崔 敏,史富强,张 帆,等.基于实测的生物柴油农业机械碳质组分排放特征 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6544-6551.
Cui M, Shi F Q, Zhang F, et al. Real-world emission characteristics of carbonaceous from agricultural machinery fueled with biodiesel [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6544-6551.

基于实测的生物柴油农业机械碳质组分排放特征

崔 敏[1*],史富强[1],张 帆[2],陈颖军[3] (1.扬州大学环境工程系,江苏 扬州 225000；2.华东师范大学地理科学学院,上海 200062；3.复旦大学环境科学与工程学院,上海 200438)

摘要: 生物柴油作为一种碳中和燃料,其应用如何影响柴油机械尾气中关键碳质组分的排放,目前尚不清晰.为探究生物柴油对农业机械碳质组分排放的影响,本研究通过实测手段,系统分析了生物柴油混合比例(B0、B5、B20)、排放标准(国Ⅱ、国Ⅲ)、机械类型及运行工况等多因素对尾气中有机碳(OC)与元素碳(EC)化学组分(OC1-OC4、EC1-EC3)的排放影响.结果表明:(1)生物柴油掺混可显著降低 OC 与 EC 的排放因子(EF_{OC} 和 EF_{EC}),其中 B20 较 B0 农业机械的 EF_{OC} 与 EF_{EC} 分别下降 44.6%与 24.3%,其主要原因为燃料含氧量与燃烧效率提高;(2)燃料性质与燃烧温度共同影响 OC 与 EC 各组分的生成.相对于 B0 机械，B5 机械排放的 OC1,OC2 占比下降,而 EC2 比例上升;(3)基于排放因子估算,2022 年中国农业机械 OC 与 EC 排放总量分别为 10608t 与 2507t,占道路移动源排放的 27.6%与 9.4%;若推广 B5 与 B20 燃油,农业机械总有机碳排放量可较 B0 基准分别降低 35.8%与 44.2%.

关键词： 农业机械；生物柴油；有机碳(OC)；元素碳(EC)；排放因子
中图分类号： X513 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-6923(2025)12-6544-08

Real-world emission characteristics of carbonaceous from agricultural machinery fueled with biodiesel. CUI Min[1*], SHI Fu-qiang[1], ZHANG Fan[2], CHEN Ying-jun[3] (1.School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China；2.School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China；3.Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, China). *China Environmental Science*, 2025, 45(12)：6544~6551

Abstract：Biodiesel is recognized as a carbon-neutral fuel, yet its impact on the emissions of key carbonaceous components from diesel engine exhaust remains unclear. To investigate the influence of biodiesel on carbonaceous component emissions from agricultural machinery, this study conducted real-world measurements to systematically analyse the effects of multiple factors-including biodiesel blend ratio (B0, B5, B20), emission standard (China II, China III), machinery type, and operating conditions-on the chemical composition of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) (divided by thermal stability into OC1-OC4 and EC1-EC3). The results indicated that: (1) The emission factors of OC and EC (EF_{OC} and EF_{EC}) were significantly reduced by biodiesel blending. For instance, EF_{OC} and EF_{EC} were reduced by 44.6% and 24.3%, respectively, for B20compared to B0, which was primarily attributed to increased fuel oxygen content and improved combustion efficiency. (2) The formation of OC and EC subcomponents was jointly influenced by fuel properties and combustion temperature. In emissions from B5machinery, the proportions of OC1 and OC2 were decreased, while that of EC2 was increased. (3) Based on emission factor estimates, the total national OC and EC emissions from agricultural machinery in China in 2022 were calculated to be 10608t and 2507t, respectively, accounting for 27.6% and 9.4% of road mobile source emissions. If B5 and B20 were widely adopted, total OC emissions from agricultural machinery could be reduced by 35.8% and 44.2%, respectively, compared to the B0 baseline.
Key words：agricultural machinery；biodiesel；OC；EC；emission factor

有机碳(OC)和元素碳(EC)是大气细颗粒物($PM_{2.5}$)的重要组成部分[1-3],在 $PM_{2.5}$ 中占比为10%~70%[4],对大气能见度、气候变化以及人类健康有重要影响[5-9].OC 和 EC 主要来源于生物质燃烧、化石燃料不完全燃烧等,人体长期吸入可导致呼吸系统疾病、心血管疾病及肺癌[10].其中,EC 是强吸光性物质,吸收太阳辐射并释放热量,导致温室效应加剧[11].OC 中存在大量吸光组分,如棕碳,对于温室效应产生较大影响[12].长期来看,OC 和 EC 与二氧化碳(CO_2)协同减排可助力空气质量与气候目标实现“双赢”[13].

机动车排放是 OC 和 EC 的主要来源之一[14-15].其中,柴油车排放 OC 和 EC 占机动车总排放量的

收稿日期： 2025-05-23
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(42107105)
* 责任作者, 副教授, mcui@yzu.edu.cn

90.1%和95.1%[16].近年来,对道路移动源柴油车尾气污染物排放研究较多[17-19],而对非道路移动源柴油机的排放问题缺乏关注.生态环境部 2023 年发布的《中国移动源环境管理年报》显示[20],由于非道路移动源种类较多,控制污染物排放的水平较为落后,以农业机械为代表的非道路移动源柴油机排放的污染物对大气质量的影响逐渐增强.截至 2023 年,全国农业机械总量约为 2 亿万台套,其中国Ⅱ和国Ⅲ分别占 61.4%和 18.3%[20].与机动车成体系的排放监管系统相比,农业机械缺乏统一的监管体系,污染物的排放因子明显高于道路移动源柴油车[21].

