

农用拖拉机燃用生物柴油排放特性研究

蔡文杰，刘学渊^{*}，陈彦林，杨通云，乔梦雪

(1. 西南林业大学机械与交通学院，昆明 650224；2. 云南省高校高原山区机动车环保与安全重点实验室，昆明 650224)

摘要：农业机械已日益成为中国大气污染的重要来源，其排放问题需要更深入的研究。为探究在高海拔条件下农用拖拉机燃用不同比例生物柴油对实际作业条件下的 CO (carbon monoxide)、HC (hydrocarbon)、NO_x (nitrogen oxides) 和 PN (particulate number) 排放特性的影响，该研究对比分析了一台国 III 排放标准的农用拖拉机在海拔 2 200 m 下掺烧 B10 (10% 体积大豆甲酯生物柴油+90% 体积柴油)、B20、B30 与柴油 (B0) 在旋耕时 (发动机转速处于 1 500~1 700 r/min, 发动机功率在 20~30 kW) 的相关污染物排放的情况。分别使用 OBD (on board diagnostics) 和 PEMS (portable emission measurement system) 进行拖拉机工况和污染物的数据采集。试验结果表明：生物柴油的使用会略微降低燃油的经济性，增加有效燃油消耗率 (brake specific fuel consumption, BSFC)，B10、B20 和 B30 相较于 B0 的 BSFC 分别增加了 2.31%、2.71% 和 2.04%。该研究基于发动机功率方面来表征农用拖拉机 CO、HC、NO_x 和 PN 的排放因子。生物柴油有助于降低农用拖拉机的 CO、HC 和 PN 排放因子，B10、B20 和 B30 相较于 B0 基于发动机功率的 CO 排放因子分别下降了 10.15%、12.73% 和 32.10%；相较于 B0 基于功率的 HC 排放因子分别降低了 13.22%、26.45% 和 30.58%；相较于 B0 基于功率的 PN 排放因子分别降低了 8.22%、10.91% 和 14.17%。随着生物柴油比例的增加，CO、HC 和 PN 排放因子降低幅度增大。生物柴油会略微增加农用拖拉机的 NO_x 排放，随着生物柴油比例的增加，NO_x 排放因子也相应增加，B10、B20 和 B30 相较于 B0 基于发动机功率的 NO_x 排放因子分别增加了 1.60%、2.78% 和 4.20%。该研究中所有测试燃料基于功率的 NO_x 排放因子较《指南》推荐值高 3 倍多，可见《指南》推荐值对高原环境下的 NO_x 排放因子不适用，高原环境会影响拖拉机在实际作业过程中的污染物排放。为减少高海拔条件下农用拖拉机在实际作业过程中的污染物排放，考虑到燃油的经济性和生物柴油对 NO_x 排放的影响，将小比例掺混生物柴油作为农用拖拉机替代燃料来使用，不仅可以减少 CO、HC 和 PN 的排放，还可以减少化石燃料的使用。研究结果可为高海拔环境下农用拖拉机燃用生物柴油的实际污染物排放控制优化提供参考，可以补充在高海拔地区农业机械的排放数据库，以辅助环境污染研究和政策制定。

关键词：高海拔；生物柴油；排放因子；农用拖拉机；PN (particles number)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406216

中图分类号: X51

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0054-09

蔡文杰，刘学渊，陈彦林，等. 农用拖拉机燃用生物柴油排放特性研究[J]. 农业工程学报，2024，40(20): 54-62. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406216 <http://www.tcsae.org>

CAI Wenjie, LIU Xueyuan, CHEN Yanlin, et al. Emission characteristics of biodiesel fueled in agricultural tractors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 54-62. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406216 <http://www.tcsae.org>

0 引言

非道路移动源成为许多国家空气污染的重要来源，是大气污染排放 NO_x 和 PM 等污染物的关键来源^[1-2]。非道路移动源排放 HC、NO_x、PM 分别为 42.7 万、474.2 万、23.1 万 t，农业机械排放的 NO_x 和 PM 是非道路移动源排放总量占比最多的，分别占 34.7% 和 39.6%^[3]。中国是世界上重要的农业大国，耕地面积大，农业机械使用率和覆盖率高，农业机械污染物排放量高。此外，农用

拖拉机作为农业生产中的重要工具，其维护状况直接影响到机械的性能和使用寿命，但大部分农机维护较少，特别是在一些季节性农业较为明显的地区，农机可能只在特定季节使用，导致农民忽视了非使用期间的维护。农用拖拉机维护差会导致机器的燃油效率降低，性能下降，缩短使用寿命，增加污染物排放等问题出现。而且中国大部分农机使用都是国 III 排放标准及以下，在不改变发动机的前提下，生物柴油可以有效提高燃油的燃烧效率，减少污染物排放。因此，研究拖拉机燃用生物柴油的实际排放具有重要的实际意义。

高原地区由于其独特的地形和气候的影响，限制了污染物的扩散。此外，紫外线辐射较强，这可能会加速某些污染物的光化学反应，影响污染物的消散。中国幅员辽阔，拥有全球最广袤的高原地区，高度在 2 000 m 以上的高原约占中国国土面积的 1/3。高原环境是一种比较特别的生态环境系统，大气压力低，氧含量低，当柴

收稿日期: 2024-06-29 修订日期: 2024-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51968065); 高原农用柴油机掺混乙醇的油气混合和燃烧特性研究 (202301BD070001-257)。

作者简介: 蔡文杰，研究方向柴油机掺烧排放。

Email: 2806509426@qq.com

※通信作者: 刘学渊，博士，正高级实验师，研究方向农业机械排放研究。

Email: Liuxueyuan@swfu.edu.cn

油机在高海拔环境下工作时,会出现经济性、动力性恶化,进气压力降低导致碳烟排放增加等问题^[4]。生物柴油由于其含氧特性和高十六烷值可以促进在高海拔地区发动机缸内燃烧,可以显著降低 PM、CO、CO₂ 等气态污染物排放^[5-8],但会增加 NO_x 等污染物的排放^[9-11]。由于生物柴油的含氧特性和低硫和低芳烃含量,使用生物柴油在减少 PN 排放方面具有很大的优势^[12]。燃烧生物柴油可实现碳循环,有助于实现碳达峰和碳中和目标。生物柴油燃烧时的颗粒物数量较柴油低^[13],且生物柴油燃烧产生颗粒物的氧化活性高于柴油^[14]。生物柴油是柴油机理想的替代燃料,燃烧生物柴油有助于 DPF (diesel particulate filter) 的再生^[15]。因此,研究高海拔条件下农用机械燃用生物柴油的排放,对于优化农业机械的设计、提高能源利用效率和减少环境污染具有重要的实际意义。

