

文章编号:1671-1637(2013)04-0063-07

## 柴油公交车燃用不同替代燃料的排放特性

谭丕强,李 洁,胡志远,楼狄明

(同济大学汽车学院,上海 201804)

**摘要:**采用 OBS-2200 车载排放检测系统,分析了柴油公交车实际道路工况的气态排放特性。使用的燃料分别为纯柴油、天然气制油(GTL)与生物柴油,道路工况主要包括市区主干道、次干道和快速路。分析结果表明:公交车燃用各类燃料的 CO、HC、NO<sub>x</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的道路瞬时质量排放率均与瞬态车速变化有良好的跟随特性。公交车燃用各种替代燃料的气态污染物质量排放率随车速增加总体呈上升趋势,其中 HC 和 CO<sub>2</sub> 的质量排放率随车速增大,基本呈线性增加趋势,CO 和 NO<sub>x</sub> 的质量排放率在中低速区域随车速上升呈现增加趋势,而在高速区域有所降低。与主干道、次干道相比,公交车在快速路上燃用各种燃料的气态污染物的排放因子都是最低的。与纯柴油相比,不论是质量排放率还是排放因子,生物柴油和 GTL 柴油的 CO 和 HC 排放都有所下降,且生物柴油的降幅更大一些。从全路况范围来看,纯生物柴油的 CO 和 HC 排放最低,纯生物柴油的 NO<sub>x</sub> 排放要高于柴油。全路况下,纯天然气制油、体积比为 20%天然气制油、体积比为 20%生物柴油的 CO<sub>2</sub> 排放要低于纯柴油,但纯生物柴油的 CO<sub>2</sub> 排放要高一些。

**关键词:**柴油公交车;替代燃料;生物柴油;天然气制油;道路排放

**中图分类号:**U473.1

**文献标志码:**A

## Emission characteristics of diesel bus burning different alternative fuels

TAN Pi-qiang, LI Jie, HU Zhi-yuan, LOU Di-ming

(School of Automobile, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The gaseous emissions of diesel bus fueled with pure diesel fuel, gas-to-liquid(GTL) fuel and biodiesel fuel were studied by using OBS-2200 gaseous portable emission measurement system on arterial road, residential road and elevated road. Analysis result shows that the on-road transient mass emission rates of CO, NO<sub>x</sub>, HC and CO<sub>2</sub> have good following performance with the transient change of vehicle speeds. The mass emission rates of gaseous pollutants from the bus burning alternative fuels show a total ascending tendency with increasing vehicle speed. The mass emission rates of HC and CO<sub>2</sub> almost linearly increase with ascending vehicle speed, while CO and NO<sub>x</sub> emissions firstly increase with the speed increasing in low and medium vehicle speed ranges, and then decrease with the speed increasing in high vehicle speed range. Compared to arterial road and residential road, the emission factors of the bus burning alternative fuels on elevated road are the lowest. Compared to pure diesel fuel, the emission factors and mass emission rates of CO and HC from the bus burning biodiesel fuel and GTL fuel decline, and for biodiesel fuel, the decreasing range is greater. The average emissions of CO and HC from the bus burning pure biodiesel fuel on the whole test roads are the lowest. Compared to pure diesel fuel,

收稿日期:2013-02-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50906062);中央高校基本科研业务费专项资金项目(201272);上海市科委科研计划项目(10231201900)

作者简介:谭丕强(1974-),男,山东临沂人,同济大学副教授,工学博士,从事汽车排放控制和清洁燃料研究。

NO<sub>x</sub> emissions from the bus burning pure biodiesel fuel are higher on all roads. CO<sub>2</sub> emissions of the bus burning pure GTL fuel, GTL fuel with 20% blend ratio and biodiesel fuel with 20% blend ratio are respectively lower than the emission for pure diesel fuel, but CO<sub>2</sub> emission of the bus burning pure biodiesel fuel is slightly higher than the emission for pure diesel fuel. 2 tabs, 11 figs, 16 refs.

