北京大学能源研究院
INSTITUTE OF ENERGY

ENERGY FOUNDATION
能源基金会

非道路移动机械领域的绿色低碳发展路径研究报告

Pathways Towards Green and Low-carbon Development of Non-road Mobile Machinery

北京大学能源研究院

2024.1.26

Institute of Energy, Peking University

January 26, 2024

关于作者

刘昊林，王倩钰，独威，顾江源，于永淼，杨富强

ABOUT THE AUTHORS

LIU Haolin, WANG Qianyu, DU Wei, GU Jiangyuan, YU Yongmiao, YANG Fuqiang

致谢

本研究由北京大学能源研究院统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

在本项目研究过程中，研究团队得到了中环联合认证中心的大力支持，在此向他们表示诚挚感谢。

研究团队同时感谢以下专家在项目研究过程中作出的贡献：
（以姓氏首字母排序）
白荣春、董昊、房康宁、高绍凯、龚慧明、黎晓晖、陆智俊、宁学贵、秦静、阮计连、史京玺、邵臻颖、谭建伟、王光存、王伟峰、杨雷、杨裕丰、张学敏、赵剡水、赵莉、郑平、朱泓

另外，也感谢辛思涵、武毅楠和吉志豪在资料整理方面的协助。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of Institute of Energy, Peking University and is funded by Energy Foundation China.

The team is grateful for the generous support it received throughout this research from China Environmental United Certification Center.

The team would like to thank the following experts for their contribution to this research:
(Names listed alphabetically)
BAI Rongchun, DONG Hao, FANG Kangning, GAO Shaokai, GONG Huiming, LI Xiaohui, LU Zhijun, NING Xuegui, QIN Jing, RUAN Jilian, SHI Jingxi, SHAO Zhenying, TAN Jianwei, WANG Guangcun, WANG Weifeng, YANG Lei, YANG Yufeng, ZHANG Xuemin, ZHAO Yanshui, ZHAO Li, ZHENG Ping, ZHU Hong

目录

执行摘要 1
1 非道路移动机械绿色低碳发展意义 5
1.1 中国减少石油消费的重要性 5
1.2 非道路移动机械节油减碳的意义 6
1.3 项目研究边界 8
1.4 研究内容 8
2 非道路移动机械领域发展现状 9
2.1 中国非道路移动机械现状 9
2.2 国内非道路移动机械企业新能源化现状 19
2.3 国际非道路移动机械企业新能源化现状 22
2.4 国内外地方转型行动及低排放区应用案例 24
2.5 国内外对比分析 28
3 非道路移动机械油耗及碳排放的影响因素分析 29
3.1 发动机能效 29
3.2 机械电动化 30
3.3 替代燃料应用 30
4 情景目标的划分和设定 30
4.1 分析框架和研究方法 30
4.2 情景分析中的因素分析 32
4.3 保有量预测 35
4.4 基准情景 36
4.5 政策强化情景 41
4.6 基准情景和政策强化情景下三种机械油耗总量及碳排放总量预测 45
5 非道路移动机械的主要节油减碳路径 46
5.1 主要节油减碳路径探索 47
5.2 各节油减碳路径发展现状与面临挑战 50
6 非道路移动机械的节油减碳路径选择 53
6.1 各机械类型节油减碳路径选择和时间表 53
6.2 各机械类型在典型应用场景下节油减碳路径优先级及节油潜力 55
7 主要结论 58
8 政策建议 60
8.1 加强对非道路移动机械污染物排放及油耗监管 60
8.2 加快企业技术革新 60
8.3 加强政策激励和引导，利用经济手段促进行业低碳化发展 60
8.4 建立二手非道路移动机械的退出和报废机制 61
8.5 促进非道路移动机械标准化进程 61
8.6 组建跨部委工作组并搭建行业信息共享平台 62
8.7 推动农业机械电动化和农村可再生能源协同发展新模式 62
附录 1 基准情景下当年机械节油及减碳量计算 64
附录 2 政策强化情景下当年机械节油及减碳量计算 65
附录 3 机械各节油减碳路径节油量计算 66

附录 4 基准情景和政策强化情景下三种机械各节油减碳路径总油耗及碳排放总量计算 67

图目录

图 1-1：中国与欧美非道路移动机械排放标准实施进度 7
图 2-1：中国工程机械产业链结构[14] 10
图 2-2：挖掘机 2012-2022 年产销量变化趋势图 11
图 2-3：挖掘机 2018-2022 年国内销量及出口量变化趋势图 11
图 2-4：2012-2021 年挖掘机保有量变化趋势图 12
图 2-5：2021 年大、中、小型挖掘机保有量及占比 12
图 2-6：装载机典型应用场景产比 14
图 2-7：装载机 2015-2020 年产量销量变化趋势图 14
图 2-8：装载机主要机型销量占比 15
图 2-9：装载机 2015-2020 年国内销量及出口量变化趋势图 15
图 2-10：2012-2021 年装载机保有量变化趋势图 16
图 2-11：中国农业机械产业链结构 17
图 2-12：2014-2021 年拖拉机保有量变化趋势图 18
图 2-13：2020 年大、中、小型拖拉机保有量及占比 19
图 4-1：分析框架 31
图 4-2：基准情景下挖掘机、装载机、拖拉机各自年度节油量及节油总量预测 40
图 4-3：基准情景下挖掘机、装载机、拖拉机各自年度碳减排量及减碳总量预测 40
图 4-4 政策强化情景下挖掘机、装载机、拖拉机各自年度节油量及节油总量预测 44
图 4-5 政策强化情景下挖掘机、装载机、拖拉机各自年度碳减排量及减碳总量预测 45
图 4-6 两种情景下挖掘机、装载机及拖拉机的油耗总量变化趋势 45
图 4-7 两种情景下挖掘机、装载机及拖拉机的碳排放总量变化趋势 46
图 6-1：2025-2060 年挖掘机、装载机、拖拉机的最优节油减碳路径 54
图 6-2：2025-2060 年挖掘机、装载机、拖拉机在典型应用场景下最优节油减碳路径 57

表目录

表 1-1：加快构建现代能源体系相关政策文件 6
表 2-1：各类挖掘机保有量、年度工作小时数、平均使用油耗、行业每年总油耗及碳排放总量 13
表 2-2：三类装载机保有量、年度工作小时数、平均使用油耗、行业每年总油耗及碳排放总量 16
表 2-3：各类拖拉机保有量、年度工作小时数、平均使用油耗、行业每年总油耗及碳排放总量 19
表 4-1：挖掘机、装载机、拖拉机保有量预测 35
表 4-2：挖掘机、装载机、拖拉机能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测（基准情景） 37
表 4-3：各节油减碳路径下各类机械的保有量占比预测（基准情景） 37
表 4-4：挖掘机各路径节油减碳潜力（基准情景） 38
表 4-5：装载机各路径节油减碳潜力（基准情景） 39
表 4-6：拖拉机各路径节油减碳潜力（基准情景） 39
表 4-7：挖掘机、装载机、拖拉机能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测（政策强化情景） .. 41
表 4-8：各节油减碳路径下各类机械的保有量占比预测（政策强化情景） 41
表 4-9：政策强化情景下挖掘机行业各路径节油减碳潜力 42
表 4-10：装载机行业各路径节油减碳潜力（政策强化情景） 43
表 4-11：拖拉机各路径节油减碳潜力（政策强化情景） 44
表 5-1：推动我国非道路移动机械产业国家政策 47
表 6-1：各类机械在其典型应用场景下不同节油减碳路径下的保有量占比预测 56
表 6-2：典型应用场景下各节油减碳路径节油减碳潜力 57

执行摘要

1. 非道路移动机械绿色低碳发展意义

石油是现代经济社会发展的“血液”，是事关国计民生的战略性资源，同时也是导致环境污染、生态破坏和二氧化碳排放的重要来源。然而我国的石油资源大部分依赖于进口，2022 年中国石油对外依存度高达 71.2%。石油能源供需缺口增大，加之近年来国际石油价格大幅飘升和波动，高度依赖这一不可再生资源已经对我国长期稳定和发展构成了巨大威胁并日益成为制约我国经济社会持续发展的重要因素。我国每年的柴油消耗量中约有 60%用于非道路用发动机，其中，工程机械和农业机械的柴油消耗量占比最大，约占 36%。推动非道路移动机械领域减少石油消费，能够促进我国石油消费尽早达峰和减少对外依赖，对于保障我国能源和经济安全具有重要意义。

此外，随着人类社会现代化的进程加快，各种类别的非道路移动机械（装载机、挖掘机、推土机、拖拉机和联合收割机等）正被越来越多的应用在工业生产、城市建设、农业生产等行业中，伴随而来的是非道路移动机械严重的排放问题。2022 年，非道路移动源污染物排放总量为 556.8 万吨，约占我国移动排放源总量的 1/4。因此，减少石油消费也对于打赢蓝天保卫战，积极应对气候变化，尽早实现碳达峰、碳中和具有重要意义。

本报告选择保有量大、能耗高、使用频繁，以及应用场景广的三种具代表性的非道路移动机械：挖掘机、装载机和拖拉机为主要对象，分别判断这些机械类型在提高能效、电动化、混合动力化和替代燃料应用等主要方面的节约柴油、减少碳排放的路径及潜力，并且通过了解该领域实施绿色低碳转型过程中存在的困难和挑战，形成政策建议，推动非道路领域向更加绿色节能的方向发展。

2. 非道路移动机械领域发展现状

我国工程机械和农业机械依然以传统燃油机械为主。为了摸清我国非道路移动机械的油耗和碳排放情况，本报告根据对企业调研数据及网上公开的数据，对重点研究对象挖掘机、装载机和拖拉机的油耗和碳排放进行估算。目前这三种机械的总油耗约为 4882.48 万吨，二氧化碳排放总量接近 1.54 亿吨。随着未来城市基建、矿业等产业的不断发展，对于施工用机械的需求也会增多，若不加大对传统柴油机械的替代，由此造成的油耗也会更多。不仅对我国能源安全产生不利影响，也将会成为“双碳”目标实现的掣肘。

关于新能源非道路移动机械的发展情况，虽然目前我国新能源工程机械渗透率不足 1%，但新能源工程机械市场已然呈现出群雄逐鹿局面，新能源工程机械产品层出不穷，传统工程机械主机厂纷纷布局新能源工程机械领域，适用于封闭和固定工作环境等应用场景的细分品类已率先走向电动化。技术

自研的同时也在和“三电”企业进行深度合作开发，不断推出多类型电动化工程机械产品。全球工程机械龙头如卡特彼勒、沃尔沃建筑设备、三一集团、徐工集团等已推出数款电动化工程机械产品。而我国农业机械的新能源化还处于初始阶段，目前发展进程较慢。

国际对于新能源非道路移动机械的探索起步较早，得益于完善的政策及财政支持体系，新能源技术较为成熟。我国新能源非道路移动机械研究起步较晚，与国际上先进水平在关键零部件技术、新能源非道路移动机械配套股利政策及措施等方面仍有一定的差距。不过，我国山东、浙江等地已率先开展新能源非道路移动机械的试点应用，在北京、西安等城市也划定了低排放区，以减少和控制非道路移动机械的排放。

3. 情景目标的划分和设定

为了更好地了解不同技术路径对中国非道路移动机械行业降低石油消耗和碳排放的潜在影响，基于行业相关的政策导向、发展趋势以及环境保护要求，本报告提出了两个情景——基准情景和政策强化情景。并使用量化计算的方法，采用自下而上的方式，预测不同情景下三种机械类型分别在 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年的节油量和碳减排量。

基准情景下，非道路移动机械行业按照当前政策和行业规划目标发展。在非道路移动机械行业新能源技术创新改革与支持新能源非道路移动机械发展等相关政策的推动下，非道路移动机械能效不断改善（每年提高 0.6%），新能源化及替代燃料应用在该领域发展相对缓慢。通过研究发现，由于发动机能效提升、电动化发展（纯电动化和混动化）以及替代燃料的逐步应用，基准情景下，与现状相比，截至 2030 年和 2060 年三种机械总节油量分别为 127.67 万吨和 622.88 万吨，减碳量分别为 401.55 万吨和 1959.02 万吨 CO_2。

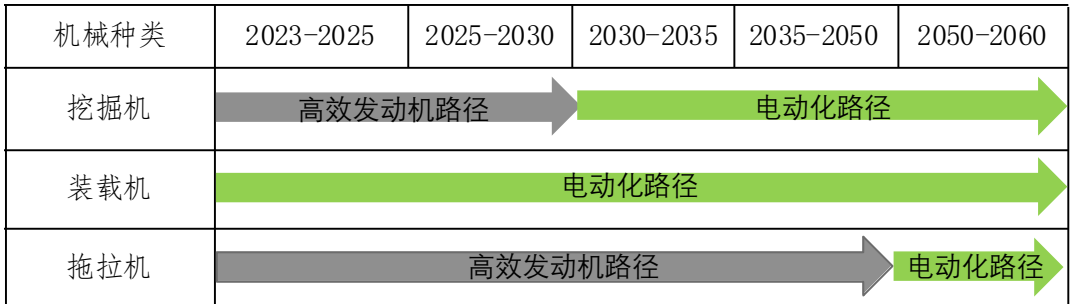
政策强化情景下，本报告预计未来我国会出台新的政策更快推动新能源工程机械和农业机械发展，以及建立更加明确的新能源化目标，与基准情景相比，政策加速非道路移动机械行业新能源技术创新改革与机械的市场应用，完全采用技术性的能效提升（每年提高 1.5%），新能源化及替代燃料应用在该领域发展相对迅猛。通过研究发现，由于政策支持及技术突破，发动机能效、电动化发展（纯电动化和混动化）速度以及替代燃料的应用快速发展。政策强化情景下，与现状相比，截至 2030 年和 2060 年三种机械总节油量分别为 232.14 万吨和 845.99 万吨，减碳量分别为 730.12 万吨和 2660.75 万吨 CO_2。