韩红涛等研究了农用拖拉机燃用矿物柴油和生物柴油混合燃料的排放特性,发现生物柴油可以降低 CO 排放,生物柴油用量的增加会增加 NO_x 排放^[16]。谢伟安等在一台农用单缸柴油机上进行生物柴油掺烧试验,发现生物柴油在一定程度上可以降低碳烟排放,其中高负荷条件下的改善较为明显^[17]。SAKTHI 等研究了农用柴油机以氢气和以工业废料培养制备产生的生物柴油为燃料的排放特性,研究表明生物柴油可以降低 HC、CO 的排放水平^[18-19]。TOMIĆ 等在一台拖拉机上燃用生物柴油-柴油混合燃料,进行标准耕作试验,试验结果表明在最大负荷下,与石化柴油相比,CO 排放量降低了 11.81%^[20]。HOMA 等对重型拖拉机燃用柴油-生物柴油-乙醇进行了燃料的经济性和环境评估,结果表明在柴油中添加生物柴油可以显著降低环境影响,而添加生物乙醇没有明确影响^[21]。AVINASH 等研究了以二甲醚为燃料农用拖拉机的颗粒物排放,发现燃用二甲醚的 soot 排放可以忽略不计^[22]。仇振宇等利用便携式排放测试系统 (portable emission measurement system, PEMS) 对曲靖市中大型农用拖拉机实际工况下的尾气排放情况进行了测试,建立了 2021 年曲靖市中大型农用拖拉机大气污染物及温室气体排放清单^[23]。赵梦佳通过 PEMS 进行拖拉机实际工况排放试验,建立了深度极限学习机预测模型并对拖拉机怠速、行走和旋耕等基本工况下的污染物排放进行预测^[24]。孔庆好通过柴油拖拉机排放测试平台开展田间实地排放测试,结合模型对农用拖拉机时间序列的排放清单进行估算^[25]。ZHANG 等通过结合卫星数据、土地使用和土壤信息,以及内部调查来评估实际地区的农业机械排放^[26]。相关文献中采用了便携式排放测量系统 (PEMS) 进行拖拉机的实际排放测试^[1,27]。李宇航等针对农用车辆柴油机 NO_x 排放与实际运行工况之间的复杂非线性关系,提出一种数据驱动下的 NO_x 排放预测模型^[28]。徐萌等以一款处于非道路第四阶段开发的小型农用柴油机为研究对象,基于试验数据验证 GT-Power 所建模型,基于 NSGA-II 对其进行油耗和排放的多目标优化,降低了 NO_x 和碳烟排放^[29]。国 IV 排放标准提出了 37 kW 以上机械 PEMS 测量的方法和限值要求,国 IV 排放标准对 NO_x

排放限值更加严格,同时提出颗粒物粒子数量 (particles number, PN) 限值要求,更加注重实际使用过程中的排放控制。相关研究表明,实际试验测量和试验室台架试验测试之间的排放速率可能存在数量级的差异^[30-31]。如今,越来越多的农业机械在实际工况条件下进行排放测试,以获得更真实的排放数据^[32-33]。对于燃烧柴油产生的常规污染物排放因子,生态环境部发布的《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》^[34] (后面简称《指南》) 里面包含了基于发动机功率的排放因子,但是很难准确覆盖我国所有行政区域内农用拖拉机的排放情况。综上所述,该研究决定通过 PEMS 对拖拉机的实际排放测试,获取准确的实时排放数据,使农用拖拉机的排放因子更贴合实际作业情况。

上述大部分文献都涉及对 CO、HC、NO_x 和 PM 的排放因子测试和分析,但很少有研究涉及农用拖拉机颗粒物数量 (PN) 排放因子计算和高海拔地区农用拖拉机掺烧生物柴油污染物排放情况的分析。生物柴油在高海拔条件下的性能和排放特性尚未得到充分研究,这对于高海拔地区的农业机械化发展具有重要意义。该研究旨在探讨在海拔 2 200 m 下,农用拖拉机燃用生物柴油对排放的影响。通过试验研究,对比分析了测试燃料燃烧产生的主要排放物。基于旋耕工况量化了 CO、HC、NO_x 和 PN 基于发动机功率的排放因子,可为高原山区建立农用拖拉机排放 CO、NO_x、HC 和 PN 污染物建立排放清单和制定减排措施提供参考。

1 试验与设备

1.1 测试仪器

该研究中采用的车载排放测试技术是指将便携式排放测试设备 (PEMS) 安装在实际作业的拖拉机上,测试其在实际工作条件下的排放特征。可真实反映发动机排放的实际状况,该测试方法在机动车尾气排放中有广泛运用。该研究中的车载测试设备主要包括 OBD 诊断系统、SEMTECH-EFM 流量计、SEMTECH-COSTAR 排放分析仪、GPS 和气象站。排放分析仪具体参数如下表 1 所示,设备连接示意图如图 1 所示,试验农具具体参数如表 2 所示,试验拖拉机运行示意图如图 2 所示。

表 1 仪器参数

Table 1 Instrument parameters

测试内容 Test content	单位及范围 Unit and scope	精度 Precision
CO _x	0~20%	±2.0%
HC	0~1%	±1.0%
NO _x	0~0.3%(NO) 0~0.1%(NO ₂)	±2.0%
PN (Particles number)	0~10 ⁷ 个·m ⁻³	±10.0%

1.2 气体分析仪测试方法

车载排放测试的气体污染物主要有 CO、HC、NO_x 和 PN,不同的气体污染物采用不同的测试方法。CO 采用 FEM 模块的非分散红外 (NDIR, nondispersive infrared analyzer) 原理测量,NDIR 的测试原理主要基于污染物

对红外光能的吸收,大多数非对称的多原子气体都能够一定程度上吸收红外光能,不同气体污染物由于分子结构的不同,其特定波长的吸收带也不尽相同,污染物浓度的大小决定了吸收辐射能的多少。 NO_x 采用 NO_x 模块的非分散紫外 (NDUV, nondispersive ultraviolet analyzer) 原理测量,NDUV 与 NDIR 大致相同,当需要测试的气体污染物通过紫外线照射到样品池时候,气体中的 NO 和 NO_2 能够吸收紫外光能,紫外光能出现衰减,气体污染物中 NO 和 NO_2 浓度越高,吸收的紫外光能越多,紫外光能衰减越大。气体污染物吸收的紫外光能与污染物浓度成比例关系。 HC 采用 FID 模块的氢离子火焰 (FID, flame ionization detector) 原理测量, FID 燃料、空气和排气样品在探测器火焰喷射器的底部混合在一起,并在喷射器的尖端燃烧。