**Key words:** diesel bus; alternative fuels; biodiesel fuel; gas-to-liquid fuel; on-road emission

**Author resume:** TAN Pi-qiang(1974-), male, associate professor, PhD, +86-21-69589981, tanpq@hotmail.com.

## 0 引 言

在全球能源危机和环境保护的背景下,节能减排是交通运输行业发展的重要趋势,其中汽车行业是城市交通节能减排的主要组成部分。柴油公交车作为城市重要的公共交通工具需要消耗巨大的能源,同时又会产生大量的有害排放,因此,开展柴油公交车替代燃料的研究非常重要。在诸多柴油替代燃料中,生物柴油和天然气制油(GTL柴油)较为典型<sup>[1-2]</sup>。

生物柴油是以动植物油脂为原料经化学作用制成的液体燃料,具有十六烷值与含氧量高,含硫量低等优点,并无须改动柴油机可直接使用<sup>[3-5]</sup>。GTL柴油是一种以天然气为原料,通过费托(Fischer-Tropsch)合成工艺转化而成的液体燃料,清洁,无色,具有十六烷值高,芳香烃含量低,不含硫等特点,且可直接在柴油机中使用<sup>[6-8]</sup>。

针对生物柴油和 GTL 柴油,国内外学者在发动机台架上进行了许多研究。国外方面,Armas 等的试验研究表明发动机燃用纯 GTL 柴油和纯生物柴油的 HC、CO 排放因子均有显著的降低,纯 GTL 柴油的 NO<sub>x</sub> 排放因子与纯柴油相差不大,而纯生物柴油的 NO<sub>x</sub> 排放因子比柴油稍有降低<sup>[9]</sup>;Krahl 等的研究表明发动机燃用生物柴油 HC 与 CO 排放均有所降低,NO<sub>x</sub> 的排放与柴油相比增加 15%<sup>[10]</sup>;Jaichandar 等研究了环形凹角燃烧室燃用 B20 生物柴油,结果表明 HC 排放减少 20.7%,CO 排放减少 44.5%,NO<sub>x</sub> 排放增加约 9.2%<sup>[11]</sup>。国内方面,武涛等对增压中冷柴油机燃用 GTL 柴油进行了研究,在试验工况下燃用 GTL 平均降低了 16.6%的 HC、14.5%的 CO 和 15.1%的 NO<sub>x</sub> 的排放<sup>[8]</sup>;谭丕强等的研究表明,燃用生物柴油可以有效降低柴油机芳香烃类物质和总挥发性有机物的排放,全负荷工况下,燃用纯生物柴油较燃用柴油的苯排放减少 95%,甲苯排放减少 70%,二甲苯排放减少 80%,乙

苯排放减少 40%,欧洲稳态测试循环表明,使用纯生物柴油和掺混 20%的生物柴油的发动机排气挥发性有机物排放低于柴油,掺混 20%生物柴油较柴油降低 42.98%,纯生物柴油降低 53.23%<sup>[12-14]</sup>;谭丕强等对生物柴油和 GTL 柴油的研究表明,燃用掺混 10%的生物柴油后,NO<sub>x</sub> 排放量略有增加,增幅为 1.23%,而 HC 和 CO 排放量有所下降,降幅分别为 2.41%和 13.80%,柴油机燃用 GTL 柴油的瞬态工况排放,不论在高转矩或者低转矩工况下,HC 瞬态排放都显著低于纯柴油,低转矩工况下 CO 瞬态排放明显低于纯柴油,NO<sub>x</sub> 瞬态排放略低于纯柴油,而高转矩工况下 CO、NO<sub>x</sub> 的瞬态排放与纯柴油基本相当<sup>[14-15]</sup>;陈昊等的研究表明在发动机转速为 1 500 r·min<sup>-1</sup>时,燃用纯生物柴油的 HC、CO 排放平均分别降低 17.17%、26.73%,NO<sub>x</sub> 排放平均增加 21.93%<sup>[16]</sup>。

以上这些发动机台架试验的研究结果表明,仅就气体污染物排放而言,与燃用纯柴油相比,燃用生物柴油时,发动机的 HC、CO 排放有所下降,而 NO<sub>x</sub> 排放有所增加;燃用 GTL 柴油时,与燃用纯柴油相比,发动机的 HC、CO 等有害排放都有不同程度的降低。

以上的发动机台架试验大都是在特定工况点或者特定试验循环下进行的,有助于清晰地理解燃料变化给发动机排放带来的影响。但车用柴油机的实际运行工况特征与发动机台架试验工况存在很大差异,有必要对公交车实际运行时的道路排放进行研究。目前,对于公交车燃用纯柴油的实际道路排放已经开展了一些研究工作,但对于公交车燃用生物柴油或者 GTL 柴油的实际道路排放特性,较少见到报道。基于以上分析,本文以上海市柴油公交车为对象,研究了其使用纯柴油、不同配比生物柴油、不同配比 GTL 柴油在实际道路运行时的气态污染物排放特性。