生物柴油有望成为化石柴油的清洁替换能源[22].使用生物柴油替换化石柴油可有效降低常规污染物的排放(如一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)等)[23].Tomić 等[24]分别通过对农业机械添加不同比例生物柴油(15%、25%、50%和 75%)进行对比分析,发现随着生物柴油比例的增加农业机械的燃料燃烧更加完全且热效率更高.但是,生物柴油机械对于 OC 和 EC 的排放影响仍有争议[25-26],需要不断增加实测数据来最终评估生物柴油使用的环境效应.

本文选取了 5 台具有代表性的农业机械,实测不同油品状况下农业机械的 OC 和 EC 排放因子(EF_{OC} 和 EF_{EC});分析影响农业机械 OC 和 EC 组成特征的主要因素;评估生物柴油农业机械 OC 和 EC 减排潜力.相关研究可为我国移动污染源减排提供数据基础和方向指导.

1　材料与方法

1.1　测试车辆和油品选择

依据《中国移动源环境管理年报 2024》相关数据,拖拉机与收割机在农业机械保有量中占比达 80%,其中近 85%的农业机械污染来自于国Ⅱ和国Ⅲ机械排放.按照中国农业农村部规定,拖拉机可划分为小型拖拉机(功率小于 58.8kW)和中大型拖拉机(功率大于 58.8kW).因此,本研究选取了 5 台具有代表性的农业机械,这些机械涵盖不同排放标准与功率.如表 1 所示,分别为 1 台国Ⅱ小型拖拉机(G2ST)、1 台国Ⅱ中大型拖拉机(G2LT)、1 台国 III 中大型拖拉机(G3LT)、1 台国Ⅲ小型联合收割机(G3SS)以及 1 台国 III 中大型收割机(G3LS).此外,依据作业需求,中大型拖拉机通常会连接配套农具协同作业.配套农具主要包含旋耕机、机引犁以及水稻插秧机,其在总配套农具中占 74%.在本研究中,选用了旋耕机、机引犁和开沟机的农业机械及配套农具类别,选定的运行工况涵盖怠速、行驶、旋耕、犁地、开沟与收割等,其中旋耕、犁地、开沟和收割统称为工作状态.

表 1　测试农业机械详情信息

Table 1　Test agricultural machinery details

类型	简称	功率 (kW)	排放标准	燃油喷射类型	关键环保零部件	出厂年份
拖拉机	G3LT	118	GIII	高压共轨	ECU[a]	2022
	G2LT	73.5	GⅡ	泵喷系统	/	2014
	G2ST	11	GⅡ	泵喷系统	/	2015
联合收割机	G3LS	92	GIII	高压共轨	ECU	2021
	G3SS	46	GIII	泵喷系统	EGR[b]	/

注:a: ECU−发动机控制单元;b: EGR−废弃再循环系统.

本研究选取国内广泛应用的餐饮废油脂源生物柴油进行试验.当前,中国生物柴油与化石柴油的混合比例设定为 5%:95%(B5))而国际上已逐步将这一比例提升至 20%(B20)[27].鉴于此,本研究选取纯化石柴油(B0)、B5 生物柴油及 B20 生物柴油作为测试油品.柴油及生物柴油的油质详细分析报告见表 2.

表 2　生物柴油和柴油的燃料质量

Table 2　Quality of diesel and biodiesel

参数	柴油	生物柴油	单位
运动黏度(40℃)	2.744	4.275	Mm^2/s
运动黏度(100℃)	1.162	1.723	Mm^2/s
燃点	100	196	℃
闪点	71	172	℃
总热值	111101	9864	cal/g
净热值	43.384	38.149	MJ/kg
碳	85.8	76.1	%
氢	12.82	12	%
氧	0.93	11.76	%
氮	0	0.04	%
硫	0	1.08	%

1.2　农业机械排放实测

本次实地采样地点位于江苏省扬州市公道镇,测试使用的便携式稀释采样系统在之前的研究中已有报道[25,27].本研究使用的稀释系统由常规气态物质在线监测系统(Photon Ⅱ:可在线分析尾气中二氧化碳(CO_2)、CO、NO_x 和二氧化硫(SO_2)的浓度)、

稀释腔、干净空气供给系统和颗粒物采样系统组成.其中一套颗粒物采样系统使用石英滤膜进行采样,用于本研究 OC 和 EC 的分析.现场搭建的采样简图如图 1 所示.

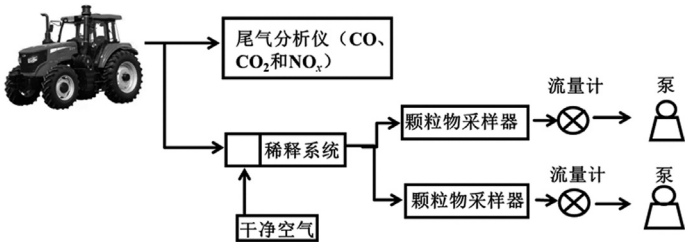


图 1 采样系统示意

Fig.1 Diagram of the sampling system

1.3 OC 和 EC 分析

OC 和 EC 的组成及含量需带回实验室进行分析.利用热光碳分析仪(DRITOR Atmoslytic Inc., Calabasas,CA,USA)测定石英滤膜上 OC 和 EC 的含量.使用切割器切取滤膜样品放入热光碳分析仪,在纯氦气环境下升温加热,140、280、480 和 580℃温度时检测到的物质分别为 OC1、OC2、OC3 和 OC4.随后在 2% O_2 和 98%氦气的条件下继续升温 580,740 和 840 ℃时检测到的物质分别 EC1,EC2 和 EC3.计算 OC 和 EC 含量时应注意,仪器升温至 580℃时,会有部分 OC4 碳化为 EC1,称为裂解碳(POC, pyrolytic carbon).因此,为较正热光碳分析仪检测过程中产生的误差,OC 的实际含量应该加上 POC,而 EC 需减去 POC 的量.