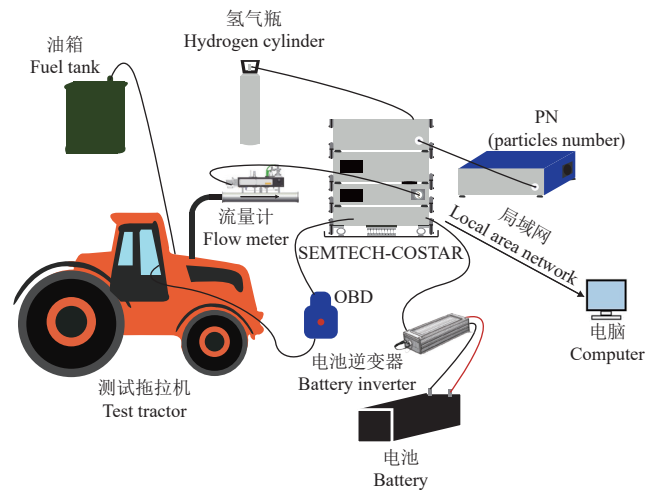


图 1 设备连接示意图
Fig.1 Schematic diagram of device connection

表 2 农具参数
Table 2 Information on agricultural tools

农具名称 Name of the agricultural tool	农具型号 Model of farm equipment	长×宽×高 Length-Width-Height/ mm×mm×mm	质量 Weight/ kg	耕宽 Plough width/ mm	耕深 Plough depth/ mm
旋耕机 Rotary plough	1GBH-230	2 580×1 100 ×1 250	630	2 300	120~180



图 2 试验拖拉机运行示意图
Fig.2 Schematic diagram of the operation of the test tractor

当碳氢化合物燃烧时,它们形成带正电荷的离子。这些离子被具有正偏置电压的喷嘴头排斥,然后碳被吸引到带负电荷的集电极,在那里测量产生的电流,通过

测量离子电流的大小来测量 HC 浓度的大小。PN 测量采用凝结核颗粒物计数器 CPN 模块基于颗粒物带电和带电颗粒物探测技术。电晕使用高电压放电使颗粒物带电。进入设备的颗粒物将会被电晕产生的离子赋予电荷。离子捕集器会移除这些自由离子,原理:电离的空气为颗粒物充电;颗粒物带电量与颗粒物尺寸相关。

1.3 试验地点和农业机械

该研究在云南曲靖陆良县召夸镇(海拔 2 200 m)试验地点进行测试,试验地点经纬度为东经 103.678 78°,北纬 24.820 942°。测试了 1 辆配有旋耕犁的国 III 排放标准的山东泰山 TS904 拖拉机,发动机型号为 YC4A100,标定牵引力为 21.8 kN,额定转速 2 200 r/min,标定功率 66.2 kW。该研究根据农用拖拉机的作业特点,选择耕作(旋耕)这一种典型操作模式进行测试,试验方法:每次测试前更换试验用油,让拖拉机运行至少 10 min 来消除上次测试燃油的影响,每种测试燃油都需要进行一个小时的测试,来确保试验数据的准确性。每次测试之前,试验人员都会仔细检查拖拉机排气管的密封性,以确保测试数据的准确性。

1.4 试验用油

试验用柴油作为对比用油,为加油站购买的标准柴油,生物柴油为大豆甲酯生物柴油 (SME),购自河北隆海生物能源股份有限公司,该试验的混合燃油分别为 B10 (生物柴油和柴油按体积 1 比 9 混合)、B20 和 B30。表 3 列出了试验用柴油和混合燃油的燃油理化特性。

表 3 燃油理化特性
Table 3 Properties of fuel oil

特性 Properties	B0	B10	B20	B30	B100
十六烷值 Cetane number	50	50.54	50.83	51.6	54.4
含氧量 Oxygen content/%	0	1.64	2.24	3.68	10.6
低热值 Low calorific value/(MJ·kg ⁻¹)	42.68	41.87	41.59	41.06	39.43
闪点 Flash point	60	67	74	83	168
黏度 Viscosity/(mm ² ·s ⁻¹)	2-4	3.15	3.26	3.41	4.29

注: B0 为标准柴油, B100 为纯大豆生物柴油, B10 为 90% 体积的 B0 与 10% 体积的 B100 掺混的燃料, B20 和 B30 按相应比例进行掺混, 下同。
Note: B0 is standard diesel, B100 is pure soya biodiesel, B10 is fuel blended with 90% volume of B0 and 10% volume of B100, and B20 and B30 are blended in the corresponding proportions, the same below.

1.5 有效燃油消耗率 (BSFC) 和污染物基于功率的排放因子 (EFs) 计算方法

由于非道路移动源机械在实际工作中测量燃油消耗数据比较困难,该研究基于碳平衡原理,结合排放测量结果,计算得到逐秒的燃油消耗量^[35]。油耗计算公式如下所示:

$$F_{RX} = (0.866E_{R(HC)} + 0.429E_{R(CO)} + 0.273E_{R(CO_2)}) / (\rho(X) \times 1000 C_{WFFX}) \quad (1)$$

式中 F_{RX} 代表燃油的消耗率, s^{-1} ; $\rho(X)$ 代表燃油密度, g/mL ; $E_{R(HC)}$ 、 $E_{R(CO)}$ 和 $E_{R(CO_2)}$ 分别代表 HC 、 CO 和 CO_2 的瞬时排放速率, g/s ; C_{WFFX} 代表燃油中的碳含量, 文

中柴油取值为 0.866, 生物柴油取 0.73, 代表中国柴油和生物柴油中典型的碳含量。B10、B20 和 B30 分别取 0.85、0.84 和 0.825。

有效燃油消耗率 (BSFC, B_{SFC}) 计算公式如下所示:

$$B_{SFC} = (F_{RX} \rho(X) \times 3.6 \times 10^6) / P_e \quad (2)$$

式中 B_{SFC} 为有效燃油消耗率, $g/(kW \cdot h)$; P_e 为发动机功率, kW 。

农用拖拉机燃用柴油和掺烧生物柴油时 CO 、 CO_2 、 HC 和 NO_x 的排放因子通常会基于发动机功率、燃油消耗量和行驶时间等角度来量化, 计算公式如下:

$$E_{FPe} = \sum_{n=i}^j E_{RP,n} / \sum_{n=i}^j P_{e,n} \quad (3)$$

式中 E_{FPe} 为基于功率的排放因子, $g/(kW \cdot h)$; P 是车辆排放的某种污染物; n 是某一工况的持续时间, s ; i 和 j 分别是该工况的起始时间和结束时间, s ; $E_{RP,n}$ 是某种污染物在某一工况下的排放速率, g/s 。进行计算时先对数据进行筛选, 筛选出拖拉机在作业工况下 (发动机转速处于 $1\,500 \sim 1\,700\,r/min$, 发动机功率在 $20 \sim 30\,kW$) 的实际排放量。

