DOI:10.19789/j.1004-9398.2025.03.011
文献引用:屈林臻,崔阳阳,黄广寒,等.国内外零排放工程机械推广做法及启示[J].首都师范大学学报(自然科学版),2025,46(3):75-80. QU L Z,CUI Y Y,HUANG G H,et al. Promotion practice and implication of domestic and abroad zero-emission construction machinery [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2025,46(3):75-80.

国内外零排放工程机械推广做法及启示

屈林臻[1,2],崔阳阳[2],黄广寒[2],易华炜[2],李 菡[2],朱利军[2],薛亦峰[2*]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;
2. 北京市生态环境保护科学研究院,北京 100037)

摘要:燃油工程机械应用广泛、数量多,燃料燃烧过程中会排放大量大气污染物和温室气体,推广应用零排放机械是碳污协同控制的重要路径。本文量化并评估了使用零排放机械带来的环境减排效益,总结了国内外零排放工程机械的推广做法和经验,分析国内推广应用中存在的困难和问题,产生了对未来城市推广应用零排放工程机械的启示。结果表明:相对于燃油机械,零排放机械的使用具有显著的污染减排效应,其中CO_2、挥发性有机物(VOCs)和NO_x排放分别减少99.8%、99.0%~99.5%和93.2%~93.9%。当前国内外均有对工程机械全生命周期管理实施经济措施和非经济措施来推广应用零排放机械的经验,但仍存在技术性能低、购置成本高、市场不成熟、配套设施不完备等问题,建议采取财政激励,提高产品标准和明确目标等措施,推广零排放工程机械,实现碳污协同控制。

关键词:工程机械;零排放;大气污染;温室气体;经验启示
中图分类号:X511 **文献标志码**:A

Promotion practice and implication of domestic and abroad zero-emission construction machinery

QU Linzhen[1,2], CUI Yangyang[2], HUANG Guanghan[2], YI Huawei[2], LI Han[2], ZHU Lijun[2], XUE Yifeng[2*]

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048;
2. Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037)

Abstract: Fuel-powered construction machinery is widely used and numerous, and generates a large number of air pollutant and greenhouse gas emissions during fuel combustion process. The promotion and application of zero-emission machinery is the important path for collaborative control of carbon and air pollutant emissions. This paper quantifies and evaluates the environmental emission reduction benefits brought about by the use of zero-emission machinery, summarizes the promotion practices and experiences of zero-emission construction machinery at home and abroad, analyzes the difficulties and problems in promoting application in China, and generates insights into the future promotion and application of zero-emission construction machinery in cities. The results show that, compared with fuel machinery, the use of zero-emission machinery has a significant pollution reduction effect, in which CO_2 emissions are reduced by 99.8%, volatile organic compounds (VOCs) emissions are reduced

收稿日期:2024-01-11
*通信作者:xueyifeng@cee.cn

by 99.0% to 99.5% and NO_x emissions are reduced by 93.2% to 93.9%. At present, both domestic and foreign regions have the experience of implementing economic and non-economic measures to promote the application of zero-emission machinery for the whole life cycle management of construction machinery. However, there are still problems such as low technical performance, high acquisition cost, immature market, incomplete supporting facilities and so on. It is recommended that energizing financial, improving product standards and clearing targets could be adopted to promote zero-emission construction machinery and achieve the goal of synergistic carbon pollution control.

Keywords: non-road construction machinery; zero emission; air pollution; greenhouse gases; promotion practice and implication

CLC: X511 **DC**: A

0 引 言

工程机械是指在房屋、市政、道路、水利和园林等各类工程建设中广泛应用的挖掘、铲土运输和工程起重机械等,通常以柴油发动机为动力,在燃烧过程中产生大量大气污染物,如碳氢化合物、氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)等,以及温室气体,如CO_2、CH_4和N_2O等,对环境空气质量和气候产生显著影响[1-3]。根据《2023年中国移动源管理年报》,2022年燃油工程机械排放的HC、NO_x和PM排放量分别为10.6、134.9和7.1万t,占非道路移动源排放总量的25.0%、28.5%和30.6%[4]。