1 研究方案

1.1 试验装置和燃料

试验样车为上海市日常运营的柴油公交车,排放水平满足国 IV 标准,基本参数见表 1。排放测试设备是日本 HORIBA 公司的 OBS-2200 车载排放检测系统,不仅可以对 CO、CO<sub>2</sub>、HC、NO<sub>x</sub> 以及排气流量和空燃比进行连续检测和记录,而且可根据所得数据计算出车辆每单位行驶距离的排放气体质量和油耗等参数。该设备采用加热型的不分光红外检测法 NDIR 测量 CO 和 CO<sub>2</sub> 排放,采用加热型的氢火焰离子检测法 FID 测量 HC 排放,采用加热型的化学发光法 CLD 测量 NO<sub>x</sub> 排放,采用 Pitot 管流量计测量排气流量。该系统还配备有 GPS 设施,可以获得车辆的实时位置信息,从而得到实时车速。

表 1 试验公交车的基本参数

Tab. 1 Basic specifications of test bus

参数名称	参数值
总质量/kg	17 500
整备质量/kg	11 000
最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	85
额定功率/kW	213
发动机排量/L	7.146
排放水平	国 IV 标准

试验燃料有纯柴油、体积掺混比为 20% 和 100% 的生物柴油、体积掺混比为 20% 和 100% 的 GTL 柴油,其中生物柴油由废弃油脂制成,后 4 种燃料分别简称为 B20、B100、G20、G100。纯柴油、B20、B100、G20、G100 的主要理化特性见表 2。

表 2 试验燃料的主要理化特性

Tab. 2 Physical and chemical characteristics of test fuels

参数	纯柴油	B20	B100	G20	G100
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	822.0	832.9	876.3	812.1	772.1
十六烷值	51.2	53.1	60.4	56.0	74.8
低热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	38.04	38.01	37.88	38.53	40.47
含硫量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	15.0	15.4	17.0	12.3	1.4
90%馏出温度/℃	342.2	342.5	343.6	333.9	300.8

1.2 试验方案

试验车辆的最大载重量为 6 500 kg,试验载荷为 45 个装满 50 kg 水的塑料水桶,8 块 200 Ah 蓄电池的质量为 500 kg,所有试验设备总质量为 200 kg,4 名试验操作人员和驾驶员总质量为 300 kg,总载荷为 3 250 kg,为最大载荷的 50%。试验路线为上海市的实际道路,涵盖了公交车的典型

路况,包括市区主干道、次干道、快速路 3 种不同的实际道路类型,总里程为 22 km,其中主干道为 10 km,次干道为 6 km,快速路为 6 km。

2 试验结果分析

2.1 公交车不同路况的速度分布特性

图 1、2 分别为公交车燃用纯柴油时不同路况的速度区间分布和平均速度。由于公交车在市区行驶速度不高,按照车速将公交车行驶速度分为低速区域(小于 10 km·h<sup>-1</sup>)、中速区域(10~40 km·h<sup>-1</sup>)和高速区域(大于 40 km·h<sup>-1</sup>)。由图 1 可以看出车辆低速行驶工况在主干道和次干道所占比例均较高,中速行驶工况在次干道中比例较高,而高速行驶工况在快速路中的比例明显高于其他 2 种路况。从图 2 可以直观地比较这 3 种路况的速度平均值,快速路平均值最高,主干道次之,次干道最低。对公交车燃用其他 4 种不同替代燃料时的车速进行分析,发现与纯柴油有相似的速度分布情况,在此不再赘述。

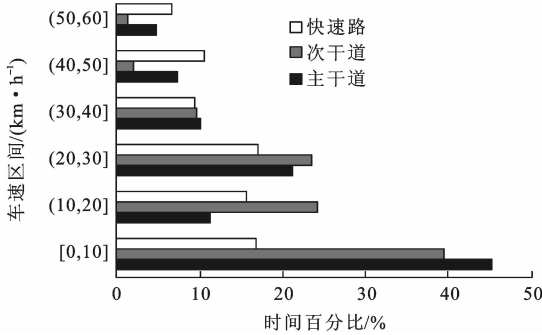


图 1 速度区间分布

Fig. 1 Velocity distributions

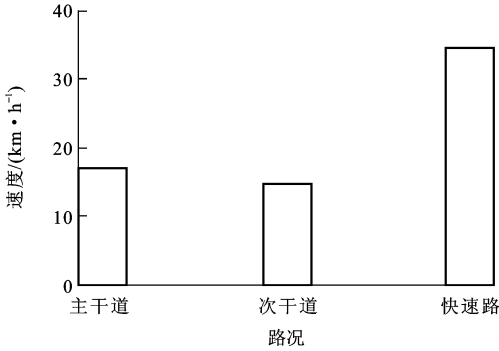


图 2 平均车速

Fig. 2 Average velocities

2.2 公交车燃用纯柴油的道路瞬时排放

为直观认识各种气态污染物排放与车速的关系,对公交车燃用纯柴油的瞬时车速和气态排放进行了研究,根据各路况车速特性,在主干道、次干道和快速路中各选取了公交车 400 s 的瞬时车速和气