2 结果与分析

2.1 海拔 2 200 m 下各试验燃料的有效燃油消耗率

燃油消耗率 (BSFC) 可以量化燃料效率和衡量内燃机燃料经济性。发动机在作业过程中转速均低于 $2\,000\,r/min$, 基本处于 $1\,500 \sim 1\,700\,r/min$, 发动机功率在 $20 \sim 30\,kW$, 拖拉机作业时的速度为 $2 \sim 4\,km/h$ 。可以从图 3 看到, 随着生物柴油比例的增加, 有效燃油消耗率 (BSFC) 有所增加, B10、B20 和 B30 相较于 B0 的 BSFC 分别增加了 2.31%、2.71% 和 2.04%, 这是由于生物柴油的热值较柴油低, 生物柴油掺混比例增加, 热值会有所降低, BSFC 就会相应增加。

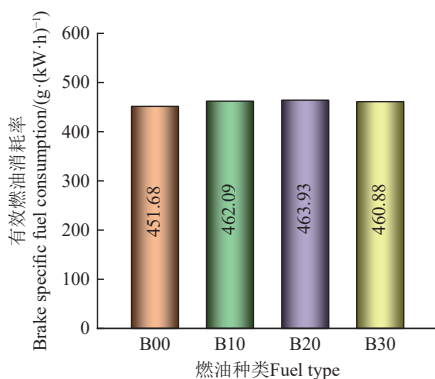


图 3 海拔 2 200 m 下测试燃料的有效燃油消耗率

Fig.3 Brake specific consumption of test fuels at 2 200 m altitudes

此外, 由于生物柴油的黏度较高, 会影响燃油的雾化效果, 也会导致 BSFC 的增加。高海拔地区空气密度低, 发动机进气量减少, 进气量减少导致氧气不足, 燃油与空气混合不均匀, 燃油的雾化效果也会受到进气温度的影响, 发动机的燃烧效率下降, 导致发动机的输出功率下降, 为了维持发动机的工作性能, 发动机需要更

多的燃油来补偿功率的损失。虽然生物柴油的热值低会降低 BSFC, 但由于生物柴油的含氧特性和高十六烷值可以燃料燃烧更加充分, 起到降低 BSFC 的作用, 生物柴油燃料在燃料性能方面的优势提高了燃烧效率, 所以, BSFC 的增加一般小于热值差, 如图中 B30 的 BSFC 相较于 B10 和 B20 增加少。有上述可知, 生物柴油的使用会增加拖拉机的油耗, 但由于其独特的理化性质可以使油耗的增加减小。

2.2 污染物瞬时排放特征

为了分析旋耕模式下农用拖拉机的瞬时排放特征, 该研究给出了测试拖拉机在海拔 2 200 m 高度下部分 CO 、 HC 、 NO_x 和 PN 的瞬时排放速率片段。如图 4 所示, 污染物的波动幅度较大, 这是由于拖拉机在旋耕时油门负荷较大, 当拖拉机需要抬升旋耕机进行转弯换垄, 此时负荷相对较小, 排放速率降低^[36]。由于柴油机在燃烧过程中通常使用过量的空气进行压缩点火, 加上柴油的自燃温度比汽油高, 柴油在高温高压下燃烧, 这有助于更完全的燃烧, 所以柴油机的 HC 瞬时排放速率较小。结合图 3 的 BSFC 来看, 生物柴油会导致燃油的消耗量增加, 进而喷油量就会增加, 导致缸内燃烧温度升高, 增加 NO_x 的排放。 PN 的瞬时排放速率随生物柴油的组分的增加而减小, 可以从图 4 中看到, 生物柴油对 PN 排放有降低作用, 由于生物柴油的含氧特性可以使燃料燃烧更充分, 减少颗粒物的排放。

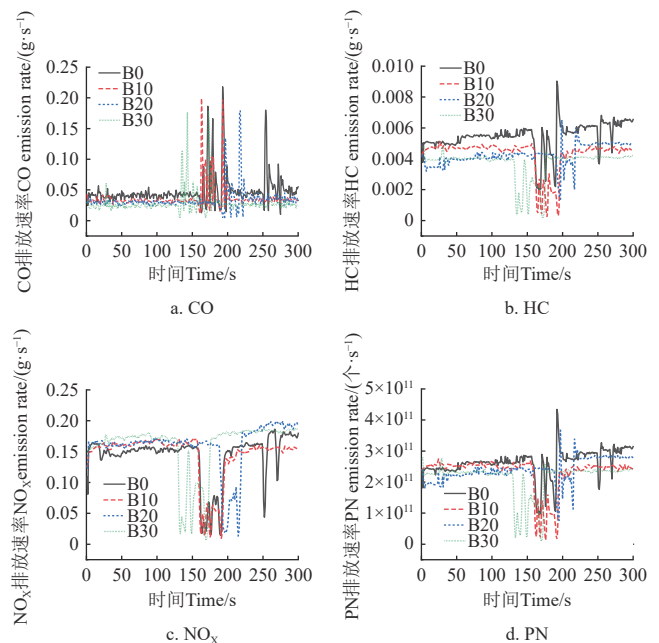


图 4 海拔 2 200 m 下测试燃料的 CO 、 HC 、 NO_x 和 PN 瞬时排放速率

Fig.4 CO , HC , NO_x and PN transient emissions rate of the tested fuels at 2 200 m altitudes

2.3 测试燃油各污染物基于功率的排放因子

海拔自然环境对农用拖拉机的正常工作有所影响, 通过计算农用拖拉机作业过程中基于发动机功率的污染物排放因子, 对农用拖拉机燃用不同比例生物柴油的基于发动机功率排放因子进行对比分析。根据式 (1) ~ (3)

