



中国汽车技术研究中心有限公司
China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd.



中国非道路移动机械低碳排放的潜力 分析及政策建议

Analysis of the low carbon emission potential of China's
non-road mobile machinery and policy recommendations

南开大学，中国汽车技术研究中心有限公司

2023.10

**Nankai University, China Automotive
Technology and Research Center Co., Ltd**

October, 2023

金陶胜，南开大学副教授

研究重点是车辆排放控制、空气污染控制等。到目前为止，以第一作者或通讯作者身份在 *Journal of hazardous materials*, *Science of the total environment*, *Energy*, *Journal of management* 等国内外期刊上发表了 50 多篇论文。

Emial: jints@nankai.edu.cn

李勇，中国汽车技术研究中心有限公司中级工程师

研究重点是基于物联网及大数据分析的重型柴油车及柴油机械排放跟踪技术研究及应用示范、交通道路排放通量核算与评估等。

Emial: liyong@catarc.ac.cn

Taosheng Jin, associate professor of Nankai University

Research focuses on vehicle emission control, air pollution control, etc. So far, as the first author or corresponding author, he has published more than 50 papers in domestic and foreign journals such as Journal of hazardous materials, Science of the total environment, Energy, Journal of management, etc.

Emial: jints@nankai.edu.cn

Yong Li, intermediate Engineer of China Automotive Technology and

Research Center Co., Ltd

The research focuses on the research and application demonstration of heavy-duty diesel vehicle and diesel machinery emission tracking technology based on Internet of Things and big data analysis, and the accounting and evaluation of traffic road emission flux.

Emial: liyong@catarc.ac.cn

致谢

本研究由南开大学和中国汽车技术研究中心有限公司统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of Nankai University and China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd and is funded by Energy Foundation China.

目 录

第一章 前言	1
第二章 非道路移动机械的生产和销售情况	2
1 工程机械产销情况	3
第三章 安徽省和河南省农业机械使用现状	3
1 安徽省柴油农业机械使用现状调查研究	4
1.1 安徽省柴油农业机械年活动水平分布	4
1.2 安徽省柴油农业机械小时油耗分布	7
1.3 安徽省柴油农业机械油耗速率分布	8
1.4 安徽省柴油农业机械年耗油量分布	9
2 河南省柴油农业机械使用现状调查研究	9
2.1 河南省柴油农业机械年活动水平分布	9
2.2 河南省柴油农业机械小时油耗分布	12
2.3 河南省柴油农业机械油耗速率分布	14
2.4 河南省柴油农业机械年耗油量分布	14
第四章 国外非道路机械低碳化的现状、政策和管理	15
1 国外低碳/零碳非道路移动机械的发展情况	15
1.1 美国低碳/零碳非道路移动机械的发展情况	15
1.1.1 建筑机械	15
1.1.2 农业机械	16
1.1.3 叉车	16
1.2 欧洲低碳/零碳非道路移动机械的发展情况	16
1.2.1 叉车	16
1.2.2 高空作业平台	16
1.2.3 挖掘机	17
1.2.4 装载机	17
1.2.5 混凝土搅拌车	17
2 国外低碳/零碳非道路移动机械的推广政策	18
2.1 美国低碳/零碳非道路移动机械的推广政策	18
2.2 欧盟低碳/零碳非道路移动机械的推广政策	18
2.3 日本低碳/零碳非道路移动机械的推广政策	19
2.4 印度低碳/零碳非道路移动机械的推广政策	19
第五章 中国非道路机械低碳化的政策和管理	20
1 中央及行业层面的相关政策与规定	20
2 各地政府层面的相关政策与规定	21
第六章 京津冀地区非道路移动机械使用现状	23
1 京津冀地区非道路移动机械保有量调查研究	23
3 京津冀地区不同类型机械的排放贡献	27
4 京津冀地区不同排放标准机械的排放贡献	29
5 京津冀地区非道路移动机械空间排放特征分析	30
6 京津冀区域非道路移动机械 CO ₂ 减排潜力分析	31
第七章 机械电动化可行性分析	34

1 机械电动化政策需求的背景.....	34
2 机械电动化的市场需求背景.....	35
3 电动机械的发展情况.....	37
4 机械电动化场景与方向分析.....	39
4.1 工程机械作业场景选择.....	39
4.2 工程机械电动化技术水平.....	41
4.2.1 当前技术水平下电动化对于机械结构设计的影响.....	42
4.2.2 当前技术水平下电动化对一次购买费用的影响.....	43
4.2.3 当前技术水平下电动化对充电能力的需求.....	44
4.2.4 当前市场价格下电动化对充电桩建设的需求.....	45
4.2.5 当前市场价格下电动机械与燃油机械的使用费用分析.....	45
第八章 总结与政策建议.....	47
1 总结.....	47
2 政策建议.....	48
参考文献.....	49

图目录

图 1 安徽省柴油农业机械功率段分布	4
图 2 安徽省柴油农业机械年活动水平分布	4
图 3 功率与年活动水平分布散点图	5
图 4 全功率段年活动水平频数分布直方图	5
图 5 < 37 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图	5
图 6 37- 75 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图	6
图 7 75- 130 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图	6
图 8 >130 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图	6
图 9 安徽省柴油农业机械小时油耗分布	7
图 10 功率与小时油耗分布散点图	7
图 11 全功率段小时油耗频数分布直方图	8
图 12 安徽省柴油农业机械油耗速率分布	8
图 13 安徽省柴油农业机械年耗油量分布	9
图 14 河南省柴油农业机械功率段分布	9
图 15 河南省柴油农业机械年活动水平分布	10
图 16 功率与年活动水平分布散点图	10
图 17 全功率段年活动水平频数分布直方图	11
图 18 < 37 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图	11
图 19 37- 75 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图	12
图 20 75- 130 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图	12
图 21 >130 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图	12
图 22 河南省柴油农业机械小时油耗分布	13
图 23 功率与小时油耗分布散点图	13
图 24 全功率段小时油耗频数分布直方图	13
图 25 河南省柴油农业机械油耗速率分布	14
图 26 河南省柴油农业机械年耗油量分布	15
图 27 2011~2020 年京津冀区域不同工程机械类型需求量占比	24
图 28 京津冀区域非道路移动机械不同排放标准占比	25
图 29 2020 年北京市挖掘机月均活动小时数	27
图 30 京津冀区域不同类型工程机械的排放贡献占比	28
图 31 京津冀区域不同类型农业机械的排放贡献占比	29
图 32 京津冀区域不同排放标准机械的排放贡献占比	30
图 33 京津冀区域非道路移动机械分城市排放量	30
图 34 京津冀区域非道路移动机械排放空间分布	31
图 35 2025 年和 2030 年各排放情景下非道路移动机械的排放量	33
图 36 2025 年和 2030 年两种排放控制情景下非道路移动机械的减排潜力	33
图 37 2025 年和 2030 年两种排放控制情景下工程机械和农业机械的减排潜力	34
图 38 电动重型车销量与补贴的关系	36
图 39 城市电动重型车辆的销量分布	36
图 40 NO _x 与 PM 排放的快速测试法	39

图 41 典型叉车作业负荷点分布	40
图 42 典型装载机作业负荷点分布	40
图 43 典型挖掘机作业负荷点分布	41
图 44 切换铅酸电池产生的重量影响	42
图 45 切换锂电池产生的重量影响	42
图 46 切换铅酸电池产生的一次购买费用影响.....	43
图 47 切换锂电池产生的一次购买费用影响.....	43
图 48 不同机械-不同充电功率的充电时间分析	44
图 49 中国燃油价格构成.....	46
图 50 中国的工业电价举例	46

表目录

表 1 2018-2021 年工程机械产销情况	3
表 2 美国低碳/零碳非道路移动机械的推广政策	18
表 3 欧盟低碳/零碳非道路移动机械的推广政策	18
表 4 日本低碳/零碳非道路移动机械的推广政策	19
表 5 印度低碳/零碳非道路移动机械的推广政策	19
表 6 中央及行业层面的相关政策与规定	20
表 7 各地政府层面的相关政策与规定	21
表 8 2011~2020 年电动叉车需求率 (%)	23
表 9 2020 年京津冀区域非道路移动机械保有量 (万台)	24
表 10 工程机械的功率段分布比例 (%) 和平均功率 (kW) [21]	25
表 11 工程机械负载因子	25
表 12 农业机械平均功率 (kW) 及负载因子	26
表 13 工程机械和农业机械年活动小时数 (h)	27
表 14 快速法摸底排放	39
表 15 典型挖掘机能量需求	41
表 16 装载挖掘机能量需求	41
表 17 装载机能量需求	42
表 18 不同机械在不同充电功率下的时间计算	44
表 19 单一充电桩建设价格	45

第一章 前言

移动源是我国大气污染最重要的来源之一，包括道路移动源和非道路移动源。近些年，机动车的排放控制一直是环保部门工作的重点。政府已经发布了一系列控制车辆排放的措施，如限制私家车数量，油品和排放标准的升级，限号出行等，减排成效显著，机动车的排放呈现逐年下降的趋势^[1]。而非道路移动源虽然在保有量上远不及机动车，但是由于缺乏登记管理、发动机技术与排放标准相对滞后等原因，其对移动源的排放贡献日益凸显，尤其是氮氧化物（Nitrogen Oxides, NO_x ）和颗粒物（Particulate Matter, PM）。根据《中国移动源环境管理年报（2022年）》^[2]，2021年非道路移动源 NO_x 排放量略低于机动车（478.9万吨和582.1万吨），PM的排放量是机动车的3.4倍（23.4万吨和6.9万吨）。Wen等^[3]针对非道路移动源对空气质量的影响做了研究，结果表明2019年其对城市细颗粒物（Fine Particulate Matter, $\text{PM}_{2.5}$ ）、 NO_x 和 NO_3^- 的贡献率分别为5.2%、24.2%和15.3%，20年间贡献率分别增长了131.1%、43.9%和61.7%。此外，已经有学者对 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源解析进行了细化评估，例如非道路移动源是石家庄市采暖期 $\text{PM}_{2.5}$ 的第三大贡献者，贡献比例为13.8%^[4]。

非道路移动源通常包括工程机械、农业机械、船舶、铁路机车和飞机。其中工程机械和农业机械统称为非道路移动机械。近年来，随着城市化进程的推进，很多城市均开展了大量基础设施建设，工程机械的保有量迅速增加，2021年已有近千万台。同时，我国农业机械化水平逐年提高，2021年小麦和玉米综合机械化率分别达到97.3%和90.0%^[5]。农业机械柴油总动力2021年已达到107764万千瓦^[6]。工程机械和农业机械的大量应用导致了城市和乡村的大气污染加剧。2021年，非道路移动机械对非道路移动源 NO_x 和PM的排放贡献比例分别为64.9%和71.4%，其中农业机械贡献率比工程机械高4.9%和7.2%^[2]。除了大气污染物，非道路移动机械的柴油消耗量也很高，柴油燃烧后会产生大量二氧化碳（Carbon dioxide, CO_2 ），加剧温室效应。在碳达峰碳中和的背景下，其对 CO_2 的排放贡献同样也不容忽视。有研究指出安徽省农业机

械柴油消耗以及北京市工程机械柴油消耗分别占到当地柴油消耗总量的 25%和 23%左右^[7, 8]。

同欧美等国家相比，我国出台非道路移动机械排放标准的时间较晚，但发展较快。有研究表明排放标准的出台有效避免了 2008~2017 年间 4.4 Tg 的 NO_x 排放和 297.8 Gg 的 PM 排放^[9]。最新标准为 2022 年 12 月全面实施的国 IV 标准^[10]，该标准的限值对标欧盟 IIIB 标准和美国 Tier 4f 标准。国 IV 标准也首次将柴油车加装的后处理装置如柴油氧化催化器（Diesel Oxidation Catalyst, DOC）、选择性催化还原装置（Selective Catalytic Reduction, SCR）和柴油颗粒物过滤器（Diesel Particulate Filter, DPF）广泛应用于非道路移动机械，这将有助于降低单台机械的排放^[11]。此外，各地还采取了一系列针对非道路移动机械的排放管理政策和措施，比如北京市开展非道路移动机械编码登记管理，定期公开环保信息，并划定了城市禁止高排放区域^[12]。

除了对于常规大气污染物的排放控制，2018 年发布的《非道路移动机械污染防治技术政策》指出要进一步研究天然气、生物柴油等替代燃料的燃烧情况和排放特征，积极开展相关的排放控制技术研究；同时控制温室气体排放，逐步将 CO₂、氧化亚氮（Nitrous Oxide, N₂O）等温室气体纳入排放管理体系。此外，插电式混合动力汽车和电动汽车表现出较大的碳减排潜力，电动发动机在非道路机械领域的应用也值得关注，2020 年，电动叉车的市场渗透率已达 50%左右。《工程机械行业“十四五”发展规划》^[13]指出要进一步提高工程机械电动化比例，尤其是一些场内区域。

中国当前面临着来自大气污染和碳减排的多重压力，开展大气污染物和 CO₂ 的控制工作是我国积极应对气候变化、治理大气污染的重要途径之一。因此，对非道路移动机械开展关于低碳排放的潜力分析等方面的研究，可以为科学有效地制定非道路移动机械污染控制决策提供依据，对改善城市大气环境质量具有重要意义。

第二章 非道路移动机械的生产和销售情况

1 工程机械产销情况

表 1 2018-2021 年工程机械产销情况

产品名称	产、销 (台)	2021 年	2020 年	2019 年	2018 年
挖掘机 ^a	生产量	321245	326285	234948	214255
	销售量	321230	316704	233881	206646
装载机	生产量	137013	120865	116248	108983
	销售量	125482	119320	115580	107442
推土机 ^a	生产量	7167	5680	4984	7491
	销售量	6168	5444	4878	7595
平地机	生产量	5475	3091	2974	3396
	销售量	4629	3018	2940	3506
压路机	生产量	12120	13497	12506	9884
	销售量	11098	13061	12816	9785
摊铺机	生产量	1450	1601	1738	1284
	销售量	1424	1619	1788	1283
轮式起重 机 ^b	生产量	51670	55999	43846	32810
	销售量	51633	55560	45479	32597
履带起重 机	生产量	3348	3379	2308	1825
	销售量	3405	3306	1987	1833
塔式起重 机	生产量	43791	56243	23733	13359
	销售量	42988	58603	23148	12600
叉车 ^c	生产量	1184539	792635	601717	504339
	销售量	1254531	825847	613973	511603

a:含轮胎式

b:汽车起重机、轮胎起重机

c:内燃机、电动

第三章 安徽省和河南省农业机械使用

现状

1 安徽省柴油农业机械使用现状调查研究

1.1 安徽省柴油农业机械年活动水平分布

安徽地区共收集问卷 266 份，有效问卷 244 份，其中柴油机械 230 份，电动机械 14 份。在 230 份柴油农业机械问卷中，< 37 kW 机械 116 台，占比 51 %；37-75 kW 机械 64 台，占比 28 %；75-130 kW 机械 33 台，占比 14 %，> 130 kW 机械 17 台，占比 7 %（图 1）。

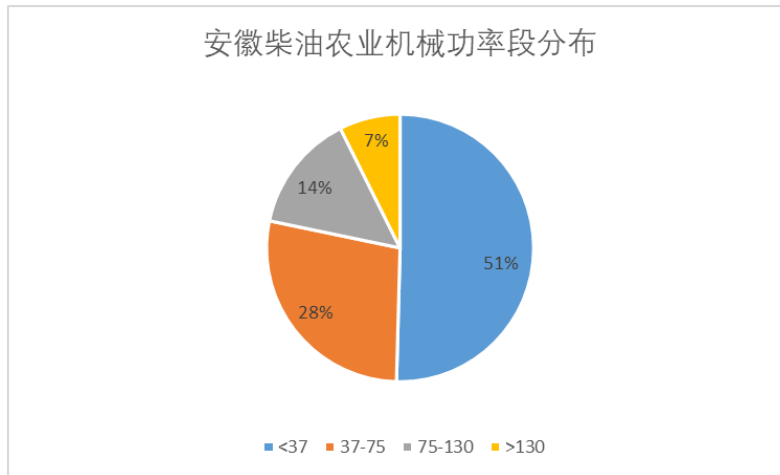


图 1 安徽省柴油农业机械功率段分布

< 37 kW 机械平均年活动水平 947.39 h，37-75 kW 机械平均年活动水平 698.45 h，75-130 kW 机械平均年活动水平 572.03 h，> 130 kW 机械平均年活动水平 1464 h（图 2）。

