90% 以上用于汽油调和, MTBE 调和汽油的存储和使用过程是 MTBE 进入环境的主要途径。我国城市一般区域 MTBE 的污染程度相对较轻, 而加油站区域附近 MTBE 污染相对较重, 尤其是加油站周边地下水中 MTBE 的检出浓度和超标率相对较高。目前我国 MTBE 污染防治主要围绕加油站防渗改造工作开展, 包括双层储罐和管线的更换, 防渗池的设置以及增加常规监测管理等, 建议将加油站防渗改造工作常规化、标准化, 并进一步重视饮用水及水源地内的 MTBE 监测工作。

参考文献:

- [1] United States Geological Survey. Occurrence of the gasoline additive MTBE in shallow groundwater in urban and agricultural areas[R]. Washington, D.C.: United States Geological Survey, 1995.
- [2] USEPA. The blue-ribbon panel on oxygenates in gasoline, executive summary and recommendations[EB/OL]. [2019-08-21]. <https://ntl.bts.gov/lib/25000/25000/25060/rec721.pdf>.
- [3] USEPA. Regulatory determinations support document for selected contaminants from the second drinking water Contaminant Candidate List (CCL 2)[R]. Washington, D.C.: USEPA, 2008.
- [4] 徐志强. 黑土中甲基叔丁基醚(MTBE)测定及其在黑土中吸附特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2005.
- [5] 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.
- [6] 沈鹏飞, 侯文杰, 许明杰, 等. 甲基叔丁基醚的市场现状及工艺技术进展[J]. 化学工程师, 2018, 32(1): 50-53.
- [7] 杨红波. 国内 MTBE 行业五大新动向[J]. 中国石化, 2015(5): 32-34.
- [8] ARP H P H, FENNER K, SCHMIDT T C. Predicting methyl tert-butyl ether, tert-butyl formate, and tert-butyl alcohol levels in the environment using the fugacity approach[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(9): 3237-3244.
- [9] 胡勤海, 陈艳, 管丹蓉, 等. 甲基叔丁基醚(MTBE)的环境生态效应[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊 1): 336-341.
- [10] ACHTEN C, KOLB A, PÜTTMANN W, et al. Methyl tert-butyl ether (MTBE) in river and wastewater in Germany[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(17): 3652-3661.
- [11] 梁林涵. 北京市汽油添加剂甲基叔丁基醚环境污染特征、人群健康风险评估及环境管理对策研究[D]. 南宁: 广西医科大学, 2015.
- [12] 王伯光, 邵敏, 张远航, 等. 珠江三角洲大气中甲基叔丁基醚的污染特征研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1614-1620.
- [13] SMITH D F, KLEINDIENST T E, HUDGENS E E, et al. Photooxidation of methyl tertiary butyl ether[J]. International Journal of Chemical Kinetics, 1991, 23(10): 907-924.
- [14] 叶斯阳. 深圳市 MTBE 环境污染特征与人群健康风险评估研究[D]. 广州: 广东药学院, 2015.
- [15] 李琴, 黄炯丽, 卿利, 等. 南宁市加油站工人甲基叔丁基醚暴露健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(5): 447-449.
- [16] 彭晓武. 汽油添加剂甲基叔丁基醚(MTBE)污染特征、人群健康风险评估及管理对策研究[R]. 广州: 环境保护部华南环境

科学研究所, 2014.

- [17] USEPA. EPA regional screening levels[R]. Washington, D.C.: USEPA, 2013.
- [18] EPA822-R-04-005, Edition of the drinking water standards and health advisories[S].
- [19] 陈井影, 宋宪臣, 孙华, 等. 顶空-气相色谱法测定水体中甲基叔丁基醚[J]. 吉林农业大学学报, 2006, 28(3): 303-307.
- [20] 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.
- [21] 梁林涵, 彭晓武, 郑晶, 等. 南宁市普通人群甲基叔丁基醚暴露健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(12): 1073-1075.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 孙岩, 郝代辉, 吕佳佳. 浅谈加油站防渗改造[J]. 化工管理, 2018(15): 129-130.
- [28] 童莉, 梁鹏, 朱秋颖, 等. 加油站储罐泄漏地下水污染防治对策[J]. 环境影响评价, 2014(3): 18-20.

编辑: 丁 怀 (收稿日期: 2019-10-22)

(上接第 1309 页)

- [21] 许辉云. 基于变异系数权重-灰色关联-TOPSIS 法的中东部八省旅游产业竞争力研究[J]. 伊犁师范学院学报(自然科学版), 2018, 12(4): 17-20.
- [22] 张森, 覃亚伟, 刘佳静. 基于 TOPSIS 与灰色关联分析的区域建筑业可持续发展评价[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(4): 189-193.
- [23] 吴先明, 蔡海滨, 邓鹏. 基于灰色关联度的改进 TOPSIS 模型在水质评价中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 24-28.
- [24] 刘启君, 黄旻, 宋艺欣, 等. 基于灰色关联 TOPSIS 模型的武汉市环境承载力评价及障碍因子诊断[J]. 生态经济, 2016, 32(5): 191-195.
- [25] WANG H B, ZHAO L J, XIE Y, et al. "APEC blue" - the effects and implications of joint pollution prevention and control program[J]. Science of the Total Environment, 2016, 553: 429-438.
- [26] ZHENG S, POZZER A, CAO C X, et al. Long-term (2001-2012) concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}) and the impact on human health in Beijing, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15: 5715-5725.
- [27] PIRES J M, SOUSA S V, PEREIRA M C, et al. Management of air quality monitoring using principal component and cluster analysis - Part I: SO₂ and PM₁₀[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(6): 1249-1260.
- [28] LU W Z, HE H D, DONG L Y. Performance assessment of air quality monitoring networks using principal component analysis and cluster analysis[J]. Building and Environment, 2011, 46(3): 577-583.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2020-03-30)