态污染物的质量排放率,将其放在一张瞬态图中进行对比分析,见图 3,其中 0~400 s 是主干道,400~800 s 是次干道,800~1 200 s 是快速路。

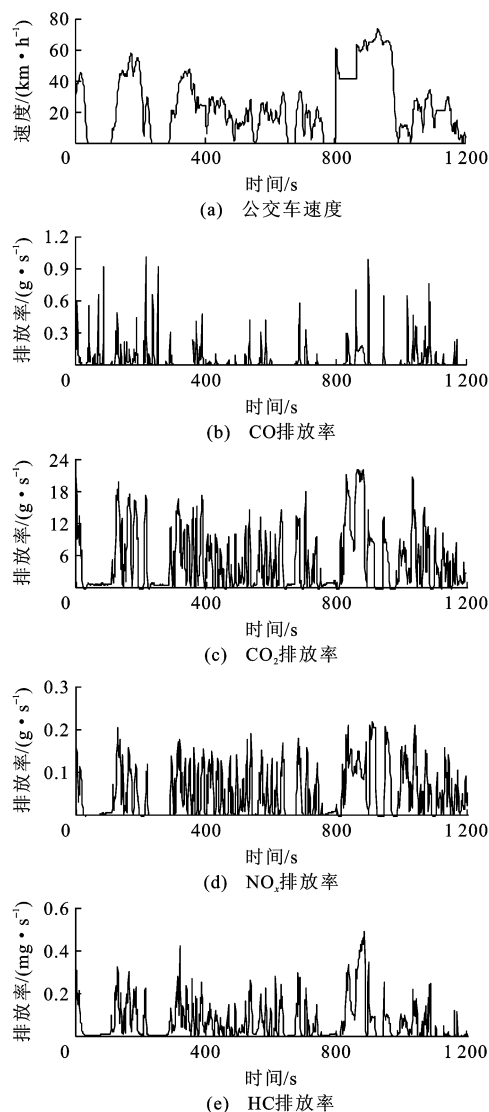


图 3 道路瞬态排放率

Fig. 3 On-road transient emission rates

由图 3 不难看出,该车 CO、CO₂、NOₓ 和 HC 的道路瞬时质量排放率均与瞬态车速变化有良好的跟随特性,车速增加,污染物的质量排放率也增加,表明公交车燃用纯柴油的道路瞬时排放与车速具有高度的正相关性。分析了公交车燃用其他 4 种燃料的道路瞬时排放特性,得到了相似的结果,表明公交车实际道路的瞬间排放率与车速具有高度的相关性。

## 2.3 公交车燃用不同替代燃料的气态排放特性

### 2.3.1 CO 排放

图 4 给出了全路况下随车速变化的公交车单位时间 CO 质量排放率。随车速增加,在中低速区域,纯柴油 CO 的质量排放率大都呈现持续增加的趋势,

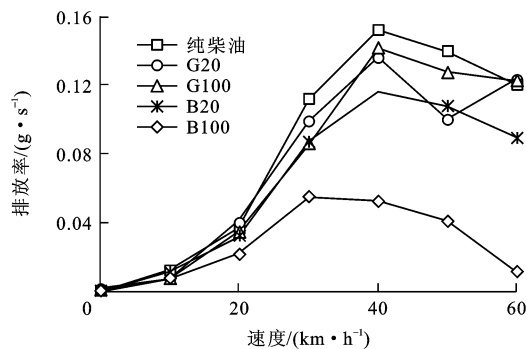


图 4 CO 质量排放率

Fig. 4 CO mass emission rates

但在高速区域尤其是超过 40 km·h⁻¹ 时有所降低。在中低速区域时质量排放率随车速增加,可以认为此时车速增加,一般情况下发动机转速也在增加,导致单位时间内的发动机循环次数增加,发动机单个循环的燃空混合与燃烧时间变短,气缸局部区域缺氧加剧,致使 CO 不能充分燃烧成为 CO₂,因而发动机单个循环的 CO 排放增加,再加上单位时间内的发动机工作循环次数上升,更进一步提高了单位时间的车辆污染物质量排放率。高速区域的车速进一步增加时,加速和减速工况较少,发动机工况相对稳定,缸内燃烧温度高,也有利于 CO 的氧化,故 CO 的质量排放率有所下降。