可见，若国家更加重视非道路移动机械行业的绿色低碳化发展，出台一系列更加激进的激励政策，则未来行业新能源化发展前景将更加乐观，节油减碳效果更加显著，有助于缓解我国石油资源匮乏和高需求之间的矛盾和尽早实现“双碳”目标。

4. 非道路移动机械的主要节油减碳路径及选择

由于情景分析的特点，基准情景和政策强化情景在不同阶段的节油量和减碳量有差别。为了推动我国非道路领域的能效提升和绿色低碳转型，促进相关企业的国际竞争力和该领域的高质量发展，基于情景分析的结果，本报告最终以政策强化情景下更加激进的机械能效提升潜力、电动化率及替代燃料应用率预测数据为基础，采用定量和定性结合的分析方法，预测未来各路径的节油减碳潜力，以期通过政策的出台推动非道路领域的绿色低碳发展。

研究发现，短期内对于挖掘机和拖拉机，电动化机械和其他新能源机械发展仍面临技术限制、高成本等挑战，且技术尚在研发阶段，不能满足实际应用需要；对于装载机，纯电动机械突破市场示范起步“瓶颈”，进入快速普及发展阶段，成为最先规模化电动化替换的品类，因此挖掘机和拖拉机的最优节油减碳路径仍为高效发动机路径，装载机的最优节油减碳路径为电动化路径（纯电为主）。中期来看，纯电动化迅速在挖掘机行业普及，在拖拉机行业开始形成初步的规模效应，但传统燃油机械仍为主流。长期来看，电动化（包括纯电动和混动）也可较成熟地应用在拖拉机上，成为拖拉机节油减碳的最佳路径。



此外，本报告对三种非道路移动机械的典型应用场景也进行分析，对于同一机械类型的不同应用场景，占比和最佳节油减碳路径的选择也不同。本报告依据机械吨位、使用场所是否固定、充电难易度共三个维度来选择最佳节油减碳路径。

对于挖掘机，大型挖掘机主要应用场景为矿山开采和大型基建，在纯电动化进程中对于电池能量密度、耐久性、续航能力和电机功率要求较高，因此纯电动化进程稍慢相较于中型和小型挖掘机。对于挖掘机和装载机，地产开发、矿山开采等场景为固定场所，不太涉及长途运输，且开采工作一般不会短时间内结束，拉电缆、建设充电站是可持续应用的，因此纯电动化机械替代的实现难度相对低。市政建设、园林水利场景为非固定场所，涉及长途运输，但多在市区，也方便充电换电，纯电动化机械替代难

度也相对低。对于拖拉机，其在使用场景中做工时负荷不稳定，尤其是对于大型拖拉机，瞬时负荷变化大，对电池性能要求较高，短期内纯电动化电池技术不够成熟无法支撑如此高负荷的需求。考虑到混动拖拉机具有可以为后面的拖拽农机提供电源的延伸功能，因此中长期来看，混动化为大型拖拉机的最佳节油减碳路径、纯电动化为中小型拖拉机的最佳节油减碳路径的可能性较高。

<table>
<tr><th>机械种类</th><th>应用场景</th><th>2023-2025</th><th>2025-2030</th><th>2030-2035</th><th>2035-2050</th><th>2050-2060</th></tr>
<tr><td rowspan="2">挖掘机</td><td>矿山开采</td><td colspan="3">高效发动机路径</td><td colspan="2">电动化路径</td></tr>
<tr><td>市政建设</td><td colspan="2">高效发动机路径</td><td colspan="3">电动化路径</td></tr>
<tr><td>装载机</td><td>地产开发</td><td colspan="5">电动化路径</td></tr>
<tr><td>拖拉机</td><td>种地</td><td colspan="4">高效发动机路径</td><td>电动化路径</td></tr>
</table>

7. 政策建议

基于行业发展现状和难点，以及为了促进行业加快低碳化发展，本报告提出了 7 条政策建议，包括：加强对非道路移动机械污染物排放及油耗监管；加快企业技术革新；加强政策激励和引导；利用经济手段促进行业低碳化发展；建立二手非道路移动机械的退出和报废机制；促进非道路移动机械标准化进程；组建跨部委工作组并搭建行业信息共享平台；推动农业机械电动化和农村可再生能源协同发展新模式等，以期加速我国非道路移动机械可持续和低碳化发展。

1 非道路移动机械绿色低碳发展意义

随着我国工程项目的迅猛进步和发展，非道路移动机械的保有量和使用量也在不断增加，尤其是工程机械和农业机械。目前，关于非道路移动机械的污染物排放情况我国已有研究，污染物治理也取得一定成效，相关标准和政策也陆续出台。然而我国对非道路移动机械的能耗和碳排放研究较少，“双碳”目标的提出对非道路移动机械领域的能效提升和绿色低碳转型起到推动作用。

1.1 中国减少石油消费的重要性

2020 年 9 月 22 日，习近平主席在第 75 届联合国大会一般性辩论中宣布，中国将力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和。在之后不到一年的时间里，习近平主席在将近 10 次的重大国际场合讲话中都重申了这一目标，这既是中国推动构建人类命运共同体的重大举措，也是负责任大国对全世界的庄严承诺。能源作为推进碳达峰、碳中和的主战场，作为人类社会发展的重要物质基础，能源安全已成为关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题，对国家繁荣富强、人民生活改善、社会长治久安至关重要。

石油是现代经济社会发展的“血液”，是事关国计民生的战略性资源，同时也是导致环境污染、生态破坏和二氧化碳排放的重要来源。随着我国城市化、工业化进程的深入推进，我国经济增长对高效优质的石油资源的需求大幅度提高。2022 年，中国石油消费占中国一次能源消费总量的 17.9%[1]，占全球石油消费总量的 16.4%[2]（2021 年），仅次于美国居世界第二位。然而我国的能源储量具有富煤、贫油、少气的特点，石油资源大部分依赖于进口。自 1993 年中国成为石油净进口国之后，石油进口量持续快速攀升。作为世界上最大的石油进口国，2022 年中国生产原油 2.05 亿吨，进口原油 5.08 亿吨[3]，进口成品油 2645 万吨[4]，石油对外依存度达到 71.2%，远超国际上 50%的安全警戒线。石油能源供需缺口增大，加之近年来国际石油价格大幅飘升和波动，高度依赖这一不可再生资源已经对我国长期稳定和发展构成了巨大威胁并日益成为制约我国经济社会持续发展的重要因素。推动石油消费尽早达峰，控制石油消费总量过快增长和减少对外依赖，对于保障我国能源和经济安全具有重要意义。

此外，在经济高速增长的条件下，传统的以煤炭、石油为主的能源消费结构也逐渐显现出其弊端。这种传统能源消费在带来经济快速增长的同时也造成了严重的环境污染。2022 年，全球能源部门 CO_2 排放量增长了 0.9%（3.21 亿吨），达到 368 亿吨，其中，石油消费的 CO_2 排放量增长甚至超过了煤炭，增长了 2.5%，达到 112 亿吨[5、6]，约占全球能源部门 CO_2 排放总量的 30.4%。而中国能源部门 CO_2 排放量为 133 亿吨[7]，约占全球能源部门 CO_2 排放总量的 36%。因此，减少石油消费也对于打赢蓝天保卫战，积极应对气候变化，尽早实现碳达峰、碳中和具有重要意义。

为了加快构建现代能源体系、保障国家能源安全，力争如期实现碳达峰、碳中和，推动实现经济社会高质量发展，国家出台了一系列政策文件，详见表 1-1。

表 1-1：加快构建现代能源体系相关政策文件

文件名称	发布时间	主要内容
中共中央、国务院《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》	2021 年 9 月 22 日	强化能源消费强度和总量双控、大幅提升能源利用效率、严格控制化石能源消费、积极发展非化石能源，加快构建清洁低碳安全高效能源体系，要求石油消费“十五五”时期进入峰值平台期。
国家发改委、能源局《“十四五”现代能源体系规划》	2022 年 1 月 29 日	阐明我国能源发展方针、任务举措，并明确提出推动生产消费结构转型升级，加快构建“清洁低碳、安全高效”的现代能源体系。
党的二十大报告	2022 年 10 月 16 日	深入推进能源革命，加快发展方式绿色转型，完善能源消耗总量和强度调控，重点控制化石能源消费，逐步转向碳排放总量和强度“双控”制度，积极稳妥推进碳达峰碳中和。
2023 年政府工作报告	2023 年 3 月 5 日	提出今年发展主要预期目标，其中包括重点控制化石能源消费，生态环境质量稳定改善。

因此不管是从能源安全还是环境保护的角度，我国的经济发展要走科学协调可持续发展道路，就必须改变能源结构，提高清洁能源的消费比重，加速清洁能源转型，先进有效的节能措施，集约型的经济发展模式，科学合理的能源消费结构缺一不可。

1.2 非道路移动机械节油减碳的意义

非道路移动机械是指用于非道路上的，自驱动或者具有双重功能，或者不能自驱动但被设计成能从一个地方移动或者被移动到另一个地方的机械。包括但不限于工程机械（如装载机、挖掘机、推土机等）、农业机械（如拖拉机、联合收割机）、林业机械、发电机组、渔业机械和机场地勤设备等[8]。

与道路移动源相比，非道路移动机械以柴油和重油为主要燃料，具有技术水平低、使用年限长、耗油量高、维护率低和单机排放量较大等特点。随着人类社会现代化的进程加快，各种类别的非道路移动机械正被越来越多的应用在工业生产、城市建设、农业生产等行业中，伴随而来的是非道路移动机械严重的排放问题。2022 年，非道路移动源污染物排放总量为 556.8 万吨，约占我国移动排放源总量的 38%[9]。

2021 年 4 月 1 日，北京市生态环境局发布《关于北京市提前实施国家第四阶段非道路移动机械排放标准的通告》，明确指出本地排放贡献中移动源污染占比最大，达 45%。虽然非道路移动机械领域的

石油消耗及污染物排放高，但长期未引起足够重视。我国对非道路移动机械污染物排放的管控起步也比较晚，尚缺乏有效的监督管理手段，污染物排放底数不清，各有关部门的职责界定不明确，已经成为打赢蓝天保卫战的短板之一。

为提升大气环境质量，加快推进非道路移动机械污染防治研究工作，世界各国均制定了相应的非道路移动机械排放标准。中国、欧盟及美国的非道路移动机械排放标准实施进度具体见图 1-1[10]。

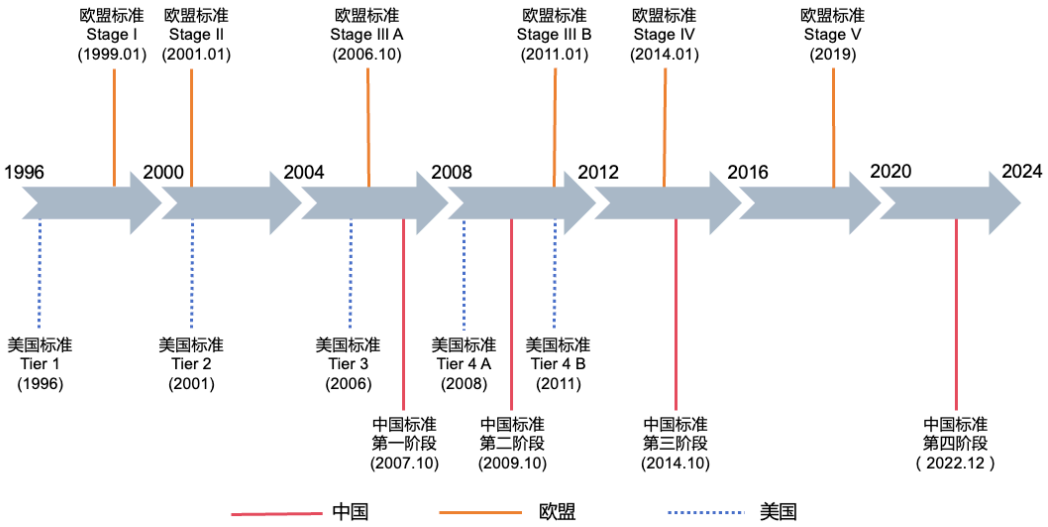


图 1-1：中国与欧美非道路移动机械排放标准实施进度

目前，关于非道路移动机械的污染物排放控制方面我国已有研究并已取得一定成效，生态环境部也出台了一系列法规来推进非道路移动机械行业的绿色低碳发展。其中 2022 年 12 月 1 日起正式实施非道路移动机械“国四”排放标准对非道路移动机械行业有着重大意义。根据生态环境部制定的《非道路柴油移动机械污染物排放控制技术要求》，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本标准要求，随着环保政策趋严，不符合排放标准的设备将面临限制作业区域等措施。相比于国三排放标准，国四排放标准将大大改善工程机械设备对环境污染的压力，标准要求发动机排放的氮氧化物（NOx）减少 13%-45%、颗粒物（PM）减少 50%～94%、加强对老旧设备的环保管理来促进工程机械设备的更新迭代。

中国环境科学院的课题研究报告[11]指出，“十一五”期间中国非道路移动机械柴油消耗量占全社会柴油消耗量的 60%左右。为了控制和减少燃油消耗，《非道路用柴油机燃料消耗率限值及试验方法》（GB/T 28239-2020）规定了非道路用柴油机燃料消耗率的限值和试验方法。根据不同功率段的非道路用柴油机，标准规定了相应的燃料消耗率限值。标准的实施将有助于推进非道路用柴油机的节能与环保，促进其可持续发展。

然而，针对非道路移动机械整机，我国在油耗和碳排放方面的数据、标准、政策和管理有所缺失，并没有同治理非道路污染物排放一样被引起同样的重视。一是因为工程机械和农业机械更关注出勤效率，是否能作业，而油耗不是首先考虑的因素。二是因为工程、农业机械应用场景和工况多，不方便统计油耗。此外，尽管目前对于中国的非道路移动机械的能耗和碳排放已有少量研究，但是现有研究方法单一，多是统计年鉴中直接获得油耗量数据并估算排放情况[12]。这就造成了非道路移动机械排放的研究存在许多问题，要完成对非道路移动机械排放的研究，必须制定更加系统、严谨的研究方法。