燃油工程机械的排放问题已成为研究的重点领域。国内外已有学者对工程机械污染减排问题进行研究[5-6]。推广零排放工程机械被认为是减排的重要途径,最常见的是采用电池、燃料电池的机械,机械电动化可以显著减少污染物排放[7-9]。多项研究探讨了机械电动化的实现方式,并验证了其在降低排放和燃料消耗方面的效果[10-13]。未来非道路机械的排放仍将维持在较高水平,推广零排放工程机械的应用是实现碳污协同控制的关键路径[13]。

尽管对零排放工程机械的重要性已有广泛共识,但对其推广经验的总结和探讨仍显不足。因此,本研究量化了使用零排放机械的环境减排效益,分析了国内外零排放工程机械的推广实践和经验,归纳了其在生产、使用和淘汰等不同阶段的主要推广措施。此外,还对比了国内外推广做法的差异,分析了当前零排放机械推广中存在的问题与挑战,为进一步推广应用提供参考与启示。

1 使用零排放工程机械的减排效益

使用零排放工程机械对于区域具有明显的大气污染和碳减排效果,如果不考虑电力的间接排放,主要大气污染物和温室气体的减排将达到100%。即使将零排放机械所使用的电力在生产过程中的远端大气污染物和温室气体排放纳入考量,其整体减排效益依然显著。

根据《城市大气污染物排放清单编制技术手册》[14]提供的电力生产排放因子,煤炭、天然气排放因子的单位分别为g/kg、g/m³,按照单位煤炭((kW·h)/kg)和天然气((kW·h)/m³)平均发电量对挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)、CO和NO_x进行折算,获得与燃油机械相对应单位的排放因子(单位为g/(kW·h)),CO_2排放因子根据柴油碳排放因子和省级电网碳排放因子确定。结合机械额定功率(单位为kW),核算得到不同燃料情景下机械排放强度(单位为g/h),见表1。

表1 不同燃料情景机械CO_2及污染物排放强度对比

单位:g/h

燃料情景	CO_2	VOCs	CO	NO_x
燃油机械	21 918.21	38.23	178.83	226.93
燃煤发电	22.76	0.44	22.20	90.92
燃气发电	22.76	0.08	4.87	15.35

注:VOCs为挥发性有机物。

分别对比燃煤发电、燃气发电情景下CO_2、VOCs、CO和NO_x减排比例。结果显示,燃煤发电和燃气发电情景下,CO_2排放均减少了99.8%;在燃煤发电情景下VOCs下降比例为98.8%~99.0%,CO下降了84.3%~87.6%,NO_x下降比例相对较小,为59.9%~63.8%;燃气发电情景下污染物下降比例有所增加,VOCs、CO和NO_x分别下降了99.0%~99.5%、97.3%和93.2%~93.9%。可见使用零排放工程机械,具有明显的大气污染和碳减排效益。

2 国外零排放机械推广经验

本文参考国际交通委员会研究报告《推广零排放非道路机械》中的分类思路[15],分别从设定零排放目标和划定低排区等非经济手段和投资激励、税收优惠等经济手段,归纳总结了国外零排放机械推广经验。通过对比各国家或地区的措施,在推动零排放机械的普及与应用方面,美国、加拿大和欧盟等采取了多种经济和非经济手段。本文按照机械的全生命周期,对国外推广经验进行介绍。

2.1 生产阶段措施

(1)设定零排放目标,有利于推动零排放工程机械的使用。英国伦敦的目标是到2040年实现建筑工地零排放[16]。美国加利福尼亚州要求在可行的情况下到2035年实现该州非道路车辆和设备100%零排放[17];美国纽约设定的目标是到2035年在售的所有新乘用车和卡车实现零排放[18]。加拿大要求到2030年,燃料用的汽油和柴油碳排放强度降低15.0%[19]。挪威在气候应对中计划2025年市政当局的建筑和施工活动必须实现零排放,2030年城市所有建设活动实现零排放[20]。