由图 4 可以看出,公交车燃用生物柴油和 GTL 柴油后,其 CO 的质量排放率随车速的变化趋势与纯柴油类似,也都是随着车速的增加,先增大后减小,但变化程度存在不同程度的差异。首先,与纯柴油相比,该车燃用 4 种替代燃料的 CO 排放率都有所降低,其中 G20 和 G100 均低于柴油,且二者的 CO 排放差别不大,这主要由于 GTL 柴油的十六烷值较高,密度明显低于纯柴油,对燃烧有利;总体看来,生物柴油比 GTL 柴油的 CO 排放还要低一些, B20 燃油已明显低于纯柴油,燃用 B100 纯生物柴油的 CO 质量排放率大幅低于其他 4 种燃料,尤其在中高速区域。这是由于生物柴油含有分子内氧,有利于局部区域 CO 的进一步氧化,从而明显降低了 CO 排放。

图 5 描述了公交车在市区主干道、次干道、快速路以及全路况的 CO 排放因子。就纯柴油而言,其主干道和次干道 CO 排放因子接近,快速路明显要低,这主要是由于快速路工况下,车速较高,行驶同样里程的时间短,排放因子自然降低。可以看出,不论是主干道、次干道、快速路,还是全路况,公交车燃用 GTL 柴油和生物柴油混合燃料的 CO 排放因子

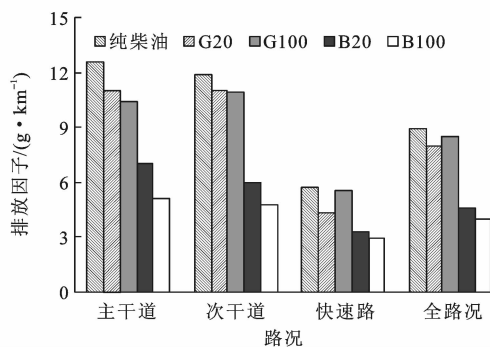


图5 CO排放因子

Fig. 5 CO emission factors

都低于柴油,只是程度有所不同。总体看来,燃用G20和G100燃料的CO排放因子差别不大,且都略低于纯柴油,分别低9.9%和4.3%。燃用B20和B100生物柴油的CO排放因子明显低于纯柴油,在各路况下都较为显著,其中全路况下二者排放较为接近,且B20较纯柴油排放因子低48.4%,B100较纯柴油排放因子低54.9%。

### 2.3.2 HC排放

图6给出了全路况下随车速变化的公交车单位时间HC质量排放率。该车燃用纯柴油的HC质量排放率随车速增加而升高,基本呈线性关系变化。这仍然是由于车速增加后,发动机单个循环的燃空混合与燃烧时间变短,导致HC排放上升;还有车速增加导致单位时间的发动机工作循环次数增加,从而使单位时间的质量排放率进一步增加。

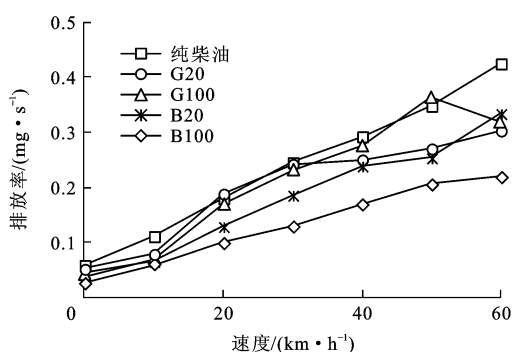


图6 HC质量排放率

Fig. 6 HC mass emission rates

总体看来,4种替代燃料的HC质量排放率均比柴油低,随车速的变化特性与纯柴油类似,也近似呈线性关系。使用G20、G100燃油的HC排放接近;使用生物柴油的HC质量排放率比GTL柴油还要低,其中B20燃油在各车速下明显低于纯柴油,而燃用B100纯生物柴油的HC质量排放率则大幅低于纯柴油,在全部车速区域均为如此,这仍然与生物柴油自身含有的分子内氧有关。