计算 CO、HC、NO_x 和 PN 基于功率排放因子, 结果如图 5~图 8 所示。

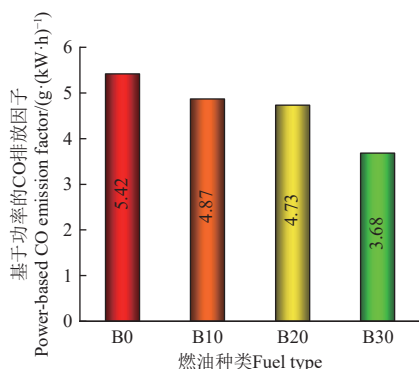


图 5 在海拔 2 200 m 下基于功率的 CO 排放因子
Fig.5 Power-based CO emission factor at 2 200 m altitude

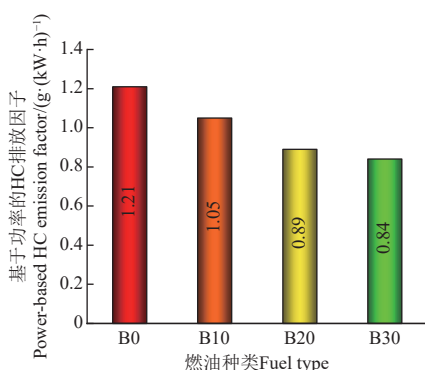


图 6 在海拔 2 200 m 下基于功率的 HC 排放因子
Fig.6 Power-based HC emission factor at 2 200 m altitude

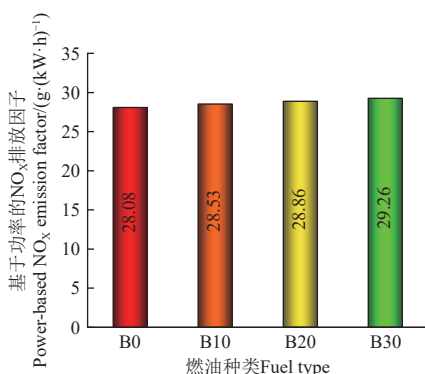


图 7 在海拔 2 200 m 下基于功率的 NO_x 排放因子
Fig.7 Power-based NO_x emission factor at 2 200 m altitude

2.3.1 CO 排放因子

CO 的生成是由于燃料燃烧不充分以及在燃烧过程中氧含量不足导致 CO 没有被氧化。点火延迟期是柴油机最重要的性能参数, 燃油喷雾特性是影响柴油机性能和污染物排放的重要原因。从图 5 中可以看到, 基于功率的 CO 排放因子 B0 在海拔 2 200 m 下是 5.42 g/kW·h。柴油中加入不同比例的生物柴油可以降低农用拖拉机的 CO 排放, B10、B20 和 B30 相较于 B0 基于发动机功率的排放因子分别下降了 10.15%、12.73% 和 32.10%。随着生物柴油比例的增加, CO 排放因子降低幅度增大, 因为生物柴油含氧特性和高十六烷值促进燃料的燃烧,

特别是在高海拔地区, 由于空气温度较低, 发动机的冷却效果可能会增强, 影响发动机的热效率, 进而影响燃烧过程, 增加 CO 排放。此外, 高海拔导致空气密度降低, 使燃油的蒸发、与空气混合受到影响, 燃油的雾化效果变差, 由于燃烧不完全产生的 CO 变多。在高海拔地区, 为了维持发动机的正常工作, 燃油消耗量增加, 虽然生物柴油的低热值会导致燃油消耗较 B0 增加更多, 但由于其含氧元素, 加上高十六烷值, 使得燃料燃烧更充分, 降低了高海拔环境的影响。由上述可知生物柴油对农业拖拉机作业过程中的 CO 多类型排放因子有降低作用。

2.3.2 HC 排放因子

HC 排放的主要来源于未燃烧的燃油以及不完全燃烧产物。柴油机由于其独特的压缩点火方式, 使燃料在高温高压下自燃, 使燃料燃烧更完全, 所以柴油机 HC 排放较低。燃料的理化特性和发动机工作环境对 HC 的排放都有所影响。在海拔 2 200 m, 由于高海拔环境下的空气密度低, 空气中的氧含量低, 增加发动机缸内的不完全燃烧和火焰淬熄, 促进了 HC 的生成, 此外, 氧含量的降低也会阻碍生成 HC 的进一步氧化, 使得 HC 的排放增加^[37]。混合燃料因其含有氧元素且生物柴油的十六烷值较高, 促进了燃料在缺氧环境下的燃烧, 使其受到高原环境的影响降低, 而 B0 由于受到上述高原环境的影响, 燃烧恶化, 污染物排放增加。从图 6 中可以看到, 基于发动机功率的排放因子, B0 基于功率的 HC 排放因子在海拔 2 200 m 下为 1.21 g/kW·h, B10、B20 和 B30 相较于 B0 基于功率的 HC 排放因子分别降低了 13.22%、26.45% 和 30.58%。从上述的数据分析来看, 生物柴油的比例的增加对基于功率的 HC 排放因子影响增大。综上所述, 生物柴油可以降低农用拖拉机在作业过程中的 HC 排放。

2.3.3 NO_x 排放因子

NO_x 排放主要受这几个方面影响: 缸内温度、氧浓度和高温反应持续时间^[38]。发动机在高海拔地区运行会延长了发动机的滞燃期和燃烧后期, 推迟燃烧起点, 提高放热率峰值, 增加缸内燃烧的温度峰值^[39]。上述条件有利于 NO_x 的生成。但是, 海拔升高会降低环境空气中的氧浓度, 进而抑制了 NO_x 的产生^[40]。在该研究的测试地区, 显然前一个因素对 NO_x 排放影响更为显著。从图 7 中可以看到, B0 在海拔 2 200 m 下基于发动机功率的 NO_x 排放因子为 28.08 g/kW·h, B10、B20 和 B30 相较于 B0 基于功率的 NO_x 排放因子分别增加了 1.60%、2.78% 和 4.20%。

由于在高原地区含氧量较低, 且 B0 不具有生物柴油的含氧特性, 导致燃烧较差、缸内温度较低, 导致 NO_x 排放较混合燃料低。此外, 由于生物柴油的热值较低, 油耗较 B0 有所增加, 加上在高海拔地区环境温度较平原低, 生物柴油的粘度较大, 会增加喷油压力, 导致喷入的燃油较多, 缸内温度升高, 增加了 NO_x 的排放。由于受到环境空气氧含量的限制, 生物柴油相较于 B0

对 NO_x 的排放增加较小。从上述的数据分析来看,生物柴油的使用会导致农用拖拉机在作业过程中的基于功率的 NO_x 排放因子增加,且随着生物柴油的比例的增加对 NO_x 的排放影响增大。