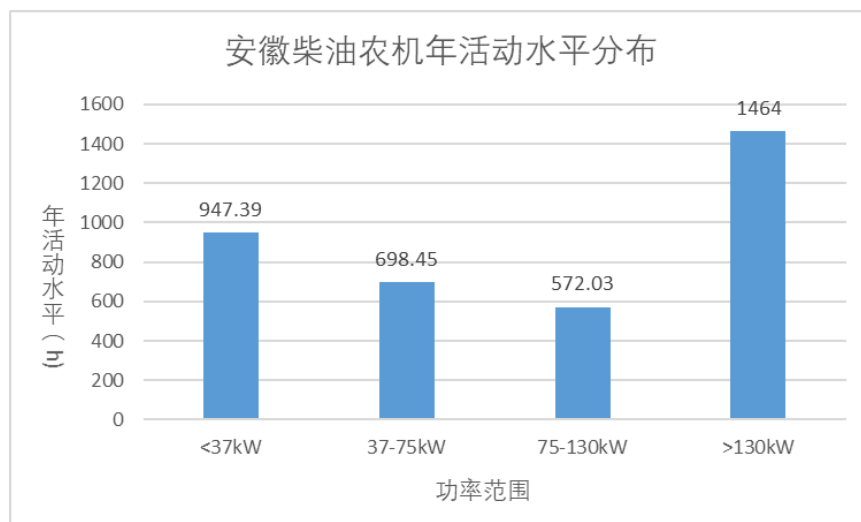


图 2 安徽省柴油农业机械年活动水平分布

按照功率和年活动水平对应关系，得到其分布散点图和全功率段年活动水平频数分布直方图如下如下：

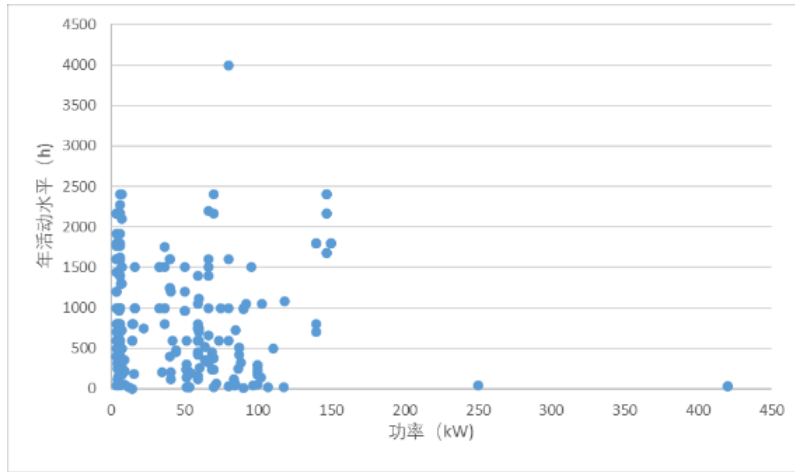


图 3 功率与年活动水平分布散点图

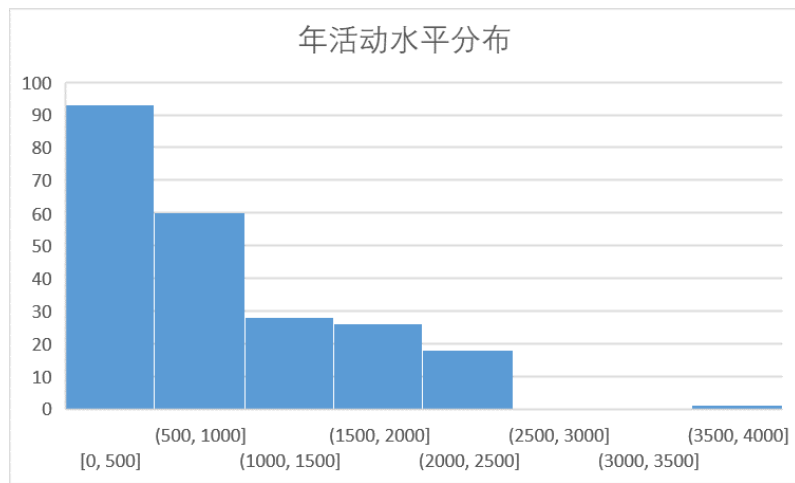


图 4 全功率段年活动水平频数分布直方图

大部分机械年活动水平都在 1000 h 以下，500 h 以下占最大比例，同时 < 37 kW 机械其分布较为不集中，为进一步展现功率和年活动水平的关系，绘制各功率段年活动水平分布直方图如下：

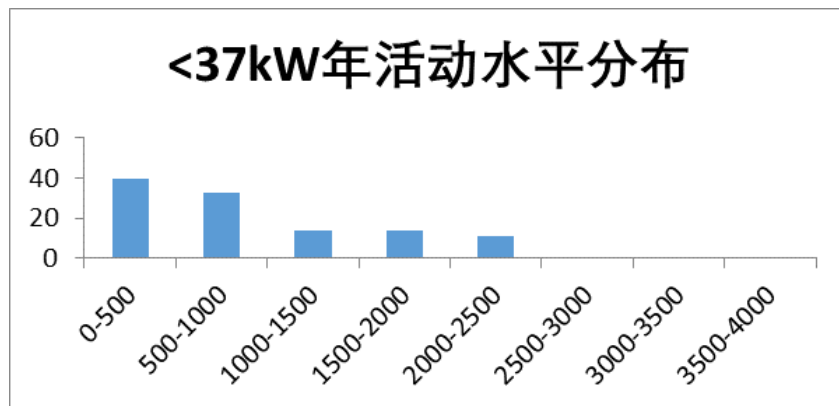


图 5 < 37 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图

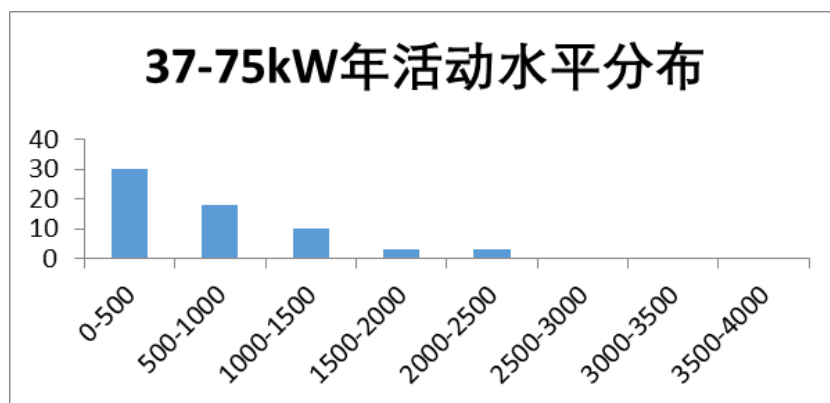


图 6 37- 75 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图

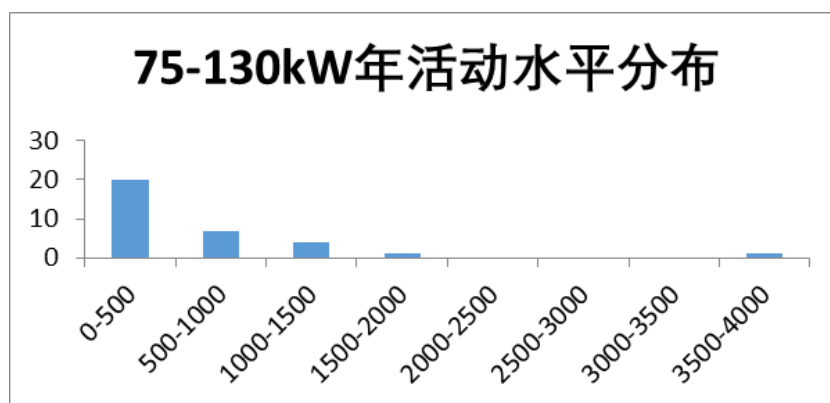


图 7 75- 130 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图

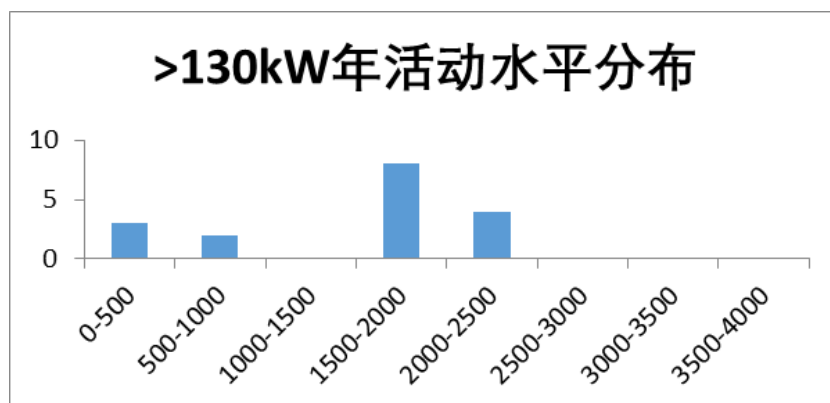


图 8 >130 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图

除 > 130 kW 机械和 < 37 kW 机械外，年活动水平集中分布在 0-500 h 的范围。< 37 kW 机械，则是 0-1000 h 占据最多，且由于数值大部分偏大，造成最终平均值仅次于 > 130 kW 机械；> 130 kW 机械年活动水平则是集中分布在 1500-2500 h。

1.2 安徽省柴油农业机械小时油耗分布

< 37 kW 机械平均小时油耗为 1.95 L/h；37-75 kW 机械平均小时油耗为 4.38 L/h，75-130 kW 机械平均小时油耗 8.67 L/h；> 130 kW 机械平均小时油耗 3.71 L/h。

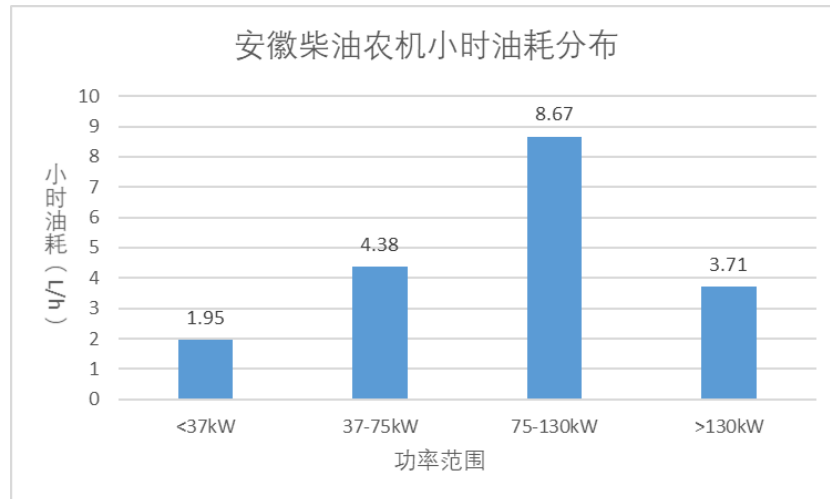


图 9 安徽省柴油农业机械小时油耗分布

按照功率和油耗速率的对应关系，绘制散点图和分布直方图如下：

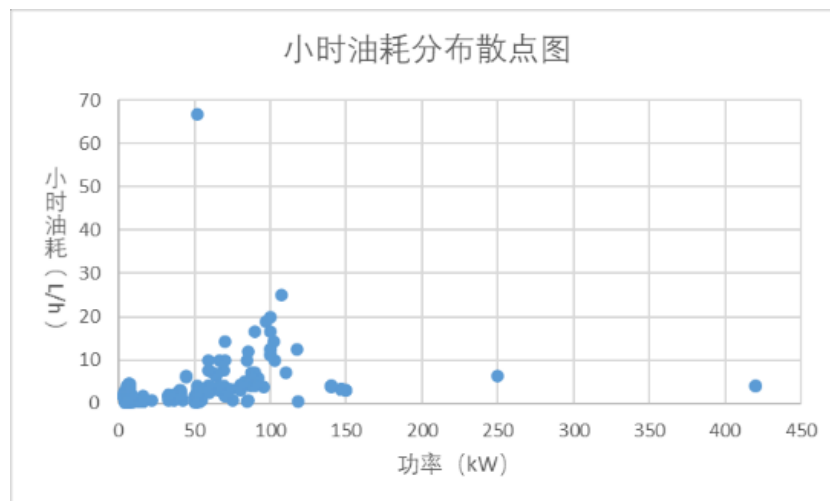


图 10 功率与小时油耗分布散点图

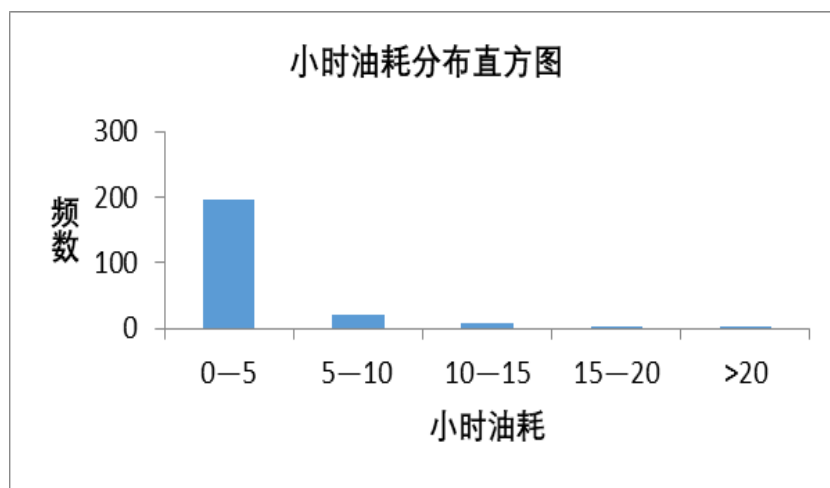


图 11 全功率段小时油耗频数分布直方图

从中可以看出大部分柴油机械小时油耗集中在 0-5 L/h 的范围之内，且小功率农业机械小时油耗分布较为集中，37 kW 以上分布开始逐渐变离散。> 130 kW 机械由于数据量较少，偏差太大，可信度较低。

1.3 安徽省柴油农业机械油耗速率分布

< 37kW 机械平均油耗速率 274.58 g/kWh，37-75 kW 机械平均油耗速率 64.66 g/kWh，75-130 kW 机械平均油耗速率 76.07 g/kWh，> 130 kW 机械平均油耗速率 18.73 g/kWh。

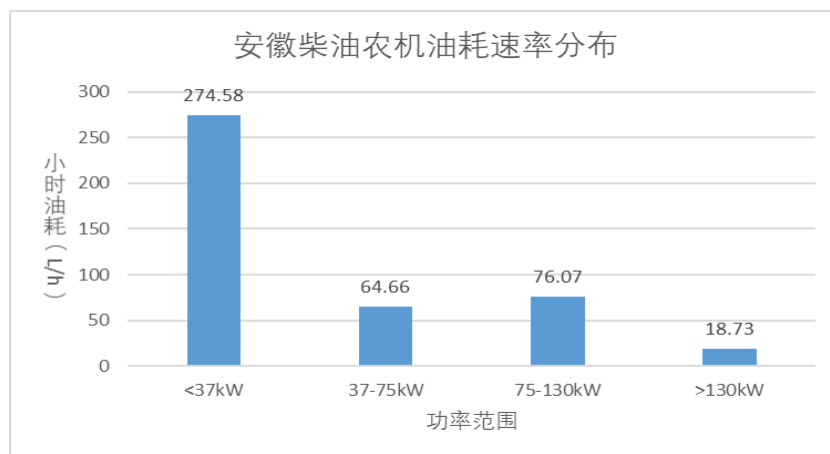


图 12 安徽省柴油农业机械油耗速率分布

整体油耗速率呈随着功率的提升下降的趋势，其中 37-75 kW 和 75-130 kW 功率段机械小时油耗较为接近。

1.4 安徽省柴油农业机械年耗油量分布

< 37 kW 机械平均年耗油量为 1074.88 kg，37-75 kW 机械平均年耗油量为 1186.15 kg，75-130 kW 机械平均年耗油量为 1624.9 kg，> 130 kW 机械平均年耗油量为 2727.42 kg，年耗油量随着农机功率的提升而提升。

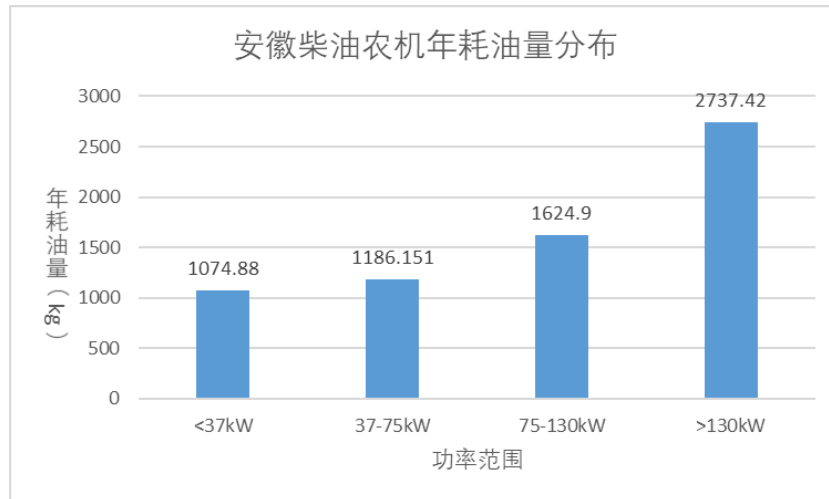


图 13 安徽省柴油农业机械年耗油量分布

2 河南省柴油农业机械使用现状调查研究

2.1 河南省柴油农业机械年活动水平分布

在 467 份柴油机械问卷中，有 334 台 < 37 kW，占比 72%；61 台介于 37-75 kW，占比 13%；45 台介于 75-130 kW，占比 10%，22 台 > 130 kW，占比 5%。

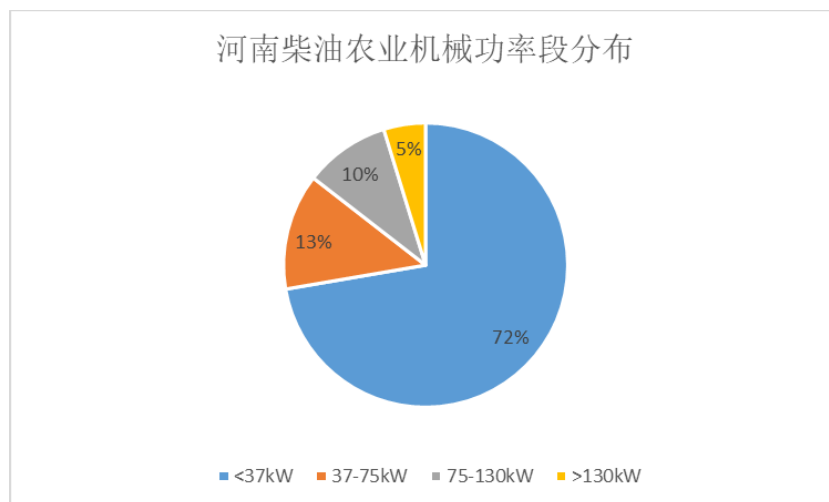


图 14 河南省柴油农业机械功率段分布

<37 kW 机械平均年活动水平 318.671 h，37-75 kW 机械平均年活动水平 450.95 h，75-130 kW 机械平均年活动水平 471.19 h，> 130 kW 机械平均年活动水平 693.16 h。