1.3 项目研究边界

随着国家逐步重视非道路移动机械领域的排放问题，越来越多的研究单位也对这一领域投入更多关注和研究。2019 年 5 月，中国环境科学院机动车排污监控中心的《非道路移动机械控制管理政策体系研究报告》[13]提出了地方非道路移动机械排放控制对策，为城市划定低排区提供参考和依据。2023 年 10 月，南开大学和中汽研汽车检验中心（天津）有限公司联合撰写的《中国非道路移动机械低碳排放的潜力分析及政策建议》报告[14]针对我国整体非道路移动机械的使用现状、低碳化情况和机械电动化可行性进行了梳理和分析，并指出不同非道路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。

关于本报告的研究方向，鉴于我国针对非道路移动机械的污染物排放已有比较扎实的研究基础，因此，本研究报告主要把非道路移动机械的柴油消费和碳排放情况作为主要研究方向。本报告中的碳排放，主要指非道路移动机械使用/作业造成的二氧化碳排放，不包含全生命周期碳排放。

关于本报告的研究对象，我国每年的柴油消耗量中约有 60%用于非道路用发动机，其中，工程机械和农业机械的柴油消耗量占比最大，约占 36%[15]。2021 年，挖掘机和装载机保有量占工程机械保有量的 41%，拖拉机保有量占农业机械保有量的 10.6%[16]。因此，本研究报告将针对高耗能高污染高排放的工程机械和农业机械开展深入研究，选择保有量大、能耗高、使用频繁，以及应用场景广的三种具代表性的非道路移动机械：挖掘机、装载机和拖拉机为主要对象。研究这三种代表性机械如何绿色低碳转型，对推动非道路移动机械领域节能减碳更具积极意义。

1.4 研究内容

为了促进提高我国非道路领域相关企业的国际竞争力和该领域的高质量发展，本报告将针对高耗能高排放的工程机械和农业机械开展深入研究，梳理非道路移动机械领域的能耗和排放情况，并且选择三种具代表性的非道路移动机械（挖掘机、装载机、拖拉机）为主要分析对象，分别判断这些细分机械品类在提高能效、电动化、混合动力化和替代燃料应用等主要方面的柴油节约、减少碳排放路径及

潜力，探索符合国情的绿色转型路径，并且通过了解该领域实施绿色低碳转型过程中存在的困难和挑战，形成政策建议，递交相关政府部门，推动非道路领域向更加绿色节能的方向发展。

2 非道路移动机械领域发展现状

2.1 中国非道路移动机械现状

非道路移动机械种类繁多，应用领域广阔，在我国国民经济中占有重要的地位。相对于道路车辆而言，非道路移动机械在功率分布方面更加宽泛，在能源消耗方面更加突出，污染也更加严重。近年来，随着非道路移动机械产业快速发展，产品、技术研发上不断突破，相关产品逐渐受到海外市场的青睐，国际影响力进一步提升。

2.1.1 工程机械

工程机械是用于工程建设施工机械的总称，包括挖掘机、推土机、装载机、叉车、压路机、摊铺机、平地机、以及其他机械等。凡土石方工程，流动起重装卸工程，人货升降输送工程，市政、环卫及各种建设工程、综合机械化施工以及同上述工程相关的生产过程机械化所应用的机械设备[17]。截至 2021 年年底，中国工程机械主要产品保有量约为 864.5 万台，比上年增长 3.44%[16]。与此同时，工程机械是国民经济的支柱产业之一，是非常重要、不可或缺的生产资料。所以，他们被广泛应用于火电、钢铁、建材、造纸、矿山建筑等碳排放多的行业中，是压在这些行业碳排放背上的沉重包袱。虽然非道路移动源数量少但单位机械的各项污染物排放均远超机动车，工程机械的二氧化碳排放量占非道路移动源排放总量的 31.3%。传统工程机械的主要燃料为柴油，新能源工程机械的渗透率不足 1%，工程机械的新能源化是实现节能减排的重要环节[18]。

中国工程机械产业链结构见图 2-1。我国工程机械产业上游主要包括为制造工程机械产品提供原材料的钢铁行业、涂料行业和零部件制造业，如：工程机械用钢材、内燃机、液压系统、轴承、轮胎等。中游包括挖掘机、装载机、起重机、推土机等不同类型的工程机械制造企业。下游主要为对工程机械有需求的行业，如：基础设施建设、房地产、矿山挖掘、水泥以及农村建设等[19]。

对于产业中游，从市场结构来看，挖掘机、起重机、压路机以及推土机这四个工程常用器械占据了我国工程机械市场上绝大部分的份额，其中挖掘机占比最大，超过 57%。从主要产品销量来看，近年来我国工程机械产品销量持续增加，2021 年全年挖掘机、装载机、推土机和平地机分别实现同比增长 4.63%、7.11%、17%和 56%。从工程机械营业收入来看，近年来我国工程机械营业收入稳步增长，2021 年全行业营业收入首次突破 8,000 亿元。从出口规模看，随着疫情稳定控制和海外市场需求的加快恢复，我

国工程机械在海外销量激增，2021 年出口金额达到 340 亿元美元，同比增长 62.3%[20]。

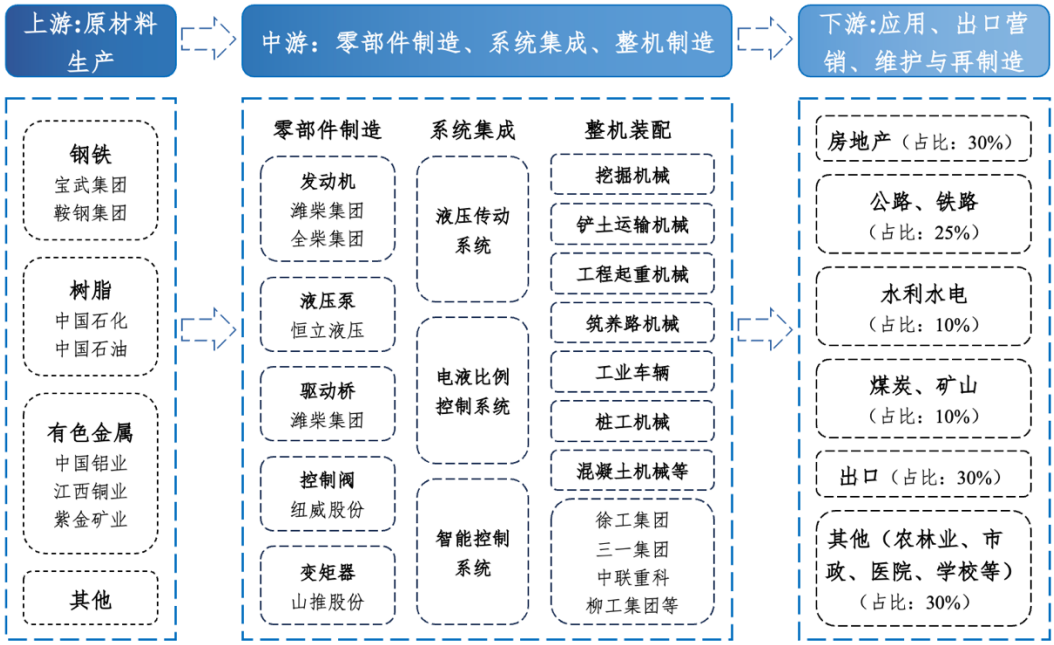


图 2-1：中国工程机械产业链结构[16]

2.1.1.1 挖掘机

挖掘机是用铲斗挖掘高于或低于承机面的物料，并装入运输车辆或卸至堆料场的土方机械。常见的挖掘机可分为间歇式挖掘机、连续式挖掘机、其他机械三类[16]。按照规模大小的不同，挖掘机可以分为超大型挖掘机（整机重量 30～70t）、大型挖掘机（整机重量大于 28.5t）、中型挖掘机（整机重量 18.5～28.5t）、小型挖掘机（整机重量小于 18.5t）和微型挖掘机（整机重量小于 6t）[16]。

从中国挖掘机产量市场数据来看，我国挖掘机行业呈现周期性波动趋势。中国挖掘机产量在 2012-2015 年总体呈现下降趋势；自 2016-2020 年后呈现缓慢上升趋势，2020 年我国挖掘机产量达到 40.1 万台；受疫情和地缘政治等因素的影响，全球经济放缓，我国基础设施建设、工程施工等行业发展受到冲击，对于上游的挖掘机行业需求大幅减少，2021 年我国挖掘机生产量降至 36.2 万台。据中国工程机械工业协会统计，2012-2021 年中国挖掘机市场销量呈现周期性波动趋势。2012-2015 年，中国挖掘机市场销量呈现波动下降趋势，2016-2021 年中国挖掘机市场销量呈现逐年上升趋势，2021 年销量达 34.3 万台。

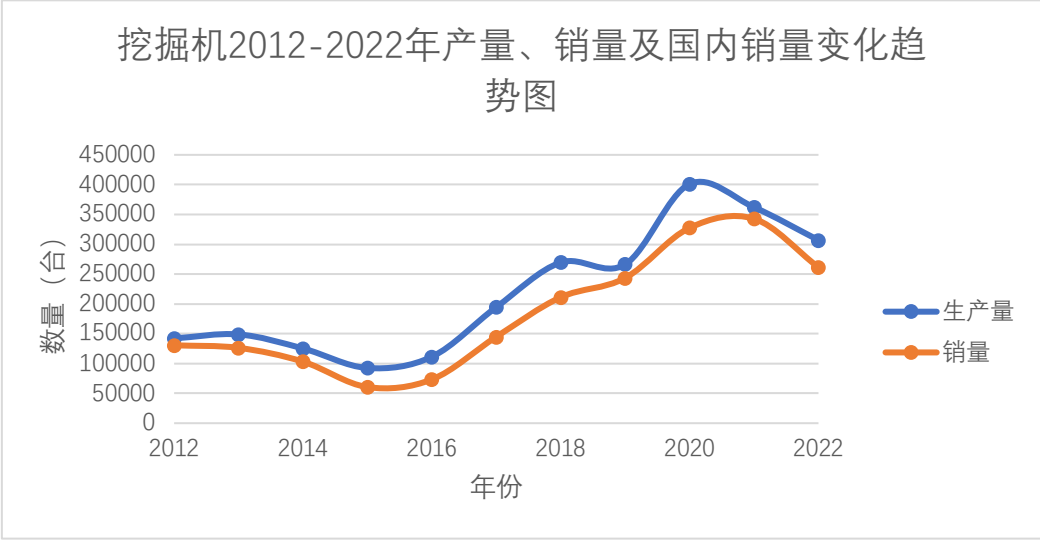


图 2-2：挖掘机 2012-2022 年产销量变化趋势图

近年来，我国挖掘机国内销量呈现波动趋势，2018-2020 年国内销量呈现上升趋势，2020 年国内销量为 29.29 万台；但受疫情和地缘政治等因素的影响，2020 年后持续下降，2022 年国内销量降至 15.19 万台。反观我国挖掘机的出口量却增长迅速，2022 年我国挖掘机出口量为 10.95 万台，同比增长 60.09%，主要得益于我国一系列对外发展政策的影响，使得我国承包对外承包工程量逐年增长，海外市场对于挖掘机的需求扩大。

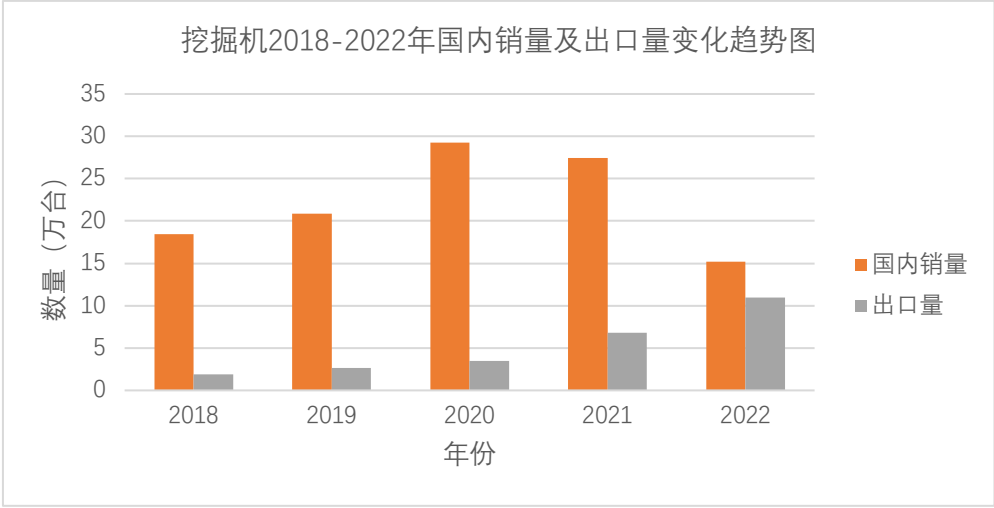


图 2-3：挖掘机 2018-2022 年国内销量及出口量变化趋势图

中国工程机械工业协会统计数据显示，我国挖掘机保有量在 2014-2015 年及 2017-2018 年经历两次短暂下降后，整体保持上升趋势。截至 2021 年底，挖掘机保有量约为 203.85 万台[21]，其中大型及超

大型挖掘机占比约为 15%，约 30.6 万台；中型挖掘机占比约为 25%，约 51 万台；小型挖掘机占比约为 60%，约 122.4 万台[14]，详见图 2-5。

