

车用汽油及含氧燃料的环境效应

张孟珠¹,郝春晓²,葛蕴珊^{1*},王欣¹ (1.北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081; 2.中国环境科学研究院,北京 100012)

摘要:基于7辆国6轻型车的WLTC循环测试,计算了汽油、E10和MTBE10(汽油中添加10%体积的甲基叔丁基醚)排放的温室气体的致暖效应(GWP)、臭氧生成潜势(OFP)和非甲烷有机气体(NMOG)排放.结果表明,车队平均 N_2O 和 CH_4 排放的GWP分别为0.6和0.07g $\text{CO}_2\text{e}/\text{km}$.E10和MTBE10的非 CO_2 温室气体排放的GWP比汽油更高.从整个碳生命周期看,生物质E10可以使温室气体排放的GWP下降5%~15%.E10和MTBE10都倾向于增加苯系物(BHC)排放和OFP.试验车辆的NMOG排放约在30mg/km左右,使用含氧燃料E10和MTBE10没有显示出大幅度增加NMOG的现象.

关键词: GWP; OFP; 汽油; 乙醇; MTBE

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)04-1545-07

Environmental impacts of gasoline and oxygenated fuels when used on light-duty vehicles. ZHANG Meng-zhu¹, HAO Chun-xiao², GE Yun-shan^{1*}, WANG Xin¹ (1.School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2022,42(4): 1545~1551

Abstract: Based on the WLTC test results of seven China-6 compliant light-duty vehicles, the global warming potential (GWP), ozone formation potential (OFP), and non-methane organic gases (NMOG) with gasoline, E10, and MTBE10 were calculated and discussed. The GWP of crew-averaged N_2O and CH_4 emissions were respectively 0.6 and 0.07g $\text{CO}_2\text{e}/\text{km}$. The GWP of non- CO_2 greenhouse gases with E10 and MTBE10 fuelling was higher than those of gasoline. Bio-E10 is capable of removing 5%~15% of life-cycle GWP from gasoline vehicles. E10 and MTBE10 both tended to increase benzene hydrocarbon (BHC) emissions and therefore OFP. The NMOG from the test vehicles was roughly 30mg/km. The employment of oxygenated fuels, such as E10 and MTBE10, didn't result in an obvious increase in NMOG.

Key words: GWP; OFP; gasoline; ethanol; MTBE

O_3 污染和温室效应是世界环境面临的主要威胁^[1-2].预计到2030年,中国将成为非 CO_2 温室气体排放量最多的国家^[3].同时,在人口密集的城市,每年以 O_3 为首要污染物的天数接近一半^[4].

机动车尾气中不仅含有 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 等温室气体,而且其排放的可挥发性有机物(VOC)是 O_3 的主要前驱物^[5-6].从污染物生成的原理来看,车辆的 N_2O 排放受到燃料类型、燃烧技术、车辆使用年限、后处理技术等因素的影响^[7-9], CH_4 和VOC排放是燃料中对应成分和燃料完全燃烧程度的函数^[10].在车用汽油中添加含氧物质会改变发动机缸内的燃烧特性,进而影响温室气体排放、 O_3 合成和醛酮排放,特别是在含氧物质以生物质为原料的情况下.多数研究就乙醇汽油的 CO_2 排放量比汽油低这一现象达成共识,但在乙醇汽油对 CH_4 、 N_2O 和VOC排放量的影响规律方面尚无统一结论^[11-13].对于醛酮排放,王欣等^[14]测试了25辆在用车在NEDC循环下的排放,证明了汽油中添加乙醇成分有利于降低臭氧生成

潜势(OFP),但会增加醛类排放.另一种常用含氧物质甲基叔丁基醚(MTBE)作为低成本的辛烷值促进剂,自1979年开始被广泛使用.大量研究表明MTBE的引入极大减少了苯排放和OFP^[15-16],但其会代谢出大量危害人体的醛类化合物^[17].