1.4 质量控制

采样过程中使用的所有石英滤膜均需进行预处理,具体处理步骤如下:在马弗炉中于 500℃的温度下焙烧 6h 以去除有机杂质.采样前后的滤膜在恒温恒湿箱中恒温恒湿 24h(25℃,45%相对湿度),并使用十万分之一精度的天平对采样前后的滤膜各进行两次平行称重,确保两次称重的误差不超过 0.04mg;上述过程可去除滤膜中带有的水分以及有机质,同时避免仪器误差对后续实验结果产生影响.

多波段热光碳分析仪每次开机都要依次运行“烘烤”、“校准”和“空白”程序,三峰偏差要小于 5%.每天在测样品前对仪器进行程序烘烤,每次使用环形切刀和玻璃片都要擦拭干净,以免影响实验结果.

1.5 排放因子计算

本研究采用碳平衡法计算不同型号的农业机械的 OC 和 EC 的排放因子,排放因子是指单位质量燃料燃烧排放污染物的质量.碳平衡法假设燃料中的所有碳(燃料中的碳扣除灰分中的碳)在燃烧后主要转化为 CO、CO_2 和颗粒态的 OC 和 EC.碳质组分的排放因子计算公式如下所示:

$$\mathrm{EF}_i = \frac{\Delta X_i}{\Delta \mathrm{CO}_2} \times \frac{M_i}{M_{\mathrm{CO}_2}} \times \mathrm{EF}_{\mathrm{CO}_2} \tag{1}$$

式中:$\mathrm{EF}_{\mathrm{CO}_2}$ 和 EF_i 分别代表为 CO_2 和污染物 i 的排放因子,g/kg fuel;ΔX_i 和 $\Delta \mathrm{CO}_2$ 为去除环境背景浓度后的污染物 i 和 CO_2 的物质的量浓度, mol/m^3; M_i 和 M_{CO_2} 为污染物 i 和CO_2 的摩尔质量, g/mol.

$$\mathrm{EF}_{\mathrm{CO}_2} = \frac{\mathrm{C}_F \times \Delta(\mathrm{CO}_2)}{\Delta(C_{\mathrm{CO}_2}) + \Delta(C_{\mathrm{CO}}) + \Delta(C_{\mathrm{OC}}) + \Delta(C_{\mathrm{EC}})} \tag{2}$$

式中:$\mathrm{EF}_{\mathrm{CO}_2}$ 为 CO_2 排放因子,g/kg fuel;$\Delta(\mathrm{CO}_2)$ 是扣除环境背景浓度后的 CO_2 质量水平,g/m^3,实测获得;C_F 是单位重量燃油中 C 的含量 gC/kg fuel; $\Delta(C_{\mathrm{CO}})$, $\Delta(C_{\mathrm{CO}_2})$, $\Delta(C_{\mathrm{OC}})$, $\Delta(C_{\mathrm{EC}})$ 分别代表 CO、CO_2、OC 和 EC 中碳的质量浓度, g C/cm^3.

1.6 排放清单计算

本研究基于实测获得的排放因子及相关活动水平数据[28]估算 2022 年中国和各省份不同型号的农业机械使用 B0,B5 和 B20 燃油后的 OC 和 EC 排放清单,公式如下所示:

$$E_i = \mathrm{CF}_i \times \mathrm{EF}_i \times 10^3 \tag{3}$$

式中:i 表示设备类型,E_i 表示设备 i 的年排放量, t/a,EF_i 代表设备 i 的排放系数, g/kg fuel;CF_i 表示设备 i 的全国和全国各省的年燃料消耗量,t/a.

2 结果与讨论

2.1 生物柴油农业机械 OC 和 EC 排放因子及影响

因素

实测研究表明,B0 农业机械的 EF_{OC} 和 EF_{EC} 平均值分别为(1.39 ± 0.28) g/kg 和(0.37 ± 0.25) g/kg.将本研究的测试结果与文献中报道的其它柴油机械的 OC、EC 排放因子进行对比,发现农业机械 OC、EC 排放因子介于文献报道数据之间.Huang 等[29]报道的一艘大型柴油内河货船的 EF_{OC} 为(2.22±0.60) g/kg,高于本研究测试结果;但其测试得到的 EF_{EC} 为(0.21±0.20) g/kg 低于本研究中获得的农业机械排放水平.此外,Cui 等[17]报道的非道路源柴油车的 EF_{PM} 为(0.836±0.801) g/kg,而道路源柴油车的 EF_{PM} 为(0.498±0.234) g/kg,均小于本研究的 OC 和 EC 排放因子.柴油机械不同 OC 和 EC 排放特征可能受到机械类型、燃油质量和运行条件等共同影响.例如,内河船舶由于船龄较高、航道行驶条件差、使用柴油质量差和缺乏管控等原因,导致 OC 的排放因子高于农业机械[30].农业机械排放 OC 和 EC 均小于生物质燃料燃烧排放.Ruzicková 等[31]研究表明住宅锅炉中的生物质燃烧产生的 OC 含量为(2.16±4.47) g/kg,EC 含量为(0.42±1.01) g/kg,均高于本研究测试结果,可能与燃料化学组成差异有关[32].