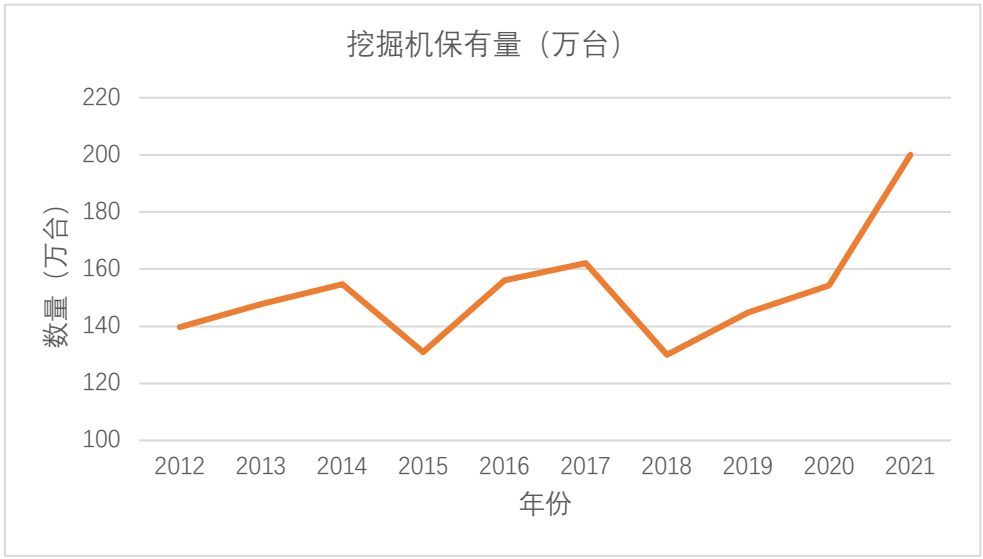


图 2-4：2012-2021 年挖掘机保有量变化趋势图

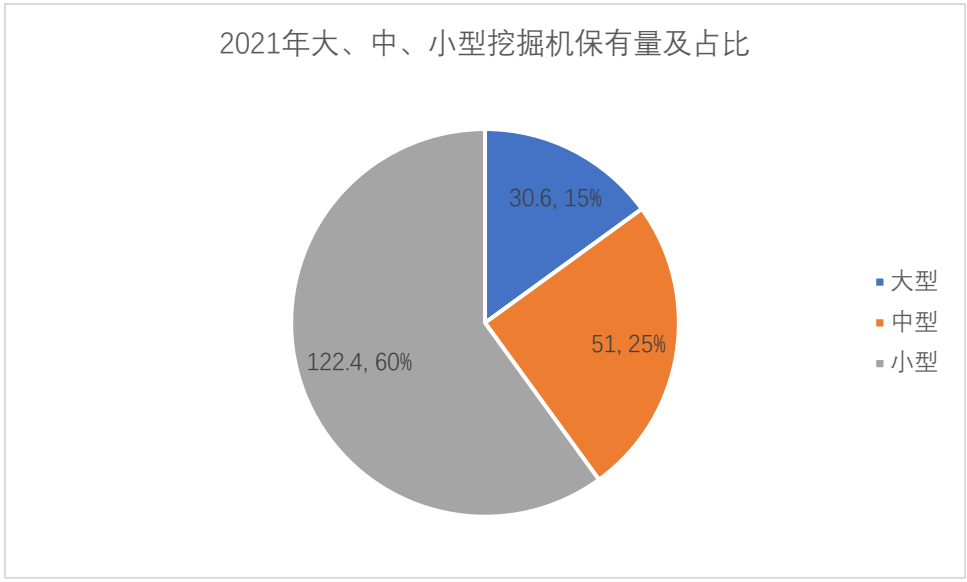


图 2-5：2021 年大、中、小型挖掘机保有量及占比

根据企业调研结果，大型挖掘机和超大型挖掘机主要应用场景为矿山（煤矿、金属矿、砂石矿、采石场）和大型基建，场景应用占比约为 60%和 40%。主要客户为开采公司、租赁公司、渣土公司，私人客户量少。中型挖掘机主要应用场景为城市基建、水利建设、地产开发等，主要为租赁客户。小型挖掘机主要应用场景为林业施工、农业施工、水利施工等。每台挖掘机年度工作小时数参考《非道路移动源

大气污染物排放清单编制技术指南》，为 770 小时/年[22]。

根据对企业调研数据及网上公开的 10 个品牌的 46 种挖掘机型号的油耗数据整理得出，大型及超大型挖掘机平均使用油耗约为 31.31L/h，中型挖掘机平均使用油耗约为 19.68L/h，小型挖掘机平均使用油耗约为 8.39L/h。根据各类挖掘机保有量、年度工作小时数及实际油耗可以得出当前挖掘机行业每年总油耗，约为 1956.25 万吨，每年碳排放总量约为 6152.64 万吨[23]。

表 2-1：各类挖掘机保有量、年度工作小时数、平均使用油耗、行业每年总油耗及碳排放总量

挖掘机分类	年度工作小时数（小时）	保有量（万台）	平均使用油耗（升/小时）	每年总油耗（万吨）	每年碳排放总量（万吨）
大型及超大型挖掘机	770	30.6	31.31	627.10	1972.30
中型挖掘机		51	19.68	657.02	2066.41
小型挖掘机		122.4	8.39	672.13	2113.93
合计				1956.25	**6152.64**

2.1.1.2 装载机

装载机是一种广泛用于公路、铁路、建筑、水电、港口、矿山等建设工程的土石方施工机械，主要用于铲装土壤、砂石、石灰、煤炭等散状物料，也可对矿石、硬土等作轻度铲挖作业，可分为履带式装载机、轮胎式装载机、滑移转向式装载机和特殊用途装载机[17]。换装不同的辅助工作装置还可进行推土、起重和其他物料如木材的装卸作业。常用的单斗装载机，按发动机功率、传动形式、行走系结构、装载方式的不同进行分类，其中额定工作载荷小于 3 吨为小型装载机，3～7 吨为中型装载机，大于 7 吨为大型装载机。装载机主要依据作业场合和用途进行选择和确定机型：一般在采石场和软基地进行作业，多选用轮胎装载机配防滑链。在动力方面，一般多采用工程机械用柴油发动机，在特殊地域作业，如海拔高于 3,000 米的地方，应采用特殊的高原型柴油发动机。据中国工程机械工业协会数据，2021 年中国装载机主要应用领域区域有基础建设、采矿、水利工程等，其中基础建设装载机主要应用领域占比 33%，采矿占比 32%，水利工程、房地产占比分别为 14%和 8%[16]。

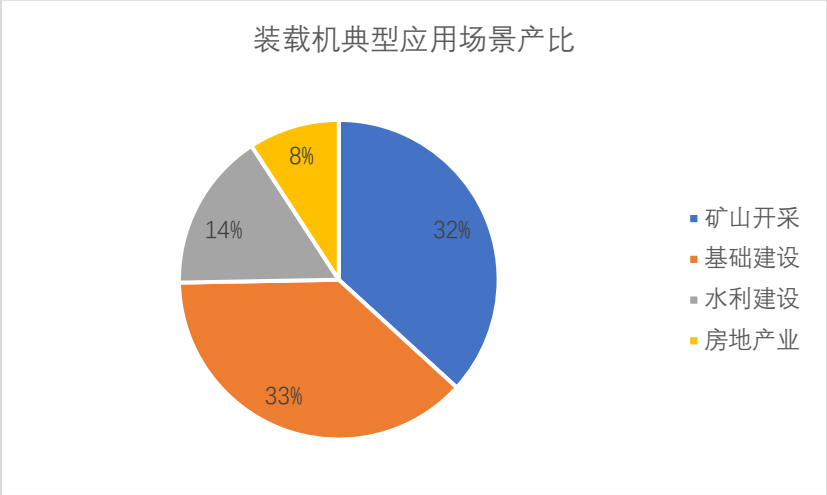


图 2-6：装载机典型应用场景产比

从中国装载机产量市场数据来看，我国装载机行业呈现周期性波动趋势。中国装载机产量在 2015-2016 年总体呈现下降趋势，自 2016 年后呈现持续上升趋势，于 2019 年达到峰值后快速下降，2020 年我国装载机生产量降为 12.1 万台。据中国工程机械工业协会统计，2015-2020 年中国装载机市场销量呈现周期性波动趋势。2015-2019 年，中国装载机市场销量呈现上升趋势，2019-2020 年中国装载机市场销量呈现波动下降趋势，2020 年销量 10.9 万台，同比下降 12%。总体来看，2015-2021 年中国装载机产量整体均为产量高于销量，在行业波动“谷”期，产销差距更大，产品库存积压情况明显。从产销率来看，国内装载机产销率高于 50%，在行业发展景气期间，国内装载机产销率整体高于 75%。

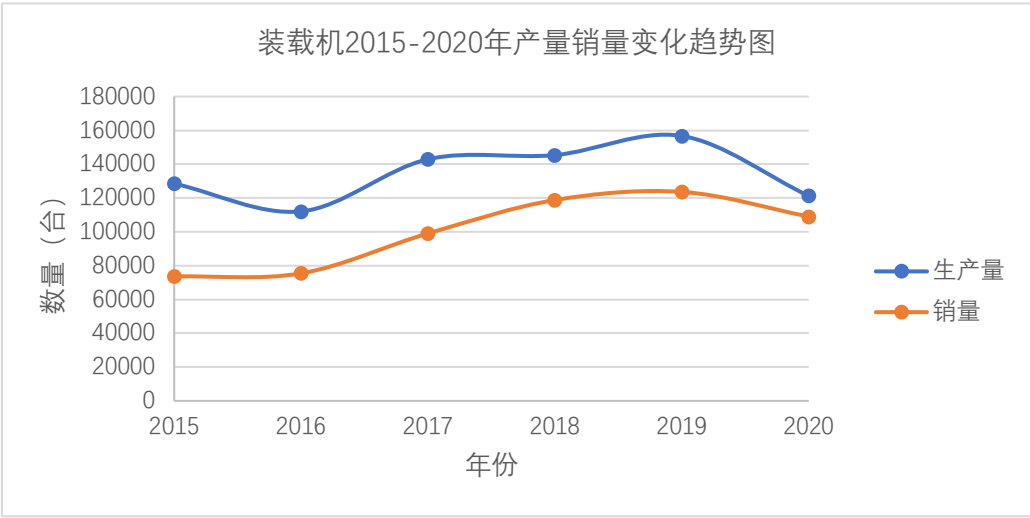


图 2-7：装载机 2015-2020 年产量销量变化趋势图

针对不同吨位装载机的销售情况来看，3 吨以下装载机国内销量约 1.2 万台，占比 8.8%；3 吨装载机销量 2.5 万台，占比 17.89%；5 吨装载机销量 8.8 万台，占比 62.52%，可见小型和中型装载机为主

力机型[16]，故本报告中重点考虑以上三种吨位装载机，并根据这三种吨位装载机的平均使用油耗、年度工作小时数、保有量估算每年总油耗及每年碳排放总量。

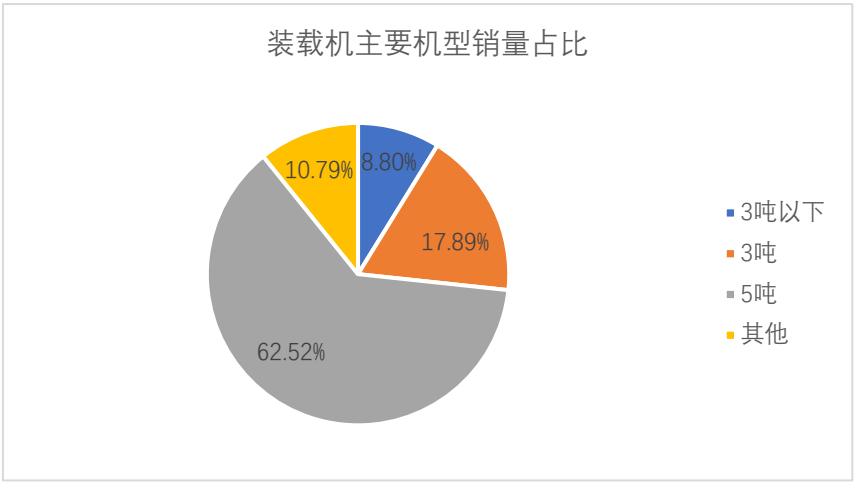


图 2-8：装载机主要机型销量占比

从统计数据规模来看，2015-2020 年我国装载机出口数量呈现周期性变化。2015-2016 年呈现下降趋势，2016-2019 年呈现上升趋势，2019 年到达峰值后大幅下降，2020 年我国装载机出口量为 3.7 万台，同比下降 23.3%[16]。