目前的多数研究集中于含氧汽油的温室气体和VOC排放,鲜见关于致暖效应(GWP)和OFP效应估计的研究.虽然机动车排放的 CH_4 和 N_2O 比 CO_2 排放量少7个数量级,但其对温室效应的贡献同样不容忽视,因为非 CO_2 温室气体比 CO_2 截热能力更强,而且在大气中停留的时间可能更长;此外,不同碳数、不同结构的VOC成分对应的 O_3 反应率差别很大,对 O_3 形成的贡献也不相同.因此,本文基于7辆国6a轻型车的全球统一轻型车辆测试循环(WLTC)

收稿日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51806015);移动源污染排放控制技术国家工程实验室开放基金资助项目(NELMS2018A17)

* 责任作者, 教授, geyunshan@bit.edu.cn

温室气体和 VOC 中苯系物(BHC)排放因子,对汽油、E10 和 MTBE10(汽油中添加 10%的 MTBE)这 3 种燃料的 GWP 和 OFP 进行计算分析,以此评估车用汽油含氧成分和生物质乙醇对大气环境的影响程度.除此之外,为了衡量燃料含氧对含氧碳氢污染物排放的影响,计算了非甲烷有机气体(NMOG)排放,以期作为燃料设计和污染物治理工作提供借鉴.

1 设备与评价方法

1.1 测试系统及循环

整车排放测试在德国 IMTECHSFTP 型恒温恒湿环境仓中进行,底盘测功机为德国马哈(MAHA)生产的 ECDM-48L-4WD 型电力测功机.试验按照我国第 6 阶段排放认证循环-WLTC 进行^[18],试验温度为 23℃.采用全流定容稀释系统(CVS,日本 HORIBA 公司,型号 7400S)取样.温室气体排放测试分析仪为日本 HORIBA 公司的 MEXA-7400LE,检测方法为:不分光红外法(NDIR)检测 CO₂ 排放量,气相色谱和电子捕获检测器(GC+ECD)检测 N₂O 排放量,气相色谱和氢离子火焰(GC+FID)检测 CH₄ 排放量.苯系物排放的采样分析采用美国 Agilent 公司的 Tenax TA 型金属采样管、6890 型气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)和英国 Markes 公司生产的 UNITY 型热脱附装置.乙醇和醛酮排放由日本 HORIBA 公司的 MEXA-6000FT 型傅里叶红外光谱仪(FTIR)检测.温室气体排放量由 CVS 稀释排气容积、污染物在稀释排气中的浓度和污染物在标况下的密度计算;苯系物排放量由 Tenax TA 管采样总体积、仪器检出

量和分流比计算.乙醇和醛酮排放量由原始排气容积(未经稀释)、污染物在排气中的浓度和污染物在标况下的密度计算.

1.2 试验油品

3 种试验油品分别为满足国 6 燃油标准的不含氧汽油、E10(10%匹配混合乙醇汽油)和 MTBE10(10%甲基叔丁基醚汽油),如表 1 所示.3 种燃料的芳香烃、烯烃和环烷烃含量接近,E10 和 MTBE10 分别添加了 10%体积分数的乙醇和 MTBE 代替汽油中的部分 C8 烷烃.

表 1 燃油的主要理化参数

Table 1 Main physical and chemical parameters of the fuels

油品参数	汽油	E10	MTBE10
研究法辛烷值	95	95.2	95
氧(%质量分数)	0	3.59	1.77
烷烃(%体积分数)	48.9	37.5	38.8
烯烃(%体积分数)	7.1	7.4	7.3
环烷烃(%体积分数)	12.9	13.3	13.2
芳香烃(%体积分数)	31.0	31.9	30.8
雷德蒸气压(kPa)	58.14	57.94	58.75
密度(20℃,kg/m ³)	744.1	755.9	750.4
T10(℃)	58.2	55.4	55.3
T50(℃)	104.5	101.6	99.4
T90(℃)	157.3	158.4	157.2

1.3 试验车辆

7 辆车(表 2)均满足国 6a 排放标准,后处理系统均为三元催化器.为了排除发动机和催化器老化对试验结果的影响,保证车况和催化器性能良好,试验车辆的行驶里程均小于 15000km.

表 2 试验车辆的主要技术参数

Table 2 Main specifications of the test vehicles

车辆参数	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
排量(L)	2.0	2.0	2.0	1.4	1.5	2.5	2.0
发动机型式	Turbo, DI ^a	Turbo, DI	Turbo, DI	Turbo, DI	Turbo, DI	NA, DI+PFI ^b	Turbo, DI+PFI
变速器型式	9AT ^c	8AT	6AT	7DSG ^d	CVT ^e	8AT	CVT
行驶里程(km)	2425	5504	12118	3584	2020	6721	740
加载惯量(kg)	1963.8	1856	2191.9	1771	1748.6	1807	1948.3
驱动型式	RWD ^f	4WD ^g	FWD ^h	FWD	FWD	FWD	FWD
最大功率(kW)	190	141	191	110	130	154	180
最大扭矩(N·m)	370	280	350	250	230	250	380
压缩比	10.5	10.2	9.5	10.5	10.6	13	8~14.1VCR ⁱ

注:a为直喷,b为直喷加进气道喷射,c为手动,d为双离合,e为无极变速,f为后驱,g为四驱,h为前驱,i为可变压缩比.