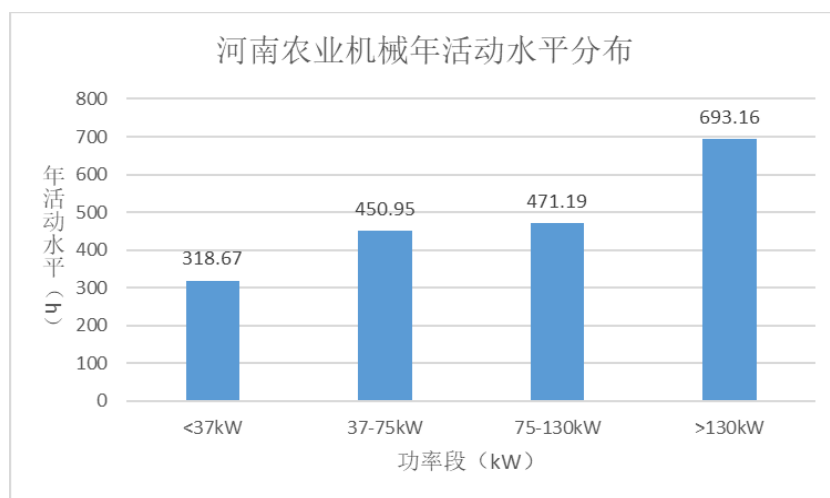


图 15 河南省柴油农业机械年活动水平分布

按照功率和年活动水平对应关系，得到其分布散点图和全功率段年活动水平频数分布直方图如下：

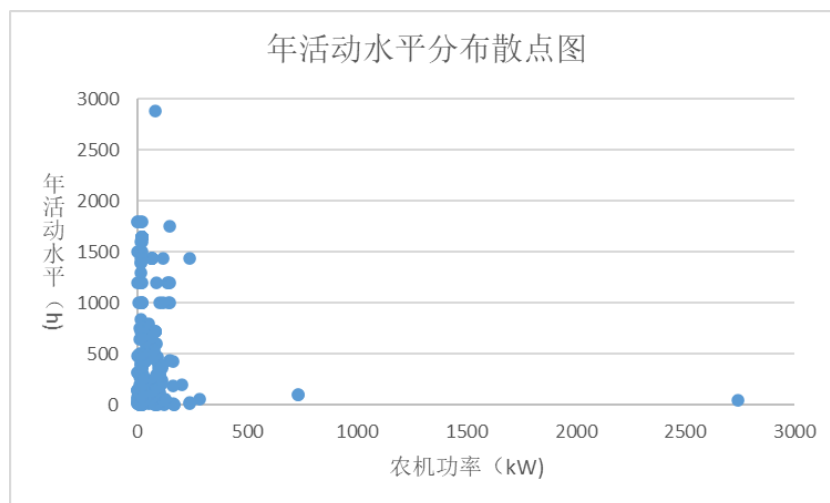


图 16 功率与年活动水平分布散点图

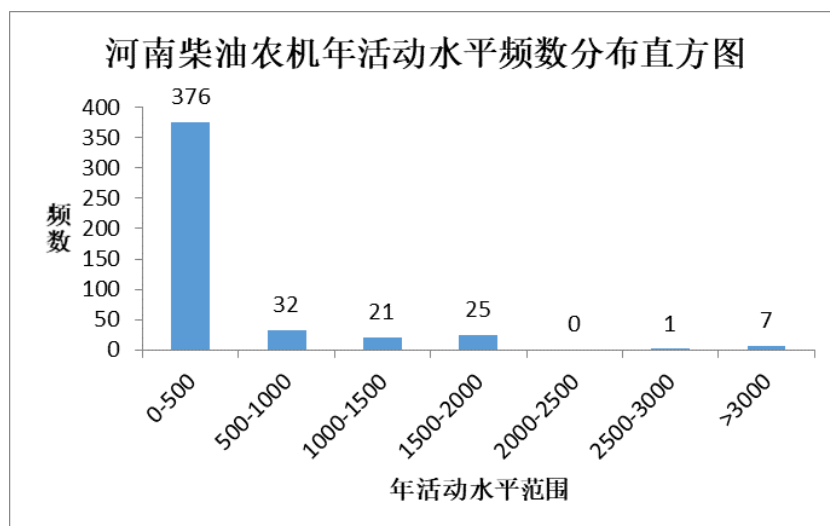


图 17 全功率段年活动水平频数分布直方图

除极少数极端值外，大部分柴油农业机械年活动水平介于 0-500 h 内，为分析功率对年活动水平的影响，分别得到四个功率段的年活动水平频数分布直方图如下：

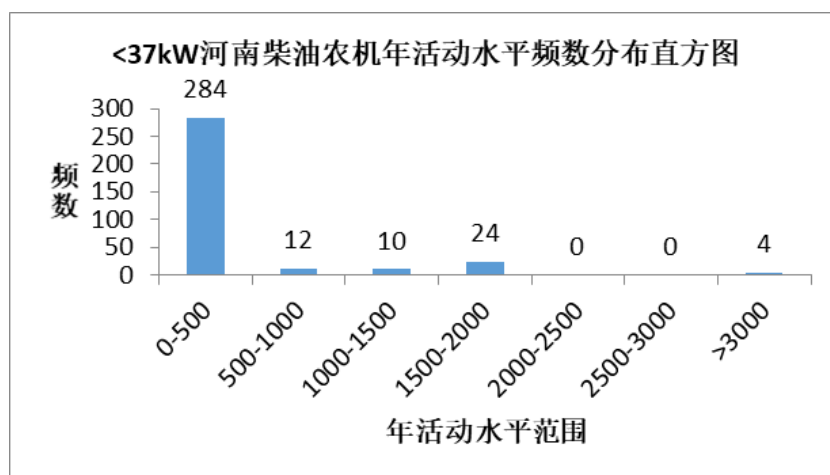


图 18 < 37 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图

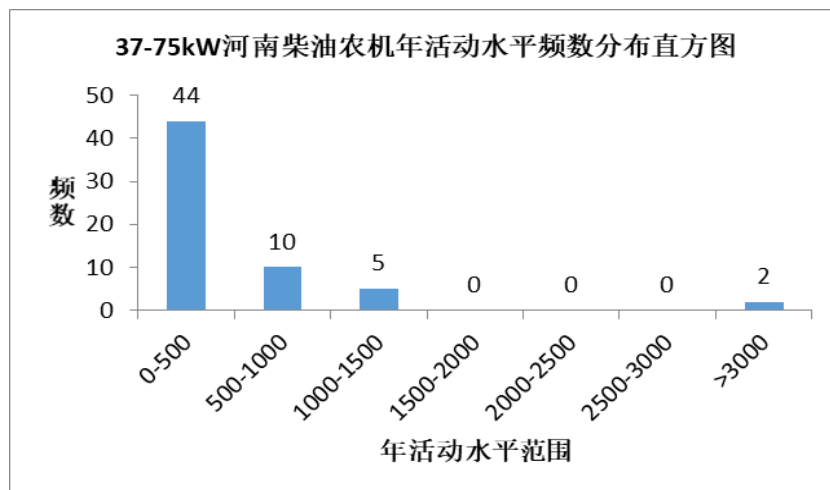


图 19 37- 75 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图

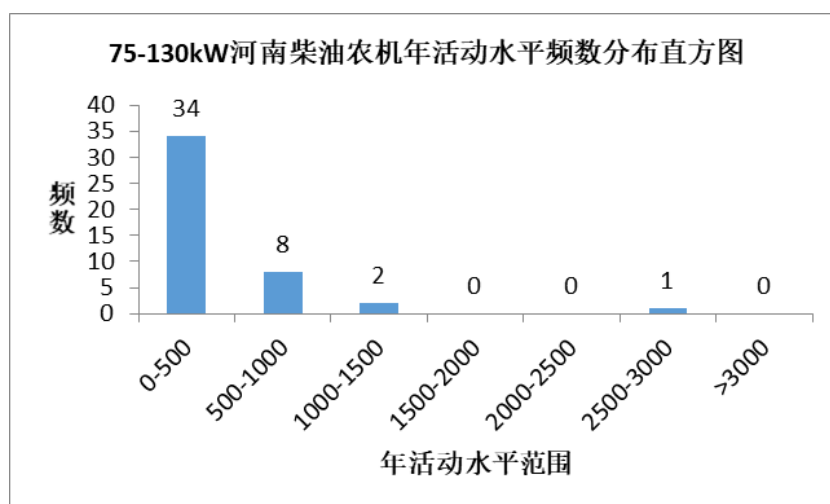


图 20 75- 130 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图

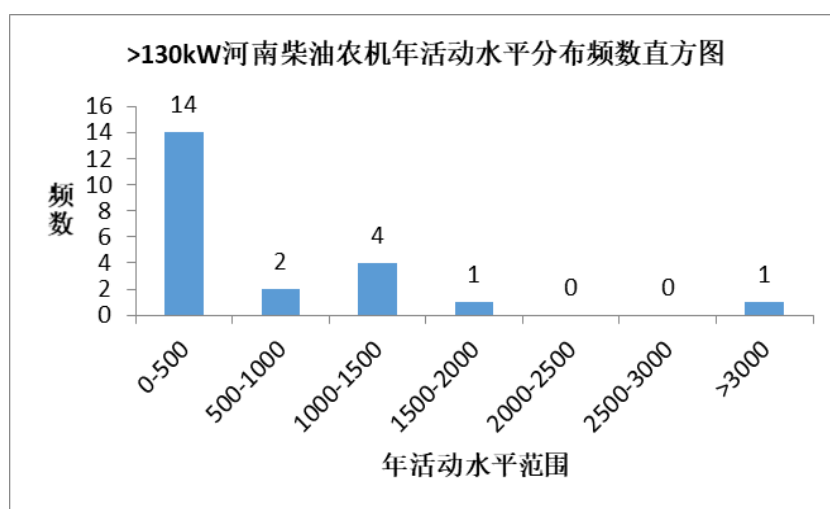


图 21 >130 kW 功率段农业机械年活动水平分布直方图

对于全功率段而言，年活动水平都以 0-500 h 为主，功率越高的机械，其年活动水平相对越高。且随着年活动水平的提高，出现频率呈下降趋势。同时，功率越高的机械，年活动水平超过 500 h 的频率相对较高。

2.2 河南省柴油农业机械小时油耗分布

<37 kW 机械平均小时油耗 2.87 L/h； 37-75 kW 机械平均小时油耗 6.21 L/h； 75-130 kW 机械平均小时油耗 7.38 L/h； > 130 kW 机械平均小时油耗 6.01 L/h。

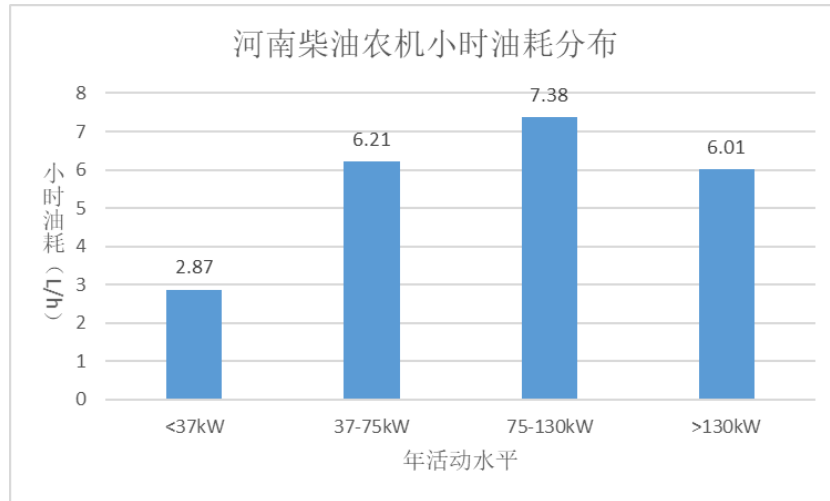


图 22 河南省柴油农业机械小时油耗分布

按照功率和小时油耗关系，绘制散点图和分布直方图如下：

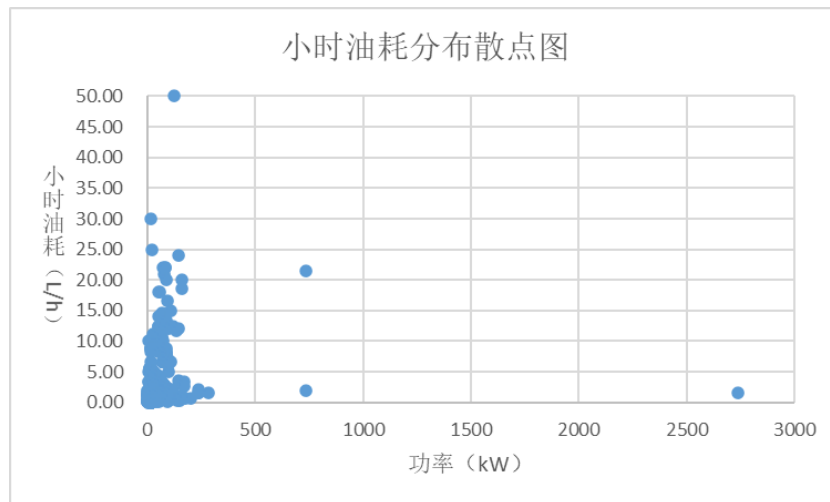


图 23 功率与小时油耗分布散点图

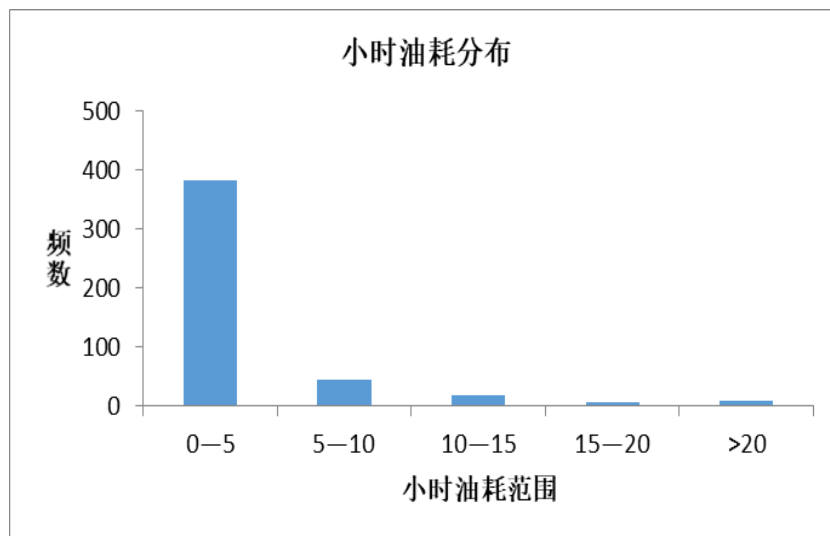


图 24 全功率段小时油耗频数分布直方图

随着功率的增加，小时油耗呈上升趋势，但在> 130 kW 时，出现了异常的下降，据推测可能是由于> 130 kW 时样本数据过少，极端数据影响较大，对原始数据的查阅验证了这一推测。同时，大部分机械的小时油耗位于 0-5 L/h 的区间。

2.3 河南省柴油农业机械油耗速率分布

< 37 kW 机械平均油耗速率 168.07 g/kWh，37-75 kW 机械平均油耗速率 88.64 g/kWh，75-130 kW 机械平均油耗速率 70.78 g/kWh，> 130 kW 机械平均油耗速率 27.73 g/kWh，随着功率的提高，油耗速率整体呈现出下降的趋势。

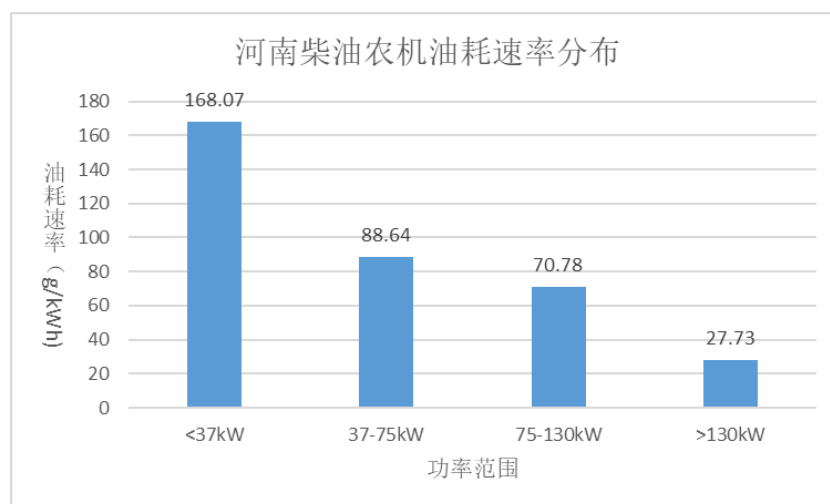


图 25 河南省柴油农业机械油耗速率分布

2.4 河南省柴油农业机械年耗油量分布

< 37 kW 机械平均年耗油量为 226.06 kg，37-75 kW 机械平均年耗油量为 900.67 kg，75-130 kW 机械平均年耗油量为 1071.17 kg，> 130 kW 机械平均年耗油量为 1399.83 kg，功率越大的机械，其年耗油量也更高，呈非线性增长。

