

乙醇汽油对汽车污染物排放影响研究进展

魏阳冰¹, 陈宏飞¹, 谢沛远¹, 孙文欣¹, 朱仁成^{1,2*}, 王运静^{2*}, 张超越¹

1. 郑州大学生态与环境学院, 河南 郑州 450001

2. 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要: “双碳”背景下, 替代燃料乙醇汽油的推广应用在汽车减污降碳和能源安全领域受到广泛关注. 为研究乙醇汽油对汽车污染物和温室气体排放的影响, 本研究基于大量文献数据, 统计分析了乙醇汽油的使用对汽车尾气常规气态污染物、颗粒物 (PM)、温室气体、挥发性有机物 (VOCs) 以及蒸发排放的影响, 并综合评估其对二氧化碳 (CO₂)、PM 和 VOCs 的减排效果, 进一步针对典型区域分析乙醇汽油推广应用带来的环境效益. 结果表明: ①与传统汽油相比, 乙醇汽油的使用可以降低尾气中总碳氢化合物 (THC)、一氧化碳 (CO)、氮氧化物 (NO_x)、VOCs、PM 及其数量的排放, 其降幅分别为 10.0%、22.0%、1.3%、17.7%、21.3%、14.9%, 且减排率均随汽油中乙醇含量的升高而增高, 但是有增加 VOCs 蒸发排放量的趋势. ②乙醇汽油对尾气中温室气体的减排效果并不显著, 但通过减少化石燃料的使用能在一定程度上减少机动车尾气中 CO₂ 的排放. 以 2022 年河南省轻型汽油车保有量为基准, 评估了河南省全省推广乙醇汽油 (E10 汽油) 后轻型汽油车 CO₂、PM 及 VOCs 的减排量, 分别为 9.1×10⁵、92.4 和 1 118.1 t/a. 研究显示, 乙醇汽油的推广使用具有一定的减污降碳协同效益, 加强蒸发排放控制能够进一步降低使用乙醇汽油时的污染物排放.

关键词: 乙醇汽油; 尾气排放; 蒸发排放; 颗粒物 (PM); 挥发性有机物 (VOCs); 温室气体

中图分类号: X511; X513 **文章编号:** 1001-6929(2024)03-0514-11

文献标志码: A **DOI:** 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.11.18

Research Progress on Impact of Ethanol Gasoline on Vehicle Emissions

WEI Yangbing¹, CHEN Hongfei¹, XIE Peiyuan¹, SUN Wenxin¹, ZHU Rencheng^{1,2*}, WANG Yunjing^{2*}, ZHANG Chaoyue¹

1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: In the context of ‘carbon peaking and carbon neutrality’ initiative, the utilization of ethanol gasoline as an alternative fuel has attracted significant interest for its potential to mitigate vehicular pollutants, reduce carbon emissions, and enhance energy security. To examine the effects of ethanol gasoline on vehicle pollutants and greenhouse gas emissions, this study conducted a comprehensive statistical analysis of its impact on regulated exhaust emissions, including gaseous compounds, particulate matter (PM), greenhouse gases, and volatile organic compounds (VOCs) and evaporative emissions. The reduction of carbon dioxide (CO₂), PM, and VOCs achieved through the use of ethanol gasoline was comprehensively assessed, and the environmental advantages of implementing ethanol gasoline in a representative area were further evaluated. The results demonstrate that the use of ethanol gasoline resulted insignificant reductions in exhaust emissions of total hydrocarbons (THC), carbon monoxide (CO), nitrogen oxide (NO_x), VOCs, PM, and particulate number (PN) by 10.0%, 22.0%, 1.3%, 17.7%, 21.3% and 14.9%, respectively, in comparison to conventional gasoline. The efficiency of emission reduction increases proportionally with the elevated ethanol content in gasoline, although it results in increased evaporative VOCs emissions. Ethanol gasoline does not have significant effect on the reduction of greenhouse gas emissions, but it does help reducing vehicle CO₂ emissions to some extent by reducing reliance on fossil fuels. Utilizing the 2022 inventory of light-duty gasoline vehicles in Henan

收稿日期: 2023-08-31 **修订日期:** 2023-11-20

作者简介: 魏阳冰 (2000-), 女, 海南海口人, 硕士, 主要从事机动车排放研究, wyb0110@gs.zzu.edu.cn.

* 责任作者: ①朱仁成 (1989-), 男, 河南开封人, 副教授, 博士, 主要从事大气污染防治研究, zhurc@zzu.edu.cn; ②王运静 (1982-), 女, 河北廊坊人, 副研究员, 博士, 主要从事移动源 VOCs 污染特征、排放清单研究, wangyunjing@vecc.org.cn

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目 (No.232300421243); 中国环境科学研究院国家环境保护机动车污染控制与模拟重点实验室开放基金项目 (No.VECS2022K05); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No.2022YSKY-05)

Supported by Natural Science Foundation of Henan Province, China (No.232300421243); Open Research Fund of State Environmental Protection Key Laboratory of Vehicle Emission Control and Simulation, Chinese Research Academy of Environmental Sciences (No.VECS2022K05); Fundamental Research Funds for the Central Public-Interest Scientific Institution, China (No.2022YSKY-05)

Province as a baseline, the study assesses the emission reduction quantities of CO₂, PM, and VOCs resulting from the province-wide adoption of ethanol gasoline (E10), amounting to 9.1×10⁵, 92.4 and 1118.1 t/a, respectively. The results show that ethanol gasoline exhibits a synergistic benefit in pollution reduction and carbon mitigation, enhanced evaporative emission control can further mitigate pollutant emissions when utilizing ethanol gasoline.

Keywords: ethanol gasoline; exhaust emissions; evaporative emissions; particulate matter; volatile organic compounds (VOCs); greenhouse gases

机动车排放是城市地区大气细颗粒物 (PM_{2.5})、挥发性有机物 (VOCs) 和温室气体的主要来源之一, 不仅能够促进灰霾和光化学烟雾的形成, 还会增加人们罹患呼吸系统、心脑血管等疾病的风险^[1-4]。《中国移动源环境管理年报 (2022 年)》显示: 2021 年底我国汽车保有量已经达到 3.02 亿辆, 同比增长 7.5%。2021 年我国机动车的一氧化碳 (CO)、碳氢化合物 (HC)、氮氧化物 (NO_x)、颗粒物 (PM) 排放量分别为 7.7×10⁶、2.0×10⁶、5.8×10⁶、6.8×10⁴ t^[5]。因此, 加强机动车排放控制对于城市 PM_{2.5} 和臭氧复合污染防控具有重要意义。《2022 年国内外油气行业发展报告》显示, 交通领域燃油消耗占我国石油消费总量的 55.4%。在我国机动车高保有量和持续增长的背景下, 如何在确保能源安全的同时, 实现减污降碳协同增效, 成为当前亟待解决的重要问题。

为缓解机动车保有量不断增加引起的环境污染和能源短缺问题, 车用清洁替代燃料不断发展^[6-7]。

乙醇具有高燃烧效率、高辛烷值和良好抗震爆性^[8-9], 被广泛用作汽油的部分替代品并得以推广应用。我国从 2003 年开始试点推行 E10 汽油 (含体积分数为 10% 变性燃料乙醇的车用乙醇汽油), 截止到 2023 年 8 月, 已有 15 个省 (自治区、直辖市) 全域或局部使用, 具体如表 1 所示。目前关于乙醇汽油对汽车排放影响研究众多, 但由于车辆技术水平、实验条件和测试技术等存在较大差异, 不同研究之间结论并不完全一致, 甚至存在相反的现象。例如, 杨正军等^[10]发现乙醇汽油对汽车尾气中 CO、总碳氢化合物 (THC) 有较好的减排效果; 而 Zhu 等^[11]则发现了相反的规律。汽车排放的 VOCs 可分为尾气排放和蒸发排放^[12-13], 随着对尾气排放控制的增强, 蒸发排在汽车总 VOCs 排放中的占比逐年升高^[14-15]。另外, Yamada^[16]指出蒸发排放的 VOCs 可能是比尾气 VOCs 更高效的臭氧诱导剂。因此在关注乙醇汽油对尾气排放影响的同时, 其对 VOCs 蒸发排放的影响也不容忽视。