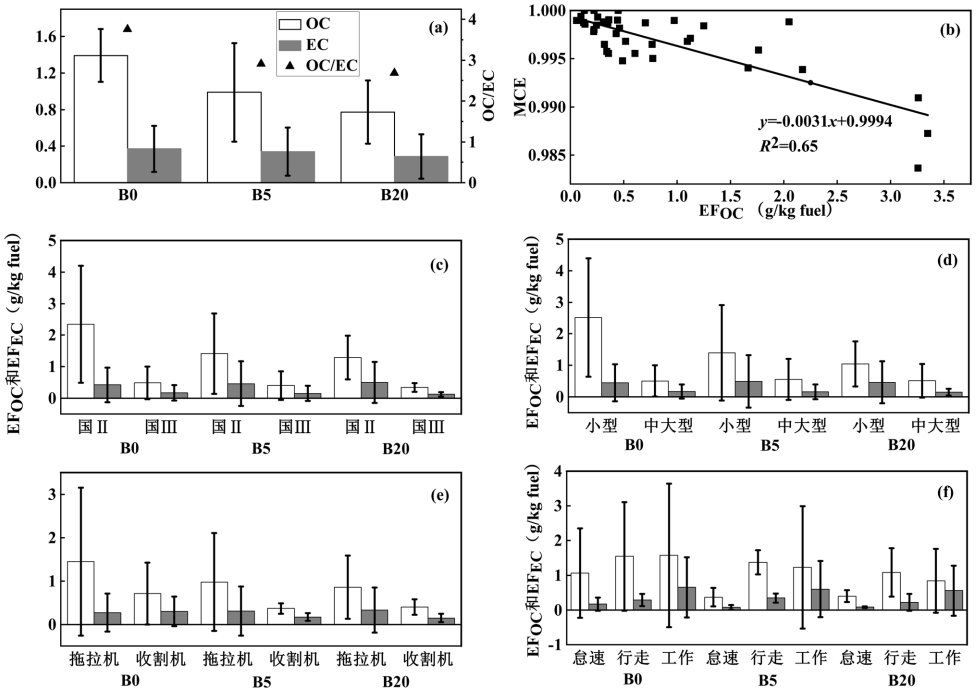


图 2　不同油品、机械类型和工况下农业机械 OC 和 EC 排放因子(g/kg fuel)

Fig.2　Emission factors of OC and EC from agricultural machinery under different fuel types, machinery types, and operating conditions

总体上,随着生物柴油混合比例的增加,农业机械排放 EF_{OC} 和 EF_{EC} 逐渐降低(图 2(a)).燃烧 B5 燃料的农业机械 EF_{OC} 为(0.98±0.53) g/kg,EF_{EC} 为(0.34±0.26) g/kg,相对于 B0 燃料分别降低 29.5%和 8.1%.燃烧 B20 燃料的农业机械 EF_{OC} 为(0.77±0.34) g/kg,EF_{EC} 为(0.28±0.24) g/kg,相对于普通化石柴油降低 44.6%和 24.3%.相关文献也发现生物柴油替换化石柴油可降低柴油机械 EF_{OC} 和 EF_{EC}[33].随着生物柴油比例的升高,燃油的含氧量上升,燃烧效率(MCE)上升,造成污染物排放因子降低[34].如图 2(b)所示,本研究测试得到的 EF_{OC} 与燃烧效率呈显著负相关.此外,Liu 等[35]研究指出,生物柴油中酯基可促进 HO_2 生成,且倾向于优先结合氧,生成 CO、CO_2 或者其它氧合物质,而抑制炭黑前体物乙炔和乙烯的生成.因此,随着生物柴油比重增加,EF_{EC} 呈下降趋势.但是,从单一车辆来看,EF_{OC} 和 EF_{EC} 随着生物柴油比例增加变化趋势与平均水平差异较大.例如,对于 G2LT 机械来说,B5 和 B20 农业机械的 EF_{OC} 显著高于 B0(B0、B5 和 B20 的 MCE:0.996、0.995、0.995);而对于 G3LT 车辆来说,B5 农业机械 EF_{OC} 和 EF_{EC}

均高于 B0.因此,不同油品农业机械 EF_{OC} 和 EF_{EC} 的变化趋势仍会受到燃烧效率、燃烧温度、燃料组成、后处理装置等共同制约,变异性较大.

此外,为进一步讨论生物柴油的使用对 EF_{OC} 和 EF_{EC} 的影响,本文评估了不同生物柴油比例下农业机械排放标准、发动机功率大小、农业机械类型以及运行工况这几个因素(图 2(c)(d)(e)(f)).总体来说,排放标准的提升显著降低了 OC 和 EC 的排放,这与已有研究结果相一致[36].但是,不同比例生物柴油添加后不同排放标准农业机械 OC 和 EC 的变化趋势有所不同.随着生物柴油比例增加,国Ⅱ机械 EF_{OC} 的降幅逐渐增大,降幅明显高于国Ⅲ机械.但是,随着生物柴油比例增加,国Ⅱ机械的 EF_{EC} 逐渐增大,国Ⅲ机械的 EF_{EC} 逐渐降低.造成这一结果的可能原因推测是:相比于国Ⅱ排放标准,国Ⅲ的发动机具有更高的颗粒物排放标准要求,相应地配备了更先进的发动机技术[20],因此在排放标准加严的条件下推测生物柴油中高氧与高粘度对 OC 的影响降低.相反地,国Ⅱ农业机械随着生物柴油比例的增加,燃烧效率增加,燃烧温度提高,促使更多的 OC 向 EC 进行转化,导致最终 EC 的排放逐渐增大.此外,中大型农业机械可显著降低 OC 和 EC 的排放水平(图 2(d)),这与已有的研究结果相一致[21].Shen 等[21]测试非道路工程机械排放半/中等挥发性有机物特征同样发现小型工程机械有机物排放因子高于中大型机械,这可能与不同型号车辆燃烧效率相关.但随着生物柴油比例增加,小型农业机械的 EF_{OC} 逐渐降低,中大型农业机械的 EF_{OC} 逐渐增加,而 EC 的排放趋势与 OC 相反.小型农业机械使用 D100 到 D20 时的 EF_{OC} 降幅达到 58.5%,但中大型农业机械反而上升 3.3%.推测可能与发动机的性能有关,即中大型农业机械具有相对更好的燃烧条件[36],生物柴油中高氧与高粘度对中大型农业机械污染物排放的影响更小.无论使用何种燃油拖拉机的 EF_{OC} 和 EF_{EC} 普遍高于收割机,可能与拖拉机工作状态下负荷增大导致油耗增加有关[38].但收割机 OC 和 EC 排放水平受到生物柴油添加比例的影响高于拖拉机,OC 和 EC 的最高降幅可达(48.4%和 51.2%),这受发动机功率大小以及排放标准两者共同影响有关.无论何种燃油,农业机械在怠速,行走,工作的工况下,总有机碳(OC+EC)的排放因子逐渐升高.这与黄成等[39]对轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子测试结果一致.而在同一工况下,B0、B5 和 B20 的 OC 和 EC 排放因子依次呈下降趋势.