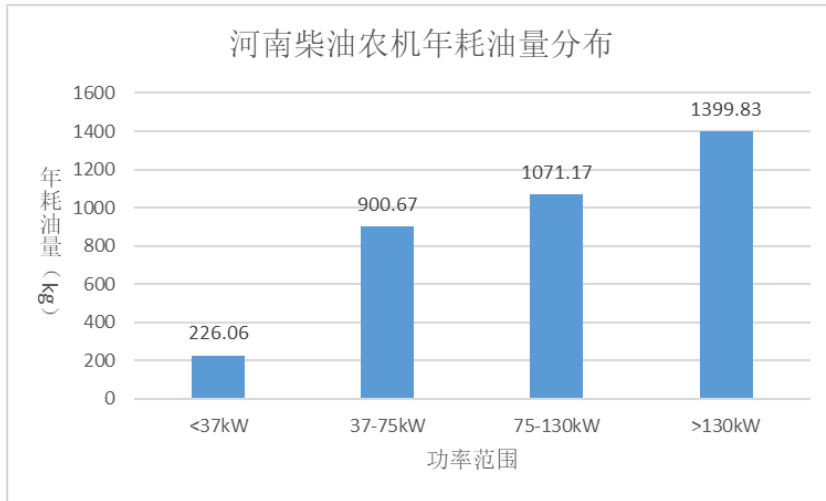


图 26 河南省柴油农业机械年耗油量分布

第四章 国外非道路机械低碳化的现状、政策和管理

1 国外低碳/零碳非道路移动机械的发展情况

1.1 美国低碳/零碳非道路移动机械的发展情况

1.1.1 建筑机械

包括迷你挖掘机、小型挖掘机、中型挖掘机、大型挖掘机、轮式装载机、反铲挖掘机、滑移/履带装载机等。

电池驱动的小型挖掘机在 2021 年占美国市场的 5%。预测到 2029 年，电动比例最大的机械将是小型挖掘机（美国和加利福尼亚州均为 9%），轮式装载机（美国和加利福尼亚州均为 6%），反铲挖土机（为 9%）和滑移/履带装载机（两者均为 11%）。

除美国外，欧洲和亚洲在考虑初步实现电动化的商业目标时，应尽量考虑拓展以电动挖掘机为代表的建筑机械。

与电池动力相比，氢燃料电池创新和研发方面明显缺乏规模化，在多领域明显落后于电池动力。

1.1.2 农业机械

截至 2022 年 8 月，当年美国销售了 57 台电池动力拖拉机，占美国拖拉机总销量的 0.02%。到 2029 年，预计美国将销售超过 3000 台电池动力拖拉机，相当于美国拖拉机总销量的近 1%。此外，预计到 2029 年，混合动力电动拖拉机将占美国拖拉机年总销量的 8%左右，数量将超过 21900 台。在加利福尼亚州，到 2029 年，每年约 8000 辆拖拉机销售中的 12%将是电池电动的，另外 8%是混合动力的。

1.1.3 叉车

北美几家叉车锂电池供应商的年销售额约为 3000 万美元。他们预计这些年销售额将在未来三年内上升到 6000 万至 8000 万美元之间。这些增长是由于地方和国家环境立法的生效，柴油机械被电动机械取代。加利福尼亚州的法规尤其严格。据贸易杂志 ForConstructionPros.com 报道，在鼓励叉车电气化的法规方面，“加州处于领先地位”。

预测到 2029 年，美国叉车的年总销量将超过 330000 台，其中近 250000 台将是电池动力（88000 台铅酸和 156000 台锂离子电池）。同时，预计将有超过 10000 台由燃料电池叉车将被销售。

1.2 欧洲低碳/零碳非道路移动机械的发展情况

1.2.1 叉车

叉车电动化处于领先水平。由于欧盟室内零排放的法规要求，叉车的电动化在几年前就已经逐渐普及。许多叉车厂商如克拉克、斗山、现代、三菱、小松、丰田、永恒力、林德等均推出了从小型到中型，三轮到四轮等多款电动叉车，并占据了主流市场。在不需要大量转场的室内仓储空间中，电动叉车有着明显的优势，相较于丙烷燃料车辆，电动叉车可以达到节省 75%运营成本的业绩。

1.2.2 高空作业平台

在高空作业平台全球市场，电驱尤其是电池纯电驱动已经成为主流驱动技术，全球三大市场（北美、欧洲、亚洲）均超过 50%。北美市场已超过 60%。更为显著的是，对于剪叉式高空作业平台，全球三大市场均已实现超过 80%的

纯电化，北美市场更是达到了 90%。值得一提的是，在欧洲市场有 4%的混动高空作业平台。

1.2.3 挖掘机

与叉车和高空作业平台有所不同，挖掘机电动化发展相对落后，但也开始逐步加速。到 2029 年，英国电驱迷你挖掘机的市场将会占到 15%，其中主要为电池纯电技术。相比中大型挖掘机，在欧洲市场，迷你挖掘机的电动化走得更远。小松，沃尔沃等厂商已于 2019 年德国慕尼黑 bauma 展上展示了电驱迷你挖掘机。沃尔沃于 2020 年初推动的电驱化进程同时发布了首款量产迷你电驱挖掘机 ECR25。JCB 和德国厂商 Wacker Neuson 也推出了首款电驱迷你挖掘机 19C-IE 及 EZ17 并以零排放高效率作为主要卖点。值得特别关注的是，与剪叉式高空作业平台类似，Yanmar 也在 2019 年提出了挖掘机去液压油化的战略并推出样机。通过使用 3 个电推杆取代液压缸，Yanmar 的迷你挖掘机样机实现了真正的无油化。

1.2.4 装载机

早在 2015 年，日立建机就推出其首款混动装载机 ZW220HYB-5B 样机，山崎、沃尔沃、斗山及柳工均发布 5 t 到 14 t 混动装载机样机，卡特彼勒 988K XE 及约翰迪尔 644K 均作为电动量产机型推向市场。但是，所有这些中大吨位电动装载机产品仍然处于培育发展阶段。相较之下，小型装载机的电动化市场则稍有领先。欧洲厂商 MultiOne、Schaeffer、Wacker Neuson 分别推出了 1.55~1.9 t 电机及轮边静液压的小型纯电装载机，沃尔沃也于 2020 年推出 L25 纯电装载机。

1.2.5 混凝土搅拌车

混凝土搅拌车的电驱化大幕则是在 2020 年初才徐徐拉开。利勃海尔发布了全球首款纯电 5 轴混凝土搅拌车，该车基于沃尔沃 FM 电动卡车，达到 670 hp（约为 492 kW），实现真正纯电动化。随后 CIFA 也发布了全球首款混动混凝土搅拌车。除了柴油机本身，该机型还配备了锂电池并支持快充，可以实现最高 380/400 V，75 kW 快充，可以在 18 min 完成充电。实现了装料时充电的工况以满足提高效率的目的。紧随其后，普茨迈斯特凭借其 iONTRON 技术推出了全球首款电驱混凝土泵车，不同于前两款产品，普茨派斯特电驱泵车并未

使用车载电池，其混凝土泵主要动力源为通过线缆直连的电力驱动，行走和支架伸缩则由柴油机提供动力。

2 国外低碳/零碳非道路移动机械的推广政策

2.1 美国低碳/零碳非道路移动机械的推广政策

表 2 美国低碳/零碳非道路移动机械的推广政策

项目名称	项目内容
混合动力和零排放卡车和公共汽车代金券激励项目 (HVIP)	激励加利福尼亚州的用户购买或租赁零排放非道路货运设备。
大众汽车环境缓解信托基金	向加利福尼亚州提供约 4.23 亿美元，以减轻制造商通过使用这些设备造成的过量氮氧化物排放。希望“报废和更换”重型非道路设备（以及道路设备）的潜在购买者可以获得这笔资金来购买零排放机型。
莫耶计划	每年提供约 6000 万美元用于更换加州存在污染的发动机。
资助农业减排替代措施 (FARMER) 计划指南	用于减少农业部门的排放，拨款 5.35 亿美元，并资助了 6662 台总价 2.897 亿元的机械。其中，2333 台零排放机械，总计 2830 万美元。
柴油减排法案 (DERA)	包括但不限于非道路源。项目可以包括机械更换、发动机更换、怠速优化、排气改造等。
针对性的大气补贴计划	最大限度地减少美国部分地区的环境空气浓度最高的臭氧和 PM _{2.5} 空气污染。项目包括机械更换、发动机更换、怠速油耗、排气改造等。

2.2 欧盟低碳/零碳非道路移动机械的推广政策

表 3 欧盟低碳/零碳非道路移动机械的推广政策

项目名称	项目内容
G/TBT/N/EU/967 号通报	规定了提案范围内的欧盟批准和上市的技术要求、行政要求和程序。此外，该提案还规定了这类非道路移动机械的市场监测的规则和程序。
G/TBT/N/GBR/48	由于摩托车、农用车现行临时方案将于 2022 年 12 月 31 日到期，因此也必须延长到 2022 年 12 月 31 日之后，以便能够继续供应此类产品并采取执法行动，解决不符合安全、安保及环保标准的问题。
《可持续与智能交通战略》	到 2030 年，零排放船舶将进入市场。
法国农机合作社 (CUMA)	推进农业机械化，法国通过补贴和贷款鼓励农民成立农机合作社，共同购买和使用农业机械，实行农业生产资料的一体化共营和使用上的互助。对于新成立的农业机械合作社，法国政府提供不超过 3 万法郎的启动补贴，并为合作社购买的农机提供 15%-25% 的价格补助。银行会根据机械种类、作物品种等为合作社提供优惠贷款。
成立“农机环”组织 (英国)	降低了英国农民购买及使用农业机械的成本。

《农业资产竞争力和适应性计划》（法国） 提升国内农场尤其是畜牧场的竞争力，推动农业生产设备现代化发展。2015-2019年，该计划的总预算资金从3.13亿欧元增加到6.21亿欧元，农民在购买节能、生态友好的农业机械时最多可获得60%的补贴支持。

《机动车辆税法》（德国） 对农业、林业经营使用的拖拉机、拖车等实施税收豁免政策。2019-2022年此项目的税收支出高达4.8亿欧元，为20项最大税收支出之一。

《欧洲绿色协议》 将海运纳入碳交易市场（目前该市场仅覆盖航空运输）、推广船舶排放控制区。

2.3 日本低碳/零碳非道路移动机械的推广政策

表4 日本低碳/零碳非道路移动机械的推广政策

项目名称	项目内容
《农业机械化促进法》	规范农业机械的推广工作，同时大力开展农田整合、机耕道修建项目，补贴比例在10%-50%，其中对于技术先进、价格高昂的设备补贴力度更大。在发展条件较差的地区，农民组织购买农机可获得33%的补贴。对于农民共同购买和联合使用的智能机器，政府会提供50%的财政补贴。
《加强中小企业经营法》（起重机）	企业可向日本建设机械工程会提出申请，由其颁发“加强中小企业经营法”的提高生产力设备证书。获取该证书后，在计算固定资产税时，2014年1月20日至2016年3月31日间购买的设备立即摊销或减免5%税收，2016年4月1日至2017年3月31日间购买的设备立即摊销50%或减免4%税收。特别措施：资产低于3000万日元的公司和个人业主立即摊销或免税10%，资产在3000万至1亿日元的公司立即摊销或免税7%。

2.4 印度低碳/零碳非道路移动机械的推广政策

表5 印度低碳/零碳非道路移动机械的推广政策

项目名称	项目内容
国家农业发展计划（RKVY）	购机补贴。
国家粮食安全使命计划（NFSM）	购机补贴。
农业机械化子任务（SMAM）	购机补贴，政府还对农业机械演示与培训、测试与示范、建立农机租赁银行、地区推广等活动提供多方位财政援助，援助比例为30%-60%，特殊情况下甚至可实现全额覆盖。
“十二五”经济计划	从2007-2015年，印度投放到工程机械市场的资金累计达到400亿美元。未来8年，每年约增加17%的投资额。

除中央政府计划外，泰米尔纳德邦、北方邦、阿萨姆邦等各邦也实施了多样的购置补贴措施：

(1) 泰米尔纳德邦通过财政资助农民购买各类农业机械，普通农民、在册种姓及部落农民可分别享受 40%、50%的补贴；

(2) 北方邦为农民购买拖拉机提供成本价格的 25%与 45000 卢比中较低者的补贴额度；

(3) 阿萨姆邦则提供 70%的购机补贴。

第五章 中国非道路机械低碳化的政策和管理

从政策来看，近几年（2019-2023）非道路相关政策主要偏向于老旧高污染机械产品出清，引导行业清洁化、高科技化发展。

1 中央及行业层面的相关政策与规定

表 6 中央及行业层面的相关政策与规定

日期	政策	具体内容	是否强制	分类
2019.1	《柴油货车污染治理攻坚战行动计 划》	对于提前淘汰并购买新能源货车的，享受中央财政现行购置补贴政策。鼓励地方研究建立与柴油货车淘汰更新相挂钩的新能源车辆运营补贴机制，制定实施便利通行政策。	否	排放、电动化
2020.9	《推动公共领域车辆电动化行动计 划》	鼓励有条件的地区或城市对新能源重卡研发或运营予以支持：拟通过中央基建投资补助等方式，支持包括重卡在内的特色领域新能源汽车应用。	否	电动化
2020.12	《非道路移动机械污染防治技术政 策》	鼓励混合动力、纯电动、燃料电池等新能源技术在非道路移动机械上的应用，优先发展中小非道路移动机械动力装置的新能源化。	否	排放

2020.12	《非道路柴油移动机械污染排放控制技术 requirements》	自 2022 年 12 月 1 日起，所有生产、进口和销售的 560kW 以下(含 560kW)非道路移动机械及其装用的柴油机应符合“国四”排放标准。	是	排放
2021.1	《关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》	促进汽车零部件、工程机械、文办设备等再制造产业高质量发展。加强资源再生产品和再制造产品推广应用。	否	排放
2021.10	《关于推广“十三五”时期产业转型升级示范区典型经验做法的通知》	江苏省徐州市依托开发区培育壮大工程机械产业集群，国家工程机械产品质量监督检测中心、2020 年徐州经开区综合实力跃居国家级开发区第 24 位。	否	经济
2021.10	《关于支持民营企业加快改革发展与转型升级的实施意见【2020】1566 号》	推动机械装备产业高质量发展、石化产业安全绿色高效发展，推进老旧农业机械、工程机械及老旧船舶更新改造。	否	经济
2022.12	《中国移动源环境管理年报(2022)》	对低排放控制区内的非道路移动机械开展环保信息公开情况和编码登记查验、烟度和油品抽测等监督执法。	是	排放

2 各级政府层面的相关政策与规定

表 7 各级政府层面的相关政策与规定

日期	政策	具体内容	是否强制	分类
2021.7	《山东省工业设计产业“十四五”发展规划》	高端装备产业重点围绕新能源汽车、海洋工程装备及高技术船舶、轨道交通装备、高端工程机械、智能农业装备、高档数控机床与机器人、能源装备、环保装备等领域开展整机、整车、系统装备的工业设计。	否	经济
2021.12	《山东省“十四五”战略性新兴产业发展规划》	推动工程机械产业资源整合，加快发展推土机、装载机、液压挖掘机、道路机械等，支持济宁、临沂建设高端工程机械产业基地，打造国内领先、国际著名的工程机械制造标杆。	是	经济

2022.4	《关于印发山东省非道路移动机械污染排放管控工作方案的通知》	2022年起，各市每年抽取部分非道路移动机械开展排气检测，3年内基本消除冒黑烟现象。2024年年底前，基本淘汰国一及以下排放标准或使用15年以上的非道路移动机械。2025年年底前，在用燃油非道路移动机械全部安装实时定位监控装置，实现在线远程监控。	是	排放
2022.7	《在用非道路工程机械(2022-2025)污染防治技术指南》	建议地方政府根据大气环境质量需求，对在用非道路工程机械分时、分类划定禁止使用高排放非道路工程机械的区域。优先控制城市建成区内在用非道路工程机械的污染物排放，完善在用非道路工程机械使用的登记制度。鼓励淘汰高排放非道路工程机械。	否	排放
2021.12	《甘肃省“十四五”生态环境保护规划》	加强对进入禁止使用高排放非道路移动机械区域内作业的工程机械的监督检查，重点管控区域每半年至少抽查一次，其他区域每年至少抽查一次，抽查率达到50%以上，禁止超标排放工程机械进入控制区使用。	是	排放
2021.6	《浙江省应对气候变化“十四五”规划》	对56千瓦以上的国二和国三建筑、市政、交通等工程机械和场内机械开展尾气达标治理。推进港口、机场和企业等场内56千瓦以下中小功率机械新能源或清洁能源替代。	是	排放
2021.6	《浙江省高端装备制造业“十四五”发展规划》	大力支持以LNG、电能等为主的绿色新动力船、江海联运船及各类高端船舶等的开发研究。承担20年以上船龄老旧远洋渔船更新建造任务，为实现远洋渔船欧盟卫生、MSC等国际注册标准注册数量达到200艘提供技术保障。规划期为2021-2025年。	是	经济、排放
2022.5	《安徽省“十四五”农业机械化发展规划》	深入实施“两强一增”行动，聚焦推广应用和生产制造，加快推动农机农艺融合、机械化信息化融合，促进机械化生产与农田建设相适应、服务模式与农业适度规模经营相适应，推进制造智能化、技术集成化、服务社会化、农田宜机化和保障要素化，补短板强弱项、促协调，推动我省农机装备产业向先进适用高质量发展转型。	否	经济

2021.12	《陕西省“十四五”制造业高质量发展规划》	工程机械领域，重点突破动力换挡变速箱设计制造技术等关键技术，加快开发液压系统、传动系统等关键零部件。	否	经济
2021.12	《广西大众创业万众创新“十四五”规划》	推广应用工程机械虚拟仿真、工业互联网和大数据应用、云计算、工程机械绿色制造技术、工程机械节能降噪技术、工程机械智能化技术等，促进高速、高效加工在关键零部件制造中的应用，促进产品升级换代。	否	经济
2021.8	《湖南省“十四五”战略性新兴产业发展规划》	重点发展适应全球市场需求的混凝土机械起重机械、中大型液压挖掘机、多功能履带式消防车、矿用电动轮自卸车、大型桩工机械、土压平衡盾构机、混凝土喷射台车、全断面硬岩隧道掘进机、数字化散装物料输送成套技术装备等高端产品。	否	经济

第六章 京津冀地区非道路移动机械使用现状

1 京津冀地区非道路移动机械保有量调查研究

根据京津冀区域施工面积^[14, 15, 16]占全国施工面积比例，结合《中国工程机械工业年鉴》^[17]中工程机械全国需求量，得到 2011~2020 年不同机械需求量，占比变化如图 27 所示。挖掘机、装载机和叉车的需求量占比超过 92.0%，有逐年增加的趋势。叉车的需求量占比最大，为 42.7%~59.2%，2011~2015 年占比增加，2016~2020 年呈下降趋势。2011~2020 年电动叉车需求率如表 8 所示。装载机和挖掘机的需求量占比分别为 21.1%~30.1%和 13.6%~27.4%。