1.4 GWP、OFP 和 NMOG 计算

检测分析了 3 种温室气体(CO₂、N₂O 和 CH₄)、

7 种苯系物(苯、甲苯、乙苯、间二甲苯、邻二甲苯、对二甲苯和苯乙烯)和 5 种含氧化合物(甲醛、乙醛、乙醇、甲酸和乙酸).GWP 由温室气体排放因子和单位温室气体的 GWP 因子按式(1)计算得到,OFP 由苯系物排放因子和最大增量反应活性(MIR)值按式(2)计算得到.单位 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 气体的 GWP 因子分别为 1、298 和 25,苯、甲苯、乙苯、间二甲苯、邻二甲苯、对二甲苯和苯乙烯的 MIR 值分别为 0.72、4、3.04、9.75、7.64、5.84 和 1.73.根据美国环保署(EPA)的定义,NMOG 包含非甲烷碳氢(NMHC)和含氧碳氢化合物.本文 NMOG 为 NMHC、甲醛、乙醛、乙醇、甲酸和乙酸的排放因子之和.由于 FTR 对乙醇的测量精度较差,根据 Gierczak 等人的建议,以乙醇测量值的 75%作为乙醇排放因子的实际值^[19].

$$\text{GWP} = \sum m_i \times \text{GWP}_i \quad (1)$$

$$\text{OFP} = \sum m_j \times \text{MIR}_j \quad (2)$$

式中: m_i 和 m_j 分别表示温室气体 i 和苯系物 j 的排放因子, g/km ; GWP_i 表示温室气体 i 的 GWP 因子; MIR_j 表示苯系物 j 的 MIR 值.

2 结果与分析

2.1 燃料的温室气体排放及 GWP 比较

如图 1(a)所示,在相同的试验室测试条件下,不同车辆的 CO_2 排放水平不同,这与车重、变速系统、发动机额定功率和功重比等因素有关,其中车重是最为主要的因素^[20].Burgess 等^[21]的研究发现,车重降低 10%,油耗减少 8.7%;Ehsani 等^[22]研究发现,车重降低 10%,机动车的 CO_2 排放随之减少 2.5%;Doll 等^[23]也得到了类似的趋势.正是基于此,福特和本田汽车分别在底盘和车身结构中使用了铝和碳纤维.可以看出,添加乙醇或 MTBE 成分对不同车辆 CO_2 排放的影响不一致.从整个测试车队来看,燃用汽油、E10 和 MTBE10 时的平均 CO_2 排放因子分别为 185.4、181.5 和 183.7 g/km . CO_2 排放受到燃料碳氢比(C/H)和完全燃烧程度的影响,C/H 越大,燃烧程度越高,生成的 CO_2 越多^[24].乙醇的 C/H 为 0.33,MTBE 的 C/H 为 0.42,汽油中被替换的 C8 烷烃的 C/H 为 0.44,从这一点来看,乙醇和 MTBE 都有利于减少 CO_2 的排放.从燃烧程度来说,乙醇和 MTBE 引入了氧原子,降低了燃料对氧的需求和局部过浓的程度,

有利于促进燃烧的完全程度和减少 CO 的排放.对于不同发动机,两种因素共同作用导致的燃烧特性不同,因此燃料对 CO_2 排放的影响在不同试验车辆上存在差异.