2.3.4 PN 排放因子

该研究中农用拖拉机作业工况下 PN 基于功率的排放因子如图 8 所示。在高海拔地区,空气中氧含量降低加上空气密度降低,燃料燃烧不完全导致颗粒物排放数量增加;还会导致燃油和空气混合的不均匀分布程度增加,将喷雾雾化和燃烧挤压到更小的区域内,燃料高度集中燃烧增加颗粒物的排放。高海拔地区环境温度相对较低,尾气排放之后的温度降低幅度更大,挥发性有机物在冷却过程中形成纳米颗粒,增加了 PN 排放^[41-42]。此外,海拔高度的增加导致燃油消耗量增加,缸内喷入的燃油量增加,增加燃烧时生成的颗粒物。生物柴油由于其含氧特性和高十六烷值,使燃料燃烧更充分,减少了碳烟和其他颗粒物的产生;低硫和低芳烃含量可以减少硫酸盐颗粒物和三环芳烃(PAHs)的产生,有助于降低柴油机的颗粒物排放。B0 在海拔 2 200 m 基于发动机功率的 PN 排放因子为 6.569×10^{13} 个/(kW·h),B10、B20 和 B30 相较于 B0 基于功率的 PN 排放因子分别降低了 8.22%、10.91% 和 14.17%。随着生物柴油比例的增加,对减少 PN 排放的影响越显著。从上述数据分析可知,生物柴油的添加有助于减少农用拖拉机的 PN 排放。

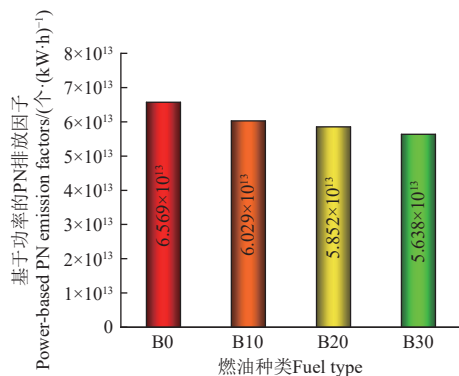


图 8 在海拔 2 200 m 下基于功率的 PN 排放因子

Fig.8 Power-based PN emission factor at 2 200 m altitude

2.3.5 测试结果评价

该研究中燃用 B0、B10、B20 和 B30 燃料时农用拖拉机作业工况的 CO、HC 和 NO_x 基于功率的排放因子值与《指南》基于功率的排放因子推荐值相比较如图 9 所示。国内非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南中对所有类型机械给出单一的排放因子,忽略了机械作业环境对排放造成的影响,例如在该研究中国 III 排放标准下,37~75 kW 的功率范围内不同用途的拖拉机,《指南》中给出了相同的排放因子,而该研究中的拖拉机在 2 200 m 高海拔下作业的排放因子不同。由图 9 可知,该研究在高原环境下农用拖拉机作业过程所有测试燃料排放的 NO_x 均高于《指南》推荐值。B0、B10、B20 和 B30 基于功率的 NO_x 排放因子在海拔 2 200 m 下

分别是《指南》推荐值的 4.01、4.07、4.12 和 4.18 倍;B0、B10、B20 和 B30 基于发动机功率的 CO 排放因子在海拔 2 200 m 下分别是《指南》推荐值的 1.08、0.97、0.95 和 0.74 倍;B0、B10、B20 和 B30 基于发动机功率的 HC 排放因子在海拔 2 200 m 下分别是《指南》推荐值的 0.93、0.80、0.68 和 0.65 倍。可以明显看到,该研究试验燃料的 CO 和 HC 排放因子和《指南》推荐值较为接近,但 NO_x 排放因子较《指南》推荐值高 3 倍多。造成这些差异是因为《指南》推荐值的数据来源主要以农机大省为主,农机大省普遍具有农田可机械化面积广、道路平坦,农机更新换代快。农机大省大多处于低海拔地区,空气氧含量高,农用拖拉机在工作过程中缺氧燃烧比例相对高原环境较低。综合上述影响因素,《指南》推荐值不完全适用高海拔地区,高海拔地区农用拖拉机工作环境恶劣,高海拔环境对农用拖拉机 NO_x 排放影响显著。有必要针对非道路机械工作地区进行单独计算排放清单,以此来提高排放清单准确性。

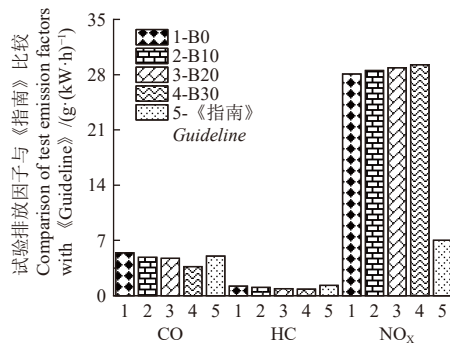


图 9 测试燃料基于功率的 CO、HC 和 NO_x 排放因子与《指南》比较

Fig.9 Power-based CO, HC and NO_x emission factors for test fuels compared with Guideline

3 结 论

该研究选取海拔为 2 200 m 的试验耕地作为试验地点,以 B0、B10、B20 和 B30 作为试验燃料,对一辆国 III 排放标准的农用拖拉机进行了作业(旋耕)过程中(发动机转速处于 1 500~1 700 r/min,发动机功率在 20~30 kW)的 CO、HC、 NO_x 和 PN 污染物排放因子测算,该研究中农用拖拉机机械基于功率的 CO 和 HC 排放因子与《指南》推荐值相差不大,说明该研究数据具有一定的真实性和可靠性。通过试验得出以下结论:

1) 农用拖拉机在作业过程中燃用生物柴油会增加燃油的 BSFC。在海拔 2 200 m 下, B10、B20 和 B30 的 BSFC 相较于 B0 分别增加了 2.31%、2.71% 和 2.04%。

2) 高原环境的空气中氧含量较低,且环境温度也相对较低,这些会导致燃料燃烧不充分,增加污染物的排放,生物柴油由于其含氧特性,有助于降低农用拖拉机的 CO、HC 和 PN 排放因子。在海拔 2 200 m 下, B10、B20 和 B30 相较于 B0 基于发动机功率的 CO 排放因子分别下降了 10.15%、12.73% 和 32.10%,相较于 B0 基于功率的 HC 排放因子分别降低了 13.22%、26.45% 和

30.58%，相较于 B0 基于功率的 PN 排放因子分别降低了 8.22%、10.91% 和 14.17%。随着生物柴油比例的增加，对农用拖拉机的 CO、HC 和 PN 排放因子降低更显著。