表 1 截至 2023 年 8 月中国乙醇汽油推广范围

Table 1 The scope of ethanol gasoline promotion in China by August 2023

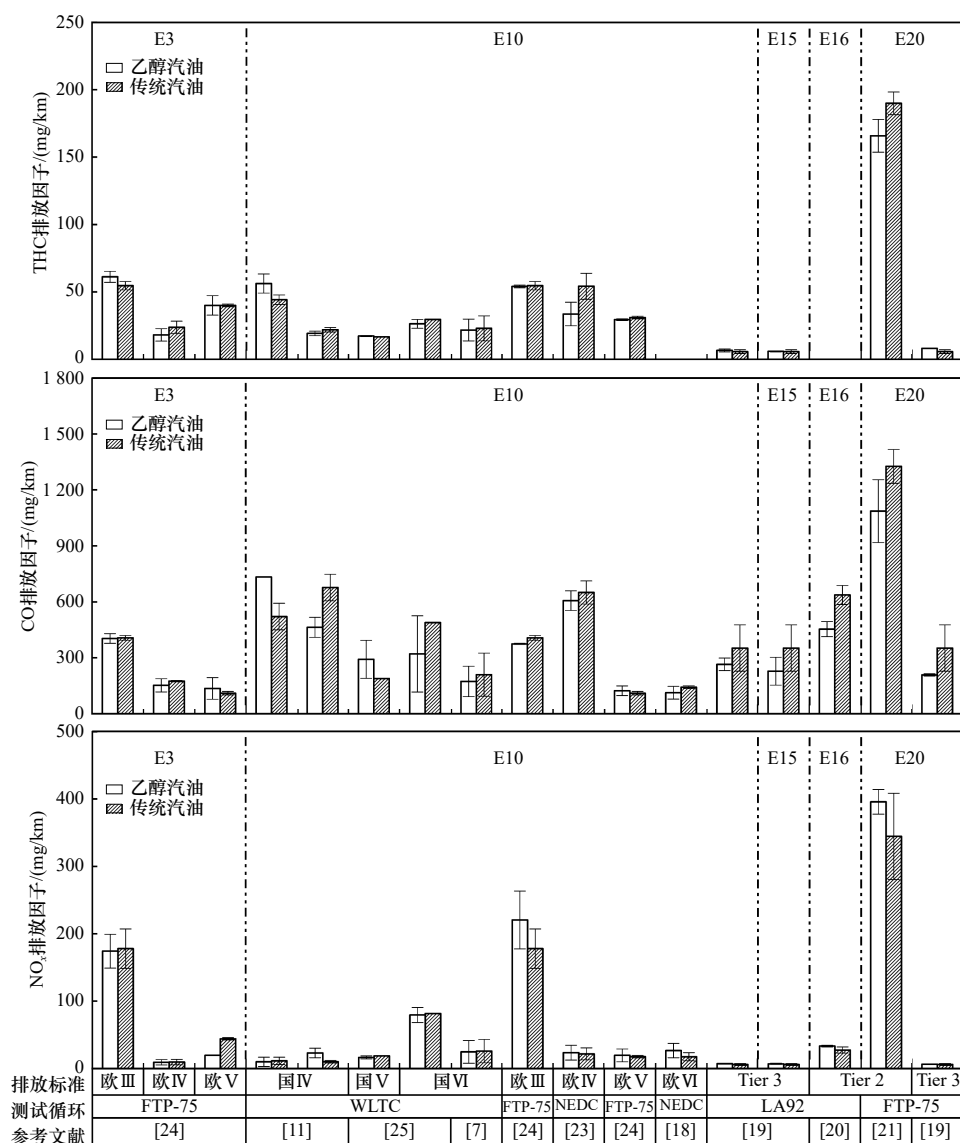
推广乙醇汽油的省份	推广情况	具体城市	起始时间
吉林省	全域推广	长春市、吉林市、四平市、通化市、白山市、辽源市、白城市、松原市、延边朝鲜族自治州	2003年8月
辽宁省	全域推广	沈阳市、大连市、鞍山市、抚顺市、本溪市、丹东市、锦州市、营口市、阜新市、辽阳市、盘锦市、铁岭市、朝阳市、葫芦岛市	2004年1月
黑龙江省	全域推广	哈尔滨市、齐齐哈尔市、牡丹江市、佳木斯市、大庆市、鸡西市、双鸭山市、伊春市、七台河市、鹤岗市、黑河市、绥化市、大兴安岭地区	2004年10月
河南省	全域推广	郑州市、开封市、洛阳市、平顶山市、焦作市、鹤壁市、新乡市、安阳市、濮阳市、许昌市、漯河市、三门峡市、南阳市、商丘市、信阳市、周口市、驻马店市、济源市	2004年12月
安徽省	全域推广	合肥市、黄山市、芜湖市、马鞍山、安庆市、淮南市、阜阳市、淮北市、铜陵市、亳州市、宣城市、蚌埠市、六安市、滁州市、池州市、宿州市	2005年4月
湖北省	局部推广	襄阳市、荆门市、随州市、孝感市、十堰市、武汉市、宜昌市、黄石市、鄂州市	2005年12月
山东省	局部推广	济南市、菏泽市、枣庄市、临沂市、聊城市、济宁市、泰安市、德州市	2006年1月
广西壮族自治区	全域推广	防城港市、南宁市、崇左市、柳州市、来宾市、桂林市、梧州市、贺州市、玉林市、贵港市、百色市、钦州市、河池市、北海市	2008年4月
内蒙古自治区	局部推广	巴彦淖尔市、乌海市、阿拉善盟	2014年6月
江苏省	局部推广	徐州市、连云港市、淮安市、盐城市、宿州市	2015年12月
广州市	局部推广	湛江市	2016年3月
天津市	全域推广	天津市	2018年10月
山西省	局部推广	太原市、阳泉市、长治市、晋城市	2019年10月
上海市	全域推广	上海市	2019年12月
河北省	全域推广	石家庄市、唐山市、秦皇岛市、邯郸市、邢台市、保定市、张家口市、承德市、沧州市、廊坊市、衡水市	2022年1月

为综合评估乙醇汽油对汽车污染物排放的影响,本研究在 Web of Science 和中国知网上分别使用检索词“ethanol gasoline”“vehicle”以及“乙醇汽油”检索 2009 年 1 月 1 日—2023 年 7 月 1 日的相关文献,经过筛选,最终得到 54 篇相关文献.通过系统梳理这 54 篇相关文献内的数据,综合评价乙醇汽油的减污降碳效果,并对全国最早的试点省份之一——河南省推广 E10 汽油的环境效益分析,以期乙醇汽油的进一步推广使用和减少大气污染物、温室气体提供科学依据.