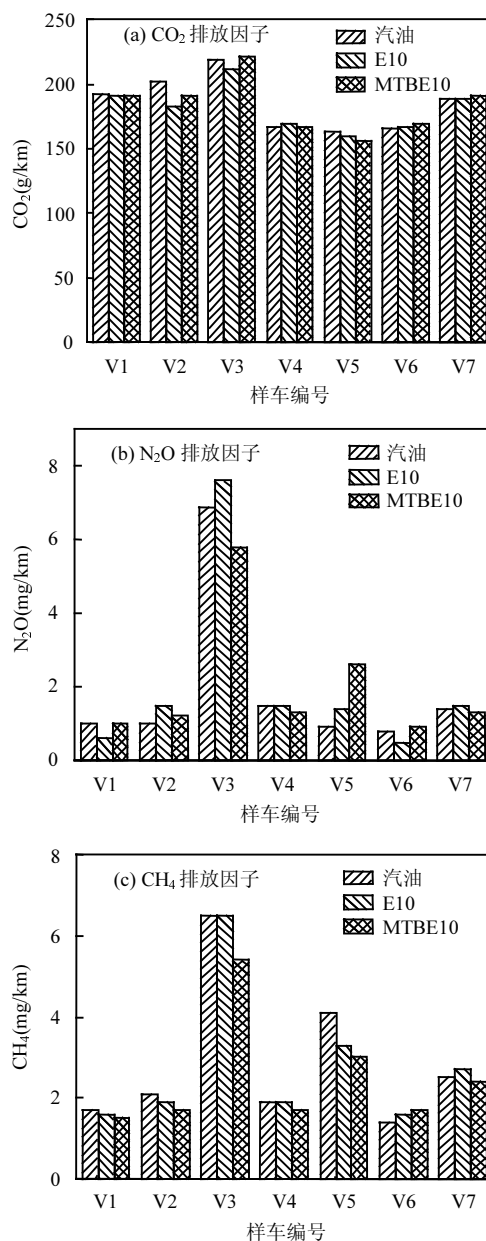


图1 试验车燃用不同燃料时的温室气体排放因子

Fig.1 Greenhouse gases emissions of the test vehicles with gasoline, E10, and MTBE10 fueling

如图 1(b)所示,不同于 CO_2 排放的特征,大多数试验车辆在燃用 E10 时, N_2O 排放都有所增加.从整体来看,汽油、E10 和 MTBE10 对应的平均 N_2O 排放因子分别为 1.9、2.1 和 2.0 mg/km . N_2O 主要产生于循环初始,三元催化器温度较低时,受到驾驶循环、

环境温度、后处理技术和燃料的硫含量等因素的影响。高的硫含量可能导致较多的 N_2O 排放,因为硫推迟了催化器达到工作温度的时间。各试验燃料的硫含量顺序为:汽油 (5.5mg/kg)<E10(6.0mg/kg)<MTBE10 (6.9mg/kg)。导致硫含量与 N_2O 排放的关系因车型而异的原因可能是:1)3 种燃料都属于含硫量超低的燃料,含硫量差异小,对 N_2O 排放的影响不明显;2) N_2O 是三元催化器在特定条件下催化转化气态污染物时的副产物^[25],因为试验车辆均为满足国 6a 标准的新车,后处理技术先进,因此后处理器的催化反应受硫的影响减弱;3)除硫之外, N_2O 也受到燃料中氧含量(促进 N_2O 的氧化)和燃料燃烧的排气温度(温度低, N_2O 排放多)等因素的综合影响,在低硫量燃料的燃烧中,这些因素与硫含量的影响可能相当;4)不同品牌试验车的后处理器性能和发动机缸内燃烧特性不同。

如图 1(c)所示,对于大多数试验车辆,燃用 E10 或 MTBE10 时, CH_4 排放相对于汽油都减少,最大下降比例达到 20%。汽油的平均 CH_4 排放因子为 2.9mg/km ,E10 和 MTBE10 的 CH_4 排放因子分别是汽油的 96%和 86%。 CH_4 的主要致因是缸内的不完全燃烧,与循环初始缸内温度低密切相关。V3 的 N_2O 和 CH_4 排放都明显高,原因是 V3 的车重大,燃烧需要的燃油量多;同时 V3 的变速器档位少,多工况下平顺性和经济性差。

由以上分析可知,不同车辆个体的排放水平有很大差异,受燃料的影响也不尽相同。这是因为整车的尾气排放受到发动机转速、负荷和后处理器等因素的影响。排除个体差异,提取关键的车辆特性参数,通过大量试验数据,采用算法和统计模型建立车辆-燃料-排放之间的关系对于优化车辆结构、燃料升级和控制污染物排放具有重要的作用。由于本文的重点是研究燃料成分变化对车队整体排放水平的影响,因此所选用的试验车为市场占有率高的车型且尽量包含不同发动机型式、不同排量 and 不同变速系统,以较为全面地体现整体排放水平的变化。

图 2(a)给出了 7 辆试验车燃用不同燃油时非 CO_2 气体排放的 GWP。值得注意的是,虽然 N_2O 和 CH_4 的排放因子处于相近水平,但 N_2O 排放的 GWP 为 $0.6\text{g CO}_2\text{e/km}$, CH_4 排放的 GWP 仅为 $0.07\text{g CO}_2\text{e/km}$ 。这也证明在国 6 排放法规中加入 N_2O 限值