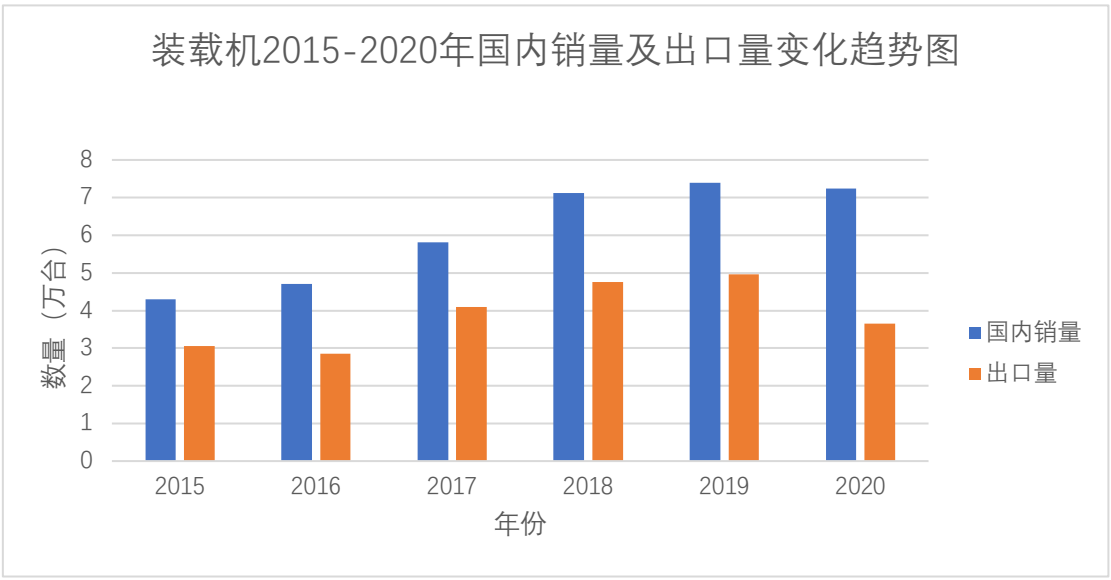


图 2-9：装载机 2015-2020 年国内销量及出口量变化趋势图

据中国工程机械工业协会统计数据可知，2012-2021 年我国装载机保有量整体呈下降趋势，截至

2021 年底，我国装载机保有量约为 150 万台[16]。

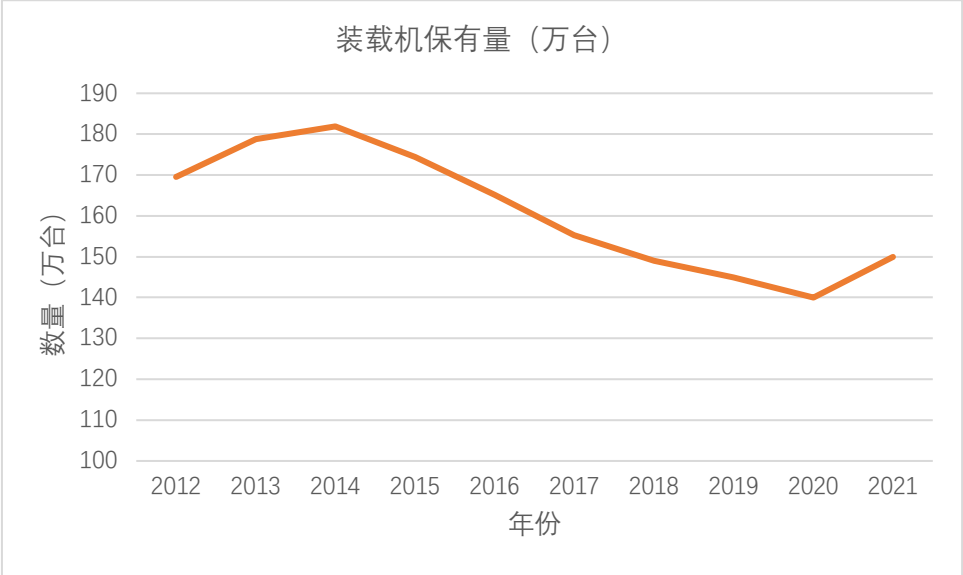


图 2-10：2012-2021 年装载机保有量变化趋势图

根据《2022 中国工程机械工业年鉴》中主要装载机销量及占比，2021 年装载机保有量[14]，网上公开不同额定工作负荷装载机平均使用油耗，以及每台装载机年度工作小时数（参考《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》，为 770 小时/年[22]错误!未定义书签。）计算可得，当前装载机行业每年总油耗约为 817.10 万吨，每年碳排放总量约为 2569.89 万吨。

表 2-2：三类装载机保有量、年度工作小时数、平均使用油耗、行业每年总油耗及碳排放总量

装载机分类	年度工作小时数（小时）	保有量（万台）	平均使用油耗（升/小时）	每年总油耗（万吨）	每年碳排放总量（万吨）
3 吨以下装载机	770	11.78	4.5	34.68	109.08
3 吨装载机		23.94	8	125.35	394.23
5 吨装载机		83.66	12	657.07	2,066.58
合计				**817.10**	**2,569.89**

2.1.2 农业机械

农业机械是在作物种植和畜牧业生产过程中，以及农、畜产品初加工和处理过程中所使用的各种机械，主要燃料为柴油，包括拖拉机、农用运输车（农机牌照）、联合收割机、排灌机械、以及其他机械等。

中国农业机械市场与工程机械市场在产业链阶段划分标准上较为相似。农业机械产业链上游为基础原材料供应商（钢铁、有色金属、橡胶等）及零部件制造商（内燃机、轴承、轮胎等）。在原材料方

面，钢铁和有色金属是制造农业机械产品的重要原材料。由于中国钢铁行业的发展情况较为稳定，农业机械行业原材料的供应也呈现相对稳定的趋势，受价格影响因素较小。在零部件方面，中国标准零部件、机械加工件的技术水平提升较快，已经逐渐形成门类齐全的行业体系，农业机械行业所需的零部件部件在中国均形成了良好的产业规模，行业内可供选择的企业较多[24]。

中游包括拖拉机、收割机、播种机等不同类型的农业机械整机制造企业，一拖股份、中联重科、吉峰科技等为国内农机制造领域的代表性企业。近年来，我国农业机械市场规模不断扩大，支撑农业各产业发展的机械化基础逐步牢固。2022 年我国农业机械总动力达到 11.04 亿千瓦。

下游包括农机流通渠道提供商和终端的农机使用者，应用行业主要为农业、林业、牧业和渔业。其中，农作物种植是农业机械最大的需求领域，随着近年来我国农业产业结构的调整，促进农民增收，助力乡村振兴，农业经济继续平稳增长。加上农业机械化水平的稳步提升，农业机械的需求量也随之不断增加，推动了我国农业机械行业的发展[25]。截至 2021 年我国农业机械市场规模已突破 5,000 亿元，发展前景广阔[26]。

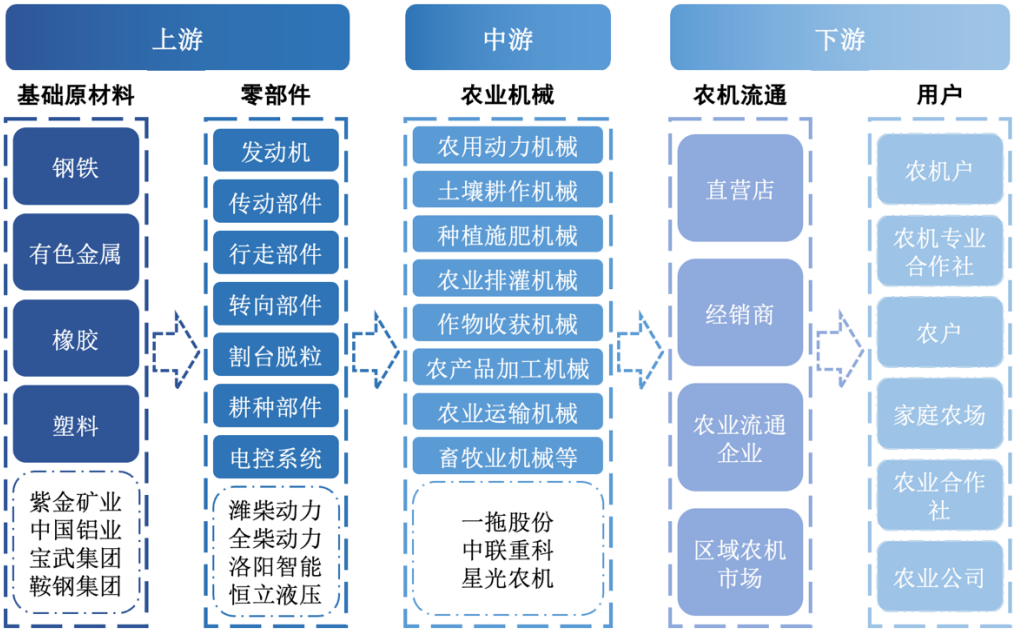


图 2-11：中国农业机械产业链结构

2.1.2.1 拖拉机

拖拉机是用于牵引和驱动作业机械完成各项移动式作业的自走式动力机，是最主要的农业机械之一。按结构类型分轮式、履带式、船形拖拉机和自走底盘等。按照发动机额定功率大小，拖拉机可以分为大型拖拉机（73.5kW 及以上）、中型拖拉机（22.1～73.5kW）和小型拖拉机（22.1kW 及以下）[27]。拖

拉机主要应用在耕地、种地、把地、收获、打药、除草六个场景，耕地、种地等场景具体使用时间取决于农作物种类，每个场景使用比例大致相同。大、中、小型拖拉机都可以在以上场景工作，区别在于耕地面积大小，耕地面积大使用大型拖拉机，耕地面积小则使用中小型拖拉机。

近年来，受行业结构变动，我国拖拉机产量逐年下滑。数据显示，2012-2020 年 1～8 月，在我国拖拉机市场中，大中型拖拉机逐步实现了对小型拖拉机的替代，小型拖拉机产量比重自 80%左右降至约 33%，这使得我国拖拉机整体产量不断下滑。2020 年，我国拖拉机生产量为 53.75 万台，其中大型拖拉机 7.0 万台，同比增长 55.99%，中型拖拉机 28.9 万台，同比增长 17.74%，小型拖拉机 17.8 万台，同比下降 47.18%；拖拉机骨干企业大中型拖拉机销量 25.4 万台，同比增长 26.19%，小四轮产量为 1.7 万台，同比下降 47.79%，实现销量 1.7 万台，同比下降 48.33%。进口额 0.5 亿美元，同比下降 44%；出口量 13 万台，同比增长 9.7%，出口额 4.8 亿美元，同比增长 8.5%。

据全国农业机械化发展统计公报，2014-2021 年拖拉机保有量变化趋势见图 2-12。2014-2021 年，我国拖拉机保有量整体呈下降趋势，截至 2021 年底，保有量约为 2173.06 万台。2020 年数据显示，拖拉机保有量 2204.88 万台，其中大型拖拉机 69.35 万台，占比约为 3.15%；中型拖拉机 407.93 万台，占比约为 18.5%；小型拖拉机 1727.60 万台，占比约为 78.35%[27]，可见目前小型拖拉机是主力机械类型。

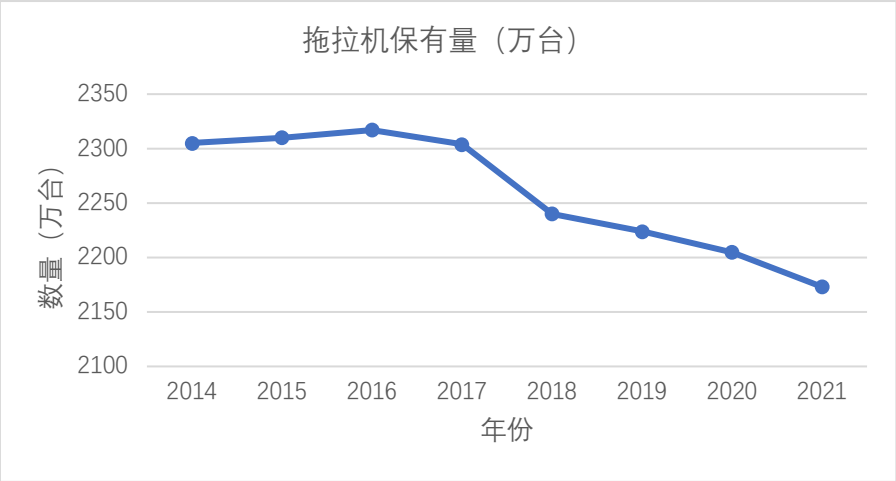


图 2-12：2014-2021 年拖拉机保有量变化趋势图

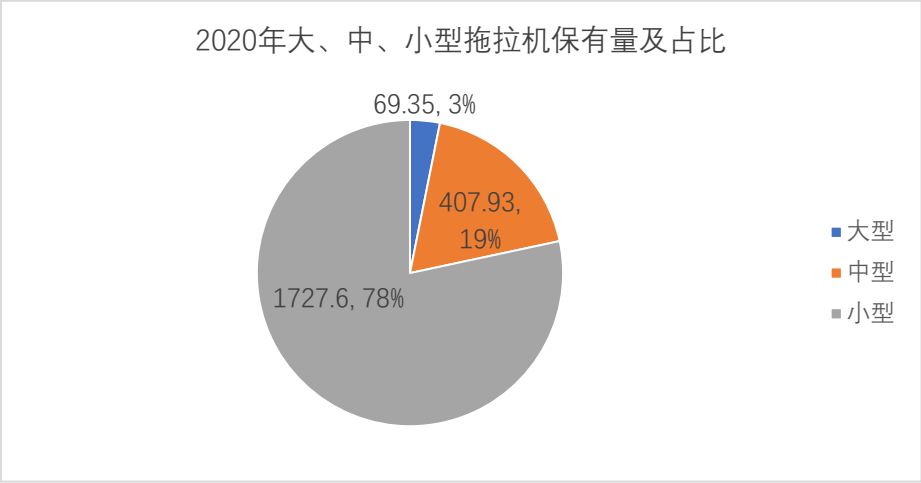


图 2-13：2020 年大、中、小型拖拉机保有量及占比

根据《2021 中国农业机械工业年鉴》中全国大、中、小型拖拉机保有量、总功率数据，及燃油消耗率调研平均数值（210g/kW·h），计算得出每台拖拉机平均油耗：大型拖拉机平均使用油耗约为 17.10L/h，中型拖拉机平均使用油耗约为 7.19L/h，小型拖拉机平均使用油耗约为 1.97L/h。每台拖拉机年度工作小时数在《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》提出的 500 小时/年[22]基础上，考虑到农业机械工作具有明显季节性，每年实际工作时间集中在农忙的 1-2 个月，经与行业专家讨论，将年度工作小时数下调为 330 小时/年。根据各类拖拉机保有量、年度工作小时数及平均使用油耗可以得出拖拉机行业每年总油耗约为 2109.13 万吨，每年碳排放总量约为 6633.49 万吨。