1 乙醇汽油对汽车尾气污染物排放影响

1.1 乙醇汽油对常规气态污染物的影响

图 1 归纳了常温下汽车使用不同汽油时尾气中 THC、CO、NO_x 的排放因子. Zhang 等^[7]发现与国 VI 汽油相比,使用乙醇汽油时 THC 和 CO 的排放因子分别降低了 7.6%~32.9% 和 10.0%~40.0%,这与文献 [17-23] 等研究结论一致.主要原因是乙醇氧含量较高,燃烧时会产生大量羟基从而贡献更易参与氧化还原反应的原子氧,促进汽油充分燃烧;并且可以降低发动机点火温度,提高燃烧速度和火焰传播速度^[17].然而,也有研究发现乙醇汽油会增加 THC 和 CO 排放,如 Zhu 等^[11]观察到燃油喷射 (GDI) 汽油车使用 E10 燃料时尾气中 THC 排放量比使用传统汽油时增加了 25.0%, Lin 等^[24]发现使用 E3 和 E10 燃料时尾



注: FTP-75 表示美国联邦政府认证测试循环; WLTC 表示全球统一轻型车辆测试循环; NEDC 表示新欧洲驾驶循环; LA92 表示美国汽车测试循环.

图 1 汽车分别使用乙醇汽油和传统汽油时尾气 THC、CO 和 NO_x 排放对比

Fig.1 THC, CO and NO_x emissions from vehicles with ethanol gasoline and conventional gasoline, respectively

气中CO排放量比使用传统汽油时分别增加了22.9%和11.5%,这可能是由驾驶习惯或车辆技术差异导致.Yao等^[22]发现乙醇含量从3%增至20%时,THC和CO的减排率分别从1.6%、1.1%增至28.8%、30.8%.

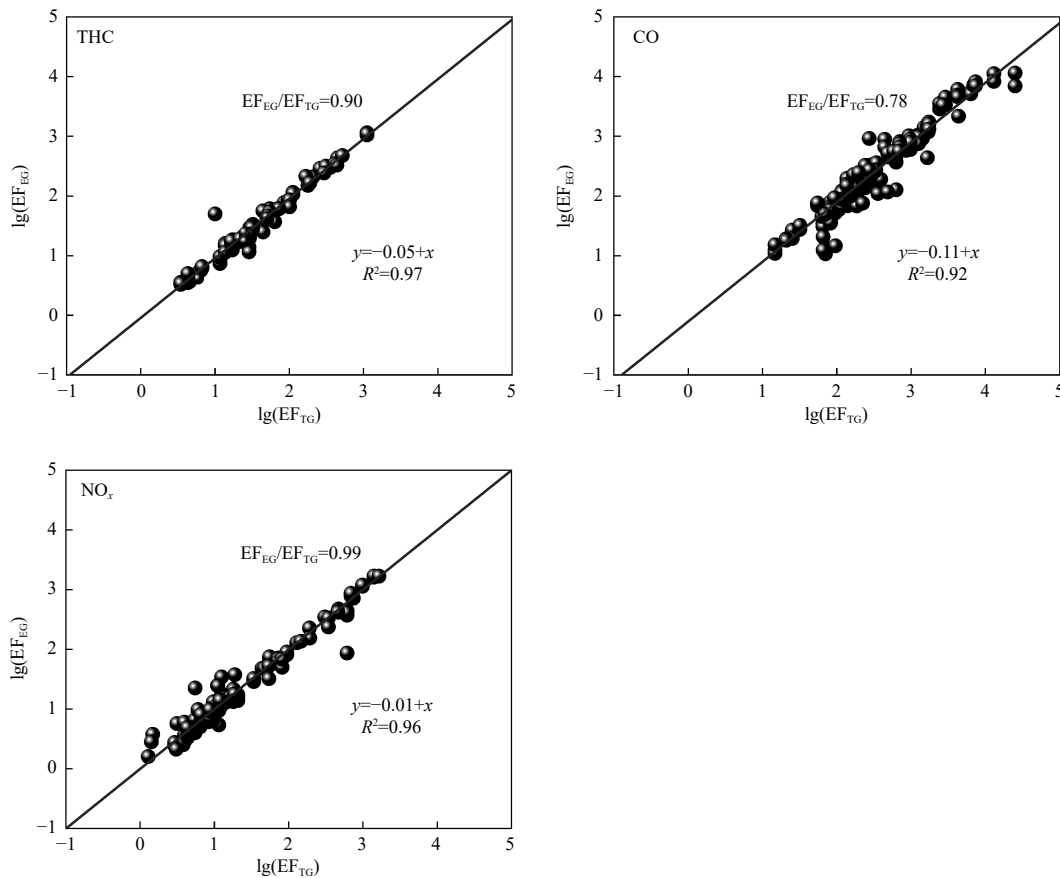
不同研究中有关乙醇汽油对尾气NO_x排放影响存在较大差异.有研究^[7,23-25]显示,汽车使用E3~E40汽油时尾气NO_x排放因子比传统汽油减少了2.1%~46.1%.而其他研究^[11,18-21,24-25]发现,相较于传统汽油,使用E3~E40汽油时汽车尾气中NO_x的排放增加了0.5%~103.5%,这可能与NO_x复杂的生成过程有关.O₂或·OH高温裂解生成的O自由基,在不低于1600℃的高温下才能将N或N₂氧化生成NO或NO₂^[17-18],故含氧量和温度都是影响尾气NO_x排放因子的关键因素.乙醇汽油会增加燃烧室内的含氧量,导致NO_x的排放因子升高,而乙醇的汽化潜热(904 kJ/kg)远高于汽油(301 kJ/kg),故乙醇汽油汽化潜热随乙醇体积分数升高而增大,使燃烧温度下降,这又会抑制NO_x的排放^[26].在这两种因素的综合作用下,改用乙醇汽油后尾气中NO_x的排放趋势并不明确.

此外,乙醇汽油共混物的热值、层流火焰速度等物化性质、汽油车发动机标定值以及后处理系统也会影响NO_x的生成^[27-28].

为了综合评估乙醇汽油对常规气态污染物的排放影响,将文献^[7,17-25,27-37]中传统汽油的排放因子对数值[lg(EF_{TG})]与乙醇汽油的排放因子对数值[lg(EF_{EG})]使用线性函数(y=a+x)进行拟合,结果如图2所示.相对而言,THC观测值分布更加集中,而CO和NO_x的离散程度更高,说明使用乙醇汽油对CO和NO_x的影响更大.从y=a+x拟合曲线来看,R²均大于0.9,说明拟合效果较好.截距a可以量化乙醇汽油具体的减排效果,即EF_{EG}/EF_{TG}=10^a.从传统汽油改用乙醇汽油后,CO、THC分别减排10.0%和22.0%,而NO_x平均排放因子无明显变化.

1.2 乙醇汽油对温室气体的影响

汽油车排放的温室气体以二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和一氧化二氮(N₂O)为主.使用乙醇汽油后,CO₂的排放因子降低0.3%~3.7%,且乙醇含量的升高对CO₂的排放因子基本没有影响^[7,18,24-25],这主要是因



注:排放因子数据来源于文献^[7,17-25,27-37],另外本研究统计数据不包含灵活燃料汽油车数据.