对于控制温室效应十分必要。如前所述, N_2O 是启动初始温度低时三元催化器的副产物,所以混合动力车的 N_2O 排放及其温室效应需要特别关注。从车队平均水平来看,燃用汽油、E10 和 MTBE10 时的非 CO_2 温室气体排放的 GWP 分别为 $0.648, 0.691$ 和 $0.662\text{g CO}_2\text{e/km}$,使用含氧燃料增加了车队的非 CO_2 温室气体排放的 GWP。

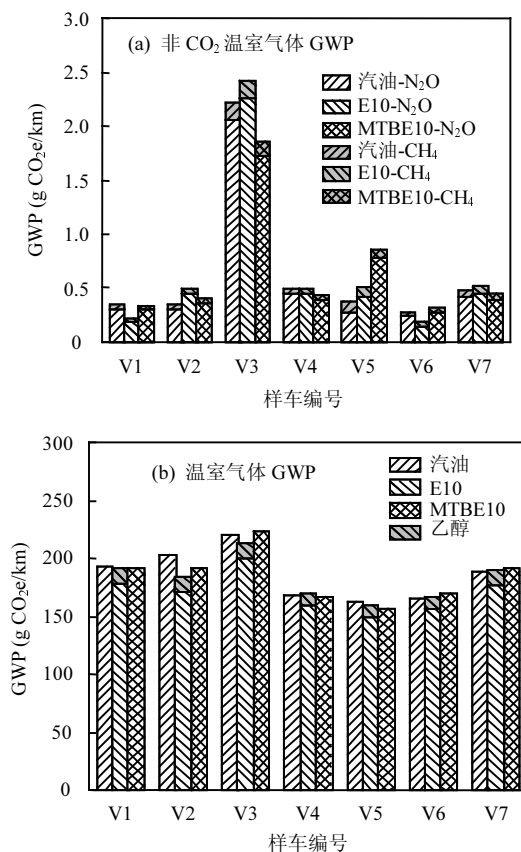


图2 试验车燃用不同燃料时的 GWP

Fig.2 GWP of the test vehicles with gasoline, E10, and MTBE10 fueling

图 2(b)给出了燃用不同燃料时排放的温室气体的 GWP,降低燃油消耗,提高发动机的热效率在长期内仍是限制温室效应的关键。可以看出,使用含氧燃料对尾气排放的 GWP 的影响存在个体差异。V6 和 V7 在使用 E10 和 MTBE10 时的 GWP 相较于汽油均略有上升,上升比例约为 1%~2%。V4 仅在使用 E10 时 GWP 有所升高,而 V3 仅在使用 MTBE10 时 GWP 有所增加。从车队排放的平均值看,E10 和 MTBE10 的 GWP 相较汽油的分别下降了 2%和 1%,优势并不明显。但如果 E10 中的乙醇来自于生物质,则从整个碳生命周期考虑,燃用 E10 的 GWP 中不需要计入乙

醇燃烧产生的 10~14g 的 CO_2 (如图 2(b) 中阴影所示), 在这一前提下, 使用 E10 相比于使用汽油时, GWP 一定减少, 减少比例从 5%~15% 不等。

2.2 燃料的 BHC 排放及 OFP 比较

如图 3(a) 所示, 燃用汽油、E10 和 MTBE10 时, 车队平均 BHC 排放因子分别为 20.1, 21.6 和 23.0 mg/km。无论使用何种燃料, 甲苯始终是最多的 BHC, 排放达到 6~12 mg/km, 占比 30%~50%。乙苯、间二甲苯、对二甲苯和苯的车队平均排放相当, 都在 2~3.5 mg/km。相比于燃用汽油时的排放, E10 的使用增加了间二甲苯 (+0.7 mg/km)、对二甲苯 (+0.7 mg/km) 和甲苯 (+1.4 mg/km) 的排放, 减少了乙苯 (-0.7 mg/km) 和邻二甲苯 (-0.4 mg/km) 的排放; MTBE10 的使用也增加了间二甲苯 (+1.0 mg/km)、对二甲苯 (+0.9 mg/km) 和甲苯 (+1.1 mg/km) 的排放。虽然前人的研究结果表明, BHC 排放主要来源于燃料中相同的成分的未燃^[26-27], 但 3 种试验燃料的 BHC 排放还是有所差异, 这说明含氧成分会对 BHC 排放种类及分布产生影响。