按路况对公交车的HC排放因子进行了分析,结果见图7。可以看出,快速路上该车燃用各种燃料的HC排放因子是最低的,这主要也是车速高的原因。不论是主干道、次干道、快速路条件下,GTL柴油和生物柴油混合燃料的HC排放因子都低于纯柴油。综合看来,全路况下该车燃用纯柴油的HC排放因子最高,G20和G100燃油的HC排放因子基本相当,并分别比纯柴油低6.3%和9.2%;B20的HC排放因子比纯柴油低22.1%;B100纯生物柴油的HC排放因子最低,且与纯柴油相比降幅很大,全路况下其排放因子较纯柴油低43.5%。

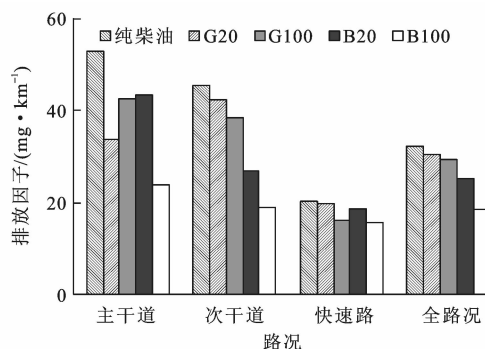
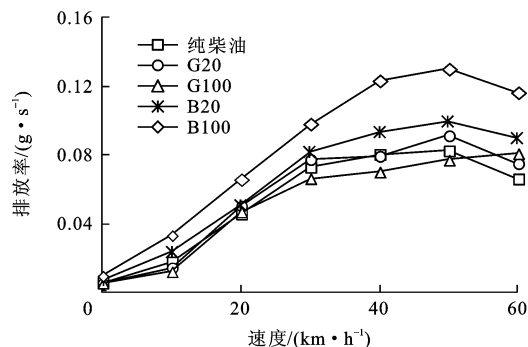


图7 HC排放因子

Fig. 7 HC emission factors

### 2.3.3 NO<sub>x</sub>排放

图8给出了全路况下随车速变化的公交车单位时间NO<sub>x</sub>质量排放率。该车燃用纯柴油的NO<sub>x</sub>质量排放率随车速增加,具有先上升后略有下降的趋势,其他4种替代燃料也有相似的变化趋势。B100纯生物柴油的NO<sub>x</sub>质量排放率最高,其次是B20燃油,这与生物柴油含氧与十六烷值稍高有关;与纯柴油相比,G20燃油的NO<sub>x</sub>质量排放率变化不大,G100燃油略有降低。在车速小于30 km·h<sup>-1</sup>时,随着车速增加,单位时间内的NO<sub>x</sub>质量排放率增长近似呈线性关系;车速在30~50 km·h<sup>-1</sup>时增长变

图8 NO<sub>x</sub>质量排放率Fig. 8 NO<sub>x</sub> mass emission rates

慢,这反映出发动机缸内温度和过量空气系数对  $\text{NO}_x$  排放的综合影响;车速大于  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  后  $\text{NO}_x$  质量排放率开始降低,负荷增加,喷油量上升导致燃烧室局部区域的氧相对较少,不利于  $\text{NO}_x$  的生成。

从路况角度分析,各路况的  $\text{NO}_x$  排放因子结果见图 9。快速路各燃料的  $\text{NO}_x$  排放因子均为最低,这仍然与快速路的车速较高有关。随着路况的不同,与纯柴油相比,其他各燃料的  $\text{NO}_x$  排放因子变化不尽相同,其中 B20 燃油的  $\text{NO}_x$  排放因子在各路况下都低于 B100 燃油,次干道、快速路、全路况 G20 燃油的  $\text{NO}_x$  排放因子都高于 G100 燃油。在全路况下,与纯柴油相比,G20、G100 的排放因子分别要高 8.1% 和 5.3%。只有 B100 燃油的  $\text{NO}_x$  排放因子在各路况下都高于柴油,这与不同车速下各燃料的  $\text{NO}_x$  排放因子特性类似,其在全路况下排放因子较纯柴油高 11.0%。全路况下 B20 的排放因子与纯柴油相差不多,只较纯柴油高 1.0%。

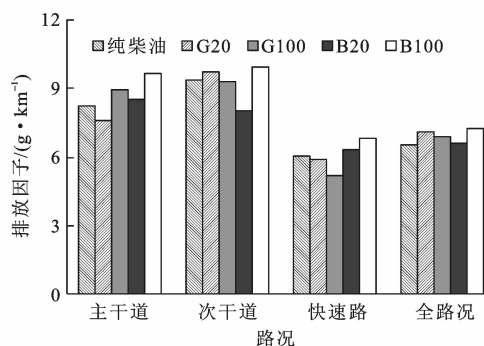


图 9  $\text{NO}_x$  排放因子

Fig. 9  $\text{NO}_x$  emission factors

#### 2.3.4 $\text{CO}_2$ 排放

图 10 为公交车燃用各燃料时,不同车速下  $\text{CO}_2$  的质量排放率。可以看出,各燃料的  $\text{CO}_2$  质量排放率随车速增加的变化趋势类似,呈现较明显的线性趋势,这是因为车速增加后,单位时间的发动机工作循环次数一般会增加,单位时间喷油量和燃油消耗量增多,从而导致越多的  $\text{CO}_2$  排出。