图2 乙醇汽油对汽车尾气常规气态污染物减排效果的综合评价

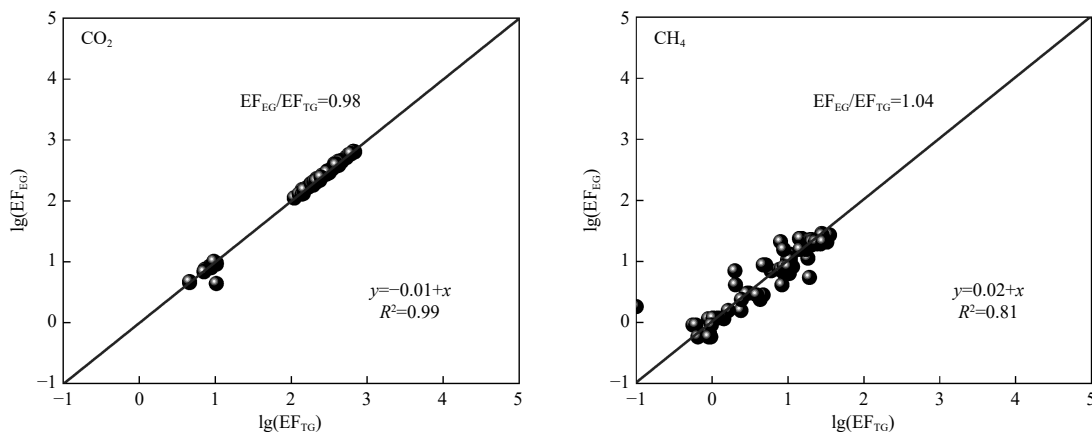
Fig.2 Comprehensive evaluation of the emission reduction effect of conventional gaseous emissions with vehicles using ethanol gasoline

为 CO_2 是燃油燃烧的主要产物,其排放主要由发动机技术决定. Lin 等^[24]发现汽油车从欧Ⅲ升级到欧Ⅳ时,尾气中 CO_2 减少了 8.5%~11.8%,而使用乙醇汽油替代传统汽油时, CO_2 的排放因子仅减少 0.8%,这说明相较于使用乙醇汽油,提高排放标准和升级发动机技术是更有效的尾气 CO_2 减排方案.

不同研究中乙醇汽油对汽车尾气 CH_4 排放影响规律并不一致.例如, Yao 等^[22]分别使用高里程和低里程汽油车测试 E3~E20 的 CH_4 变化情况,发现各燃料-车型的组合作用下 CH_4 的排放因子降低了 14.3%~71.4%.而 Graham 等^[38]分别对国Ⅱ、国Ⅲ、国Ⅴ车进行测试,结果显示大多数情况下使用乙醇汽油比传统汽油的 CH_4 排放因子要高,最高增幅可达 102.5%.其主要原因可能是乙醇汽油在增加燃烧室内氧含量的同时,又增加了碳和氢的含量,导致使用乙醇汽油后 CH_4 排放有升有降.此外, Graham 等^[38]研究证明,随着乙醇含量的增加尾气中 N_2O 的排放因子呈增加趋势,但

通过对国Ⅵ车调查发现,其 N_2O 排放因子均小于 5 mg/km,远小于 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)》的排放限值(20 mg/km)^[39].可以推测,汽车使用乙醇汽油并不会导致 N_2O 排放超出标准限值.

图3为基于文献[7,17-19,22,24-25,32-33,36,38,40]统计绘制的乙醇汽油对 CO_2 和 CH_4 减排效果的综合评价. CO_2 的观测值较为集中,减排率约为 2.0%,说明乙醇汽油对 CO_2 具有一定减排效果.生物燃料乙醇汽油排放的部分 CO_2 是植物通过光合作用固定在生物质原料中,再通过燃烧释放到大气,即在大气与生物质之间不断循环^[41];而传统汽油燃烧释放更多的是将地下化石碳释放到大气中^[42].因此,仅从汽车行驶排放环节考虑,使用乙醇汽油能在一定程度上减少 CO_2 排放.而通过综合评价,发现使用乙醇汽油增加了 4.0% 的 CH_4 排放,但 CH_4 的离散程度较高,说明其受乙醇汽油影响有一定不确定性.



注:排放因子数据来源于文献[7,17-19,22,24-25,32-33,36,38,40],其中文献[17,19,22,33]中的 CH_4 排放因子为 THC 和非甲烷碳氢的差值.

图3 乙醇汽油对汽车尾气 CO_2 和 CH_4 减排效果的综合评价

Fig.3 The comprehensive evaluation of the emission reduction effect of CO_2 and CH_4 from vehicles using ethanol gasoline

1.3 乙醇汽油对颗粒物和 VOCs 的影响

与传统汽油相比,乙醇汽油对汽车尾气中 PM 和颗粒物数量(PN)排放均有明显的减排效果^[27,43-47],且可以降低颗粒物中大部分中高分子量的多环芳烃排放^[48]. Wu 等^[25]研究发现汽油车分别使用低芳烃和低烯烃两类 E10 汽油时,尾气 PM 与 PN 排放分别降低 28.0%±17.0% 和 33.0%±20.0%,且低烯烃 E10 减排效果更好.朱仁成^[43]基于全球统一轻型车辆测试(WLTC)循环分别测试了常温(30℃)和低温(-7℃)下国Ⅳ汽油车分别使用传统汽油和 E10 汽油时的颗粒物排放情况,结果表明乙醇汽油分别降低了 20.6%~52.0%

的 PM 排放和 20.3%~58.1% 的 PN 排放,这主要归因于乙醇汽油增加了燃油的含氧量和蒸汽压;另外,通过考察整个循环下的粒径分布,发现 E10 还可以有效减少汽油车尾气中的核膜态颗粒物(<0.1 μm);对于 GDI 汽油车,排放的粒径越小,其减排效果越好.从乙醇添加比例的角度来看,乙醇比例的升高,会增强颗粒物的减排效果. Yang 等^[44]研究发现,乙醇含量增加 5.0% 时,PM 和 PN 的排放分别减少 17.5% 和 17.0%.

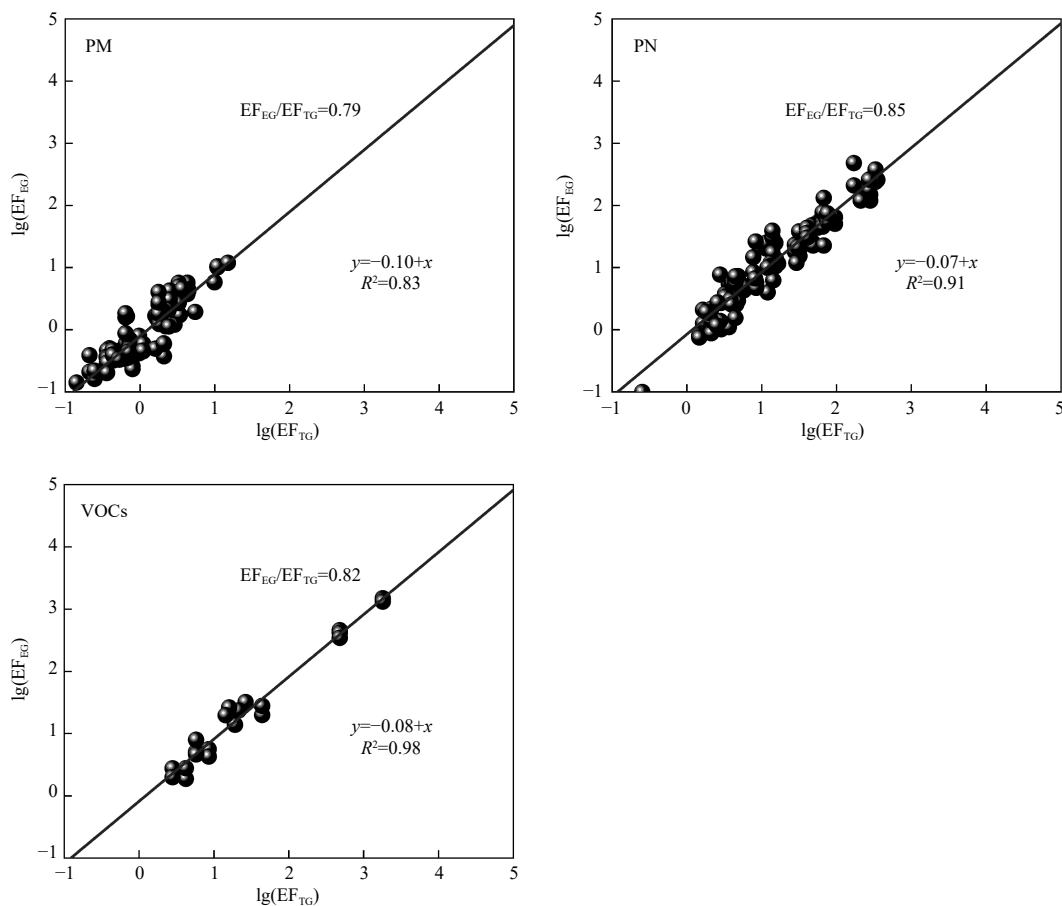
汽车 VOCs 排放被认为是城市地区大气 VOCs 的主要人为来源^[49-50].汽车尾气中 VOCs 种类约占 THC 的 65.5%~82.1%^[51].已有研究^[17,19,22,47,49]表明,使