表 2-3：各类拖拉机保有量、年度工作小时数、平均使用油耗、行业每年总油耗及碳排放总量

拖拉机分类	年度工作小时数（小时）	保有量（万台）	平均使用油耗（升/小时）	每年总油耗（万吨）	每年碳排放总量（万吨）
大型拖拉机	330	69.35	17.10	332.64	1046.19
中型拖拉机		407.93	7.19	823.03	2588.54
小型拖拉机		1727.6	1.97	953.46	2998.76
合计				**2109.13**	**6633.49**

综上，挖掘机、装载机和拖拉机这三种类型的机械每年总油耗约 4882.48 万吨，二氧化碳排放总量接近 1.54 亿吨。

2.2 国内非道路移动机械企业新能源化现状

2.2.1 工程机械

在工程机械方面，新能源工程机械市场已然呈现出群雄逐鹿局面，新能源工程机械产品层出不穷，

传统工程机械主机厂纷纷布局新能源工程机械领域，适用于封闭和固定工作环境等应用场景的细分品类已率先走向电动化。技术自研的同时也在和“三电”企业进行深度合作开发，不断推出多类型电动化工程机械产品。全球工程机械龙头如卡特彼勒、沃尔沃建筑设备、三一集团、徐工集团等已推出数款电动化工程机械产品。

2.2.1.1 徐工集团：加快智能化转型

徐工提出碳达峰、碳中和规划纲要，以及 2027 年达峰、2049 年碳中和的规划。目前，徐工正在研究具体的减碳实施路径，包括全生命周期降碳分配，降碳技术等，智能制造研究院负责整个”双碳”规划的落地和实施、体系和平台搭建。徐工的新能源研究院则是进行电动产品、混动产品和氢能产品的研发。

以绿色技术来说，徐工电动机械方面已经取得较大成绩，包括电动装载机和电动挖掘机等。徐工纯电动装载机械产品使用过程中可实现零碳排放，与燃油装载机相比，单台产品平均每年减少约 150 吨二氧化碳排放，能耗成本仅约为柴油装载机的 1/3，综合使用成本每年减少 20 万元以上。同时，徐工开展了拖线式电动装载机的研发，在特定工况下，降低了用户的购机费用及使用成本，扩展了电动装载机的产品种类。同步完成了换电式电动装载机、轮边驱动纯电动装载机等的设计工作，进一步丰富了电动装载机的供电形式。

2.2.1.2 三一集团：全面推进工程机械产品电动化

三一重工全面推进主机产品电动化及相关核心技术开发。2021 年，三一重工全面推进工程车辆、挖掘机械、装载机械、起重机械等产品的电动化，成立新能源技术委员会，各事业部均成立专门的电动化科研团队与子公司，将电动化作为主要战略，电动化研发人员超 1,600 人；电动挖掘机与装载机已实现市场化销售，电动搅拌车海外市场实现突破。

三一重工完成开发 34 款电动产品，上市电动产品 20 款，包括 4 款纯电搅拌车和 4 款纯电动自卸车等 8 款电动化工程车辆、4 款电动挖掘机，产品涵盖纯电、换电、氢燃料 3 大技术路线。电动化工程车辆产品销量破千台，销售额近 10 亿元。

2.2.1.3 中联重科：加码布局设备电动化

中联重科持续强化新数字、新能源、新材料等新技术的融合创新，高端产品不断涌现，市场竞争力持续增强，形成了技术落地、产品迭代的良性循环。中联重科新能源产品已涵盖挖掘机械、矿机、重型底盘等系列，采用纯电动、氢燃料电池、混合动力多类新能源组合。

2021 年，中联重科已累计发布了 50 多款新能源产品，产品类型覆盖混凝土泵车、混凝土搅拌车、汽车起重机、高空作业平台、挖掘机、矿卡、叉车、应急车辆、农业机械、重型底盘等领域，动力包括

纯电动、混合动力、氢燃料多种组合，全系列新能源化产品基本形成。

2.2.1.4 柳工：发布超长续航新品

柳工较早提出了工程机械电动化，并在实际经营中践行，持续加大在智能化、电动化、无人驾驶及零部件核心技术方面投入，未来重点研发方向仍为电动化、智能化和数字化。

2014 年柳工组建电动化产品和研究团队，打造出电动装载机、电动挖掘机等土石方明星产品，目前已经形成了电动装载机、电动挖掘机等成套电动设备施工解决方案；发布国内自主研制“可换又可充”电动装载机。2022 年柳工面向装载机、挖掘机、叉车等 9 大细分行业，推出系列产品。相较于传统燃油装载机，柳工第二代电动装载机在 5 年内预计能为客户节省运营成本 125 万元。

2.2.2 农业机械

与化石燃料为动力的传统农机相比，电动农机具有低排放、高效节能的优势，显然，拖拉机向电动化发展也是大势所趋。在国内发展电动农机还有另一层面的价值，就是有效地规避开化石燃料农机周期不断缩短的排放标准升级。

农用动力装备是推进农业机械化的关键核心装备，代表了农业机械化水平。长期以来，我国的高效节能农用发动机及重型拖拉机动力换挡变速器、无级变速器等关键核心零部件，以及高性能拖拉机整机主要依赖进口，制约了产品升级和产业发展。非道路国 IV 排放发动机关键技术研发，突破了发动机节能、减排、降噪，动力输出智能化控制、大型拖拉机所需无级变速传动系统及智能化控制等关键核心技术。

2.2.2.1 国家农机装备创新中心

国家农机装备创新中心背后最大的技术力量是中国一拖集团，某种程度上讲国家农机装备创新中心的实力就是一拖的实力。近几年该机构不断推出代表着中国最领先技术水平的智能化农机，早在 2020 年该中心就推出了无人驾驶电动拖拉机（ET1004-W）和氢能源电动拖拉机 ET504-H。

东方红 HB2204 是一拖在学习借鉴国内外先进的 CVT 技术、电驱动技术基础上开发出来的混合动力驱动的拖拉机，该机与纯电动相比，具有更好的实用性和经济性，预计很快将进入商业化应用。

2.2.2.2 中联重科：新能源纯电动拖拉机

由中联重科聚集顶尖研发资源研发的新能源纯电动拖拉机定位于解决我国农机装备电动化短板问题，围绕新能源电驱应用与智能套件开发、动力总成电动化等科研难点进行集中攻关，在保证功能、性能的基础上，提高了电机高效运行区占比和整车能量利用效率，延长了续航作业时间。

该科技成果孵化出的CA504ET纯电动拖拉机已进入成熟应用阶段。该产品采用锂电池作为能量源，

行驶、作业无污染零排放。电池续航时间长，可实现 1 小时快充补能（电量从 15%—90%）；配置“行走电机和作业电机”的双电机系统，是一款实用型新能源纯电动拖拉机，打破了国外产品在该领域的技术垄断。

2.2.2.3 悦达公司：应用级别的电动拖拉机

悦达集团旗下的黄海金马拖拉机工厂，是国内老牌的拖拉机企业之一。2021 年黄海金马连续推出了 YL254ET 和 YU1004 两款电动拖拉机。前者在大棚、果园里进行轻负荷作业，后者是专门为水田旋耕、播种、田间管理开发的水田拖拉机。

这两款电动拖拉机是国内小批量生产且投入到实际使用的电动拖拉机，YL254ET 和 YU1004 并没有打目前炙手可热的智能化、无人化概念，而是注重于拖拉机本身的作业性能、经济性和驾乘舒适性。

2.2.2.4 超星智能：农机新势力

超星智能公司是一家落户于农机制造大省山东济南的初创高科技企业，其核心技术团队来自清华大学。该公司有过在汽车自动导航和自动驾驶领域的技术积累和实践经验，该公司在深入考察国内农业耕作环境的基础上，参考现有的机械传动的拖拉机，研发出了全自动无人驾驶电动拖拉机。

在国内电动拖拉机领域，超星智能并非唯一从外行业进入的农机新势力，丰疆智能、比亚迪、微星科技等数十家公司或机构已经进入了智能、电动农机领域。

2.3 国际非道路移动机械企业新能源化现状

国际对于新能源非道路移动机械的探索起步较早，得益于完善的政策及财政支持体系，新能源技术较为成熟。

2.3.1 工程机械

2.3.1.1 卡特彼勒：工程机械电动化的先驱者

卡特彼勒公司是建筑工程机械、矿用设备、非道路用柴油和天然气发动机领域的全球卓越制造企业。在能源转型的当下，卡特彼勒致力于助力客户降低自身的温室气体排放、提高效率和生产力并实现能源灵活性方面。

电气化是减少温室气体排放和能耗，提升新能源占比的重要举措。卡特彼勒生产的电驱动设备在露天矿和地下矿井中都有较好的应用。2009 年以来，卡特彼勒顺应电动化发展趋势，将电驱动应用于采矿等更多领域，开发出了多种电动产品以满足客户的不同需求。2018 年卡特彼勒研发了纯电动装载机，2019 年推出了三款纯电动挖掘机和电动装载机。2022 年发布了山工机械首款零尾气排放的电驱装载机。

2.3.1.2 沃尔沃建筑设备：纯电挖掘机和装载机

沃尔沃建筑设备公司作为沃尔沃集团成员之一，是全球知名的建筑设备制造商。2021 年 11 月，沃尔沃建筑设备的全自动电动轮式装载机概念机，具有零排放、低噪音等特点，满电状态下最多可运作约 8 小时。还有电动微型履带式挖掘机，与传统机型相比具有零排放、低噪音、低能耗、高效率、低维护需求等突出优势，充分印证了沃尔沃建筑设备对未来科技的深刻洞见。

2023 年 6 月 29 日，全新沃尔沃插电式电动挖掘机下线，相较传统柴油动力机型，此款插电式电动挖掘机零废气排放，且插电式的设计可使其连续投身于装载、回转、倾倒等重复性作业中，免于停机充电或加油。在理想状态下，沃尔沃插电式电动挖掘机可提升高达 99%的动力效率，相较传统柴油动力机型大幅降低了 50%的能源成本。

2.3.1.3 小松：推进氢燃料电池技术

小松是一家业务遍及世界各地的全球化企业集团,主要产品有挖掘机、推土机等工程/矿山机械，目标是到 2030 年将其产品使用和设备生产过程中的二氧化碳排放量减少 50%（与 2010 年相比），以及到 2050 年实现碳中和的挑战性目标。为了帮助客户实现碳中和，小松一直在推进减少环境影响的各种产品、服务和解决方案的研发，例如更多的混合型柴油电动液压挖掘机和电动迷你挖掘机。

迄今为止，电池电气化主要针对紧凑型设备，大中型建筑设备需要具有更高能量的电源。小松一直在推进氢或氢燃料电池技术，以作为大型机器的替代电气化选择。因为氢气具有更高的能量密度，可以在更短的时间内加油，该机器的开发符合小松在建筑设备工作场所实现碳中和的意图。

2.3.2 农业机械

欧洲、美国、日本、韩国已完成农机市场的整合，目前这些国家和地区只有少数的处于垄断地位的大型农机企业，近几年几乎没有再出现过新的生产拖拉机、联合收获机、插秧机等农机的企业。但是在电动农机、智能化农机上则呈现百花齐放、星火燎原之势，欧美日韩的企业将在智能化、新能源的赛道上实现换道超车。

2.3.2.1 约翰迪尔：电池、控制系统自制

约翰迪尔是全球最大的拖拉机生产企业，在电动拖拉机的探索上一直走在同行前面，2015 年推出了自主研发的纯电动拖拉机，近期，又推出了纯电动无人驾驶拖拉机。

在电动拖拉机上，约翰迪尔走深度自制路线。2021 年迪尔以 2.5 亿美元收购了一家高科技企业，致力开发与现有的机器兼容的自动驾驶技术，电动化和自动化是孪生兄弟，收购后者也是为了电动农机做准备。2022 年收购了电池制造商 KreiseI Electric，这家欧洲公司开发高密度、高耐久性的电池

模块和电池组及快速充电技术，迪尔有意将 KreiseI 技术应用于其草坪设备、紧凑型多功能拖拉机、小型拖拉机、紧凑型工程等产品上。

2.3.2.2 凯斯纽荷兰：善于整合资源

凯斯纽荷兰是规模和体量仅次于约翰迪尔的巨无霸农机制造商，旗下拥有凯斯、纽荷兰和斯太尔三大知名拖拉机品牌。电气化和自动化是凯斯纽荷兰工业集团战略的两大支柱，凯斯纽荷兰曾推出 Magnum 无人驾驶概念拖拉机，影响了几乎后来所有的无人驾驶拖拉机的设计理念，在后来一拖东方红、鲁中等国产无人驾驶拖拉机上都能看到 Magnum 的影子。

凯斯纽荷兰在电动拖拉机产品上有过种种的尝试，早在 2009 年推出了氢燃料电池拖拉机概念机，并于 2019 年推出了斯太尔柴电混合动力拖拉机。在 2021 年 6 月收购美国农业自动驾驶技术 Raven 公司，当年 11 月与美国全电动无人驾驶拖拉机的生产制造企业 Monarch 签订了合作协议。

2.3.2.3 爱科：紧凑型全电动拖拉机

全球顶级的拖拉机两个品牌，其一是约翰迪尔，其二是美国爱科公司旗下的芬特。芬特拖拉机是全球高端拖拉机中的高档产品，而爱科打算用芬特作为电动拖拉机品牌，说明爱科对电动拖拉机寄予很高的希望。

从爱科发布的 2020 年可持续发展报告中，爱科集团承诺该公司到 2025 年将生产纯电动芬特拖拉机。目前，爱科正在打磨一款名为芬特 e100 Vario 的紧凑型全电动拖拉机，目前 e100 Vario 在中轻负荷作业时可以工作 5 小时。据爱科内部人士透露，在芬特 e100 Vario 的基础上，爱科将推出更大功率效率更高的电动拖拉机。