3) 生物柴油会增加农用拖拉机的 NO_x 排放，NO_x 排放随着生物柴油比例的增加而增加，B10、B20 和 B30 相较于 B0 基于功率的 NO_x 排放因子分别增加了 1.60%、2.78% 和 4.20%。高原环境对农用拖拉机的 NO_x 影响较大，该研究中的基于功率的 NO_x 排放因子较《指南》推荐值高 3 倍多。

[参 考 文 献]

- [1] HOU X N, XU C, LI J F, et al. Evaluating agricultural tractors emissions using remote monitoring and emission tests in Beijing, China[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 213: 105-118.
- [2] 鲁君, 黄成, 胡馨遥, 等. 长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单[J]. *环境科学*, 2017, 38(7): 2738-2746.
LU Jun, HUANG Cheng, HU Qingyao, et al. Air pollutant emission inventory of non-road machineries in typical cities in eastern China [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(7): 2738-2746. (in Chinese with English abstract)
- [3] 中国移动源环境管理年报(2023 年)[J]. *环境保护*, 2024, 52(2): 48-62.
China mobile source environmental management annual report in 2023 [J]. *Environmental Protection*, 2024, 52(2): 48-62. (in Chinese with English abstract)
- [4] MENG Z W, LIU Z T, LIU J L. Investigation of in-cylinder combustion deterioration of diesel engines in plateau regions[J]. *Fuel*, 2022, 324: 124824.
- [5] RAZAK N H, HASHIM H, YUNUS N A, et al. Reducing diesel exhaust emissions by optimisation of alcohol oxygenates blend with diesel/biodiesel[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128090.
- [6] SHRIVASTAVA K, THIPSE S S, PATIL I D. Optimization of diesel engine performance and emission parameters of Karanja biodiesel-ethanol-diesel blends at optimized operating conditions[J]. *Fuel*, 2021, 293: 120451.
- [7] MOHAMED K, TIEMIN X, WALEED A A F, et al. A comparative study of diesel engine fueled by Jatropa and Castor biodiesel: Performance, emissions, and sustainability assessment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 188: 453-466.
- [8] MARCO B, CARLO C, MASSIMILIANO R, et al. Use of diesel-biodiesel-bioethanol blends in farm tractors: First results obtained with a mixed experimental-numerical approach[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 965-971.
- [9] SARAIVANAN A, MURUGAN M, et al. Performance and emission characteristics of variable compression ratio CI engine fueled with dual biodiesel blends of rapeseed and mahua[J]. *Fuel*, 2020, 263(3): 116751.
- [10] ONI B A, OLUWATOSIN D. Emission characteristics and performance of neem seed (*Azadirachta indica*) and Camelina (*Camelina sativa*) based biodiesel in diesel engine[J]. *Renewable Energy*, 2020, 149(4): 725-34.
- [11] MUKESH K, BIJAN K M, ARITRA G, et al. Performance evaluation of a diesel engine fueled with *Chlorella Protothecoides* microalgal biodiesel[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 51: 103609.
- [12] YU L X, GE Y S, TAN J W, et al. Experimental investigation of the impact of biodiesel on the combustion and emission characteristics of a heavy duty diesel engine at various altitudes[J]. *Fuel*, 2014, 115: 220-226.
- [13] GAUR R K, GOYAL R. A review: effect on performance and emission characteristics of waste cooking oil biodiesel-diesel blends on IC engine[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 63: 643-646.
- [14] SCHOBING J, TSCHAMBER V, BRILLARD A, et al. Biodiesel soot combustion: analysis of the soot-catalyst contact in different experimental conditions[J]. *Fuel*, 2022, 312: 122854.
- [15] ZHAO Z C, LIU S, WANG Z, et al. Effect of ash in biodiesel combustion particulate matter on the oxidation characteristics of carbon soot[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2022, 105: 262-272.
- [16] 韩红涛, 姚伟, 刘浩. 矿物柴油和生物柴油混合燃料对农用拖拉机发动机性能和排放的影响[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2021, 48(03): 29-34, 38.
HAN Hongtao, YAO Wei, LIU Hao. Effects of fossil diesel and biodiesel blends on performance and emissions of agricultural tractor engines[J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2021, 48(03): 29-34, 38. (in Chinese with English abstract)
- [17] 谢纬安, 瞿磊, 王忠, 等. EGR 率对农用单缸柴油机燃用生物柴油的 NO_x 与 PM 排放特性影响分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(3): 914-921.
Xie Weian, Qu Lei, Wang Zhong, et al. Effect of EGR rate on NO_x and PM emission characteristics of agricultural single cylinder diesel engine fueled with Biodiesel[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(3): 914-921. (in Chinese with English abstract)
- [18] SAKTHI M V, GOPAL K, DAMODHARAN D, et al. Influence of Hydrogen induction on performance and emission characteristics of an agricultural diesel engine fuelled with cultured *Scenedesmus obliquus* from industrial waste[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 187: 1576-1585.
- [19] 聂学选, 毕玉华, 申立中, 等. 基于响应曲面法的柴油机 SCR 性能预测[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 64-72.
NIE Xuexuan, BI Yuhua, SHEN Lizhong, et al. Prediction of SCR performance of diesel engine based on response surface methodology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(10): 64-72. (in Chinese with English abstract)
- [20] TOMIĆ M, SAVINA L, SIMIKIĆ M, et al. Effects of biodiesel on changes in IC engine performances: A long-term