图 11 为各路况的  $\text{CO}_2$  排放因子。快速路上各燃料的  $\text{CO}_2$  排放因子最低,也是由于车速快,单位里程  $\text{CO}_2$  质量排放量降低的原因。与纯柴油相比,其他各燃料的  $\text{CO}_2$  排放因子变化不尽相同。全路况下,燃用 G20、G100、B20 燃料的  $\text{CO}_2$  排放因子要低于柴油,分别较柴油低 2.9%、7.3% 和 6.7%,但纯生物柴油的  $\text{CO}_2$  排放因子较纯柴油高 7.8%,这是由于 B100 纯生物柴油的质量热值略低于柴油的原因。

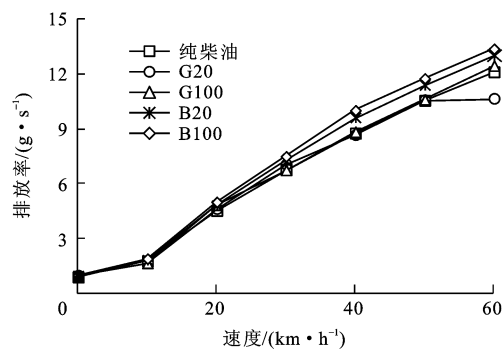


图 10  $\text{CO}_2$  质量排放率

Fig. 10  $\text{CO}_2$  mass emission rates

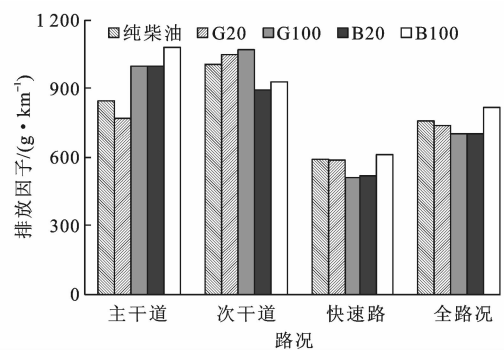


图 11  $\text{CO}_2$  排放因子

Fig. 11  $\text{CO}_2$  emission factors

### 3 结 语

(1) 公交车燃用各类燃料的  $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}_2$  的道路瞬时质量排放率均与瞬态车速变化有良好的跟随特性,表明公交车的道路瞬时排放与车速具有高度的正相关性。

(2) 公交车燃用各种替代燃料的气态污染物质量排放率随车速增加总体呈上升趋势,其中  $\text{HC}$  和  $\text{CO}_2$  的质量排放率随车速增大,基本呈线性增加趋势, $\text{CO}$  和  $\text{NO}_x$  的质量排放率则在中低车速区域随车速上升呈现增加趋势,而在高车速区域有所降低。

(3) 与主干道、次干道相比,公交车在快速路上燃用各种替代燃料的气态污染物的排放因子都是最低的。

(4) 公交车燃用各种替代燃料时,与纯柴油相比,不论是质量排放率还是排放因子,生物柴油和 GTL 柴油的  $\text{CO}$  和  $\text{HC}$  排放都有所下降,且生物柴油的降幅更大一些。从全路况范围来看,纯生物柴油的  $\text{CO}$  和  $\text{HC}$  排放最低。纯生物柴油的  $\text{NO}_x$  排放要高于柴油,其他替代燃料的  $\text{NO}_x$  排放不同车速或者路况下变化不尽相同。全路况下 G20、G100、B20 燃料的  $\text{CO}_2$  排放要低于纯柴油,但纯生