表 8 2011~2020 年电动叉车需求率 (%)

年份	2011	2012	2013	2014	2015
需求率	21.0	22.5	22.8	26.6	31.0
年份	2016	2017	2018	2019	2020
需求率	31.5	35.0	40.3	43.8	48.7

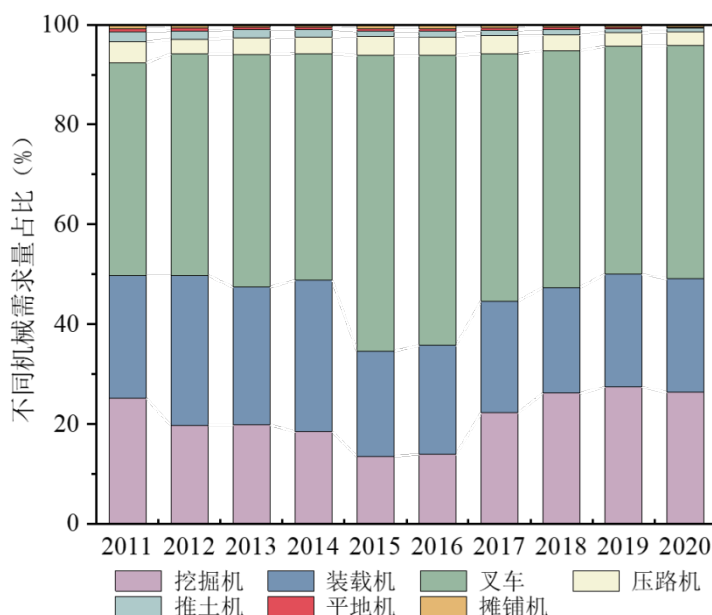


图 27 2011~2020 年京津冀区域不同工程机械类型需求量占比

假定工程机械使用年限为 10 年，京津冀区域 2020 年工程机械保有量为 2011~2020 年需求量之和。农业机械 2020 年保有量来自于《中国农业机械工业年鉴》^[18]中的各省数据。2020 年京津冀区域不同类型工程机械和农业机械保有量如表 9 所示。工程机械的保有量为 30.19 万台，远低于农业机械保有量（360.98 万台）。工程机械中叉车保有量最高，为 14.34 万台，占工程机械保有量的 47.5%，其中电动叉车保有率达到了 32.5%；其次是装载机和挖掘机，保有量分别为 7.43 万台和 6.70 万台。农业机械中农业排灌机械和小型拖拉机保有量最高，分别为 180.51 万台和 117.98 万台，约占农业机械保有量的 50.0%和 32.7%。

图 28 展示了工程机械和农业机械不同排放标准的占比情况。工程机械基于销售年份判定排放标准比例^[19]，北京市地方排放标准发布早于国家标准，京 IV 标准于 2015 年发布实施^[20]。京津冀区域工程机械国 I、国 II、国 III 和京 IV 各排放阶段比例分别为 9.7%、43.2%、36.3%和 10.8%。农业机械国 I、国 II 和国 III 各排放阶段比例分别为 43.5%、27.3%和 29.2%。

表 9 2020 年京津冀区域非道路移动机械保有量（万台）

工程机械类型	保有量	农业机械类型	保有量
挖掘机	6.70	大型拖拉机	7.08
装载机	7.43	中型拖拉机	25.31
叉车	14.34	小型拖拉机	117.98

压路机	1.00	联合收割机	17.96
推土机	0.39	农业排灌机械	180.51
平地机	0.13	耕作机械	12.14
摊铺机	0.19	总计	360.98
总计	30.19		

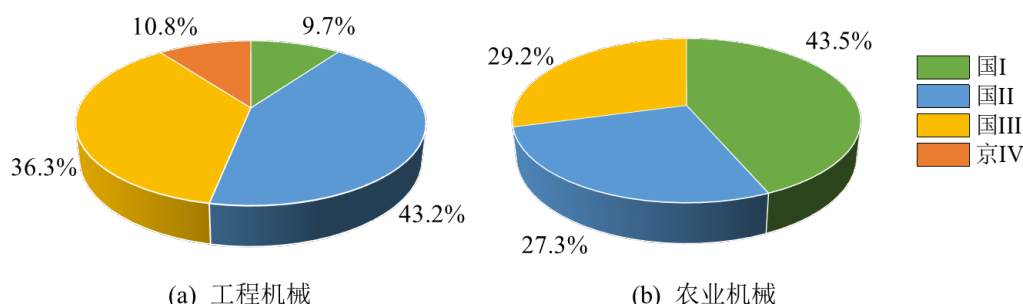


图 28 京津冀区域非道路移动机械不同排放标准占比

2 京津冀地区非道路移动机械活动水平调查研究

活动水平数据主要包括平均功率、负载因子和年活动小时数。工程机械和农业机械的平均功率和负载因子如表 10-12 所示。工程机械各功率段分布比例和平均功率来自 2020 年慧珠在线租赁平台北京市 1340 台机械的租赁数据^[21]，同时将结果应用于整个京津冀区域。农业机械在北京、天津和河北的平均功率来自于《中国农业机械工业年鉴》^[18]中不同类型机械总功率和数量的比值。农业机械功率较为集中，均分布在平均功率所在功率段范围。工程机械中的挖掘机、装载机、叉车、压路机和推土机的负载因子来自于范武波等^[22]的实测。由于缺乏本地化数据，平地机、摊铺机和各类农业机械的负载因子则参考指南^[19]中推荐值。

表 10 工程机械的功率段分布比例 (%) 和平均功率 (kW) ^[21]

机械类型	<37 kW	37~75	75~130	≥130 kW	平均功率
挖掘机	11	21	47	21	84.54
装载机	0	15	32	53	110.46
叉车	54	36	10	0	39.38
压路机	7	9	47	37	82.40
推土机	0	0	93	7	122.22
平地机	1	23	24	52	99.60
摊铺机	6	0	0	94	144.83

表 11 工程机械负载因子

机械类型	<37 kW	37~75 kW	75~130 kW	≥130 kW
挖掘机 ^[22]	0.68	0.73	0.82	0.77
装载机 ^[22]	/	0.82	0.77	0.81
叉车 ^[22]	0.58	0.62	0.68	/
压路机 ^[22]	0.59	0.62	0.74	0.76
推土机 ^[22]	/	/	0.69	0.79
平地机 ^[19]	0.65	0.65	0.65	0.65
摊铺机 ^[19]	0.65	/	/	0.65

表 12 农业机械平均功率 (kW) 及负载因子

机械类型	平均功率 ^[18]			负载因子 ^[19]
	北京	天津	河北	
大型拖拉机	110.50	98.81	94.77	0.65
中型拖拉机	38.57	45.74	43.47	0.65
小型拖拉机	17.15	14.82	11.67	0.65
联合收割机	84.00	89.52	75.61	0.65
农业排灌机械	7.32	8.30	9.12	0.65
耕作机械	4.21	4.16	4.90	0.65

通过北京市挖掘机在线监测平台可以获得 2020 年挖掘机月均活动小时数和每月工地开工率，如图 29 所示。挖掘机在 1~3 月份的活动小时数分别为 23.8 h、6.7 h 和 45.3 h，远低于其他月份平均水平，主要是受到 2020 年年初新冠疫情及春节影响，施工地区很难开工，2 月份挖掘机的开工率甚至只有 6.1%。4 月份开始陆续复工复产，挖掘机的开工率达到了 80% 以上。由于雨季的影响，部分施工项目出现停滞，7、8 月份挖掘机活动小时数和开工率略有降低。10 月份挖掘机活动小时数最高，为 144.4 h，而后受冬季气温影响，11、12 月份的活动小时数呈下降趋势。4~12 月挖掘机月均活动小时数为 122.2 h，全年累计活动小时数为 1174.6 h。天津和河北地区活动小时数也参考该结果，具体如表 13 所示。

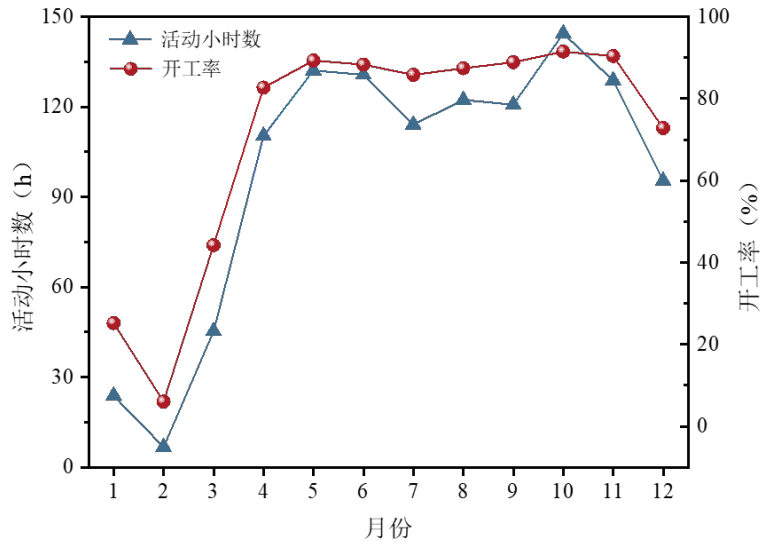


图 29 2020 年北京市挖掘机月均活动小时数

表 13 工程机械和农业机械年活动小时数 (h)

工程机械类型	年活动小时	农业机械类型	年活动小时
挖掘机	1175	大型拖拉机	615 ^[25]
装载机	1261 ^[23]	中型拖拉机	615 ^[25]
叉车	1006 ^[24]	小型拖拉机	615 ^[25]
压路机	617 ^[23]	联合收割机	262 ^[25]
推土机	1261 ^[23]	农业排灌机械	409 ^[25]
平地机	770 ^[19]	耕作机械	380 ^[19]
摊铺机	559 ^[23]		

3 京津冀地区不同类型机械的排放贡献

图 30 展示了 2020 年京津冀区域不同类型机械对工程机械总排放量的贡献特征。装载机、挖掘机和叉车是最主要的排放贡献机械，三者对 THC、CO、NO_x、PM 和 CO₂ 排放的总贡献均超过 90%，对 PM 的排放贡献最高，为 94.7%，平均排放贡献率分别为 47.0%、31.7%和 14.8%。主要是由于这三种机械的保有量占比为 94.3%。压路机（2.2%~3.6%）和推土机（2.3%~4.1%）的排放贡献较低，平地机和摊铺机的排放贡献则均低于 0.6%。装载机对工程机械总排放量的贡献率高达 38.1%~52.5%，而其保有量仅占 24.6%；保有量排名第一的叉车（47.5%）贡献率为 9.5%~22.9%，这可能是由于装载机的平均功率（110.5 kW）比叉车（39.4 kW）要大得多。

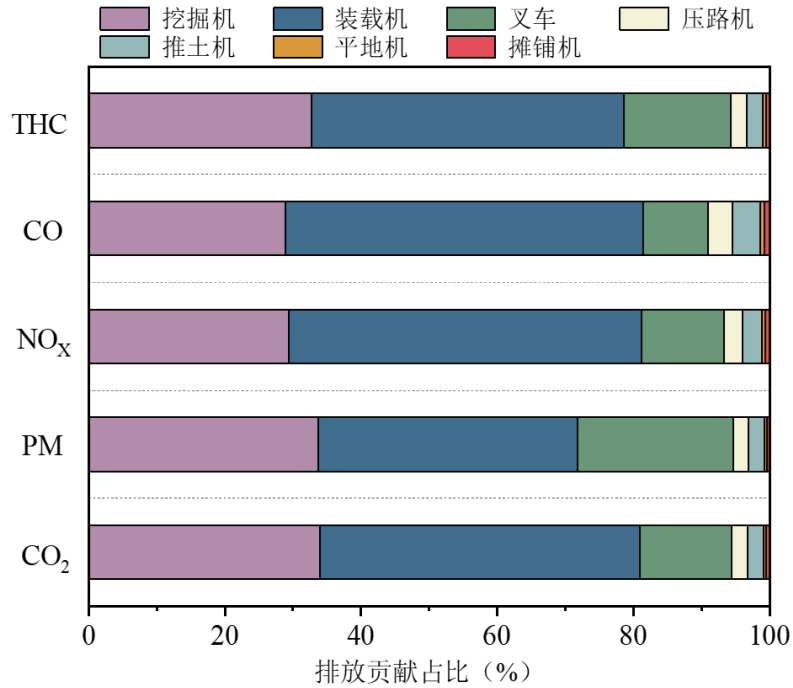


图 30 京津冀区域不同类型工程机械的排放贡献占比

图 31 展示了 2020 年京津冀区域不同类型机械对农业机械总排放量的贡献特征。小型拖拉机、中型拖拉机和农业排灌机械是最主要的排放贡献机械，对农业机械排放的总贡献超过 75%，平均排放贡献分别为 33.5%、23.2%和 21.6%，贡献率范围为 28.4%~37.5%、20.5%~25.5%和 17.8%~23.6%。其次是大型拖拉机和联合收割机，他们的平均排放贡献率分别为 12.2%和 8.9%。耕作机械的排放贡献最低，仅有 0.6%。小型拖拉机（平均功率 14.5 kW）和农业排灌机械（平均功率 14.2 kW）是农业活动的主力，保有量占到 32.4%和 50.4%，中型拖拉机的保有量虽远不及前两者，仅占到 7.3%，但由于平均功率（42.6 kW）较高，排放贡献不容忽视。

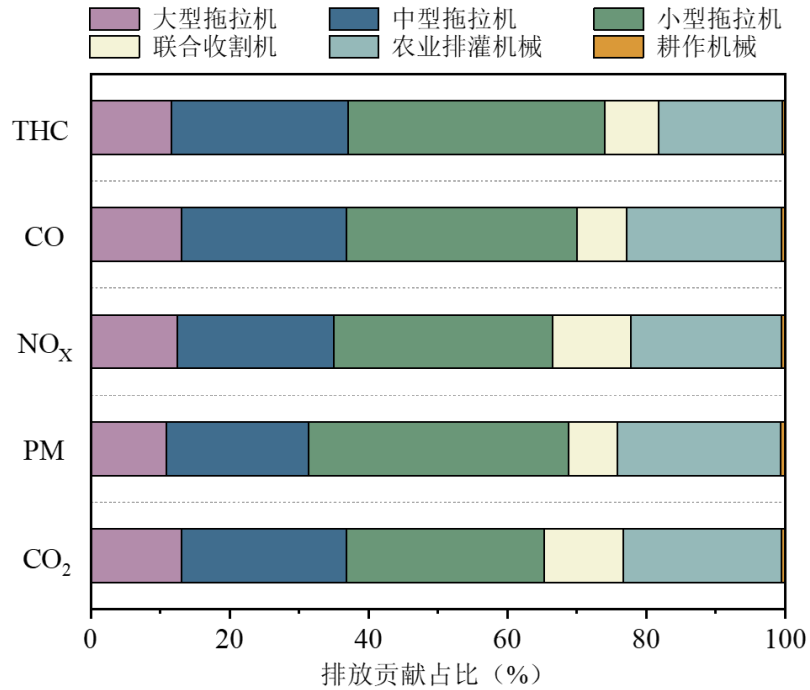


图 31 京津冀区域不同类型农业机械的排放贡献占比

4 京津冀地区不同排放标准机械的排放贡献

2020 年京津冀区域不同排放阶段的非道路移动机械对排放量的贡献占比如图 32 所示。对于工程机械来说，国 II 标准的机械排放贡献占比最大，为 43.9%~56.3%，其次是国 III 和国 I 标准的机械，贡献率范围分别为 21.2%~36.7%和 10.0%~21.6%，京 IV 标准机械贡献率最低为 0.5%~9.3%。四个排放标准的工程机械平均排放贡献分别为 17.7%、50.0%、29.1%和 3.2%。对于农业机械来说，国 I 排放标准的机械是最主要的排放贡献者，贡献率为 42.9%~53.4%（平均 50.3%），国 II 和国 III 标准机械排放贡献为 25.4%~28.1%（平均 27.1%）和 18.2%~29.1%（平均 22.6%）。其中，国 I~京 IV 标准工程机械对 CO₂ 的排放贡献分别为 10.0%、43.9%、36.8%和 9.3%，国 I~国 III 标准农业机械对 CO₂ 的排放贡献分别为 42.9%、28.0%和 29.1%，与保有量的占比结果非常接近，进一步说明 CO₂ 排放因子受排放标准影响极小。