(2)进行投资激励,有助于推动零排放机械的生产和供应。通过直接经济激励,对购买或租赁零排放机械的个人和企业进行补贴,从而降低购置成本,提升购买意愿。美国加利福尼亚州推出了清洁非道路机械代金券激励项目;荷兰则实施了清洁零排放建筑设备补贴政策。这些措施旨在通过降低成本,激励公民和企业更多地采购零排放工程机械。

(3)制定零排放工程机械产品标准。零排放机械产品还需要具备良好的能源利用效率和性能,才能可持续地替代燃油机械的使用。因此,制定零排放工程机械产品标准,规定其能源效率、电池容量及充电技术效能等指标,可促进零排放机械性能提升和技术进步。2021年英国伦敦发布技术指南对零排放工程机械产品进行标准化要求,列举了不同技术类型推荐使用的发动机型号,以及不同场景下工程机械需要满足的要求[21]。

(4)给予税收优惠和公共采购优先。由于零排放工程机械的研发成本较高,其购置成本相较于燃油机械也相应增加。欧盟实施了差异化的碳税政策,对零排放机械免征碳税,通过税收优惠,提高零排放机械的产品竞争力,进而推广零排放工程机械的应用[22]。例如法国自2019年起不再对非道路柴油机械减免税收[23]。

此外,公共采购也是推动零排放机械需求的重要手段,能够刺激市场对该类产品的主动投资。欧盟在2023年3月启动了“大买家合作项目”,旨在支持具有强大购买力的公共采购方之间的合作,并通过战略性公共采购来提供创新和可持续的解决方案,其中“零排放建筑工地”是一个重要主题[24]。

2.2 使用阶段措施

(1)划定零排放区和低排放区。英国伦敦是全球首个设立非道路移动机械低排放区的城市,要求工程机械满足PM_{10}和NO_x的排放标准,到2020年排放量减少约40.0%;伦敦的长期目标是到2040年实现建筑工地的零排放[25]。截至2022年,欧洲已设立了超过320个低排放区,并逐步扩展到非道路移动机械的排放控制[26]。

(2)加强充电设施投资和建设。完善充电设施及其配套建设对于零排放机械的应用具有重要意义。挪威奥斯陆规定,在零排放工地施工工作开始前,电网公司必须负责铺设必要的电缆,并安装变电站等适应施工现场电力需求的必要设备。此外,欧盟也已发布相关条例[27],旨在提供最低限度的充电基础设施,以消除公众对机械充电问题的担忧,并增强公众对电动机械的信任和使用信心。

(3)示范项目推动。开展示范项目可向公众证明零排放建筑工地的可行性,有助于推广零排放工程机械的应用。2019年,挪威奥斯陆启动了全球首个零排放建筑工地项目,全程使用电动机械,显著减少了柴油消耗量和温室气体排放[28]。美国加利福尼亚州在2018年签署了碳中和令,推动了零排放挖掘机、装载机试点项目[29]。零排放建筑工地项目在全球范围内得到越来越多地关注和实施,为降低污染物排放和减缓气候变化做出了积极贡献。

2.3 淘汰报废阶段措施

老旧柴油工程机械排放污染较大,但由于机械使用寿命长,许多老旧高排放机械仍在使用,因此在机械淘汰报废阶段,可采取经济补贴政策,鼓励消费者淘汰高排放机械,购置零排放机械。美国为加快淘汰高排放机械,采取了柴油机减排法案,该法案给美国环保署拨款以促进柴油机减排,其中70.0%用于美国环保署认证的柴油机减排项目,30.0%分配给各州进行柴油机减排计划,例如加利福尼亚州、宾夕法尼亚州、缅因州和怀俄明州和得克萨斯州等在这方面均采取了行动[30]。

3 国内零排放机械推广现状及存在问题

3.1 国内推广现状

零排放工程机械的推广在国外已成为减少碳排放的重要手段,相较之下,我国在零排放推广方面虽已取得一定进展,但当前推广措施局限于使用阶段和淘汰报废阶段,使用阶段仅采用了划定低排区和达标监管的方法,淘汰报废阶段主要采取老旧机械淘汰或购置零排放机械补助政策。