- experiment with farm tractors[J]. *Fuel*, 2021, 292: 120300.
- [21] HOMA H-B, SHAHIN R, POUYA M, et al. Exergetic, economic, and environmental life cycle assessment analyses of a heavy-duty tractor diesel engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol blends[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 241: 114300.
- [22] AVINASH K A, VIKRAM K, HARDIKK V, et al. Ultra-low soot/ particulate emissions from a dimethyl ether-fueled agricultural tractor engine[J]. *Fuel*, 2024, 356: 129637.
- [23] 仇振宇, 何超, 李加强, 等. 曲靖市中大型农用拖拉机排放清单与空间分布研究[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(6): 803-809.
- QIU Zhenyu, HE Chao, LI Jiaqiang, et al. Research on emission inventory and spatial distribution of middle-large size agricultural tractors in Qujing City, China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(6): 803-809. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵梦佳. 拖拉机实际工况污染物排放预测及排放清单不确定性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- ZHAO Mengjia. Research on Forecast of Pollutant Emission in Actual Working Condition of Tractor and Uncertainty of Emission Inventory [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孔庆好. 非道路移动柴油机械排放模型及影响因素研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023.
- KONG Qinghao. Research on emission model and influencing factors of non-road mobile diesel machinery— mainly agricultural tractors [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [26] ZHANG J, LIU L, ZHAO Y, et al. Development of a high-resolution emission inventory of agricultural machinery with a novel methodology: A case study for Yangtze River Delta region[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115075.
- [27] JI J, ZHANG H, PENG D, et al. Estimation of typical agricultural machinery emissions in China: Real-world emission factors and inventories[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 136052.
- [28] 李宇航, 庄继晖, 陈振斌. 数据驱动下农用车柴油发动机 NO_x 排放预测模型[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(4): 128-136.
- LI Yuhang, ZHUANG Jihui, CHEN Zhenbin. Data-driven NO_x emission prediction model for diesel engines in agricultural vehicles[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(4): 128-136. (in Chinese with English abstract)
- [29] 徐萌, 王俊, 文奕钧, 等. 小型农用柴油机油耗和排放的多目标优化[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(2): 112-120.
- XU Meng, WANG Jun, WEN Yijun, et al. Multi-objective optimization of fuel consumption and emissions of a small agricultural diesel engine[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(2): 112-120. (in Chinese with English abstract)
- [30] HEIDARI B, MARR L C. Real-time emissions from construction equipment compared with model predictions[J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2015, 65(2): 115-125.
- [31] PIRJOLA L, RONKKO T, SAUKKO E, et al. Exhaust emissions of non-road mobile machine: Real-world and laboratory studies with diesel and HVO fuels[J]. *Fuel*, 2017, 202: 154-164.
- [32] KONIUSZY A, KOSTENCKI P, BERGER A, et al. Power performance of farm tractor in field operations[J]. *Maintenance and Reliability*, 2016, 19(1): 43-47.
- [33] LOVARELLI D, BACENETTI J, FIALA M. Effect of local conditions and machinery characteristics on the environmental impacts of primary soil tillage[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 479-491.
- [34] 生态环境部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南[EB/OL]. [2014-12-31]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201407/W020140708387895425529.pdf>.
- [35] 付明亮. 非道路柴油机械排放特征研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2013.
- FU Mingliang. Emission Characterization of Non-Road Diesel Machinery [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [36] 付明亮, 丁焰, 尹航, 等. 实际作业工况下农用拖拉机的排放特性[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 42-48.
- FU Mingliang, DING Yan, YIN Hang, et al. Characteristics of agricultural tractors emissions under real-world operating cycle[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(6): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [37] 余林啸. 不同海拔高度柴油机/重型柴油机在不同海拔高度的燃烧与排放特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- YU Linxiao. Research of Combustion and Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Engine at Different Altitudes [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology. 2014. (in Chinese with English abstract)
- [38] LIU J, YAO A, YAO C. Effects of diesel injection pressure on the performance and emissions of a HD common-rail diesel engine fueled with diesel/methanol dual fuel[J]. *Fuel*, 2015, 140: 192-200.
- [39] LIU J L, WANG B S, MENG Z W, et al. An examination of performance deterioration indicators of diesel engines on the plateau [J]. *Energy*, 2023, 262: 125587.
- [40] JIAO Y F, LIU R L, ZHANG Z J, et al. Comparison of combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel and methanol-Fischer-Tropsch diesel-biodiesel-diesel blends at various altitudes[J]. *Fuel*, 2019, 243: 52-59.
- [41] KASPER M. Sampling and measurement of nanoparticle emissions for type approval and field control[J]. *SAE Technical Paper*, 2005, 26: 313-327.
- [42] NING Z, CHEUNG C, LIU S. Experimental investigation of the effect of exhaust gas cooling on diesel particulate[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 35: 333-345.

Emission characteristics of biodiesel fueled in agricultural tractors

CAI Wenjie , LIU Xueyuan^{*} , CHEN Yanlin , YANG Tongyun , QIAO Mengxue

(1. School of Mechanics and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Key Laboratory of Vehicle Environmental Protection and Safety in Plateau Mountain Area of Yunnan Provincial Colleges, Kunming 650224, China)

Abstract: Agricultural machinery has been one of the most important sources of air pollution in China. It is very necessary to do more research on its emissions. This study aims to investigate the effects of burning different proportions of biodiesel in agricultural tractors at high altitudes on the emission characteristics of CO (carbon monoxide), HC (hydrocarbon), NO_x (nitrogen oxides), and PN (particulate number) under the actual operating conditions. A series of tests were carried out on the blending B10 (10% by volume of soya bean methyl ester biodiesel + 90% by volume of diesel fuel), B20, B30, and diesel fuel (B0) in a National III emission standard agricultural tractor at an altitude of 2 200 m during rotary plowing (with the engine speed at 1 500 to 1 700 r/min and the engine power at 20 to 30 kW). OBD (board diagnostics) and PEMS (portable emission measurement system) were used to collect data on the tractor operating conditions and pollutants, respectively. The results showed that the biodiesel slightly reduced the fuel economy for the brake-specific fuel consumption (BSFC), which increased by 2.31%, 2.71%, and 2.04% for B10, B20, and B30, respectively, compared with B0. The emission factors were also obtained for the CO, HC, NO_x, and PN of agricultural tractors using engine power. Specifically, the CO, HC, and PN emission factors of agricultural tractors were reduced by 10.15%, 12.73%, and 32.10% for B10, B20, and B30, respectively, compared with B0 using biodiesel engine power; 13.22%, 26.45% and 30.58% for B0-based power and 8.22%, 10.91% and 14.17% for B30-based PN emission. The CO, HC, and PN emission factors increased with the increase in the percentage of biodiesel. Biodiesel slightly increased the NO_x emissions from agricultural tractors. The NO_x emission factor increased, as the proportion of biodiesel increased. The NO_x emission factors for B10, B20, and B30 increased by 1.60%, 2.78%, and 4.20%, respectively, compared with B0-based engine power. The power-based NO_x emission factors of all tested fuels in the plateau environment were more than three times higher than the recommended values of the Guideline. There was a great variation in the pollutant emission of the tractor during actual operation. A tradeoff was made on the fuel economy and the effect of biodiesel on NO_x emissions, in order to reduce the pollutant emissions from agricultural tractors during actual operation at high altitudes. Biodiesel can be expected to serve as an alternative fuel in small proportions for agricultural tractors. The CO, HC, and PN emissions can be reduced to avoid the use of fossil fuels. The finding can provide a strong reference to optimize the actual control of the pollutant emission of biodiesel combustion in agricultural tractors under high-altitude environments. The emission database of agricultural machinery can also be supplemented to reduce environmental pollution in high-altitude areas.

Keywords: high altitude; biodiesel; emission factors; agricultural tractors; PN