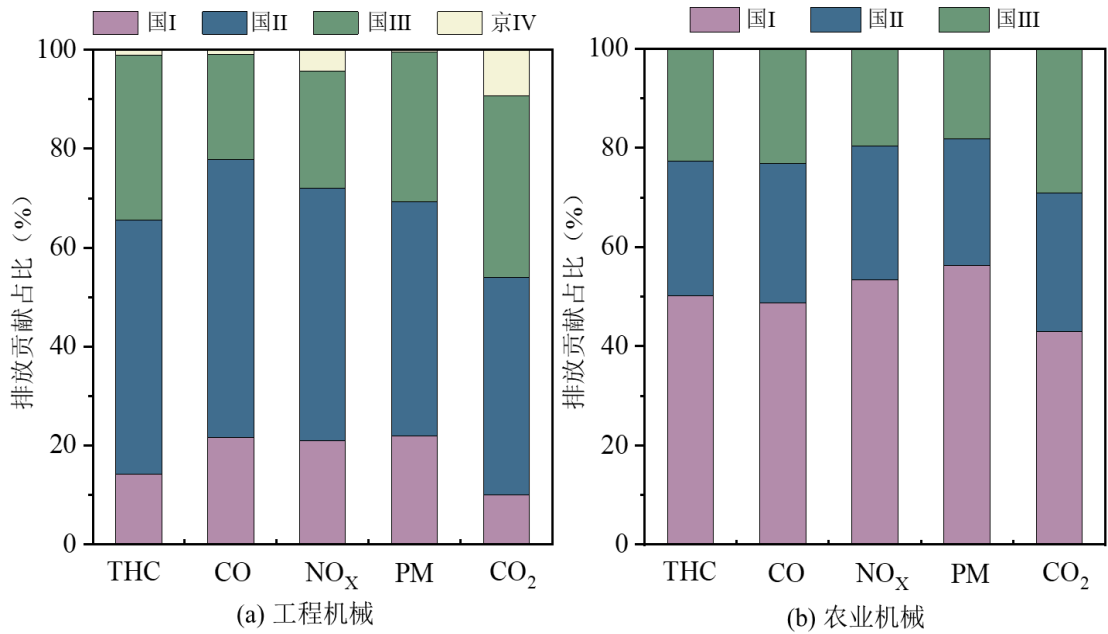


图 32 京津冀区域不同排放标准机械的排放贡献占比

5 京津冀地区非道路移动机械空间排放特征分析

基于河北省各城市建筑施工面积和农作物播种面积进行河北省工程机械和农业机械的排放量空间分配，北京市和天津市为清单计算结果。图 33 和图 34 展示了 2020 年京津冀区域非道路移动机械 CO₂ 排放量的空间分布情况。对于 CO₂ 排放来说，北京市非道路移动机械的排放贡献最高，为 13.7%，天津市的 CO₂ 排放也十分突出，占比为 8.8%。加上保定市、邯郸市、邢台市、石家庄市和沧州市，七个城市对 CO₂ 总贡献达到 66.7%。秦皇岛市由于陆域面积最小，对京津冀区域 CO₂ 的排放贡献最小，贡献比例仅为 2.6%。承德市受北部燕山山脉的影响，不利于开展施工项目和农业种植，对排放的贡献也较低，约为 4.4%。

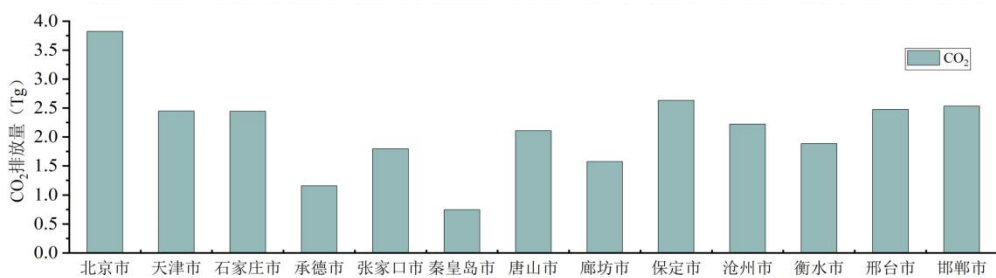


图 33 京津冀区域非道路移动机械分城市排放量

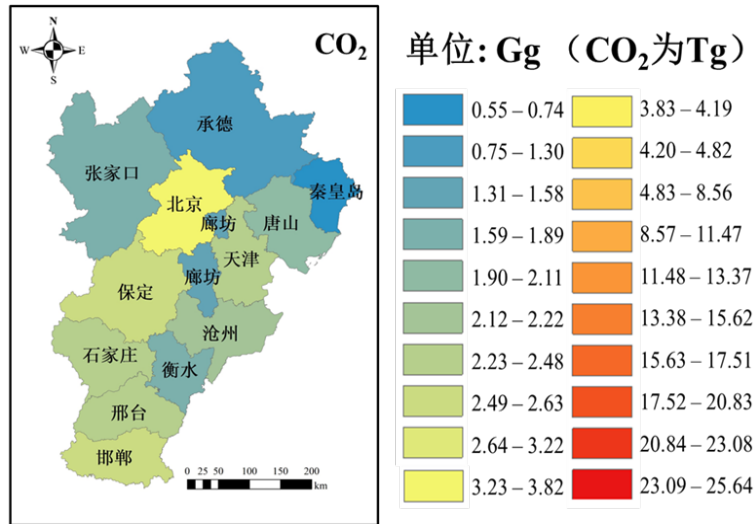


图 34 京津冀区域非道路移动机械排放空间分布

6 京津冀区域非道路移动机械 CO₂ 减排潜力分析

选取 2025 年和 2030 年作为时间节点，设置相关控制情景，并对不同情景下的京津冀区域非道路移动机械的大气污染物和 CO₂ 减排潜力进行分析。在所有情景下，北京市、天津市和河北省的农业机械的保有量设定为前一节中多元线性回归分析的预测值。根据工程机械保有量变化得到每年的需求量，2025 年和 2030 年工程机械保有量分别为 2016~2025 年需求量之和以及 2021~2030 年需求量之和。每种机械类型的保有量比例、活动水平数据（平均功率、负载因子和年活动小时数）及排放因子均参照 2020 年。假定电动机械污染物和 CO₂ 排放因子均为 0。具体设置的情景如下：

（1）一切照旧情景

一切照旧情景下，假设 2025 年和 2030 年京津冀区域关于非道路移动机械的控制策略保持在与基准年（2020 年）相同的水平，即新增加的机械仍符合国 III 标准，且电动叉车的市场渗透率维持 2020 年水平。该情景的设置可以排除保有量变化对排放量带来的影响，从而评估不同控制情景下的减排措施在减少大气污染物和 CO₂ 排放方面的有效性。

（2）基准控制情景

在基准控制情景下，采取的措施为提高非道路移动机械排放标准。其中，北京市已经率先于 2015 年发布实施京 IV 标准^[20]，该标准的排放限值等均对标国 IV 排放标准，主要针对在京销售的工程机械。针对所有非道路移动机械的国

IV 标准于 2022 年 12 月 1 日起在全国范围内实施^[26]。在该情景下，基于销售年份判定工程机械排放标准，2023 年及以后新增加的机械均符合国 IV 标准。农业机械的排放标准比例则是结合新增和淘汰机械进行更新^[27]。2025 年国 I~国 IV 标准农业机械比例分别为 20%、18%、33%和 29%；2030 年国 II~国 IV 标准农业机械比例为 5%、20%和 75%。

（3）强化控制情景

在强化控制情景下，同时采用提高排放标准和非道路机械电动化的措施。2020 年，电动叉车的渗透率已达到 50%左右。《北京市“十四五”生态环境保护规划》^[28]和《工程机械行业“十四五”发展规划》^[13]指出要以产业园区等场内区域为重点，推广使用以电动叉车为主的新能源工程机械。预测电动叉车渗透率 2025 年达到 70%，2030 年达到 80%。其他电动工程机械渗透率预计在 2025 年和 2030 年分别达到 25%和 35%。其他年份电动机械渗透率线性增加。

京津冀区域非道路移动机械在不同情景下大气污染物和 CO₂ 的排放量变化如图 35 所示。2020 年 CO₂ 的排放量为 27.84 Tg，在一切照旧情景下每年以 0.5%的降速不断降低，2030 年 CO₂ 排放量降为 26.45 Tg。与其他污染物不同，CO₂ 的减排效果最不明显。2025 年，在两种控制情景下的排放量分别为 26.97 Tg 和 25.83 Tg，减排潜力分别为 0.5%和 4.7%。2030 年，CO₂ 在两种控制情景下排放量分别降至 26.10 Tg 和 22.29 Tg，减排潜力分别为 1.3%和 15.7%。对比两种控制情景，强化控制情景中提高非道路机械的电动化水平可带来的 CO₂ 减排量更大。

估算的京津冀区域非道路移动机械 CO₂ 的排放量为 27.84 Tg，占全部门碳排放比例 2.4%，占交通部门碳排放 23.8%。京津冀区域不断降低的 CO₂ 排放有助于中国在 2030 年前实现碳达峰，京津冀区域碳排放对控制中国碳排放总量具有积极作用。在一切照旧、基准控制和强化控制情景下，非道路移动机械 2020~2030 年的碳减排对全部门碳减排的贡献分别为 1.1%、1.4%和 4.4%。

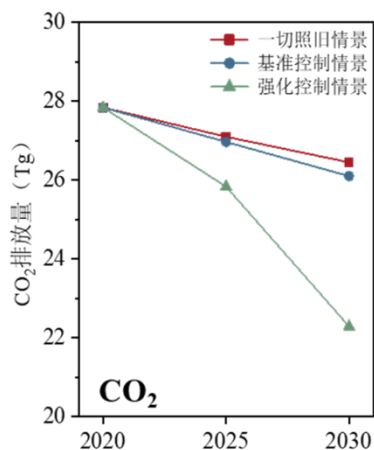


图 35 2025 年和 2030 年各排放情景下非道路移动机械的排放量

2025 和 2030 年两种控制情景与一切照旧情景相比非道路移动机械大气污染物和 CO₂ 的减排潜力如图 36 所示。对于 CO₂ 来说，由于其排放因子在不同排放标准下较为稳定，电动化机械的应用比例的增加所带来的减排潜力更明显，2025 和 2030 年强化控制情景下 CO₂ 减排潜力比基准控制下分别增加 4.2% 和 14.4%。

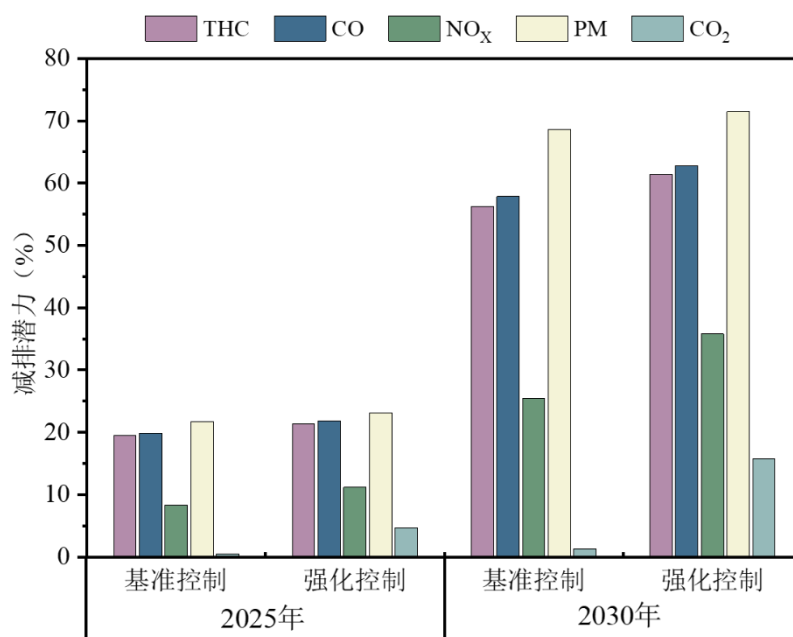


图 36 2025 年和 2030 年两种排放控制情景下非道路移动机械的减排潜力

图 37 展示了 2025 年和 2030 年工程机械和农业机械分别在基准控制情景和强化控制情景下的减排潜力。在基准控制情景下，工程机械的减排潜力要高于农业机械，2025 年 CO₂ 的减排潜力差异分别为 0.8%，2030 年差异较为明显，为 2.2%。这主要是由于工程机械除叉车外普遍机械功率较高，平均功率均

在 75 kW 以上，国 IV 排放标准中针对 37 kW 以上的机械均要求加装后处理装置，而农业机械中保有量较高的小型拖拉机和农业排灌机械的功率均在 37 kW 以下，因此减排潜力不如工程机械。在强化控制情景下，工程机械和农业机械的减排潜力均有提高，主要因为工程机械已在电动化领域有所实践，未来电动化水平较为明显，而电动化农机设备还在起步阶段。2025 年 CO₂ 的减排潜力差异分别为 4.2%，2030 年减排潜力差异分别为 16.5%。

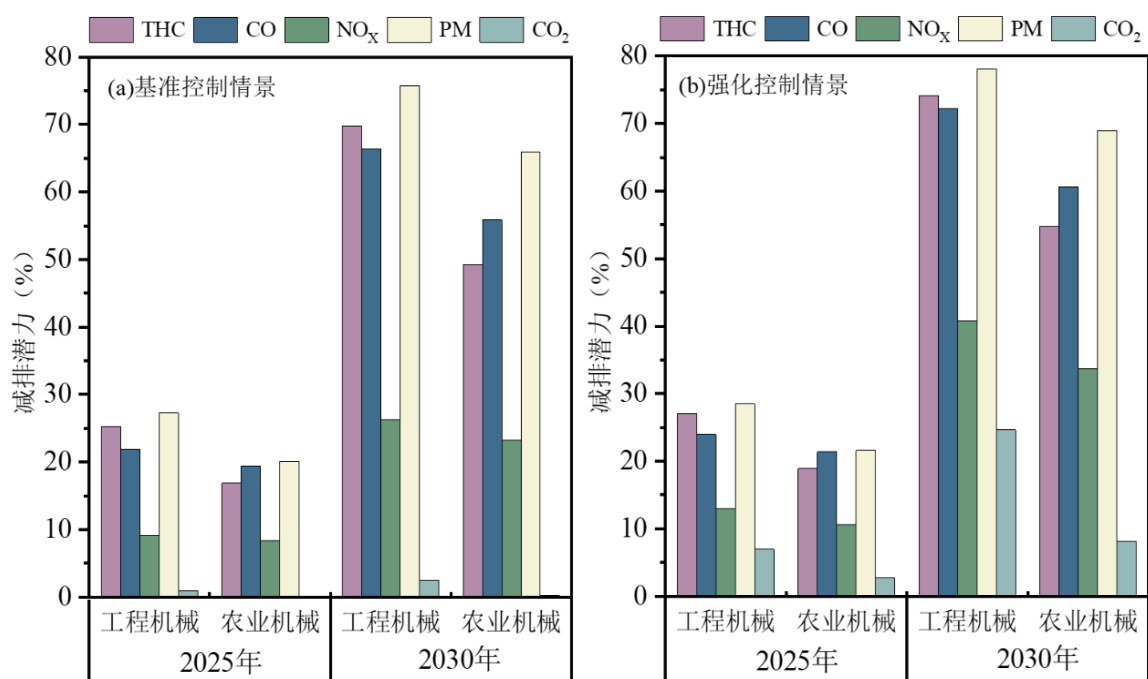


图 37 2025 年和 2030 年两种排放控制情景下工程机械和农业机械的减排潜力

第七章 机械电动化可行性分析

1 机械电动化政策需求的背景

中国从改革开放开始进入了经济发展的快车道，第二第三产业发展迅速。尤其是第二产业中的轻工业与第三产业的发展，使得中国在 40 年内快速实现了城镇化。根据国家统计局的数据，截至 2022 年中国的城镇化率已经达到 65.22%，大量人口聚集在城镇中。

人口的城镇化聚集产生的高人口密度，带来了人力密集型产业整体效率的提升，但也伴随着诸多的“城市病”。过高的人口密度使得城市居住区的环境

承载能力十分脆弱，尤其是城市的空气污染很难通过自然空气对流扩散消解，造成了过去十年严重的“雾霾”天气。为了解决这一问题中国对城市大气污染源实施了一系列的整改措施，包括污染企业外迁、交通优化、低排放区限行、重污染天气停工等。这些措施迅速改善了城市的大气污染，大大减少了雾霾天气的次数。但在以化石燃料驱动车辆与机械的大背景下，城市交通与城市建设的活跃程度与污染程度是正比的关系，车辆限行与机械停工只能在紧急情况下（如气象不利于污染扩散的日子）作为临时政策实施，而不能长期实施。

为了解决这一矛盾，中国发挥自身在特高压与输电技术上的优势，积极推进能源、排放的生产与排放隔离的方案。电厂外迁在便于集中处理污染，不易影响人体健康的地区进行电力能源的生产，将清洁的能源提供给人工密集的城市中。当前中国积极推进的电动汽车战略，相当于将本来要在城市运行产生的污染和排放，集中到一起进行处理后再向便于扩散、对人体影响小的地方进行排污。

这一措施相比于更新原有城市建设规划或更改产业结构，降低人口密度以换取环境承载力，能以较低的社会运营成本或得较好的人口环境效益。最新颁布的“十四五”规划中，强调了电动汽车的发展与充电配套产业发展的要求，是这一政策思想的延续和发展。城市电动化驱动替代燃油驱动已经成为了当前中国城市发展的主要方向之一。

2 机械电动化的市场需求背景

根据环保部数据，当前重型柴油车的 NO_x 与 PM 排放量占汽车总排放的 50%以上，是城市 O₃ 与 PM_{2.5} 污染的重要来源之一。同时，非道路移动机械的 NO_x 与 PM 排放量与重型柴油车相当，同样是城市大气污染的“祸首”。重型柴油车与非道路移动机械均以重型柴油机为驱动动力，排放特征基本一致。

为了削减重型柴油机所匹配车辆、机械引起的排放，中国一方面加严排放要求，颁布了世界最严格的排放标准之一的“重型国六”标准，另一方面也在积极推进使用替代动力，出台了多项重型电动车辆的推广政策。中国的零排放重型车市场迅速崛起，从几乎零销量到 2016 年超过 20 万辆。然而，在此之后，由于国家对电动货车和客车的补贴逐渐减少，总销量不断下滑。但电动大型客运车辆市场仍旧保持繁荣，在 2021 年补贴不足最高时四成水平的情况