3.1.1 使用阶段措施

(1)划定低排放区。截至2022年底,我国包括北京、天津和上海等在内的315个地级及以上城市已划定了非道路移动机械低排放控制区,并对于违反规定的行为给予处罚[4]。例如《北京市大气污染防治条例》规定"在禁止区域内使用高排放非道路移动机械的,由环境保护行政主管部门责令停止违法行为,处5万元以上10万元以下罚款"[31]。

(2)通过达标监管反向推动。燃油机械的污染物排放会随使用时长的增加逐步劣化,污染物排放容易超标。例如老旧柴油机械尾气的烟度是国四阶段机械的1.6~3.3倍,排放更多的颗粒物和气态污染物[32]。通过严格的排放达标监管和更高的执法监测频次,严惩排放超标的机械,可以有效推动高排放机械转向使用零排放机械,从而在一定程度上减少环境污染。严格的监管措施不仅能够倒逼企业主动采用更加清洁的技术和设备,还能加速零排放机械的普及和应用,有助于实现更清洁的工作环境和减污降碳协同发展。

3.1.2 淘汰报废阶段措施

为推动柴油机械向零排放转型,我国多省市发布了关于淘汰非道路老旧柴油机械的工作方案,以减少空气污染并促进实现碳中和目标。自2018年起,北京经济技术开发区、延庆区、门头沟区、丰台区和海淀区陆续发布了淘汰老旧柴油叉车并鼓励电动化的相关政策。这些政策主要依据叉车的额定载荷或电池容量,制定差异化的补助标准,鼓励企业或个人报废老旧燃油叉车并购置电动叉车。山东省出台了工作方案促进国一排放标准及以下非道路移动机械报废,推动了老旧机械的淘汰更新,促进其绿色低碳发展。深圳市对企业新购置的电动叉车进行补贴,叉车新能源化率达到68.5%。浙江省通过制定具体的推进方案,计划到2025年底基本淘汰国二排放标准及以下柴油叉车,并为机械新能源化制定了清晰的路线图。推行淘汰报废补助政策可促进工程机械电动化进程,提升大气环境质量,为可持续发展提供新的动力。

3.2 国内推广应用存在问题

在大气环境质量持续改善和温室气体排放控制的目标下,工程机械生产厂商开始布局零排放工程机械,国内部分地区也采取了一些措施促进使用端的推广应用,但与国外相比,我国在生产阶段和使用阶段的措施相对较少,导致零排放工程机械的推广效果不佳。存在的主要问题为:

(1)零排放机械的技术和性能难以满足需要。虽然零排放机械在环保性能上具备显著优势,但由于技术发展尚未完全成熟,其性能方面与柴油机械相比仍存在一定差距,无法满足对机械有较高性能要求的场景。例如,同级别挖掘机的电动产品功率和爬坡能力低于燃油产品、电池续航时间远小于燃油产品,从而影响作业效率和机械营收能力,尤其是中大型工程机械。

(2)零排放机械购置成本高。零排放机械的高经济成本主要来自电池、动力系统研发和相关设备。高容量电池和进口电气元件的使用增加了零排放机械的采购成本。

(3)零排放机械产品供给丰富度不足。尽管大部分厂商已推出零排放机械型号,但其种类选择有限,无法全面满足实际工程情况下的多样化需求。此外,压路机、推土机、摊铺机和平地机等零排放机械仍处于实验阶段,尚无成熟的市场化产品。此外,功率段覆盖度不够全面,特别是作业条件恶劣或功率负荷要求高的机械类别,如装载机和大型挖掘机,实现零排放仍面临较大难度。

(4)充电便利性较低。工程机械的作业地点通常不固定,多分布于电力供应有限的各种施工现场[33-36],且工程机械对电压的需求较高,对城市电网电力容量是一项挑战。安装充电设施不仅成本高昂,而且在实施上存在诸多困难。因此,充电不便成为推广零排放机械亟待解决的核心问题。

4 建议与措施

使用零排放工程机械能取得显著的减排效益,虽然国内外已有一些零排放工程机械推广和应用的成功经验,但对于作业工况条件较差、功率输出要求较高的工程机械类别(挖掘机、压路机等),零排放替代还存在较大难度。我国可以借鉴国外的