2.2 生物柴油农业机械排放 OC 和 EC 组成特征及影响因素

OC 和 EC 不同组成的生成过程受到燃料性质和燃烧温度等影响较大[32].通常情况下,OC1 和 OC2 被认为是燃烧燃料中小分子有机物挥发产生[40].EC1 通常被定义为焦炭元素碳(char-EC),而 EC2+EC3 则被定义为烟炱元素碳(soot-EC).焦炭元素碳是燃料在相对较低燃烧温度下通过热解作用直接形成的,而烟炱元素碳则是通过高温燃烧条件下的气态-颗粒态转化过程形成的[26].如图 3(a)所示,本研究测试 B0 农业机械排放的碳质组分以 EC2 为主,占总碳质组分的 38%,这与文献[41]研究结果类似.除此之外,农业机械排放的碳质组分中有较高比例的 OC1 组分[42],推测可能来自于原油组分的直接挥发过程.

随着生物柴油添加比例的变化,OC 和 EC 的组成特征差异明显.相比于 B0 农业机械,B5 农业机械排放的 OC1 和 OC2 的占比减少,EC2 占比增高.生物柴油的挥发性低于化石柴油,造成其挥发性组分 OC1 和 OC2 的占比降低;而较高的燃烧效率和部分未燃烧产物,改善颗粒成核和凝结条件,促使 EC2 占比增大[26].而随着生物柴油添加比例由 5%提高到 20%,燃烧状态主导 OC 和 EC 的组成特征.生物柴油较大的黏度降低了燃烧效率,导致更多的挥发性组分排放,因此 B20 农业机械排放的 OC 中 OC1 和 OC2 的占比进一步增大.同时,燃烧效率导致燃烧温度的降低使得 EC2 的比例也进一步降低.

不同排放标准农业机械排放 OC 和 EC 的组成特征不仅受燃烧效率影响,环保部件对其影响较大.国Ⅲ中大型拖拉机 OC 和 EC 各个组分占比相对于国Ⅱ来说,OC1 和 OC2 占比升高,EC2 和 EC3 占比下降.值得一提,国Ⅲ农业机械(G3LT 和 G3SS)燃烧效率明显高于国Ⅱ农业机械,但是 OC1、OC2 和 EC2 的占比却与之前描述不相同,可能存在其它影响组成特征的因素.从表 1 可以看出,G3SS 农业机械相比于其它机械安装了 EGR(废气再循环系统)环保附件.有关研究指出,EGR 系统虽然能有效降低 NO*x* 排放,但会导致气缸内废气分布不均,最终造成某些有机

组分显著增加[43].在怠速,行走,工作三种工况下,OC1和OC2占比持续下降,而EC2占比持续上升.可能是因为在工作状态下,柴油机缸内温度和压力持续升高,相对易挥发的有机组分减少,而燃油在高温贫氧氛围下使不易挥发和氧化的碳质组分含量有所增多[44].