2.3.2.4 日本久保田：电动拖拉机

久保田是一家相当保守的日本企业，但在电动化方面颇为激进。早在 2020 年，久保田就发布了一款概念型电动拖拉机，与迪尔、凯斯、爱科不同的是这款机器是履带行走装置，是一款太阳能充电的锂离子电池的机器。

一个企业的产品开发受国家政策、相关行业的影响很大，美国有特斯拉，约翰迪尔、爱科、凯斯纽荷兰自然而然地选择了电池能源拖拉机。而在由丰田、本田主导的日本市场，久保田受这两家企业影响很大，2022 年久保田宣布要制造氢为燃料的燃料电池拖拉机，且承诺在 2025 年要商用化。FCV 是氢气燃烧带动发电机给电池充电，使用时间和续航能力要比纯电动更有优势。

2.4 国内外地方转型行动及低排放区应用案例

2.4.1 中国地方转型行动

2.4.1.1 山东省：闯出非道路移动机械减排新路径

山东省高度重视非道路移动机械污染防治工作，要求推动非道路移动机械节能减排和绿色低碳清洁化发展，开创了纯电替代、油电混合及共享租赁等 3 种新能源非道路移动机械应用模式。

德州市天衢新区已在 14 个园区投入 230 辆共享电动叉车,同时,有 6 家企业正在与租赁公司洽谈，计划长期专项引入电动叉车 59 台，替换燃油叉车 78 台。此外，齐河县通过完善租售、维护体系，辖区 11 家重点物流园区在用新能源非道路移动机械已有 816 台，新能源机械占比达到 98.8%。

济南市积极引领龙头企业践行绿色、低碳理念，在新能源机械推广应用中发挥示范带头作用。济南比亚迪汽车有限公司已实现园区内 490 台叉车全部电动化。重汽集团已制定老旧机械淘汰更新计划，新增机械拟全部使用电动机械，集团各子公司电动叉车总数达到了 495 台。济南市轨道集团地铁建设项目各施工工地正在使用的 34 台盾构机已全部升级为电动机械，不仅减少了污染物排放，还降低了噪声污染。

在非道路移动机械迭代升级进程中，青岛市生态环境部门发现，纳入淘汰范围的机械除发动机排放标准不符合要求外，其他主要零部件大多性能良好，可以继续使用，直接整机报废不符合绿色新发展理念要求。对此，青岛市积极开展新能源改造探索，确定了使用电池和电动机直接替代发动机的新能源改造路线，为老旧机械淘汰更新提供了新方向。

2.4.1.2 山西省：实施电动农机奖补政策

2016 年 6 月，山西省出台了《关于推进电动农机发展的实施意见》，鼓励企业对电动农机进行研发和生产，在全国率先试水绿色农机，并列入强农惠农富农的补贴政策中；并于同年 7 月，出台了《关于加大电动农机研发使用力度的实施意见》。随后，山西省农机局相继制定出台了《山西省电动农机新产品奖补工作实施方案》、《山西省电动农机新产品试验考核方案》和《2016 年电动农机新产品奖补名录》等一系列配套执行标准。

在电动农机研发上，山西拿出财政专项经费 5,000 万元对电动农机生产企业和用户予以奖补。奖补产品范围确定为以电池或电力为主要动力的电动收获机械、电动农用植保机械、电动拖拉机、电动农用运输机械、丘陵山区小型电动农业机械、果园电动机械、设施农业电动农机和电动农产品加工贮藏机械等。

截至 2017 年底，山西已建设电动农机装备试验示范点 56 个，引进耕整地机械、播种机和植保机等各类电动农机装备 425 台套，使用电动农机奖补资金 4,993.3 万元，帮助 1.2 万户农民购买 1.4 万台（件）电动农机新产品。购买最多的产品是电动中耕除草机、电动运输采摘机和电动施肥器三类，除草机达到 7548 台，占购买总数的 53.48%；电动运输采摘机 2094 台，占购买总数的 14.84%；电动施肥

器 1700 台，占购买总数的 12.04%。

2.4.1.3 浙江省新昌市：启动非道路移动机械绿色化改造

新昌共有登记编码的非道路移动机械 2220 台。此类机械类型多、范围广、使用周期短、流动性强，排放超标，一直是生态环境领域的“老大难”问题。新昌在全省率先启动非道路移动机械绿色化改造：根据自愿原则，对有意愿升级改造且具备改造条件的机械，机主可与具备资质的改造企业签订协议实施“换芯”改造，将原来高排放的发动机更换为国Ⅳ排放标准的发动机。

对企业来说，“换芯”价格优势明显。按照目前市场价，重新购买 1 台国Ⅳ排放标准的柴油动力叉车至少需要花费 4 万元，而通过更换发动机将其改造升级为国Ⅳ排放标准，只需要 2 万元左右。同时，新昌采取“政府补贴一部分、企业解决一部分、业主掏一部分”模式，其中，政府补贴每台 5875.7 元。

以“改”促“治”，实现减污降碳、协同增效。经第三方权威检测机构检测，升级改造后的非道路移动机械，排污量大大降低。50 台非道路移动机械治理后，预计颗粒物（PM）排放减少 30%以上，每年可减少颗粒物（PM）排放约 2 吨，促进空气质量改善。

2.4.1.4 内蒙古：新能源矿卡替代

矿山运输地形复杂、环境恶劣且存在普遍超载现象等，对电池企业供应的电池在循环寿命、充电速度、电池性能提出更高要求。2020 年，内蒙古华能伊敏露天矿正式投运国内首套电动重型卡车智能换电系统。通过该智能换电站，电动矿卡可实现 4 分钟更换电池，且每块电池能够支撑满载的电动矿卡运行 35 公里，约来回运送 4～5 趟土方的工作量。

近年来，鄂尔多斯准格尔旗也在全力推动新能源矿卡替代传统燃油矿卡。建立了全国首座移动换电站，采用“光伏发电+新能源矿卡”结合的方式，为煤矿的新能源矿卡换电，平均电池更换速度为 6 分钟，大大提高了矿卡工作效率。2023 年 5 月，当地政府还出台了《准格尔旗新能源矿卡重卡替换燃油矿卡重卡三年行动方案》，明确指出要在 2026 年 6 月底前，全旗煤矿、洗选煤厂、电厂、集装站等能源企业现在使用的燃油矿卡 28,000 辆、重卡 60,000 辆全部实现新能源矿卡、重卡清洁替代。到 2026 年底，非化石能源消费比重达到 30%左右，旨在缓解能源和环境压力，推进地区绿色低碳发展。

2.4.2 国内外非道路移动机械领域低排放区应用案例

目前设立非道路移动机械领域低排放区的城市主要集中于欧洲和中国。英国伦敦推出了世界上第一个非道路低排放区，并将于 2040 年将低排区升级为零排放区。中国已有 300 多个城市设立了非道路移动机械低排放区，以进一步减少非道路移动机械领域的排放，其中有领先城市正在考虑将低排放区升级为零排放区。

2.4.2.1 英国伦敦

伦敦是英国实行非道路移动机械领域低排放区政策的先行者。2008 年开始实施低排放区政策，要求所有发动机功率在 37kW 至 560kW 之间的非道路移动机械满足排放标准。

针对非道路移动源，伦敦还实行了非道路移动机械登记制度，2015 年 9 月 1 日起，大伦敦地区的非道路移动机械必须满足 StageIIIA（欧洲非公路用机动设备第三阶段）排放标准。在伦敦中心区域和金丝雀码头区域内的非道路移动机械必须满足更加严格的 StageIIIB 排放标准（将 PM 和 NOx 的排放量分别降低 90%和 50%）。2020 年 9 月 1 日起，大伦敦地区的非道路移动机械必须满足 StageIIIB 排放标准，在伦敦中心区域和金丝雀码头区域内的非道路移动机械必须满足 StageIV 排放标准（新欧美非公路第四阶段最终版）[28]。

随着时间的推移，伦敦非道路移动机械低排放区的标准将逐渐变得更加严格：从 2025 年 1 月 1 日起，整个伦敦的标准将进入第四阶段；从 2030 年 1 月 1 日起，整个伦敦的标准将进入第五阶段；从 2040 年 1 月 1 日起，仅允许使用零排放机械[29]。

2.4.2.2 德国柏林

柏林是德国最开始实行低排放区的城市。柏林由城市低排区开始对柴油机污染进行管控。利用补贴的方式，鼓励在用车辆加装 DPF 来控制颗粒物（PM）排放。从 2014 年起，柏林对柴油机的管控由道路源扩大到非道路源。目前，德国关于发动机排放的立法已经涵盖了工程机械。法规要求，建筑工地的工程机械需要满足 IIIB/IIIA(IIIA for machines <37KW)标准。为满足排放标准的在用工程机械需要加装颗粒物捕集器[28]。

2.4.2.3 北京市

近年来，北京市氮氧化物主要来源于机动车、非道路移动机械等移动源，排放占比超过 80%。为了更好地治理大气污染，北京市生态环境部门严格非道路移动机械排放标准，持续扩大低排放区范围，全面推进非道路移动机械编码登记工作，加大执法力度，严控非道路移动机械排放污染。

2017 年 12 月，北京市实施非道路移动机械低排区政策，规定五环路(不含)以内区域、北京经济技术开发区行政区域、通州区部分行政区域为禁止使用高排放非道路移动机械的区域。在此区域内使用的非道路移动机械，须达到国III及以上排放标准。

2019 年 9 月，北京市启动了非道路移动机械信息编码登记工作，督导各区建立非道路移动机械准入制度，对符合排放标准非道路移动机械发放二维码身份标识，实现“一机一码”。

2021 年 7 月，北京市人民政府最新发布《北京市人民政府关于划定禁止使用高排放非道路移动机械区域的通告》进一步扩大本市禁止使用高排放非道路移动机械区域的范围，增加了朝阳区、石景山

区、门头沟区、通州区、顺义区、昌平区等 6 个区为全部区域，以及平谷区增加部分区域；同时增加禁止使用的高排放机械种类，在原 4 类机械（挖掘机、装载机、挖掘装载机、叉车）基础上再增加推土机、压路机和平地机 3 类。该《通告》自 2021 年 12 月 1 日起施行。

2021 年上半年，北京市生态环境部门入户检查非道路移动机械 1.73 万台次，发现存在环境违法问题的非道路移动机械 963 台次[30]。

2.4.2.4 西安市

2023 年 3 月 24 日，西安市发布了《西安市人民政府关于调整禁止使用高排放非道路移动机械区域的通告》[31]（下称《通告》），其中明确表示了自 2023 年 5 月 1 日起，西安市将分阶段调整禁止使用高排放非道路移动机械区域，以进一步减少非道路移动机械排气污染，改善环境空气质量。

《通告》中还指出：西安市三环路（含）以内区域，自 2023 年 5 月 1 日起，禁止使用达不到国III排放标准或者超过III类烟度限值的非道路移动机械，三环路以外区域由所在区县结合辖区实际自行划定。西安市三环路（不含）以外其他区域，自 2023 年 5 月 1 日起，禁止使用超过III类烟度限值的非道路移动机械；2023 年 8 月 1 日起，禁止使用达不到国II排放标准或者超过III类烟度限值的非道路移动机械。

2.5 国内外对比分析

目前，新能源非道路移动机械从研发到批量生产，科研单位、试制企业及试用企业经费投入较大，要推广新能源（LNG/电驱动）还要兴建一批基础设施，投资也很大。发达国家政府在科研经费投入、示范区建设、基础设施等方面给予的政策优惠，为新能源非道路移动机械的推广应用创造良好的条件，并且实现大批量的产业化：

经济上大力扶持：在研发期间，政府给予较高强度资助，支持研究单位和企业，尽快开发出节能环保的新能源非道路移动机械。资金上的大力扶持，为发展新能源非道路移动机械奠定了良好的经济基础。

政策上优惠及规划指导：政策上的优惠是对发展新能源非道路移动机械具有推动力，它给生产者和使用者提供了开发和购买的动力。在美国，对购买新能源非道路移动机械给予减税优惠，如购买节油 28%Aleecz 公司生产的混合动力高空作业车，可以减免 1,200 美元的联邦税；在日本，对生产低排放、低噪音的环保型新能源工程机械厂商和用户给予融资、税收、售价等方面的优惠。这些优惠政策对于新能源非道路移动机械的发展都具有强大的推动作用。我国有关部门可以借鉴国外经验，加大对节能和新法规上强制：不同时期与地域，对燃油工程机械的生产、销售、使用和排放实行限制性法规上的

强制，特别是关于严格限制燃油工程机械尾气排放的相关法规，是对发展新能源非道路移动机械的直接促进。

对比国外较成熟的新能源技术及政策及财政支持体系，目前，在新能源非道路移动机械领域，我国已拉开新能源产业化大幕，初步取得了一些进展：初步形成了新能源工程机械研发和技术理念；在技术研发方面，部分产品基本能满足整车要求；在产业化方面，部分新能源非道路移动机械已经实现小批量销售，正在向产业化推进。

但仍存在一些问题需要解决：我国新能源非道路移动机械研究起步较晚，政府投入不足，企业投入更少，我国新能源非道路移动机械处于试验阶段。近年来虽然部分企业加大投入，有了很大发展，但仍与国际先进水平有一定的差距；关键零部件（节能型液压元件）的产业链尚未形成，产业化能力亟待提高；国内缺少新能源非道路移动机械有关配套鼓励政策及措施。

3 非道路移动机械油耗及碳排放的影响因素分析

3.1 发动机能效

3.1.1 机械零部件运行状态

机械在运行的过程中，对零部件的精度和协调性要求极高。然而，当前中国的机械自身系统极其不完善，零部件的使用寿命和耐久力的提升空间较大，在运行的过程中，经常会偏离标准精度，直接影响了整部工程机械的运转。在这些零部件中，发动机和底盘的影响是最大的，发动机系统的不完善，增加了机械启动过程中的燃油量。而底盘的不完善，增加了机械传动时的能量，这两者都会使整个工程机械的能耗增大。根据 CECE 和 CEMA 的手册得知[32]，施工工法优化和机械优化可节省 15%～68%燃油消耗。