优秀经验,例如在生产阶段采取财政激励、提高产品标准和明确零排放目标,在使用阶段采取升级低排放区为零排放区等措施,促进零排放工程机械的推广和应用。

(1)建立财政激励措施。由于零排放技术研发成本高且未有规模化经济效应,零排放机械价格相对昂贵,财政激励是有效的推动措施。例如考虑在生产阶段给予税收优惠、生产补贴、投资激励,在使用阶段对基础设施进行投资补助等,降低企业制造成本,提高市场上零排放机械产品供给度。

(2)制定零排放工程机械产品标准。不合格或技术性能不佳的零排放机械产品会降低用户的使用倾向,因此建立具有明确导向作用的产品标准(功率、续航能力和充电接口等要求)势在必行:一是可以增加产品的可用性,满足不同场景的应用需求;二是确保产品品质,提高公众对零排放机械的信任度;三是推动产品技术进步,不断增强产品的先进性、适用性、可靠性和稳定性。

(3)明确零排放发展目标。政策制定者应根据区域"双碳"目标下的新能源比例规划,确定减排效果,并提前公布相关规划政策,量化具体目标,以向市场传递准确的信号,使市场发挥主观能动性,自主推广零排放工程机械的发展。

(4)划定零排放区域。为了进一步减少污染物的排放,改善大气环境,各地可探索在环境敏感区和碳热点地区设立零排放区(仅允许零排放机械使用),以更有针对性、有目的地加强对污染物排放的控制。

参 考 文 献

[1] WANG C D, DUAN W J, CHENG S Y, et al. Emission inventory and air quality impact of non-road construction equipment in different emission stages[J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: 14.

[2] 黄成,安静宇,鲁君.长三角区域非道路移动机械排放清单及预测[J].环境科学,2018,39(9):3965-3975.

[3] 周义学.工程机械在施工中的应用研究[J].工程建设与设计,2023(13):260-262.

[4] 生态环境部.中国移动源环境管理年报(2023年)[J].环境保护,2024,52(2):48-62.

[5] WEN C, LANG J, ZHOU Y, et al. Emission and influences of non-road mobile sources on air quality in China, 2000—2019[J]. Environmental Pollution, 2023, 324: 121404.

[6] 刘瑞媛,曹聪聪,郭栋,等.城市移动源排放特征及减排对策[J].交通科技与经济,2023,25(4):62-67.

[7] 孙景志,张家林.非道路移动机械排放污染的控制和治理[J].城市建设理论研究,2020(17):117+196.

[8] ZHU Y, FAN H. Use of biodiesel in non-road mobile machineries for low-carbon construction: policy review and lifecycle analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 421: 138543.

[9] DENSBERGER N L, BACHKAR K. Towards accelerating the adoption of zero emissions cargo handling technologies in California ports: lessons learned from the case of the Ports of Los Angeles and Long Beach[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 347: 131255.

[10] VU N L, MESSIER P, NGUYỄN B H, et al. Energy-optimization design and management strategy for hybrid electric non-road mobile machinery: a case study of snowblower[J]. Energy, 2023, 284: 129249.

[11] STAWIŃSKI Ł, ZAKHAROV V, KOSUCKI A, et al. Electromechanical actuator-based solution for a scissor lift[J]. Actuators, 2023, 12(10): 394.

[12] CAO T, RUSSELL R L, DURBIN T D, et al. Characterization of the emissions impacts of hybrid excavators with a portable emissions measurement system (PEMS)-based methodology[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 112-119.

[13] LAJUNEN A, SAINIO P, LAURILA L, et al. Overview of powertrain electrification and future scenarios for non-road mobile machinery[J]. Energies, 2018, 11(5): 1184.

[14] 中国环境科学学会.城市大气污染源排放清单编制技术指南[S/OL].[2024-01-11].https://www.chinacses.org/xw/gsgg/202308/W020230822432828039219.pdf.

[15] 邵臻颖,李今鉴.推广零排放非道路机械[EB/OL].(2023-10-15)[2024-01-11].https://www.theicct.org.cn/publication/off-road-incentives-briefing-oct23.