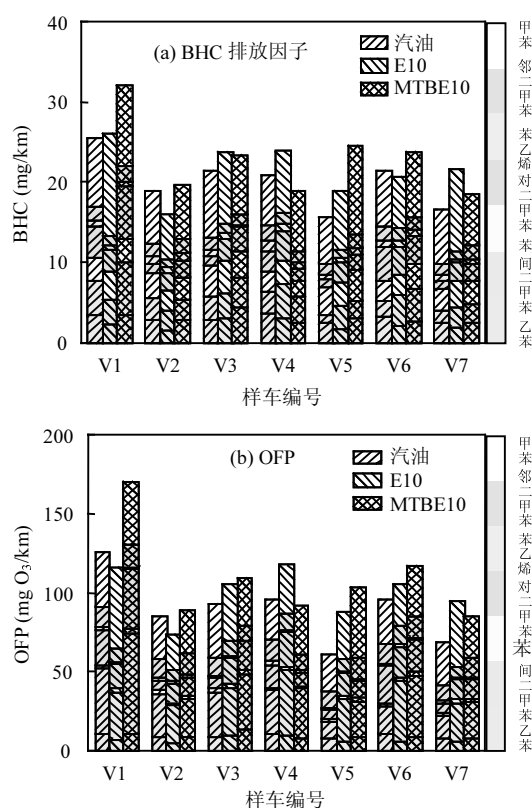


图3 试验车燃用不同燃料时的 BHC 排放和 OFP
Fig.3 BHC emissions and OFP of the test vehicles with gasoline, E10, and MTBE10 fueling

如图 3(b) 所示, 燃用汽油、E10 和 MTBE10 时,

车队平均 OFP 分别为 89.2, 100.0 和 109.3 mg O₃/km。乙醇和 MTBE 成分都倾向于增加车队的 OFP。除了甲苯因排放量高对 OFP 贡献达 30% 以外, 间二甲苯对 OFP 的贡献也不容忽视, 达 20%~35%。

2.3 燃料的 NMOG 及 THC 排放比较

如图 4(a) 所示, 汽油、E10 和 MTBE10 对应的平均 THC (NMHC+CH₄) 排放因子分别为 19.3, 18.5 和 17.3 mg/km。各个试验车的 THC 排放都小于 35 mg/km, 远低于国 6 排放标准规定的 50 mg/km 的限值^[18]。V4 和 V6 的 THC 排放在使用含氧燃料后有比较明显的增加, 使用 E10 时分别增加 1.3 和 7.6 mg/km, 使用 MTBE10 时分别增加 0.5 和 5.2 mg/km。

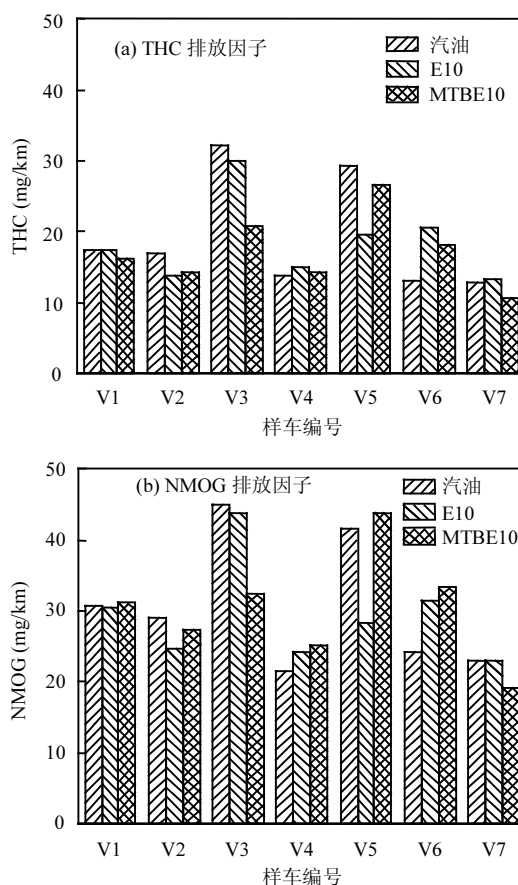


图4 试验车燃用不同燃料时的 THC 和 NMOG
Fig.4 THC and NMOG of the test vehicles with gasoline, E10, and MTBE10 fueling

图 4(b) 给出了燃用不同燃料时的 NMOG (NMHC+含氧化合物) 排放因子。7 辆车燃用汽油、E10 和 MTBE10 时的平均 NMOG 排放因子分别为 30.7, 29.4 和 30.3 mg/km, 其中含氧化合物的平均排放因子分别为 14.5, 13.9 和 15.5 mg/km, 与 NMHC 的排