下，电动大型客车的销量与 2018 年持平。在相关政策的影响下，大中城市中的城市公交基本实现了由燃油驱动转向了电驱动。

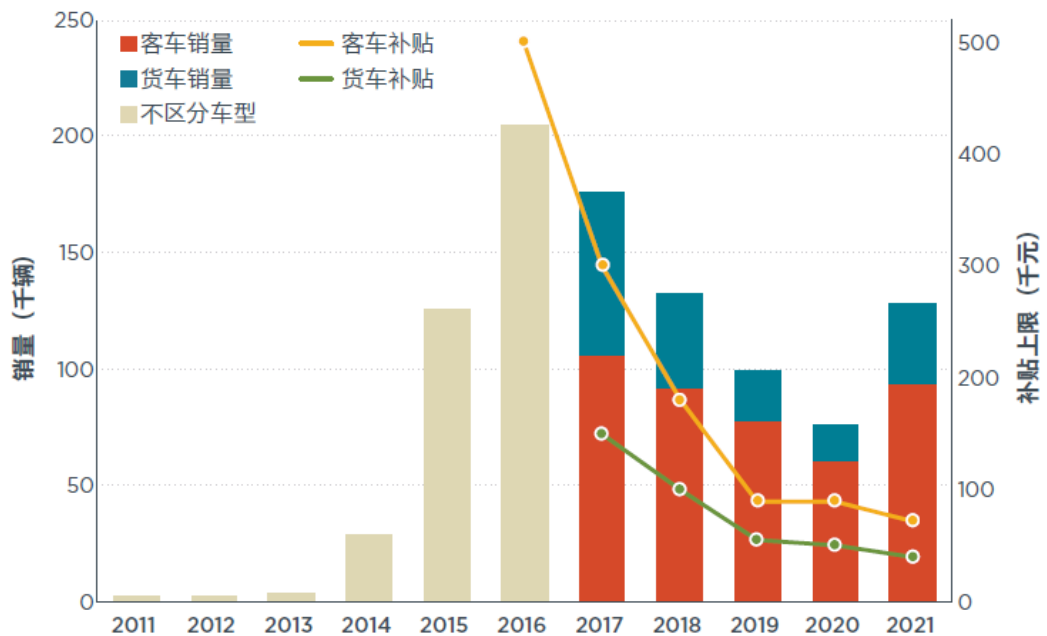


图 38 电动重型车销量与补贴的关系

电动货车方面发展最快的则是用于城市物流的小型厢式货车和环卫用车。环卫车辆与公交客运相同，受到政府采购的影响，基本会选择电动车辆。小型厢式货车则多受城市限行要求与政府对物流企业鼓励政策影响，在满足使用要求的情况尽量采购电动汽车。

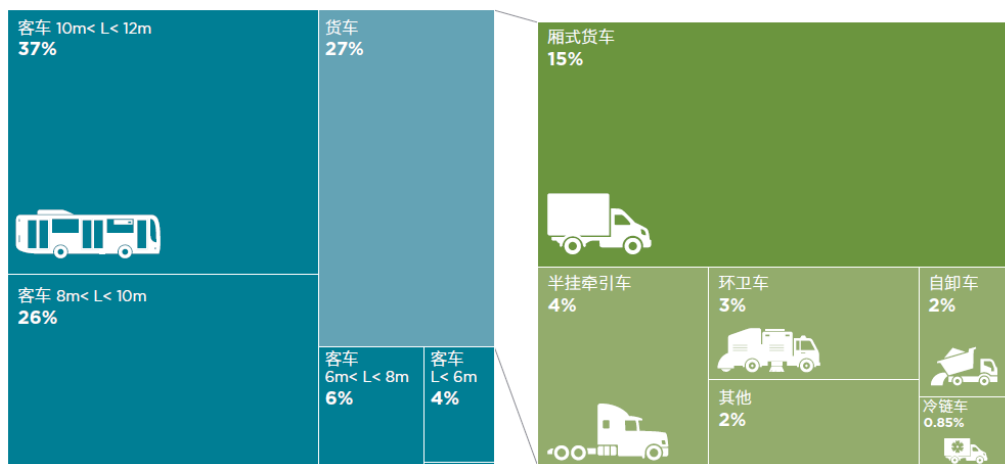


图 39 城市电动重型车辆的销量分布

城市中发展较快的电动车辆多数均有政策限制或鼓励的要求，推动使用者购买。同时其使用场景也有特殊性：公交客车、环卫车辆和小型厢式货车其作

业场景主要为城市低速运行，具单日作业输出功率较低的同时也具备长时间（>10 小时）停靠的特征，具备充分的充电时间和完善的配套充电场所。

从以上分析可以看出，电动货/客车的发展存在于电动小客车发展相同的技术瓶颈，主要集中在：

- （1）需要较长的充电时间，难以持续长时间运行；
- （2）需要稳定充足的充电场所；
- （3）续航有限，不宜单次大功率或长时间运行；
- （4）一次性采购成本高，使用者需要有明确政策限制或优惠支持；

综上，在城市内或周边有固定线路和充电场所的低功率输出重型车辆的电动化发展较快，而长途、路线不确定、高功率运行的重型车辆如牵引车和大型货车的电动化发展较慢。

非道路移动机械相比于重型车辆更加具备电动化的优势：

- （1）非道路移动机械作业地点基本固定，便于提供固定的充电设备；
- （2）大量非道路移动机械需要在厂区甚至封闭环境中作业，使用者本身有零排放机械的需求；
- （3）非道路移动机械种类众多，存在着大量低功率短时间作业的机械，对电池续航的需求较低；
- （4）大型工程的实施主体基本为大中型企业，受政策限制或优惠的影响大，便于政府的统一管理。

除了本身具备适宜的市场土壤外，非道路移动机械尤其是工程机械电动化还可以获得较高的社会环境收益。长途重型车辆的电动化推动困难，需要大量技术与基建投入。工程机械作业地点固定，不需沿途配套大量充电基础设施；工程机械管理相对松散，单机恶劣排放的机械较多，替代一台机械便可以收获大量污染减排；工程机械功率分布跨度大，大量工程机械处于中低功率且作业负荷较低，可以充分使用当前成熟电动化技术。

3 电动机械的发展情况

非道路移动机械电气化进展迅速，已经存在 8 个不同类别共 217 款机型。非道路移动机械主要分为工程机械、农用机械与船舶。其中工程机械主要在城市中作业，是当前的管控重点。根据企业端调研结果，零排放轻型叉车、机场

地面支持设备、堆场卡车和小型建筑机械在技术上进行了充分研发，具备生产配套能。

这些机械推动建筑、矿业、物流、港口等多个细分市场转型。根据用户端调研，充电基础设施配套和采购、使用成本是电动非道路移动机械最突出的两个市场障碍。工程机械现场充电基础设施需要输出功率可变，一些重型机械往往需要特别高的充电速率，而这以效率高于当前市场水平。此外，虽然全生命周期成本评估的许多电动机械与燃油机械持平，但一次性采购成本电动机械仍旧远高于燃油机械。

当前发展最快，最为明显的工程机械应用细分领域是叉车、举升机与堆高机。

这些机械主要应用于仓储物流场景中，作业地点固定。同时此类机械的持续作业时间较短，对续航需求较低。适合的作业场景推动了电动叉车的快速发展，中国叉车生产的两大龙头企业杭叉集团与安徽合力股份有限公司当前的研发重点已经从柴油叉车转向了电动叉车，根据两家公司的反馈当前销售额中超过 7 成是电动叉车。

而以挖掘机和装载机为代表的建筑机械市场中，电动化渗透率则较低。根据咨询数据，截至 2022 年底挖掘机电动化渗透率不足 1%，装载机电动化渗透率不足 5%。造成这一情况的原因主要是建筑机械的功率输出需求、充电需求较高，同时一次性采购成本较高，使用者难以承担。

此外当前工程机械的排放管理缺乏技术手段支持，大量超标排放机械无法发现和惩处，造成工程项目管理人和机械所有人缺乏排放升级的动力。

本研究过程中采用快速检测方法对天津当地 3 处建筑工地与 2 处货站的作业机械进行排放测试摸底，发现大多数机械的 NO_x 排放值均高于法规规定的限值，且部分机械存在作业时冒黑烟情况。



图 40 NO_x 与 PM 排放的快速测试法

表 14 快速法摸底排放

机械种类	排放标准	NO _x 窗口排放极值	是否有黑烟	测试结论
挖掘机	国三	549.6	是	NO _x 合格/PM 超标
装载机	国二	469.7	是	NO _x 合格/PM 超标
挖掘机	国三	947.1	否	NO _x 超标
挖掘机	国三	848.0	否	NO _x 超标
挖掘机	国三	520.3	否	合格
挖掘机	国三	464.4	否	合格
正面吊	国三	878.1	否	NO _x 超标
正面吊	国三	706.5	否	NO _x 超标

当前工程机械的电动化从市场端与生产端已经具备了充分的条件，亟需政策端提供一个契机来关联二者。

4 机械电动化场景与方向分析

根据调研反馈的结果，机械电动化必须考虑技术实现成本，电池续航，充电桩建设和一次购买成本与维保成本。对这些分析维度影响的核心是机械作业的场景与作业工况对于能量的需求与提供能量的能力，通过计算能量需求并匹配对应推广配套的所需的资金和支持来分析适宜的机械电动化方向。

4.1 工程机械作业场景选择

工程机械的可以根据作业的细分场景分为建筑机械、筑路机械和货场机械。

建筑机械常用的是挖掘机、装载机、打桩机和搅拌机等。一般会在固定的建筑工地土方作业阶段进场，在场内持续作业 1-2 个月。作业时间和作业负荷较高。

筑路机械常用的是推土机、装载机、平地机、沥青摊铺机和压路机等。一般会伴随筑路过程持续推进，单个路段的作业时间不长。筑路机械的作业时长和作业负荷中等。

货场机械常用的是叉车、堆高机、正面吊等。货场机械常年在固定区域作业，移动范围较小。货场机械根据作业地点的性质可进一步分为物流装卸用货场机械和仓库管理用货场机械，物流装卸用货场机械的作业时间较长且负荷较高；仓库用货场机械作业时间较短且负荷较低。

根据以上作业场景可以选取典型工程机械为：叉车、挖掘机、装载机。

三种机械的典型作业负荷（相对于额定功率）为：叉车 47.1%，装载机 42.6，挖掘机 65.1%。

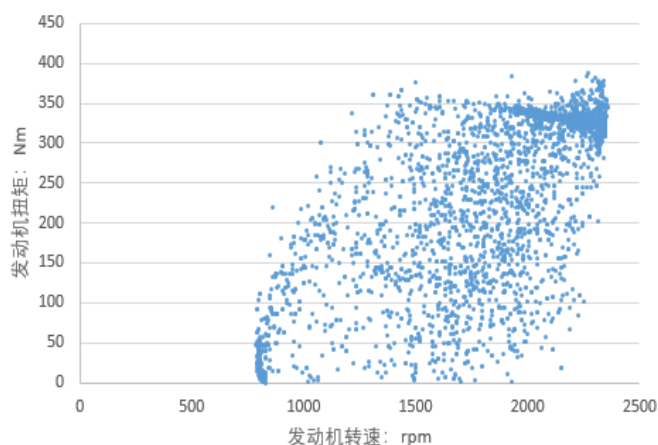


图 41 典型叉车作业负荷点分布

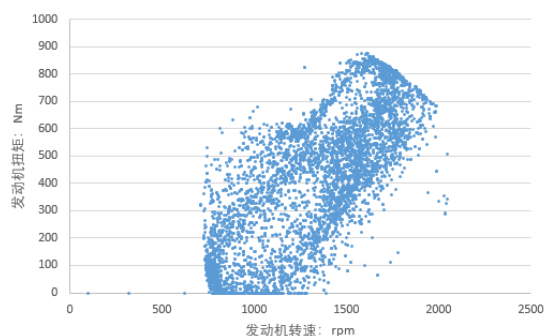


图 42 典型装载机作业负荷点分布

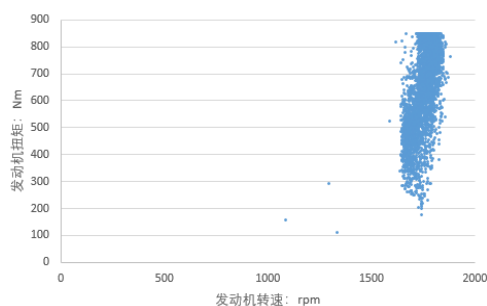


图 43 典型挖掘机作业负荷点分布

4.2 工程机械电动化技术水平

当前机械电动化的匹配电池的主要技术路线为 2 条：其一是与当前电动汽车相同的锂电路线，其二是采用传统铅酸电池路线。根据调研，当前电池技术水平能够提供的成熟的锂电池能量密度为 200Wh/kg，铅酸电池密度为 40Wh/kg；锂电池价格伴随市场波动，截至本调研的过程中锂电池的单价为 100 美元/kg，铅酸电池为 34 美元/kg。

根据以上作业场景选取典型工程机械与负荷水平；根据功率分布获取典型机型；根据问卷和监控平台的获取的日均作业时间；从而计算典型机械的能量需求如下：

表 15 典型挖掘机能量需求

序号	分类	代表功率 (kW)	代表工时 (h)	代表负荷 (%)	电池能量 (kWh)
1	小型挖机	55	3.8	65.1%	135.9
2	中型挖机	150	4.7	65.1%	459.0
3	大型挖机	300	6.3	65.1%	1228.5

表 16 装载挖掘机能量需求

序号	分类	代表功率 (kW)	代表工时 (h)	代表负荷 (%)	电池能量 (kWh)
1	小型装载机	功率 < 90kW, 取 74kW	4.9	42.6%	154.5
2	中型装载机	90kW < 功率 < 250kW, 取 162kW	4.9	42.6%	338.2

3	大型装载机	功率>250kW, 取418kW	4.9	42.6%	872.5
---	-------	------------------	-----	-------	-------

表 17 装载挖掘机能量需求

序号	分类	代表功率 (kW)	代表工时 (h)	代表负荷 (%)	电池能量 (kWh)
1	小型叉车	3t 及以下, 功率取 37kW	6.5/3.8	47.1%	113/66.2
2	中型叉车	3-5t, 功率取 55kW	6.5/3.8	47.1%	168.4/98.4
3	大型叉车	5-10t, 功率取 82kW	6.5/3.8	47.1%	251/146.8

能量需求计算公式为

$$\text{能量需求} = \text{功率} \times \text{负荷} \times \text{日均工时}$$

4.2.1 当前技术水平下电动化对于机械结构设计的影响

根据上文表中的能量需求, 满足机械一日作业所需能量的电池, 不同技术路线下对于机械的重量影响如下图所示:

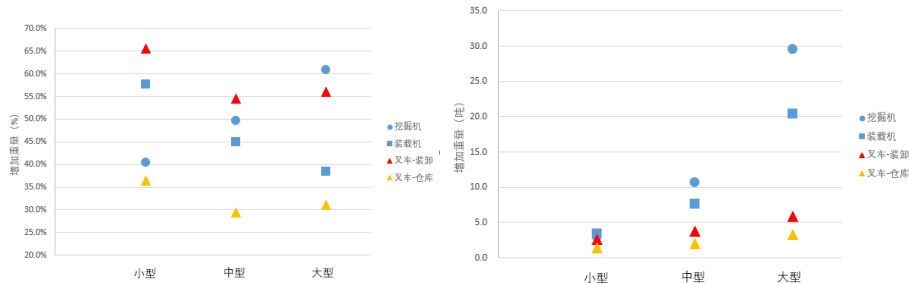


图 44 切换铅酸电池产生的重量影响

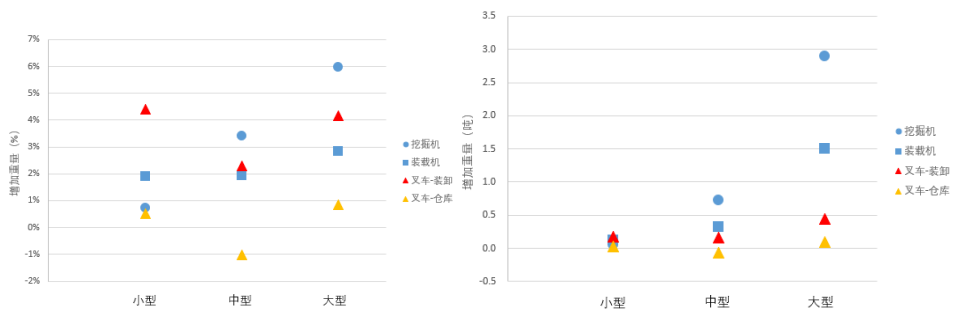


图 45 切换锂电池产生的重量影响

机械由柴油动力切换为锂电池动力对于重量的影响很小, 最大增重不超过 10%, 部分小机型还出现了减重的情况。重量基本不变的情况下, 机械生产企

业基本不需要对机械的履带、底盘和其他载重行走机构进行重新设计，可以通过旧有零部件，额外产生的制造成本较低。

机械由柴油动力切换为铅酸电池动力对于机械的整体重量影响较大，增重最高达到 65%或 30 吨。仅能量需求较低的仓库叉车增重较低，影响较小。过高的增重势必会造成机械的布置设计、行走机构的重新设计，额外增加制造成本。同时过重的电池也会造成机械体积过大影响机械的通过性。

锂电池路线对于机械生产设计影响较小，所有机械均适用于锂电池化；铅酸电池电动化的机械对于生产设计影响较大。仅仓库叉车因能量需求低，影响较小，适于直接采用铅酸电池电动化；