用乙醇汽油能够有效控制机动车尾气 VOCs 排放。Zhang 等^[52]基于新欧洲驾驶循环 (NEDC) 对 3 辆国 IV 汽车进行尾气排放测试,发现 E10 汽油能降低 37.0%~56.0% 的 VOCs 排放,与 Yao 等^[22]研究结论一致。而 Yang 等^[19,25]研究了 E3~E20 汽油和传统汽油的排放,发现乙醇含量的升高对减排率的影响并不明显。从 VOCs 组分角度分析,使用 E10 汽油后总羰基化合物排放因子比传统汽油高出 15.0%~46.0%,其中乙醛比例增加最明显 (52.0%),这是因为乙醛是乙醇在气缸内燃烧和氧化的关键中间体^[52]。瞿国凡等^[53]发现乙醇汽油的甲醛排放略低于传统汽油,是因为乙醇比汽油中碳氢化合物更容易氧化。Lin 等^[24]研究了欧 III 至欧 V 汽车使用 E3 和 E10 汽油时的排放情况,发现与传统汽油相比,使用乙醇汽油后甲苯、苯和乙烷平均减排率分别为 54.5%、42.4% 和 24.4%。而使用

乙醇汽油后臭氧生成潜势 (OFP) 并没有一致性的变化规律,这可能是由于 OFP 是受到 VOCs 组成、机动车类型及温度等因素的共同作用^[19,22,52,54]。

图 4 为基于文献 [11,15,17,22,43-47,52,54] 归纳的乙醇汽油对颗粒物和 VOCs 减排效果的综合评价。由图 4 可知,PM、PN 和 VOCs 的观测值大多居于图右下方,说明使用乙醇汽油会降低汽车尾气颗粒物和 VOCs 的排放 ($R^2 > 0.8$),且使用乙醇汽油的综合减排率分别为 21.3%、14.9% 和 17.7%。

总体而言,在汽油中添加乙醇可以增加内燃机燃烧时的含氧量并降低燃烧室温度,从而减少 THC、CO、PM、PN 及 VOCs 的排放。而温室气体在乙醇汽油车尾气排放时的减排效果相对较弱,但使用 E10 汽油可以减少化石碳的释放,能在一定程度上减少汽车尾气 CO₂ 的排放。



注: 排放因子数据来源于文献 [11,15,17,22,43-47,52,54]。

图 4 乙醇汽油对汽车尾气颗粒物和 VOCs 减排效果的综合评价

Fig.4 Comprehensive evaluation of the emission reduction effect of particulate matters and VOCs emissions with ethanol gasoline

2 乙醇汽油对蒸发排放的影响

随着排放标准日趋严格,目前汽车尾气排放已经

得到有效控制,蒸发排放越来越受到人们重视。蒸发排放包括运行损失、加油损失、热浸损失和昼夜呼吸

损失等^[55-56]. 运行损失是指发动行驶过程中油气的蒸发^[16]; 加油损失是指加油过程中被推出油箱的燃油蒸汽^[56]; 热浸损失是指发动机熄火后余热引起的燃料蒸发^[57]; 昼夜呼吸损失是由于昼夜温差导致油箱中燃料渗透和蒸汽逸出^[58]. Yamada 等^[59]发现在未配置车载油气回收系统 (ORVR) 的汽油车上, 使用 E10 和传统汽油的加油损失没有明显的差异. 有研究^[55-56]显示, 使用 E10 燃料的加油排放 VOCs 成分与使用传统燃料的成分几乎相同.

目前对乙醇汽油运行损失、加油损失方面的研究相对有限, 故笔者主要对比了乙醇汽油、传统汽油的热浸损失和昼夜呼吸损失过程中 VOCs 的排放情况 (见表 2). 有研究^[43,52,59-61]表明, E10 汽油会增加汽油车的热浸排放, 具体增幅因车辆而异, 最

高达到 66.7%, 这可能与乙醇燃料中较低的 50% 蒸馏温度 (T50) 导致的平均蒸发性较强有关. 而 Zhang 等^[23,38]测试的部分乙醇汽油热损失略小于传统汽油, 可能是车辆状态、试验条件等因素干扰所致. 使用乙醇汽油会使汽油车的昼夜呼吸损失升高, 这是由低含量乙醇燃料的近共沸效应提高了雷德蒸气压, 以及乙醇作为一种小分子燃料促进了蒸发排放的渗透机制共同导致的^[59]. 从对 VOCs 蒸发排放组成来看, Zhu 等^[11]观察到使用 E10 汽油时, 醛酮化合物占比增至 5.2%~30.4%, 这与 Zhang 等^[7]的结果基本一致. Yamada 等^[59-60]深入研究了蒸发排放的机制, 发现使用乙醇汽油后会增加渗透排放, 并且较早出现碳罐突破现象, 但其后续突破较为缓慢.

表 2 汽车分别使用乙醇汽油和传统汽油时蒸发 VOCs 排放因子对比

Table 2 Evaporative VOCs pollutant emission factors from vehicles with ethanol gasoline and conventional gasoline, respectively

燃料类型	排放标准	热浸损失/(mg/test)		24 h 昼夜浸泡损失/(mg/test)		48 h 昼夜浸泡损失/(mg/test)		数据来源
		乙醇汽油	传统汽油	乙醇汽油	传统汽油	乙醇汽油	传统汽油	
E10	国 IV	44.2	36.1	211.4	236.6	207.9	197.6	文献[38]
E10	国 VI		7.5		180.0	230.0	235.0	文献[46]
E10	欧 IV	3.9~32.1	2.3~20.5	485.0~769.0	229.0~767.0	485.0~1 456.0	415.0~1 924.0	文献[23,59]
E10	Tier 1	97.5~115.5	102.0	164.1~208.5	190.2			文献[49]
E10	Tier 2			175.0	159.0	139.0	135.0	文献[59]
E20	Tier 1	78.9	102.0	152.1	190.2			文献[49]

注: 文献 [49] 的 VOCs 蒸发排放按 THC 蒸发排放数据的 30% 比例换算.

Koupal 等^[62]研究发现, 在墨西哥推行 E10 燃料后, 机动车 VOCs 排放量增加了 13%~18%, 其中甲苯增加了 29.0%~34.0%, 是墨西哥大气 OFP 最大的前体物. 因此, 制定分时分区精细化的乙醇汽油推广应用策略, 并采用 ORVR 系统作为控制技术, 减少乙醇汽油 VOCs 蒸发排放是很有必要的.