物柴油的 CO<sub>2</sub> 排放要高一些。综合分析,公交车使用掺混比在 20% 以内的柴油替代燃料,其主要道路有害排放物大都有不同程度的降低。

## 参考文献:

## References:

- [1] MCKENZIE E C, DURANGO-COHEN P L. Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(1): 39-47.
- [2] HASSANEEN A, MUNACK A, RUSCHEL Y, et al. Fuel economy and emission characteristics of gas-to-liquid (GTL) and rapeseed methyl ester (RME) as alternative fuels for diesel engines[J]. *Fuel*, 2012, 97(2): 125-130.
- [3] TAN Pi-qiang, HU Zhi-yuan, LOU Di-ming, et al. Exhaust emissions from a light-duty diesel engine with jatropha biodiesel fuel[J]. *Energy*, 2012, 39(3): 356-362.
- [4] XUE J L, GRIFT T E, HANSEN A C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2): 1098-1116.
- [5] 袁银南,张 恬,梅德清,等.直喷式柴油机燃用生物柴油燃烧特性的研究[J]. *内燃机学报*, 2007, 25(1): 43-46.  
YUAN Yin-nan, ZHANG Tian, MEI De-qing, et al. Investigation on combustion characteristics of direct injection diesel engine fuelled with biodiesel [J]. *Transactions of CSICE*, 2007, 25(1): 43-46. (in Chinese)
- [6] MANCARUSO E, VAGLIECO B M. Premixed combustion of GTL and RME fuels in a single cylinder research engine[J]. *Applied Energy*, 2012, 91(1): 385-394.
- [7] SOLTIC P, EDENHAUSER D, THURNHEER T. Experimental investigation of mineral diesel fuel, GTL fuel, RME and neat soybean and rapeseed oil combustion in a heavy duty on-road engine with exhaust gas aftertreatment[J]. *Fuel*, 2009, 88(1): 1-8.
- [8] 武 涛,黄 震,张武高,等.燃用天然气合成油增压柴油机特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(1): 174-176.  
WU Tao, HUANG Zhen, ZHANG Wu-gao, et al. Study on characteristics of a turbocharged diesel engine fueled with gas-to-liquids fuel[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(1): 174-176. (in Chinese)
- [9] ARMAS O, GARCIA-CONTRERAS R, RAMOS Á. Impact of alternative fuels on performance and pollutant emissions of a light duty engine tested under the new European driving cycle[J]. *Applied Energy*, 2013, 107(7): 183-190.
- [10] KRAHL J, KNOTHE G, MUNACK A, et al. Comparison of exhaust emissions and their mutagenicity from the combustion of biodiesel, vegetable oil, gas-to-liquid and petrodiesel fuels[J]. *Fuel*, 2009, 88(6): 1064-1069.
- [11] JAICHANDAR S, KUMAR P S, ANNAMALAI K. Combined effect of injection timing and combustion chamber geometry on the performance of a biodiesel fueled diesel engine [J]. *Energy*, 2012, 47(1): 388-394.
- [12] 谭丕强,胡志远,楼狄明,等.非直喷式增压柴油机燃用生物柴油的性能和排放特性[J]. *内燃机学报*, 2006, 24(2): 110-115.  
TAN Pi-qiang, HU Zhi-yuan, LOU Di-ming, et al. Performance and emissions of IDI turbocharged diesel engines fuelled with biodiesel fuels[J]. *Transactions of CSICE*, 2006, 24(2): 110-115. (in Chinese)
- [13] 尤可为,葛蕴珊,何 超,等.柴油机燃用生物柴油的非常规污染物排放特性[J]. *内燃机学报*, 2010, 28(6): 506-509.  
YOU Ke-wei, GE Yun-shan, HE Chao, et al. Unregulated emissions from a diesel engine fueled with biodiesel[J]. *Transactions of CSICE*, 2010, 28(6): 506-509. (in Chinese)
- [14] 谭丕强,阮帅帅,胡志远,等.发动机燃用生物柴油的颗粒可溶有机组分及多环芳烃排放[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(8): 115-121.  
TAN Pi-qiang, RUAN Shuai-shuai, HU Zhi-yuan, et al. Soluble organic fraction and polycyclic aromatic hydrocarbons in particulate matter emissions from diesel engine with biodiesel fuel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(8): 115-121. (in Chinese)
- [15] 谭丕强,鲍锡君,胡志远,等.柴油机燃用 GTL 柴油和纯柴油瞬态工况的排放特性[J]. *内燃机学报*, 2013, 31(3): 235-240.  
TAN Pi-qiang, BAO Xi-jun, HU Zhi-yuan, et al. Emissions from a diesel engine with pure gas-to-liquids and diesel fuels during transient operating conditions [J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(3): 235-240. (in Chinese)
- [16] 陈 昊,祁东辉,边耀璋.喷雾特性对生物柴油燃烧和排放特性的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(1): 40-43.  
CHEN Hao, QI Dong-hui, BIAN Yao-zhang. Influence of spray performance on combustion and emission characteristics of biodiesel[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9(1): 40-43. (in Chinese)