放因子基本持平.可以看出,尽管对于大多数试验车辆而言,使用含氧燃料 E10 和 MTBE10 并未大幅度增加 NMOG,甚至某些车辆的 NMOG 还有所下降,但值得注意的是,对于试验车辆 V4 和 V6 来说,使用含氧燃料显著提高了尾气中的 NMOG,V4 和 V6 的 NMOG 排放在使用 E10 时分别增加 2.6(12%)和 7.2(30%) mg/km,在使用 MTBE10 时分别增加 3.6(17%)和 9.1(38%) mg/km.对比 THC 和 NMOG 排放可以得出,在汽油中添加含氧成分尤其是 MTBE 后,某些车辆的含氧化合物(醛类和乙醇等)的排放增加,其中甲醛排放增加 5%~7%,需要特别关注.由于试验车辆的 NMOG 排放几乎是 NMHC 排放的 2 倍,如果法规仅限制 NMHC 和 CH₄ 的排放因子之和,即 THC,而忽略含氧化合物排放,则近半数的污染物未被考虑在内.比如 V3 的 THC 排放因子为 30mg/km,而它的 NMOG 和 CH₄ 的排放因子之和超过了 50mg/km.

3 结论

3.1 相比于不含氧汽油,含氧燃料 E10 和 MTBE10 降低了车队 CH₄ 和 CO₂ 排放因子,增加了 N₂O 排放因子.

3.2 车队平均 N₂O 排放的 GWP 为 0.6g CO₂e/km, CH₄ 排放的 GWP 为 0.07g CO₂e/km,使用含氧燃料 E10 和 MTBE10 增加了车队非 CO₂ 温室气体排放的 GWP.

3.3 含氧燃料对尾气排放的 GWP 的影响存在个体差异,但如果 E10 中的乙醇来自于生物质,则从整个碳生命周期考虑,使用 E10 相比于使用汽油时,排放的 GWP 一定减少,减少比例从 5%~15%不等.

3.4 燃用汽油、E10 和 MTBE10 时,车队平均 BHC 排放因子分别为 20.1,21.6 和 23.0mg/km.乙醇和 MTBE 成分都倾向于增加车队的 OFP.

3.5 汽油、E10 和 MTBE10 对应的平均 NMOG 排放因子分别为 30.7,29.4 和 30.3mg/km.使用含氧燃料 E10 和 MTBE10 的 NMOG 与汽油持平.部分车辆的 NMOG 和 CH₄ 的排放因子之和超过了 50mg/km.

参考文献:

- [1] Sun J, Wu F K, Hu B, et al. VOC characteristics, emissions and contributions to SOA formation during hazy episodes [J]. *Atmospheric Environment*, 2016,141:560-570.
- [2] 邓思欣,刘永林,司徒淑婷,等.珠三角产业重镇大气 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(7):2993-3003.
Deng S X, Liu Y L, Situ S P, et al. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in an industrial town of Pearl River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(7):2993-3003.
- [3] Office of Atmospheric Programs. Global non-CO₂ greenhouse gas emission projections & mitigation 2015-2050 [R]. Washington, DC 20005: United States Environmental Protection Agency, 2019.
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 2019 年中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf>.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Bulletin of China's ecological environment(2019) [EB/OL].
- [5] 李如梅,闫雨龙,王 成,等.太原市城区夏季 VOCs 来源及其对 O₃ 生成的贡献 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(6):2515-2525.
Li R M, Yan Y L, Wang C, et al. Source apportionment of VOCs and its contribution to O₃ production during summertime in urban area of Taiyuan [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(6):2515-2525.
- [6] 曹文文,史建武,韩 斌,等.我国北方典型城市大气中 VOCs 的组成及分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(2):200-206.
Cao W W, Shi J W, Han B, et al. Composition and distribution of VOCs in the ambient air of typical cities in Northern of China [J]. *China Environmental Science*, 2012,32(2):200-206.
- [7] Odaka M, Koike N, Ishii H, et al. N₂O emissions from vehicles equipped with three-way catalysts in a cold climate [Z]. Washington, DC: SAE International, 2002.
- [8] Baronick J, Heller B, Lach G, et al. Impact of sulfur in gasoline on nitrous oxide and other exhaust gas components [J]. *SAE Transactions*, 2000,109:558-569.
- [9] 何立强,宋敬浩,胡京南,等.轻型汽油车 CH₄ 和 N₂O 排放因子研究 [J]. *环境科学*, 2014,35(12):4489-4494.
He L Q, Song J H, Hu J N, et al. An investigation of the CH₄ and N₂O emission factors of light-duty gasoline vehicles [J]. *Environmental Science*, 2014,35(12):4489-4494.
- [10] Lipman T E, Delucchi M A. Emissions of nitrous oxide and methane from conventional and alternative fuel motor vehicles [J]. *Climatic Change*, 2002,53(4):477-516.
- [11] 彭娅楠.车用低碳醇燃料全生命周期评价研究 [D]. 西安:长安大学, 2017.
Peng Y N. Research on life cycle assessment of vehicle low alcohol fuel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [12] 蔡庆丽,罗卫云.车用乙醇汽油与大气环境保护 [J]. *广西师范学院学报:自然科学版*, 2015,32(2):86-91.
Cai Q L, Luo W Y. Vehicle ethanol gasoline and atmospheric environmental protection [J]. *Journal of Guangxi Teachers Education University: Natural Science Edition*, 2015,32(2):86-91.
- [13] 胡志远,谭丕强,楼狄明.车用汽油替代燃料生命周期能源消耗和排放评价 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007,35(8):1099-1103.
Hu Z Y, Tan P Q, Lou D M. Life cycle energy and environment assessment of gasoline and its alternative fuels [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007,35(8):1099-1103.
- [14] Wang X, Ge Y S, Zhang C Z, et al. Estimating ozone potential of