3 典型区域推广乙醇汽油的环境效益分析: 以河南省为例

为评估 E10 汽油推广应用带来的 CO₂、PM 和 VOCs 的减排效果, 本研究基于最早推广乙醇汽油的省份之一——河南省, 2022 年轻型汽油车的数据进行测算.

基于 1.2~1.3 节综合分析结果, 使用 E10 汽油时 CO₂ 及 PM 减排量的计算方法如式 (1)~(2) 所示:

$$R_{CO_2} = 2.0\% \times \sum_{i=1}^n (V_i \times EF_{CO_2,i} \times D) \quad (1)$$

$$R_{VOCs} = 17.7\% \times \sum_{i=1}^n (V_i \times EF_{tail,i} \times D) - 365 \times \left[7.4\% \times \sum_{i=1}^n (V_i \times N \times EF_{HSL,i}) + 29.5\% \times \sum_{i=1}^n (V_i \times EF_{DBL,i}) \right] \quad (3)$$

式中: R_{VOCs} 表示使用 E10 汽油时 VOCs 的减排量, t/a; $EF_{tail,i}$ 表示第 i 类排放标准的汽油车对应的尾气

$$R_{PM} = 21.3\% \times \sum_{i=1}^n V_i \times EF_{PM,i} \times D \quad (2)$$

式中: R_{CO_2} 和 R_{PM} 分别表示使用 E10 汽油时 CO₂ 和 PM 的减排量, t/a; V_i 表示第 i 类排放标准的汽油车保有量, 辆; $EF_{CO_2,i}$ 和 $EF_{PM,i}$ 分别表示第 i 类排放标准汽油车使用传统汽油时 CO₂ 和 PM 的平均排放因子, mg/km; D 表示轻型汽油车行驶里程, 根据《道路机动车排放清单编制技术指南 (试行)》推荐的行驶里程, 并结合车辆实际使用过程中行驶里程随车龄递减的趋势^[63], 将 D 设为 1.2×10^4 km/a.

使用 E10 汽油时 VOCs 的减排量主要由尾气排放和蒸发排放两部分组成. 而由于加油损失和运行损失受多因素综合影响, 排放因子存在较大差异^[13], 因此蒸发排放部分仅考虑热浸损失和昼夜呼吸损失, 如式 (3) 所示:

VOCs 平均排放因子, mg/km; $EF_{HSL,i}$ 表示第 i 类排放标准的汽油车对应的 VOCs 热浸损失, mg/test; N 表

示车辆平均每天停车次数,假设为3次; $EF_{DBL,i}$ 表示第*i*类排放标准汽油车对应的VOCs昼夜呼吸损失的平均值,mg/d;7.4%和29.5%表示分别根据文献^[23,25,31,44,60-61,63]计算的热浸损失和昼夜呼吸损失的平均增长率。

根据文献^[7,11,23,24-25,38,43,46,64-69]总结的车辆排放数据,结合《2022年河南统计年鉴》统计的轻型车数量和实地调研得到的车型占比,通过式(1)~(3)计算得到2022年河南省全域使用E10汽油的轻型车CO₂、PM的尾气减排量以及VOCs综合减排量分别约为9.1×10⁵、92.4和1118.1 t/a。

表3显示了CO₂、PM的尾气减排量与VOCs综合减排量。由表3可以看出,国V车CO₂和PM尾气减排量最大,占总量的46.3%~47.6%,这是由于国V是现行车辆中保有量最多的车型。而国V车对VOCs综合减排量仅占2.7%,是因为E10一定程度上增加了车辆的蒸发排放,而现行政策对其管控较为宽松。因此在推广乙醇汽油的同时,也应加强对蒸发排放的控制,以更有效地降低VOCs排放。

表3 轻型汽油车CO₂、PM尾气减排量和VOCs综合减排量

Table 3 Reduction of CO₂ PM exhaust emissions and VOCs comprehensive emissions t/a

项目	CO ₂ 尾气 减排量	PM尾气 减排量	VOCs综合 减排量
国II车	1.1×10 ⁴	3.4	258.9
国III车	4.5×10 ⁴	13.3	195.6
国IV车	2.3×10 ⁵	20.4	597.9
国V车	4.2×10 ⁵	43.9	30.5
国IV车	2.0×10 ⁵	11.4	35.2
总计	9.1×10 ⁵	92.4	1118.1

4 结论与展望

a) 通过对2009年1月1日—2023年7月1日发表且被Web of Science和中国知网收录的相关文献统计分析,发现乙醇汽油的使用可以一定程度上降低汽车尾气污染物的排放,其中主要包括THC、CO、PM、PN及VOCs,其平均减排率分别为10.0%、22.0%、21.3%、14.9%和17.7%,而NO_x排放量基本不变。乙醇汽油车尾气排放的温室气体相较于使用传统汽油基本不变甚至小幅上升,但从化石碳、生物碳的角度考虑,使用乙醇汽油在一定程度上能够降低尾气CO₂的排放。

b) 使用乙醇汽油会增加热浸损失和昼夜蒸发排放,因此应加强对VOCs蒸发排放的管控,以减少乙醇汽油VOCs的排放。

c) 以2022年轻型车保有量和汽油消耗数据为基准,估算了河南省全域使用E10汽油的轻型车CO₂、PM尾气减排量以及VOCs综合减排量,分别为9.1×10⁵、92.4和1118.1 t/a。

d) 推广乙醇汽油对减污降碳具有积极作用。本研究通过综合评估乙醇汽油车的常规气态污染物、颗粒物、温室气体和VOCs排放因子水平,明确了乙醇汽油对各污染物的减排效果,为未来乙醇汽油的进一步推广提供了切实数据,可以为汽车领域的减污降碳协同控制提供理论支撑。考虑到乙醇汽油可能会增加VOCs蒸发排放,今后应加强对VOCs蒸发控制技术及相关法规标准的研究,以期进一步降低机动车污染物排放。

参考文献 (References):

- [1] LANG J L, LIANG X Y, LI S Y, et al. Understanding the impact of vehicular emissions on air pollution from the perspective of regional transport: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147304.
- [2] 刘跃辉, 刘禹含, 龚元均, 等. 基于观测的我国典型地区臭氧局地化学生成及其关键前体物来源 [J]. *环境科学研究*, 2023, 36(12): 2235-2244.
- [3] LIU Y H, LIU Y H, GONG Y J, et al. Observation-based study of local ozone chemical generation and precursor sources in typical regions of China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(12): 2235-2244.
- [4] LUO Z Y, WANG Y, LV Z F, et al. Impacts of vehicle emission on air quality and human health in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152655.
- [5] DOWNWARD G S, van NUNEN E J H M, KERCKHOFFS J, et al. Long-term exposure to ultrafine particles and incidence of cardiovascular and cerebrovascular disease in a prospective study of a Dutch cohort [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2018, 126(12): 127007.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 (2022年) [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2022: 1-51.
- [7] 吕玲玲, 胡京南, 何立强, 等. 汽油车技术发展对尾气排放影响研究进展 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(2): 286-293.
- [8] LÜ L L, HU J N, HE L Q, et al. Research progress on impact of gasoline vehicles technology development on exhaust emission [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(2): 286-293.
- [9] ZHANG M Z, GE Y S, WANG X, et al. Effects of ethanol and aromatic compositions on regulated and unregulated emissions of E10-fuelled China-6 compliant gasoline direct injection vehicles [J]. *Renewable Energy*, 2021, 176: 322-333.
- [10] STORCH M, HINRICHSSEN F, WENSING M, et al. The effect of ethanol blending on mixture formation, combustion and soot emission studied in an optical DISI engine [J]. *Applied Energy*, 2015, 156: 783-792.