4.2.2 当前技术水平下电动化对一次购买费用的影响

根据上文表中的能量需求，满足机械一日作业所需能量的电池，不同技术路线下对于机械一次采购费用的影响如下图所示：

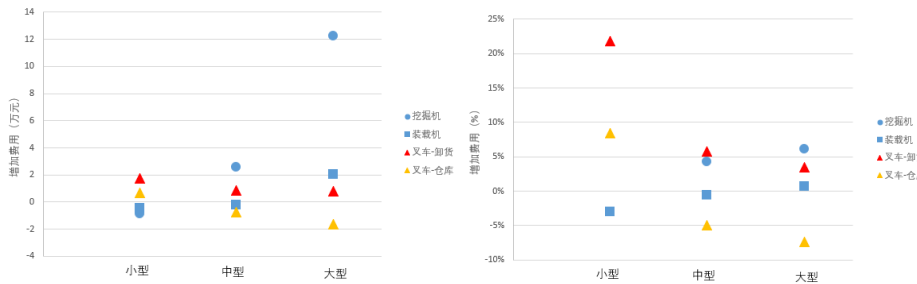


图 46 切换铅酸电池产生的一次购买费用影响

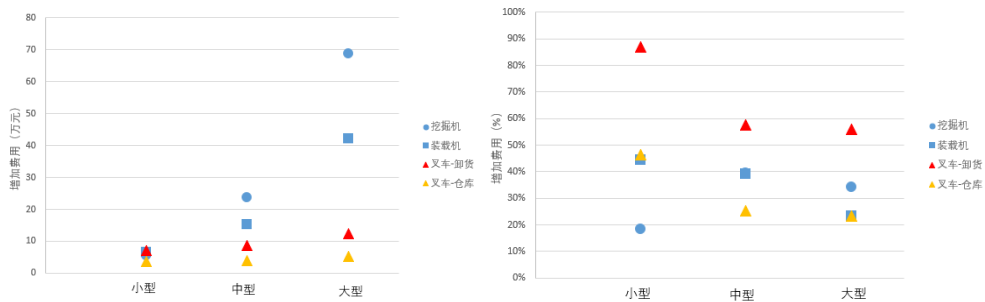


图 47 切换锂电池产生的一次购买费用影响

机械由柴油动力切换为铅酸电池动力对于机械一次购置费用的影响较小，最大费用增加为装卸叉车的 25%，部分能量需求较低的机械还出现了购买费用降低的情况。

机械由柴油动力切换为锂电池动力对于机械的一次购置费用影响较大，最大费用增加高达 86.8%。对于能量需求较低的仓库叉车和装载机价格增加相对较低。

4.2.3 当前技术水平下电动化对充电能力的需求

根据上文表中的能量需求，满足机械一日作业所需能量的充电功率和时间的计算如下图所示：

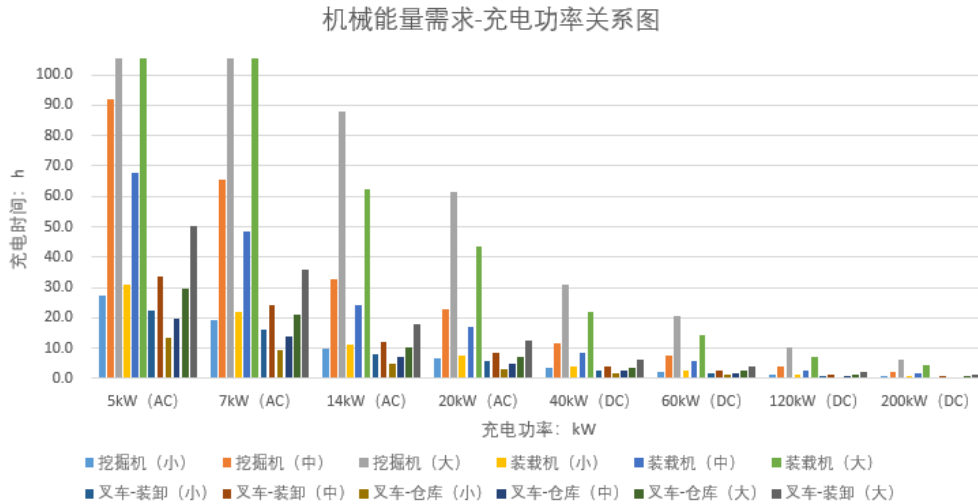


图 48 不同机械-不同充电功率的充电时间分析

表 18 不同机械在不同充电功率下的时间计算

	5kW (AC)	7kW (AC)	14kW (AC)	20kW (AC)	40kW (DC)	60kW (DC)	120kW (DC)	200kW (DC)
挖掘机 (小)	27.2	19.4	9.7	6.8	3.4	2.3	1.1	0.7
挖掘机 (中)	91.8	65.6	32.8	23.0	11.5	7.7	3.8	2.3
挖掘机 (大)	245.7	175.5	87.8	61.4	30.7	20.5	10.2	6.1
装载机 (小)	30.9	22.1	11.0	7.7	3.9	2.6	1.3	0.8
装载机 (中)	67.6	48.3	24.2	16.9	8.5	5.6	2.8	1.7
装载机 (大)	174.5	124.6	62.3	43.6	21.8	14.5	7.3	4.4
叉车-装卸 (小)	22.6	16.1	8.1	5.7	2.8	1.9	0.9	0.6
叉车-装卸 (中)	33.7	24.1	12.0	8.4	4.2	2.8	1.4	0.8
叉车-装卸 (大)	50.2	35.9	17.9	12.6	6.3	4.2	2.1	1.3
叉车-仓库 (小)	13.2	9.5	4.7	3.3	1.7	1.1	0.6	0.3
叉车-仓库 (中)	19.7	14.1	7.0	4.9	2.5	1.6	0.8	0.5
叉车-仓库 (大)	29.4	21.0	10.5	7.3	3.7	2.4	1.2	0.7

注：绿色为满足 1 个班次（8 小时）内充电完成的情况，黄色为 8-12 小时充电完成的情况，紫色为其他情况

从以上分析可以看出，中小型机械采用当前常用的 60kW 直流快充即可实现正常充电，采用当前技术建设充电设施即可；交流充电桩/器可以满足多数小型机械的充电需求而不需要单独建设充电设备，采用移动式交流充电桩/器即可满足要求，通用性好，场景灵活；大型机械作业时间集中且需要的充电的时间较长，当前市场技术水平难以满足要求。

4.2.4 当前市场价格下电动化对充电桩建设的需求

根据上文的结论，小型机械可以采用交流充电桩实现充电不需建设充电站；大型机械现在市场的主流充电技术难以满足充电需求，无法建设和推广高功率充电站；中型机械采用市场现有快充技术能够基本满足充电的需求，可以根据作业实际进行充电站的建设。

当前时长上充电桩的建设价格如下表所示：

表 19 单一充电桩建设价格

充电功率	5kW (AC)	7kW (AC)	14kW (AC)	20kW (AC)	40kW (DC)	60kW (DC)	120kW (DC)	200kW (DC)
价格(万元)	0.1	0.2	0.3	0.3	0.7	2.2	4.5	≥9

常见的中型挖掘机和装载机的作业场景为土方作业，场内同时作业机械一般有 15-20 台，即至少需要建设 60kW 充电桩 10 套，产生费用 22 万元。直流充电需要配套交流-直流转换系统与对应的线缆等，整体花费预估在 25-35 万元。即建设一个能够支持普通土方作业的充电站的花费接近 60 万元。

由于机械占用的充电位置面积远大于小型乘用车，因此机械充电站难以在项目建设完成后直接用作普通充电桩。后期用于普通充电站还需进一步的改造投入，增加了项目的额外投资。

当前交通部门与国家电网投入研发了移动式充电桩，可以实现快速并网和 AC/DC 转化，有一定可能能够在未来解决机械充电困难的问题。

4.2.5 当前市场价格下电动机械与燃油机械的使用费用分析

电动乘用车的推广除了国家进行新能源补贴之外，电动车充电多数使用的是家用充电桩，即使用民用电对车辆进行充电。民用电享受国家的电力补贴，一般是工业用电价格的 1/2。同时，中国将道路养路费、成品油消费税，城市

维护建设税等税费直接加入燃油价格中，仅由燃油车辆车主承担，电动车主并不承担。无形中又对电动车的使用提供了额外的政策优惠。

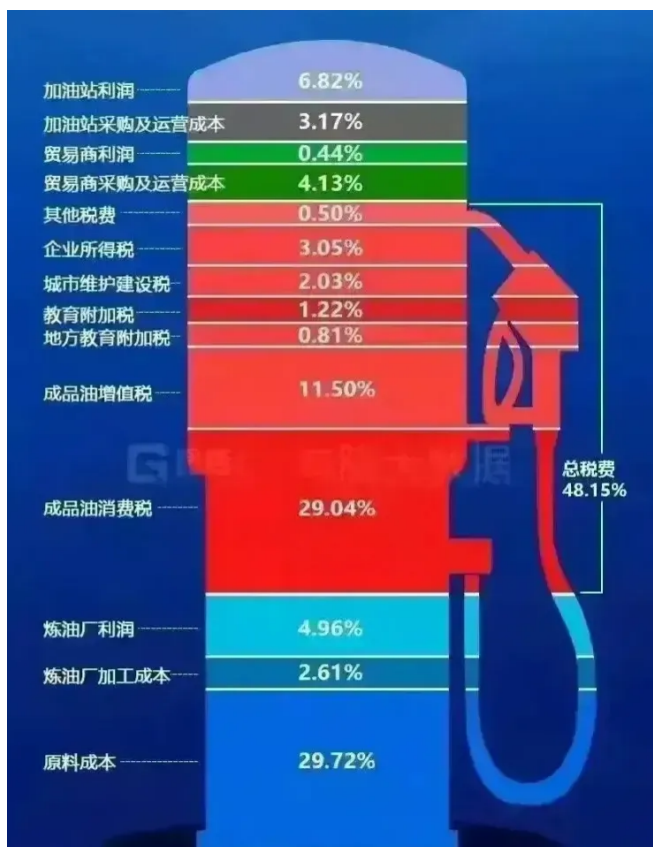


图 49 中国燃油价格构成

电动机械在工地或工场进行作业，充电时使用的是工业电价，平均电价 1 元/kWh，国家电网的充电桩服务费为 0.8 元，合计 1.8 元。

用电分类	电压等级	电度电价			
		尖峰	高峰	平段	低谷
一、一般工商业	不满 1 千伏	1.4223	1.2930	0.7673	0.2939
	1-10 千伏	1.3993	1.2710	0.7523	0.2849
	20 千伏	1.3923	1.2640	0.7453	0.2779
	35 千伏	1.3843	1.2560	0.7373	0.2699
	110 千伏	1.3693	1.2410	0.7223	0.2549
	220 千伏及以上	1.3543	1.2260	0.7073	0.2399

图 50 中国的工业电价举例

而与此相对的，工地上使用的燃油管理较为宽松，多数为地方炼油厂的廉价燃油，甚至私人炼油厂提供的“黑油”。这些燃油的价格普遍比市场加油站提供的燃油便宜 20%-40%左右。1L 燃油约能够向内燃机提供 3.77kWh 的电量。以柴油价格 7.29 元为例转化，燃油提供 1kWh 能量的费用为 1.93 元。采用“黑油”提供 1kWh 能量的费用则为 1.2-1.5 元，低于使用工业用电的充电桩价格。低廉的“黑油”使得电动机械不具备使用成本上的优势。

第八章 总结与政策建议

1 总结

非道路移动机械的整体排放量与重型柴油车相当，单机排放管理水平低于重型柴油车。非道路移动机械的单机排放高于重型柴油车，应用相同的治理手段减排效果更加明显。非道路移动机械种类繁多、使用场景种类多且分散，加之覆盖功率跨度较大，造成不同机械之间的污染物排放与碳排放控制手段和效果差异较大。

农用非道路移动机械使用存在较强的时间周期和负荷周期性，在农忙时间处于长时间大负荷运行，在农闲时间则多数处于闲置状态。农业机械工作时往往需要大负荷长时间运行，对机械的功率与充电时间要求较高；同时，农业机械分布较为分散，大量农业机械属于个体农户所有，当前技术条件下建设高功率充电设备成本过高；农业机械大量在农村作业，周边人口密度低环境承载力高，污染影响较小。农用机械进行新能源化替代，当前的成本较高而收益较低。

工程机械基本在城市或城市周边作业，作业地点较为集中；同时工程机械所有者一般以租赁机械或出卖作业服务为生，机械大多均处于作业状态，年作业时间较高；工程机械的功率跨度大，小型工程机械已经出现了明显的电动化特征而大中型工程机械电动化渗透率较低；工程机械单体排放较差，且主要活动在城市范围内，污染影响较大。工程机械使用新能源化替代，具备较好的减排潜力与升级效果。但当前技术条件下应从小功率、通用乘用车电动技术的机械开始实施，建立市场供应链后实现逐步替代升级。

船舶主要指内河船舶，中国的内河船舶主要集中在南方水系中，尤其是长江、珠江流域。船舶当前的排放管理较车辆明显落后，大约相当于重型柴油车的国三水平，具备巨大的减排潜力。但船舶排放控制技术起步较晚，当前技术水平难以快速配套。同时内河航运船舶在航路上处于持续运行状态，靠岸时间很短且靠岸位置不固定，难以实现电动化替代。目前部分作业船只和游玩船只实现了电动化，但这些船只作业负荷低、作业时间段且有固定停靠地，难以大面积推广至航运船舶中。

矿车、飞机和其他非道路移动机械。这些特种作业的机械运行区域远离人群（如飞机在高空中排放），排放污染的直接影响较小。同时其作业环境特殊，以当前新能源的技术水平难以匹配对应的动力源。因此政府对于这一部分机械的排放的管理和升级的愿望较低。

综合分析非道路移动机械的整体排放特征，结合当前的新能源技术水平，最适合进行新能源的机械为工程机械。

2 政策建议

中国新能源汽车的发展蓬勃，配套的电机、电池和控制系统形成了较为成熟的产业配套能力，为后续的重型柴油车和非道路移动机械的新能源化提供了良好的土壤。其他新能源化的手段诸如：电子燃料（e-fuel）、氢燃料、氨燃料等尚处于研究与工程化阶段，短期内不具备大规模推广的能力。

当前非道路移动机械新能源化的方向主要是电动化，利用相对成熟的电驱动产业链来服务电动非道路移动机械，6吨及以下的中小型仓库用叉车（负荷、工时低）可以采用铅酸电池实现低成本的电动化。应积极鼓励推进。

机械电动化应采取功率从小到大，逐步推进的方式完成：中小型建筑机械（75kW 以下）宜以锂电池路线进行电动化推广，但需要配套一定政策引导；中型建筑机械（75-200kW）可以以锂电池为动力逐步试点推广，并提供试点补贴以解决一次购买费用过高的问题；大型机械（200kW 以上）暂时不适合电动化。

当前主流车用的 60kW 直流快充可以直接作为中型机械充电桩，但亟需配套移动式交流-直流转换技术，来满足机械流动作业的充电需求。

当前机械用电产能本较高，烧“黑油”的成本低，用户缺乏使用电动机械动力。应重点打击工地“黑油”并提供政策补贴引导电动机械的推广。

参考文献

- [1] WU Y, ZHANG S, HAO J, et al. On-road vehicle emissions and their control in China: A review and outlook [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 332-349.
- [2] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报（2022年）[EB/OL]. (2022-12-07).
<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202212/W020221207387013521948.pdf>.
- [3] 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.
- [4] ZHANG W, LIU B, ZHANG Y, et al. A refined source apportionment study of atmospheric PM_{2.5} during winter heating period in Shijiazhuang, China, using a receptor model coupled with a source-oriented model [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 222: 117157.
- [5] 农业机械化管理局. 2021年全国农业机械化发展统计公报 [EB/OL]. (2022-08-17).
http://www.njhs.moa.gov.cn/nyjxhqk/202208/t20220817_6407161.htm.
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [7] AI Y, GE Y, RAN Z, et al. Quantifying air pollutant emission from agricultural machinery using surveys—a case study in Anhui, China [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(4): 440.
- [8] XUE Y, WU T, CUI Y, et al. Energy consumption and pollutant emission of diesel-fired combustion from 2009 to 2018 in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112137.
- [9] BIE P, JI L, CUI H, et al. A review and evaluation of nonroad diesel mobile machinery emission control in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 123: 30-40.
- [10] 生态环境部, 国家质量监督检验检疫总局. 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法（中国第三、四阶段）（GB 20891-2014）[S]. 2014.
- [11] HU J, LIAO J, HU Y, et al. Experimental investigation on emission characteristics of non-road diesel engine equipped with integrated DOC+CDPF+SCR aftertreatment [J]. *Fuel*, 2021, 305: 121586.
- [12] XUE Y, LIU X, CUI Y, et al. Characterization of air pollutant emissions from construction machinery in Beijing and evaluation of the effectiveness of control measures based on information code registration data [J]. *Chemosphere*, 2022, 303: 135064.
- [13] 中国工程机械工业协会. 工程机械行业“十四五”发展规划 [EB/OL]. (2021-07-12).
<http://www.cncma.org/article/10579>.
- [14] 北京市统计局. 北京市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [15] 天津市统计局. 天津市统计年鉴 [M]. 天津: 中国统计出版社, 2021.
- [16] 河北省统计局. 河北省统计年鉴 [M]. 石家庄: 中国统计出版社, 2021.

- [17] 中国机械工业年鉴编辑委员会. 中国工程机械工业年鉴 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [18] 中国机械工业年鉴编辑委员会. 中国农业机械工业年鉴 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [19] 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/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf>.
- [20] 北京市生态环境局. 非道路机械用柴油机排气污染物限值及测量方法 (DB11/185-2013) [S]. 2013.
- [21] Li X, Yang L, Liu Y, et al. Emissions of air pollutants from non-road construction machinery in Beijing from 2015 to 2019 [J]. *Environment Pollution*, 2023, 317: 120729.
- [22] 范武波, 钱骏, 叶宏, 等. 四川省非道路移动源大气污染物排放清单研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, 038(012): 4460-4468.
- [23] 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(07): 2738-2746.
- [24] 刘永腾, 彭永伦, 张崇波, 等. 北京市 2019 年工程机械排放污染测算 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(06): 2835-2844.
- [25] 庞凯莉, 张凯山, 马帅, 等. 中国农业机械的使用特征及其尾气排放的时空分布 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 4268-4279.
- [26] 生态环境部. 非道路柴油移动机械污染物排放控制技术要求 (HJ 1014—2020) [S]. 2020.
- [27] WANG K, GUO X, WANG X, et al. Improved estimation of pollutant emissions from agricultural machinery and projection of its reduction potential in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, 13(11): 101591.
- [28] 北京市人民政府. 北京市“十四五”时期生态环境保护规划 [EB/OL]. (2021-11-28). http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202112/t20211210_2559052.html.

免责声明

- 若无特别声明, 报告中陈述的观点仅代表作者个人意见, 不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性, 不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时, 并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐, 或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.

南开大学，中国汽车技术研究中心有限公司

2023.10.12

**Nankai University, China Automotive
Technology and Research Center Co., Ltd
October 12, 2023**