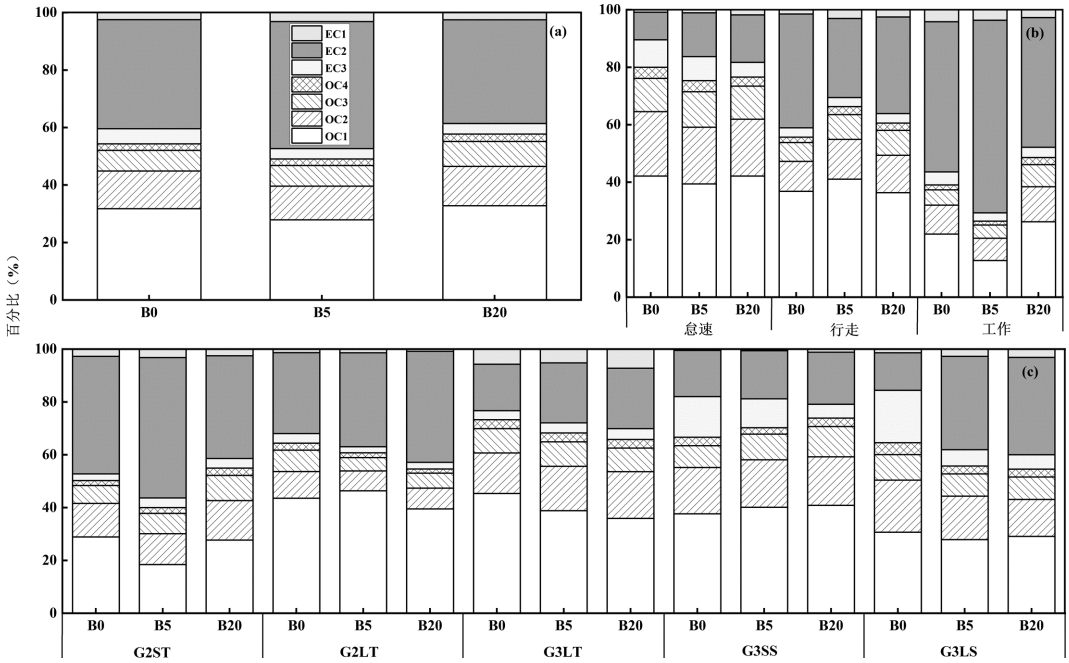


图 3　不同因素对燃用生物柴油的农业机械 OC 与 EC 组分分布的影响

Fig.3　The effects of various factors on the compositional distribution of OC and EC from biodiesel-fueled agricultural machinery

2.3　生物柴油农业机械 OC 和 EC 排放总量

基于实测 OC 和 EC 排放因子以及相关活动水平数据计算获得 2022 年中国农业机械 OC 和 EC 排放清单(图 4).结果显示,2022 年中国 B0 农业机械 OC 和 EC 的排放清单分别是 10608 和 2507t/a.将本研究结果与文献报道的道路移动源排放数据进行对比发现,2022 年农业机械 OC 和 EC 排放量可占道路移动源排放量的 27.6%和 9.4%[16].值得注意的是,上述提到的文献报道道路移动源清单是基于 2000 年数据计算获得,而随着道路源排放标准的不断加严,农业机械的排放占比会逐渐增高,不容忽视.此外,农业机械 OC 的排放总量与 2017 年中国工业锅炉 OC 排放量相当(13100t)[45].随着生物柴油添加比例的不断增加,总碳质组分的排放量逐渐降低,B5 和 B20 农业机械 TC 排放总量相对于 B0 农业机械分别降低 35.8%和 44.2%.其中 OC 排放量的降低最为明显.从图 4 可以看出,不同油品质量下,GⅡ小型拖拉机的 OC 和 EC 排放量占总农业机械的主导地位,主要由于GⅡ小型拖拉机的排放因子较大且数量较多导致.对于国Ⅱ小型拖拉机实行生物柴油替换,可达到显著减排效果.

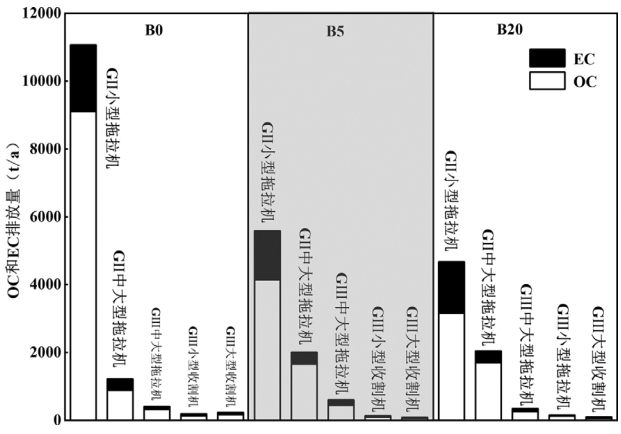


图 4　基于不同油品的农业机械 OC 与 EC 排放清单

Fig.4　Emission inventory of OC and EC from agricultural machinery based on different fuels

如图 5 所示为全国各省使用不同燃料(B0、B5、B20)的农业机械 OC 和 EC 的年排放量(不包括香港、澳门和台湾).OC 和 EC 排放量呈显著的空间分布特征.农业机械 OC 和 EC 排放量前三的省份分别为河南、山东和安徽,与这三个地区农业繁荣密不可分.Zhuang 等[46]研究表明,2020 年,我国农业机械碳排

放总量达到 1.6 亿 t,约占全国的 1.5%.若对农业机械管控不当,到 2050 年,这一比例可能会飙升至 20%.

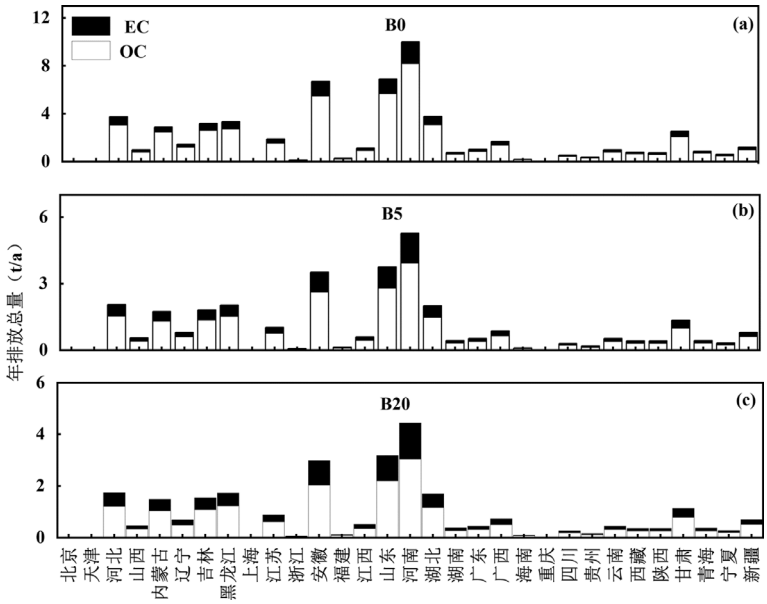


图 5 2022 年中国各省份 OC 与 EC 排放总量

Fig.5 Total emissions of OC and EC in China by province (2022)

3 结论

3.1 生物柴油替代化石柴油可有效降低农业机械的 OC 与 EC 排放因子,且减排效果随生物柴油比例增加而提升.与 B0 相比,B5 和 B20 的 EFOC 分别降低 29.5%和 44.6%,EF_{EC} 分别降低 8.1%和 24.3%.