[16] SPARREVIK M, QIU X, STOKKE R A, et al. Investigating the potential for reduced emissions from non-road mobile machinery in construction activities through disruptive innovation [J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 31: 103187.

[17] Executive Department State Of California. Executive order N-79-20 [EB/OL]. (2020-09-23) [2024-01-11]. https://www. gov. ca. gov/wp-content/uploads/2020/09/9.23.20-EO-N-79-20-Climate.pdf.

[18] TEUMIM D. A look at hydrogen-fueled passenger trains [J]. Chemical Engineering Progress, 2022, 118(12): 29-33.

[19] Government of Canada. Clean fuel regulations (SOR/2022-140)[EB/OL].(2023-12-18)[2024-01-11].https://laws-lois. justice. gc. ca/eng/regulations/SOR-2022-140/index.html.

[20] Norwegian Environment Agency. Climate cure 2030 [EB/OL]. (2020-02-04) [2024-01-11]. https://www.miljodirektoratet. no/globalassets/publikasjoner/m1625/m1625.pdf.

[21] City of London. Guide to low emission and alternative power sources and technologies for non-road mobile machinery in greater London [EB/OL]. (2021-03-10) [2024-01-11]. https://www. cityoflondon. gov. uk/assets/Services-Environment/Non-road-mobile-machinery-guide-2021.pdf.

[22] TVINNEREIM E, MEHLING M. Carbon pricing and deep decarbonisation [J]. Energy Policy, 2018, 121: 185-189.

[23] DROLSBACH C P, GAIL M M, KLOTZ P A. Pass-through of temporary fuel tax reductions: evidence from Europe[J]. Energy Policy, 2023, 183: 113833.

[24] EUROCITIES. Big buyers for climate and environment [EB/OL].(2023-03-11)[2024-01-11].https://eurocities.eu/projects/big-buyers-initiative/.

[25] WILLIAMSON A, FINNEGAN S. Sustainability in heritage buildings: can we improve the sustainable development of existing buildings under approved document L?[J]. Sustainability, 2021, 13(7): 3620.

[26] AZDAD Z, STOLL B, MÜLLER J. The development trends of low and zero-emission zones in Europe [EB/OL]. [2024-01-11]. https://cleancitiescampaign. org/wp-content/uploads/2022/07/The-development-trends-of-low-emission-and-zero-emission-zones-in-Europe-1.pdf.

[27] SOONE J. Deployment of alternative fuels infrastructure: fit for 55 package[EB/OL].[2024-01-11]. https://www. europarl. europa. eu/RegData/etudes/BRIE/2021/698795/EPRS_BRI(2021)698795_EN.pdf.

[28] 李腾.零排放建筑工地来临新能源工程机械有多远[J].今日工程机械,2022(2):26-27.

[29] 杨君.美国联邦和地方的气候治理[J].世界环境,2023(4):84-85.

[30] United States Environmental Protection Agency. Diesel emissions reduction act (DERA) funding [EB/OL]. (2024-07-17)[2024-09-24]. https://www.epa.gov/dera.

[31] 北京市生态环境局.北京市大气污染防治条例[EB/OL]. (2018-03-30) [2024-01-11]. https://sthjj. beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/zfxxgk43/fdzdgknr2/zcfb/flfg27/325829281/index.html.

[32] YI H W, CUI Y Y, ZHU L J, et al. Smoke and NO_x emission characteristics of in-use construction machinery base on substantial field measurement: a case study in Beijing, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 149: 386-393.

[33] 陈以林,沈杜烽,杜海明."碳达峰"背景下工程机械动力发展趋势研究[J].现代车用动力,2022(1):11-13+40.

[34] 聂浩,沈文平.电动工程机械推广应用研究[J].建筑机械化,2022,43(5):19-21.

[35] 牛彦峰.非道路移动机械电动化现状与发展[J].山西交通科技,2023(2):113-116+120.

[36] 张玉香.电动工程机械的现状及展望[J].内燃机与配件,2023(10):107-109.

(责任编辑:李拓宇)