- pipe-out emissions from Euro-3 to Euro-5 passenger cars fueled with gasoline, alcohol-gasoline, methanol and compressed natural gas [Z]. SAE International, 2016.
- [15] Mayotte S C, Lindhjem C E, Rao V, et al. Reformulated gasoline effects on exhaust emissions: Phase i: Initial investigation of oxygenate, volatility, distillation and sulfur effects [J]. SAE Transactions, 1994,103:1320-1330.
- [16] Council N R. Ozone-forming potential of reformulated gasoline [M]. Washington, DC: The National Academies Press, 1999.
- [17] Song C L, Zhang W M, Pei Y Q, et al. Comparative effects of MTBE and ethanol additions into gasoline on exhaust emissions [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(11):1957-1970.
- [18] GB 18352.6-2016 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段) [S].
GB 18352.6-2016 Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (CHINA 6) [S].
- [19] Gierczak C A, Kralik L L, Mauti A, et al. Measuring NMHC and NMOG emissions from motor vehicles via FTIR spectroscopy [J]. Atmospheric Environment, 2017,150:425-433.
- [20] 吕晨,张哲,陈徐梅,等.中国分省道路交通二氧化碳排放因子[J]. 中国环境科学, 2021,41(7):3122-3130.
Lv C, Zhang Z, Chen X M, et al. Study on CO₂ emission factors of road transport in Chinese provinces [J]. China Environmental Science, 2021,41(7):3122-3130.
- [21] Burgess S C, Choi J M J. A parametric study of the energy demands of car transportation: a case study of two competing commuter routes in the UK [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2003,8(1):21-36.
- [22] Ehsani M, Ahmadi A, Fadaei D. Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,53:1638-1648.
- [23] Doll C, Wietschel M. Externalities of the transport sector and the role of hydrogen in a sustainable transport vision [J]. Energy Policy, 2008,36(11):4069-4078.
- [24] Jung H H, Shelby M H, Newman C E, et al. Effect of ethanol on part load thermal efficiency and CO₂ emissions of SI engines [J]. SAE International Journal of Engines, 2013,6(1):456-469.
- [25] 何立强,胡京南,解淑霞,等.2010年中国机动车 CH₄ 和 N₂O 排放清单[J]. 环境科学研究, 2014,27(1):28-35.
He L Q, Hu J N, Xie S X, et al. CH₄ and N₂O emission inventory for motor vehicles in China in 2010 [J]. Research of Environmental Sciences, 2014,27(1):28-35.
- [26] Karavalakis G, Short D, Vu D, et al. Evaluating the effects of aromatics content in gasoline on gaseous and particulate matter emissions from SI-PFI and SIDI vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2015,49(11):7021-7031.
- [27] Schuetzle D, Siegl W O, Jensen T E, et al. The relationship between gasoline composition and vehicle hydrocarbon emissions: a review of current studies and future research needs [J]. 1994,102(suppl 4):3-12.

作者简介: 张孟珠(1993-),女,内蒙古自治区包头市人,博士,主要从事机动车排放测试及乙醇汽油排放特性研究.发表论文 10 余篇.