3.2 生物柴油比例变化影响 OC 与 EC 组分构成,随着添加比例提高,OC1 与 OC2 占比呈现波动变化,同时燃烧效率及排放标准等因素对组分特征影响显著.

3.3 农业机械排放的总碳质组分随生物柴油比例增加而逐步下降,B5 与 B20 较 B0 分别降低 35.8%和 44.2%.河南、山东和安徽是 OC 与 EC 排放量最高的省份,需加强该地区农业机械的排放管控以减轻环境与健康风险.

参考文献:

[1] Liang C S, Duan F K, He K B, et al. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of $PM_{2.5}$ [J]. Environment International, 2016,86:150-170.

[2] Tao J, Zhang L M, Cao J J, et al. A review of current knowledge concerning $PM_{2.5}$ chemical composition, aerosol optical properties and their relationships across China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017,17(15):9485-9518.

[3] Zhu Q, He L Y, Huang X F, et al. Atmospheric aerosol compositions and sources at two national background sites in northern and southern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016,16(15):10283-10297.

[4] 张毓秀,任万辉,王嘉禾,等.沈阳市冬季不同污染程度 $PM_{2.5}$ 中 OC 和 EC 污染特征 [J]. 中国环境科学, 2021,41(7):3066-3075.
Zhang Y X, ren W H, Wang J H, et al. Characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) under different pollution levels of $PM_{2.5}$ during winter in Shenyang [J]. China Environmental Science, 2021,41(7):3066-3075.

[5] Lim S, Lee M, Kim S, et al. Absorption and scattering properties of organic carbon versus sulfate dominant aerosols at Gosan climate observatory in Northeast Asia [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014,14(15):7781-7793.

[6] 李朝阳,袁 亮,张小玲,等.成都碳质气溶胶变化特征及二次有机碳的估算 [J]. 中国环境科学, 2022,42(6):2504-2513.
Li C Y, Yuan L, Zhang X L, et al., Characteristics of carbonaceous aerosols and estimation of secondary organic carbon in Chengdu [J]. China Environmental Science, 2022,42(6):2504-2513.

[7] Cheng Z, Jiang J K, Chen C H, et al. Estimation of aerosol mass scattering efficiencies under high mass loading: Case study for the megacity of Shanghai, China [J]. Environmental Science & Technology, 2014,49(2):831-838.

[8] Lu Z F, Streets D G, Winijkul E, et al. Light absorption properties and radiative effects of primary organic aerosol emissions [J]. Environmental Science & Technology, 2015,49(8):4868-4877.

[9] Wang Z L, Zhang H, Zhang X Y. Simultaneous reductions in emissions of black carbon and co-emitted species will weaken the aerosol net cooling effect [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(7):3671-3685.

[10] Qiao L P, Cai J, Wang H L, et al. $PM_{2.5}$constituents and hospital emergency-room visits in Shanghai, China [J]. Environmental Science & Technology, 2014,48(17):10406-10414.

[11] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013,118(11):5380-5552.

[12] Li Y M, Fu T M, Yu J Z, et al. Nitrogen dominates global atmospheric organic aerosol absorption [J]. Science, 2025,387(6737):989-995.

[13] 徐 利,王思敏."双碳"目标下江苏绿色低碳转型成效与政策建议 [J]. 中国发展观察, 2025,(Z1):156-162.
Xu L, Wang S M. Effectiveness and policy recommendations of green and low-carbon transformation in Jiangsu under the "dual carbon" goals [J]. China Development Observation, 2025,(Z1):156-162.