- [9] PARK C,CHOI Y,KIM C,et al.Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas[J].*Fuel*,2010,89(8):2118-2125.
- [10] 杨正军,葛蕴珊,王欣,等.乙醇汽油对国六直喷汽油车排放特性的影响[J].*中国环境科学*,2020,40(12):5213-5220.
YANG Z J,GE Y S,WANG X,et al.Effects of ethanol-gasoline on the exhaust emissions from China-6 compliant GDI vehicles[J].*China Environmental Science*,2020,40(12):5213-5220.
- [11] ZHU R C,HU J N,BAO X F,et al.Tailpipe emissions from gasoline direct injection (GDI) and port fuel injection (PFI) vehicles at both low and high ambient temperatures[J].*Environmental Pollution*,2016,216:223-234.
- [12] SUN L N,ZHONG C Z,PENG J F,et al.Refueling emission of volatile organic compounds from China 6 gasoline vehicles[J].*Science of the Total Environment*,2021,789:147883.
- [13] HATA H,INOUE K,KOKURYO K,et al.Detailed inventory of the evaporative emissions from parked gasoline vehicles and an evaluation of their atmospheric impact in Japan[J].*Environmental Science & Technology*,2020,54(10):5947-5953.
- [14] 岳婷婷,王鸣宇,黄志辉,等.轻型汽油车蒸发排放特征及温度对蒸发排放的影响[J].*环境科学研究*,2020,33(1):73-81.
YUE T T,WANG M Y,HUANG Z H,et al.Characteristics of evaporative emissions from light-duty vehicles and effects of ambient temperature on evaporative emissions of light-duty vehicles[J].*Research of Environmental Sciences*,2020,33(1):73-81.
- [15] LIU H,MAN H Y,TSCHANTZ M,et al.VOC from vehicular evaporation emissions:status and control strategy[J].*Environmental Science & Technology*,2015,49(24):14424-14431.
- [16] YAMADA H.Contribution of evaporative emissions from gasoline vehicles toward total VOC emissions in Japan[J].*Science of the Total Environment*,2013,449:143-149.
- [17] 苏会波,林海龙,李凡,等.乙醇汽油对减少机动车污染排放的机理研究与分析[J].*环境工程学报*,2015,9(2):823-829.
SU H B,LIN H L,LI F,et al.Mechanism study and analysis on emission reduction of pollutants with ethanol gasoline[J].*Chinese Journal of Environmental Engineering*,2015,9(2):823-829.
- [18] LV Z Y,YANG L,WU L,et al.Comprehensive analysis of the pollutant characteristics of gasoline vehicle emissions under different engine,fuel,and test cycles[J].*Energies*,2022,15(2):622.
- [19] YANG J C,ROTH P,DURBIN T,et al.Impacts of gasoline aromatic and ethanol levels on the emissions from GDI vehicles. part 1:influence on regulated and gaseous toxic pollutants[J].*Fuel*,2019,252:799-811.
- [20] RATCLIFF M A,LUECKE J,WILLIAMS A,et al.Impact of higher alcohols blended in gasoline on light-duty vehicle exhaust emissions[J].*Environmental Science & Technology*,2013,47(23):13865-13872.
- [21] HILTON B,DUDDY B.The effect of E20 ethanol fuel on vehicle emissions[J].*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part D:Journal of Automobile Engineering*,2009,223(12):1577-1586.
- [22] YAO Y C, TSAI J H, CHOU H H. Air pollutant emission abatement using application of various ethanol-gasoline blends in high-mileage vehicles[J].*Aerosol and Air Quality Research*,2011,11(5):547-559.
- [23] ZHANG C Z,GE Y S,TAN J W,et al.Emissions from light-duty passenger cars fueled with ternary blend of gasoline,methanol,and ethanol[J].*Journal of Energy Resources Technology*,2017,139(6):062202.
- [24] LIN Y C,JHANG S R,LIN S L,et al.Comparative effect of fuel ethanol content on regulated and unregulated emissions from old model vehicles:an assessment and policy implications[J].*Atmospheric Pollution Research*,2021,12(4):66-75.
- [25] WU X,ZHANG S J,GUO X,et al.Assessment of ethanol blended fuels for gasoline vehicles in China:fuel economy,regulated gaseous pollutants and particulate matter[J].*Environmental Pollution*,2019,253:731-740.
- [26] NIBIN M,RAJ J B,GEO V E.Experimental studies to improve the performance,emission and combustion characteristics of wheat germ oil fuelled CI engine using bioethanol injection in PCCI mode[J].*Fuel*,2021,285:119196.
- [27] MASUM B M,MASJUKI H H,KALAM M A,et al.Effect of ethanol-gasoline blend on NO_x emission in SI engine[J].*Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2013,24:209-222.
- [28] HUBBARD C P,ANDERSON J E,WALLINGTON T J.Ethanol and air quality:influence of fuel ethanol content on emissions and fuel economy of flexible fuel vehicles[J].*Environmental Science & Technology*,2014,48(1):861-867.
- [29] 苏会波,林海龙,武国庆,等.低温环境中乙醇汽油和普通汽油的冷凝水与污染物排放[J].*环境工程学报*,2016,10(5):2519-2526.
SU H B,LIN H L,WU G Q,et al.Condensate water and pollutants emission from ethanol gasoline and regular gasoline in low-temperature environment[J].*Chinese Journal of Environmental Engineering*,2016,10(5):2519-2526.
- [30] LIM C S,LIM J H,CHA J S,et al.Comparative effects of oxygenates-gasoline blended fuels on the exhaust emissions in gasoline-powered vehicles[J].*Journal of Environmental Management*,2019,239:103-113.
- [31] GRAMSCH E,PAPAPOSTOLOU V,REYES F,et al.Variability in the primary emissions and secondary gas and particle formation from vehicles using bioethanol mixtures[J].*Journal of the Air & Waste Management Association*,2018,68(4):329-346.
- [32] HUANG R,NI J M,CHENG Z X,et al.Assessing the effects of ethanol additive and driving behaviors on fuel economy,particle number,and gaseous emissions of a GDI vehicle under real driving conditions[J].*Fuel*,2021,306:121642.
- [33] YUAN W C,FREY H C,WEI T C,et al.Comparison of real-world vehicle fuel use and tailpipe emissions for gasoline-ethanol fuel blends[J].*Fuel*,2019,249:352-364.
- [34] ÖZÇELİK A E,AYDOĞAN H,ACAROĞLU M.A study of the effects of bioethanol-gasoline blends on vehicle emissions[J].