[14] Huang X H H, Bian Q J, Louie P K K, et al. Contributions of vehicular carbonaceous aerosols to $PM_{2.5}$ in a roadside environment in Hong Kong [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014,14(17):9279−9293.
[15] Klimont Z, Kupiainen K, Heyes C, et al. Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017,17(14):8681−8723.
[16] Cao G L, Zhang Z Y, Zheng F C. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China [J]. Atmospheric Environment, 2006,40:6516−6527.
[17] Cui M, Chen Y J, Feng Y L, et al. Measurement of PM and its chemical composition in real−world emissions from non−road and on−road diesel vehicles [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017,17(11):6779−6795.
[18] 黄　成,楼晟荣,乔利平,等.重型柴油公交车实际道路颗粒物排放的理化特征 [J]. 环境科学研究, 2016,29(9):1352−1361.
Huang C, Lou S R, Qiao L P, et al. Physicochemical characteristics of particulate matter emissions from heavy−duty diesel buses under real−road conditions [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(9):1352−1361.
[19] 卢　攀,李光华,张　帅,等.关中地区道路移动源细颗粒物排放特征研究 [J]. 环境科学学报, 2023,43(8):265−272.
Lu P, Li G H, Zhang S, et al. Emission characteristics of fine particulate matter from road mobile sources in Guanzhong region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(8):265−272.
[20] 生态环境部.中国移动源环境管理年报 [R]. 北京.中华人民共和国生态环境部, 2023.
Ministry of Ecology and Environment of China. China mobile source environmental management annual report [R]. Beijing. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2023.
[21] Shen X B, Chen H Q, Lv T T, et al. Real−world emission characteristics of semivolatile/intermediate−volatility organic compounds originating from nonroad construction machinery in the working process [J]. Science of the Total Environment, 2023,858:159970.
[22] IPCC. Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change [R]. Cambridge. Cambridge University Press. 2022.
[23] Dubey A, Prasad R S, Kumar S J, et al. Optimization of diesel engine performance and emissions with biodiesel−diesel blends and EGR using response surface methodology (RSM) [J]. Cleaner Engineering and Technology, 2022,8:100478.
[24] Tomić M D, Savin L D, Micic R D, et al. Effects of fossil diesel and biodiesel blends on the performances and emissions of agricultural tractor engines [J]. Thermal Science, 2013,17(1):263−278.
[25] 崔　敏,刘劲毅,侯筱筱,等.生物柴油机械羰基化合物排放特征及环境效应研究 [J]. 实验技术与管理, 2024,41(11):52−57.
Cui M, Liu J Y, Hou X X, et al. Emission characteristics and environmental effects of biodiesel−related mechanical carbonyl compounds [J]. Experimental Technology and Management, 2024,41(11):52−57.
[26] Lu T, Huang Z, Cheung C, et al. Size distribution of EC, OC and particle−phase PAHs emissions from a diesel engine fueled with three fuels [J]. Science of The Total Environment, 2012,438:33−41.
[27] Cui M, Hou X X, Han Y X, et al. Real−world emissions and formation mechanism of IVOCs from biodiesel−fueled agricultural machinery [J]. Environmental Science & Technology, 2025,59(18):9017−9026.
[28] Han Y X, Hou X X, Zhang F, et al. Emission inventory of IVOCs from diesel engine emissions in China based on real−world measured data [J]. Science of the Total Environment, 2024,954:176683.
[29] Huang C, Hu Q Y, Li Y J, et al. Intermediate volatility organic compound emissions from a large cargo vessel operated under real−world conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(21):12934−12942.
[30] Zhang F, Chen Y J, Chen Q, et al. Real−world emission factors of gaseous and particulate pollutants from marine fishing boats and their total emissions in China [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(21):4910−4919.
[31] Ruzicková J, Kucbel M, Raclavská H, et al. Comparison of organic compounds in char and soot from the combustion of biomass in boilers of various emission classes [J]. Journal of Environmental Management, 2019,236:769−783.
[32] Han Y, Chen Y J, Ahmad S, et al. High time− and size−resolved measurements of PM and chemical composition from coal combustion: implications for the EC formation process [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52:6676−6685.
[33] Wang B, Or W H, Lee S C, et al. Characteristics of particle emissions from light duty diesel vehicle fueled with ultralow sulphur diesel and biodiesel blend [J]. Atmospheric Pollution Research, 2021,12(9):101168.
[34] Zhang Y H, Lou D M, Tan P Q, et al. Effects of waste−cooking−oil biodiesel blends on diesel vehicle emissions and their reducing characteristics with exhaust after−treatment system [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,381:135178.
[35] Liu Z D, Lian T Y, Li W, et al. Mini review of current combustion research progress of biodiesel and model compounds for gas turbine application [J]. Energy & Fuels, 2021,35(17):13569−13584.
[36] Jayaram V, Agrawal H, Welch W A, et al. Real−time gaseous, PM and ultrafine particle emissions from a modern marine engine operating on biodiesel [J]. Environmental Science & Technology, 2011,45:2286−2292.
[37] Li C, Cui M, Zheng J Y, et al. Variability in real−world emissions and fuel consumption by diesel construction vehicles and policy implications [J]. Science of The Total Environment, 2021,786:147256.
[38] Tsai J H, Chen S J, Huang K L, et al. Tailpipe emissions and fuel consumption of a heavy−duty diesel vehicle using palm oil biodiesel blended fuels [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,179:237−243.
[39] 黄　成,胡磬遥,鲁　君.轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究 [J]. 环境科学, 2018,39(7):3110−3117.
Huang C, Hu Q Y, Lu J. Measurement study on OC and EC emission factors from light−duty gasoline vehicles [J]. Environmental Science, 2018,39(7):3110−3117.
[40] Qian Z, Chen Y J, Liu Z Y, et al. Intermediate volatile organic compound emissions from residential solid fuel combustion based on field measurements in rural China [J]. Environmental Science & Technology, 2021,55(9):5689−5700.
[41] Hao J, Wu G, Li T, et al. Correction to Characteristics of particulate matter emissions from a low−speed marine diesel engine at various loads [J]. Environmental science & technology, 2020,54(4):2561.
[42] 向　璇,孔少飞,程　溢,等.典型工程机械排放碳质气溶胶组成特征研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(3):1035−1043.
Xiang P, Kong S F, Cheng Y, et al. Study on compositions of carbonaceous aerosols emitted by typical construction machinery [J]. China Environmental Science, 2023,43(3):1035−1043.
[43] 桂小亮.柴油车尾气与路边环境空气超细颗粒物粒径分布及其化学组分特征研究 [D]. 广州:暨南大学, 2022.
Gui X L. Study on particle size distribution and chemical composition characteristics of diesel vehicle exhaust and roadside ambient ultrafine particles [D]. Guangzhou: Jinan University, 2022.
[44] Han Y M, Lee S C, Cao J J, et al. Spatial distribution and seasonal variation of char−EC and soot−EC in the atmosphere over China [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(38):6066−6073.
[45] Tong Y L, Gao J J, Wang K, et al. Highly−resolved spatial−temporal variations of air pollutants from Chinese industrial boilers [J]. Environmental Pollution, 2021,289:117931.
[46] Zhuang M H, Wang X, Yang Y, et al. Agricultural machinery could contribute 20% of total carbon and air pollutant emissions by 2050 and compromise carbon neutrality targets in China [J]. Nature Food, 2025, https://doi.org/10.1038/s43016−025−01163−6.

作者简介：崔　敏(1989−),女,安徽合肥人,副教授,博士,主要从事典型大气污染源排放特征研究.发表论文 20 余篇.mcui@yzu.edu.cn.