- [Journal of Clean Energy Technologies](#),2015,3(5):332-335.
- [35] SCHIFTER I,DÍAZ L,SÁNCHEZ-REYNA G,et al.Influence of gasoline olefin and aromatic content on exhaust emissions of 15% ethanol blends[J].[Fuel](#),2020,265:116950.
- [36] KARAVALAKIS G,DURBIN T D,SHRIVASTAVA M,et al. Impacts of ethanol fuel level on emissions of regulated and unregulated pollutants from a fleet of gasoline light-duty vehicles [J].[Fuel](#),2012,93:549-558.
- [37] 张传奇.低碳甲醇乙醇燃料对缸内直喷整车性能影响的试验研究 [D].天津:天津大学,2021:1-58.
- [38] GRAHAM L A,BELISLE S L,BAAS C L.Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85[J].[Atmospheric Environment](#),2008,42(19):4498-4516.
- [39] LEI Z M,ZHANG J,ZHOU M,et al.Secondary emission control towards post China 6 legislation[J].SAE Technical Paper,2021,1: 580.
- [40] JHANG S R,LIN Y C,CHEN K S,et al.Evaluation of fuel consumption,pollutant emissions and well-to-wheel GHGs assessment from a vehicle operation fueled with bioethanol, gasoline and hydrogen[J].[Energy](#),2020,209:118436.
- [41] DEMIRBAS A.Biofuels sources,biofuel policy,biofuel economy and global biofuel projections[J].[Energy Conversion and Management](#),2008,49(8):2106-2116.
- [42] CHEN B,ANDERSSON A,LEE M,et al.Source forensics of black carbon aerosols from China[J].[Environmental Science & Technology](#),2013,47(16):9102-9108.
- [43] 朱仁成.汽油特性对汽车颗粒物排放影响及预测模型研究 [D].南京:南京航空航天大学:1-131.
- [44] YANG J,ROTH P,ZHU H,et al.Impacts of gasoline aromatic and ethanol levels on the emissions from GDI vehicles.part 2:influence on particulate matter,black carbon,and nanoparticle emissions[J].[Fuel](#),2019,252:812-820.
- [45] KARAVALAKIS G,SHORT D,VU D,et al.Evaluating the regulated emissions,air toxics,ultrafine particles,and black carbon from SI-PFI and SI-DI vehicles operating on different ethanol and iso-butanol blends[J].[Fuel](#),2014,128:410-421.
- [46] ZHANG M Z,GE Y S,WANG X,et al.Particulate emissions from direct-injection and combined-injection vehicles fueled with gasoline/ethanol match-blends:effects of ethanol and aromatic compositions[J].[Fuel](#),2021,302:121010.
- [47] ROTH P,YANG J C,STAMATIS C,et al.Evaluating the relationships between aromatic and ethanol levels in gasoline on secondary aerosol formation from a gasoline direct injection vehicle[J].[Science of the Total Environment](#),2020,737:140333.
- [48] LUO Y Q,ZHU L,FANG J H,et al.Size distribution,chemical composition and oxidation reactivity of particulate matter from gasoline direct injection (GDI) engine fueled with ethanol-gasoline fuel[J].[Applied Thermal Engineering](#),2015,89:647-655.
- [49] LI Q Q,SU G J,LI C Q,et al.An investigation into the role of VOCs in SOA and ozone production in Beijing,China[J].[Science of the Total Environment](#),2020,720:137536.
- [50] PARRISH D D,KUSTER W C,SHAO M,et al.Comparison of air pollutant emissions among mega-cities[J].[Atmospheric Environment](#),2009,43(40):6435-6441.
- [51] WANG M L,LI S Y,ZHU R C,et al.On-road tailpipe emission characteristics and ozone formation potentials of VOCs from gasoline,diesel and liquefied petroleum gas fueled vehicles[J].[Atmospheric Environment](#),2020,223:117294.
- [52] ZHANG M Z,GE Y S,WANG X,et al.An assessment of how bio-E10 will impact the vehicle-related ozone contamination in China [J].[Energy Reports](#),2020,6:572-581.
- [53] 瞿国凡,姚春德,吴涛阳,等.乙醇汽油与普通汽油非常规污染物排放特性对比研究 [J].[环境科学学报](#),2020,40(1):111-118.
- QU G F,YAO C D,WU T Y,et al.Comparative experiment research on unregulated exhaust emission characteristics of alcohol-gasoline and gasoline[J].[Acta Scientiae Circumstantiae](#), 2020,40(1):111-118.
- [54] WANG H,GUO S,YU Y,et al.Secondary aerosol formation from a Chinese gasoline vehicle:impacts of fuel (E10,gasoline) and driving conditions (idling,cruising)[J].[Science of the Total Environment](#),2021,795:148809.
- [55] LIU Y,ZHONG C Z,PENG J F,et al.Evaporative emission from China 5 and China 6 gasoline vehicles:emission factors,profiles and future perspective[J].[Journal of Cleaner Production](#),2022,331: 129861.
- [56] ZI T,WANG P R,LIU B X,et al.Evaporative emission characteristics of VOCs from in-use light-duty gasoline vehicles [J].[Atmospheric Environment](#),2023,312:120024.
- [57] 刘玉灿,王志琦,钟瀚程.国五和国六轻型汽油车蒸发排放因子与特征研究 [J].[环境科学与技术](#),2023,46(3):224-229.
- LIU Y C,WANG Z Q,ZHONG H C.Characteristics and emission factors of evaporative emissions from China V and China VI light-duty gasoline vehicles[J].[Environmental Science & Technology \(China\)](#),2023,46(3):224-229.
- [58] LI J C,GE Y S,WANG X,et al.Evaporative emission characteristics of high-mileage gasoline vehicles[J].[Environmental Pollution](#),2022,303:119127.
- [59] YAMADA H,INOMATA S,TANIMOTO H,et al.Estimation of refueling emissions based on theoretical model and effects of E10 fuel on refueling and evaporative emissions from gasoline cars[J].[Science of the Total Environment](#),2018,622/623:467-473.
- [60] MAN H Y,LIU H,XIAO Q,et al.How ethanol and gasoline formula changes evaporative emissions of the vehicles[J].[Applied Energy](#),2018,222:584-594.
- [61] SCHIFTER I,DÍAZ L,GONZÁLEZ U.Impact of reformulated ethanol-gasoline blends on high-emitting vehicles[J].[Environmental Technology](#),2013,34(5/6/7/8):911-922.
- [62] KOU PAL J,PALACIOS C.Impact of new fuel specifications on vehicle emissions in Mexico[J].[Atmospheric Environment](#),2019, 201:41-49.
- [63] 孙世达,金嘉欣,吕建华,等.基于精细化年均行驶里程建立机动车排放清单 [J].[中国环境科学](#),2020,40(5):2018-2029.

- SUN S D, JIN J X, LV J H, et al. Developing vehicle emission inventory based on refined annual average vehicle kilometers travelled[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5): 2018-2029.
- [64] 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 等. 缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 [J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5464-5469.
- LI J C, GE Y S, WANG H H, et al. Chemical characterizations of particles from direct-injection gasoline vehicles [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12): 5464-5469.
- [65] 张凡, 杨正军, 钟祥麟. 轻型车颗粒物质量排放和颗粒物数量排放的转鼓试验 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2017, 8(2): 190-197.
- ZHANG F, YANG Z J, ZHONG X L. Chassis dynamometer tests of particle mass emissions and particle number emissions from light-duty vehicles [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2017, 8(2): 190-197.
- [66] 李宇飞, 李振华, 胡京南, 等. 轻型汽油车尾气 $PM_{2.5}$ 的排放特征 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(4): 503-508.
- LI Y F, LI Z H, HU J N, et al. Emission profile of exhaust $PM_{2.5}$ from light-duty gasoline vehicles [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(4): 503-508.
- [67] 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 等. 轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 [J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3112-3120.
- XIE Y, LIAO S D, ZHU M N, et al. Emission characteristics of light-duty gasoline vehicle exhaust based on acceleration simulation mode [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3112-3120.
- [68] 朱庆功, 刘俊女, 赵笑春, 等. 北京市轻型汽油车蒸发排放总量评估 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1066-1072.
- ZHU Q G, LIU J V, ZHAO X C, et al. Estimation of light-duty vehicles total evaporative emissions in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1066-1072.
- [69] 段乐君, 袁自冰, 沙青娥, 等. 不同排放标准下机动车挥发性有机化合物排放特征趋势研究 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(4): 1239-1249.
- DUAN L J, YUAN Z B, SHA Q E, et al. Investigation on the trend of emission characteristics of volatile organic compounds from motor vehicle exhaust under different emission standards [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4): 1239-1249.

(责任编辑: 张 蕊)