3.1.2 机械的操作和维护

不完善的制度导致操作者（驾驶员）在使用机械的过程中，经常出现超速驾驶、急速换挡等现象，而超速驾驶和急速换挡都需要强大的动力和能量作为支撑，促使燃油急剧燃烧，造成巨大能耗。此外，操作人员会根据客户的需求和付费方式的不同，决定不同的作业方式。比如同样的装载机，操作人员会根据工作量或时间计费等不同的计费方式操作，由此会产生不同的油耗情况。同时，很多企业不注重对机械的维护和保养，也没有相关的定期检测维修制度。无节制地使用工程机械，不健全的保养维护制度缩短工程机械的使用寿命，使其老化的速度更快，耗油量更大。根据 CECE 和 CEMA 的手册得知[32]，机手操作习惯的提升可节省 5%～30%燃油消耗。

3.1.3 发动机效率和技术水平

当前中国的工程和农业机械普遍采用的是燃油技术，这种技术本身的科技含量低，机械使用燃油的经济成本高。在使用的过程中，还经常会出现燃油燃烧不充分，以及燃油泄漏等问题。燃烧不充分不利于燃油的循环使用，而泄漏直接导致燃油的浪费。这些问题是造成工程机械燃油消耗过大的重要原因。根据 CECE 和 CEMA 的手册得知[32]，通过燃油发动机管理和控制可节省 5%～25%燃油消耗。

3.2 机械电动化

电动化是打赢蓝天保卫战重要举措。根据清华大学教授陈全世的观点，目前工程机械的电动化时机已经成熟。目前工程机械电动化主要为以下几点：一是纯电动工程机械零排放、高效能，节能减排效果明显；二是各大电池厂、工程机械厂商纷纷切入工程机械电动化市场，推动工程机械领域新能源发展。

3.3 替代燃料应用

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础，能源尤其是石油资源的匮乏、全球环境的恶化已成为当今世界社会发展的两大难题。为缓解我国石油资源匮乏和需求之间的矛盾，实现我国长期可持续的经济发展和环境保护，需要发展替代清洁燃料以部分取代石油基燃料。

替代燃料是指除了柴油、天然气以外的燃料，比如氢、甲醇等非一次性能源，从而达到节约传统化石燃料（汽油、柴油等）的目的。道路交通中已应用的甲醇发动机、混动发动机、氢发动机等。目前，出于对作业和环保要求的考虑，已有非道路移动机械使用替代燃料或者电动化。针对重型机械如大型矿车，利用柴油或甲醇发电（并非电网供电），借助电机提供更大扭矩的同时降低能耗。根据 CECE 和 CEMA 的手册得知[32]，使用替代能源可节省 10%～57%燃油消耗。

4 情景目标的划分和设定

4.1 分析框架和研究方法

4.1.1 情景定义

为了更好地了解不同技术路径对中国非道路移动机械行业降低石油消耗和碳排放的潜在影响，基于行业相关的政策导向、发展趋势以及环境保护要求，本报告提出了两个情景——基准情景和政策强化情景，并参考劳伦斯伯克利国家实验室发布的《中国重型货运部门减油路径评估》报告（以下简称

《路径评估》报告）[33]，对非道路移动机械能效提升和电动化率进行预测。

基准情景下，非道路移动机械行业按照当前政策和行业规划目标发展。在非道路移动机械行业新能源技术创新改革与支持新能源非道路移动机械发展等相关政策的推动下，非道路移动机械能效不断改善（每年提高 0.6%），新能源化及替代燃料应用在该领域发展相对缓慢。

政策强化情景下，非道路移动机械行业将出台更加严格的油耗或碳排放控制政策。该情景下，政策加速非道路移动机械行业新能源技术创新改革与机械的市场应用，完全采用技术性的能效提升（每年提高 1.5%），新能源化及替代燃料应用在该领域发展相对迅猛。

4.1.2 数据基础

本报告将统计数据与调研数据进行有效耦合，把握预测判断的趋势准确性。数据来源包括国际能源署、国家统计局、国家发改委、生态环境部、交通运输部等相关部门，中国工程机械工业协会、中国农业机械工业协会积累的行业数据、专项调查数据等，以及与多家行业内企业交流了解的行业发展情况。

4.1.3 分析框架

降低中国非道路移动机械行业柴油消耗量及碳排放的现有技术选择主要包括：采用更清洁的燃料、提高能效、以及采用更清洁、低碳或零排放的车辆技术（如纯电动、混动、氢燃料电池技术）。为了系统地评估这些技术的应用潜力，本报告对机械能效提升及低碳技术成熟度进行预测，相关因素包括产业发展前景、政策背景、生态环境、技术进步等，具体体现指标为机械保有量、机械能效提升率、机械电动化率和替代燃料应用率。

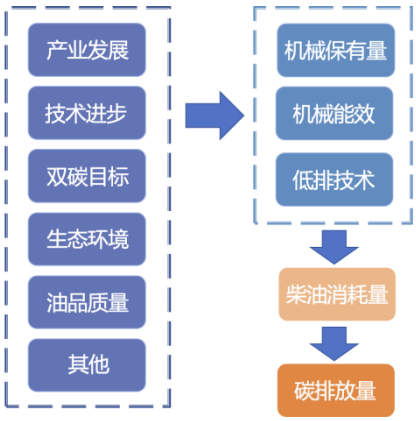


图 4-1：分析框架

4.1.4 研究思路

本报告以“自下而上”的方法，通过查阅文献、行业报告、企业调研等方式，对各非道路移动机械类型保有量、年度工作小时数及油耗数据进行统计，之后根据上述分析框架，综合产业发展、政策背景、生态环境、技术进步、替代燃料应用等因素对机械能效提升及低碳技术发展的影响，提出三条非道路移动机械领域的节油减碳路径（详情见本报告第五章），并计算出柴油消耗节约总量和碳减排总量。

4.2 情景分析中的因素分析

4.2.1 产业发展前景

改革开放以来，我国物质基础日益增强，产业体系完整，消费需求对经济增长拉动作用将持续扩大。上海财经大学认为[34]，中国经济社会发展大局保持稳定，随着一揽子经济政策效应的逐步释放，中国经济将进一步释放增长潜能，稳步进入上升周期。

本报告主要的研究对象：挖掘机、装载机和拖拉机，主要应用在房地产行业、矿产行业、基础建设及种植产业等场景，这些行业的产业发展前景直接决定了挖掘机、装载机和拖拉机的发展前景。

对于房地产行业，根据专家观点，国内经济的稳定发展是房地产市场前景的重要支撑。据中经数据统计，1997-2021 年，随着经济的不断增长和人民生活水平的提高，对于居住环境的需求也在不断增加，全国房地产开发企业房屋施工面积呈现上升趋势[35]。此外，随着城市化进程的不断推进，城市人口的增加将进一步推动房地产市场的发展。城市化进程将催生新的住房需求，将为房地产市场提供更多的机遇和潜力。然而，2021-2023 年，随着城市化进程放缓、城市人口增速放缓、旧城改造总量减少、住房市场已基本平衡，资金压力也成为制约房企新开工及施工数据的主要因素之一，短期内房地产业预期不太乐观。但是，随着国内经济的稳步回升和政策的不断放松，未来房地产市场也有望逐渐回暖。

对于矿产行业，我国正处于工业化中后期，工业化与城镇化进程加快，基础设施互联互通建设在全国范围内梯次推进，对矿产资源刚性需求量的进一步释放，将不断提振传统矿业需求，在相当长一段时期内大宗矿产品的消费需求仍将在高位运行。此外，农用化肥生产中消耗的钾、磷矿产，能源生产中消耗的化石矿产，以及药品生产消耗的小量、微量矿物，仍有巨大的需求，且不能循环利用，还需依靠矿业。即便完成了工业化，要支撑我国如此经济体量巨大的国家的正常运转，无论是对于能源矿产还是用作原料的矿产资源的需求度依然居高不下，因此采矿业未来前景乐观。

对于城市基建或大型基建，随着中国经济传统行业从高速增长转向发展优化，以及新兴产业的快速发展，基础设施、铁路、公路、港口、水利及水运等交通基础设施建设等行业将成为近期重点发展领

域。新基建工程、交通、能源、水网、新型城镇化等领域是投资的重点，也是新一代基建投资提质增效的重大契机。根据券商分析测算，“十四五”规划期间新基建的整体投资规模在 27 万亿左右，新基建为老基建赋能，新老基建融合发展的新局面将进一步打开[36]。以城市基建为例，2022 年我国人口城镇化率已达到 65%，进入城镇化中后期[37]，城市已进入由大规模增量建设转向存量提质改造和增量结构调整并重的发展阶段。中国基建行业在城市建设方面发展前景依然比较广阔。此外，中国拥有世界上最庞大的高速铁路网和公路网,但与发达国家相比,中国的交通基础设施仍有较大差距。因此,未来中国将继续投资大量资金用于高铁、高速公路等基础设施建设，并加大对城市交通网络建设的投入,基础设施互联互通建设将在全国范围内梯次推进。

对于种植产业，人口数量变化对农业产品需求产生较大影响。在过去的几十年里，我国人口一直呈现快速增长趋势。然而目前，我国正在经历多重人口变化，特别是低生育率和人口老龄化。根据国家统计局数据，2022 年我国总人口约 14.12 亿人，比 2021 年减少 85 万人，开启了人口负增长时代。中国人口与发展研究中心曾预测[38]，我国人口峰值为 14.2 亿，之后到 2035 年将保持在 14 亿。按照联合国《世界人口展望 2022》中方案的估计，我国人口到 2050 年将下降到 13 亿左右，到 2100 年将下降到 7.71 亿[39]。因此，短期内中国人口的小幅度减少对农产品的需求影响较小。然而到后期，在中国的低生育率和人口老龄化的双重因素影响下，可以预见，未来对农业产品的需求也会随之降低，种植产业的发展也会受限。

4.2.2 能效提升与技术进步

为了调整能源结构、落实环保政策、国家大力推动新能源的高效利用。生态环境部颁布《非道路移动机械污染防治技术政策》，明确鼓励混合动力、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。随着“三电”技术的逐步成熟带来电动化产品制造成本的不断降低，非道路移动机械作为生产资料，新能源化相比燃油的全生命周期成本逐步具备吸引力和经济性，新能源化成为非道路移动机械绿色发展的重要方向之一。传统燃油非道路移动机械通过优化发动机能效、电动化技术、混合动力技术等路径改善燃油经济性。农业中使用的柴油发动机单耗不断下降，随着农机大型化和农业联合收割的推行，未来农机用油单耗将逐渐降低。

4.2.3”双碳”承诺

2015 巴黎气候大会通过了《巴黎协定》，正式确立了以国家自主贡献（NDC）机制为核心的全球应对气候变化制度框架。IPCC 第六次评估报告进一步肯定了气候变化问题的紧迫性，气候变化是全球共

同面临的严峻挑战。我国力争于 2030 年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和，这是以习近平同志为核心的党中央统筹国内国际两个大局作出的重大战略决策。实现“双碳”目标，是贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求。我国已进入新发展阶段，推进“双碳”工作是破解资源环境约束突出问题、实现可持续发展的迫切需要，是顺应技术进步趋势、推动经济结构转型升级的迫切需要，是满足人民日益增长的优美生态环境需要、促进人与自然和谐共生的迫切需要，是主动担当大国责任、推动构建人类命运共同体的迫切需要。

4.2.4 交通污染物及碳排放问题越来越受到关注

交通运输中产生的废气是重要的交通污染物。国家接连发布《加快推进天然气利用的意见》、《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等具体举措，减少交通运输对环境和大气污染。

据统计，在全国每年超过 1 亿吨的柴油消耗总量中，约有 60%用于非道路移动机械（主要是农业机械和工程机械）[11]。《中国移动源环境管理年报 2023》显示，2022 年非道路移动源排放 SO_2、HC、NO_x、PM 分别为 17.6 万吨、42.5 万吨、473.5 万吨、23.2 万吨，与 2021 年排放水平相近。其中，工程机械和农业机械排放的 HC 分别占非道路移动源 HC 排放总量的 25%和 48.2%；NO_x 分别占非道路移动源 NO_x 排放总量的 28.5%和 34.9%，排放的 PM 分别占非道路移动源 PM 排放总量的 30.6%和 39.6%。

交通领域作为最大的温室气体排放源之一，占全球温室气体排放量的 15%，并保持持续增长。在我国，能源供应、工业、建筑和交通运输是四大重点碳排放行业，其中，交通运输领域的碳排放量大约占我国碳排放总量的 10%[40]，非道路移动机械 CO_2 排放占全国排放总量的 4.5%，是最难减排的部门之一。

2020 年，为贯彻《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》，防治非道路柴油移动机械排放污染物对环境的污染，改善环境空气质量，生态环境部发布《非道路柴油移动机械污染物排放控制技术要求》，规定了第四阶段非道路柴油移动机械及其装用的柴油机污染物排放控制技术要求。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，发动机排放的氮氧化物（NO_x）减少 13%～45%、颗粒物（PM）减少 50%～94%，不符合排放标准的设备将面临限制作业区域等措施。据测算，通过本次实施的国四排放标准，到 2025 年将实现 NOx37.5 万吨、PM3.2 万吨的减排，减排比例分别达 12.5%和 19.3%。因此，加强非道路移动机械源头管控，确保国四排放标准顺利实施，对提升大气环境质量具有重要意义。此外，据业内信息，近年来国家越来越重视非道路移动机械领域的碳排放问题，将在未来几年内出台的非道路移动机械“国五”标准。“国五”标准将在现有“国四”标准对非道路柴油移动机械及其装

用的柴油机污染物排放控制技术提出要求的基础上，增加碳排放监测内容。

4.2.5 油品质量升级助力交通排放清洁化

非道路移动机械领域排放标准逐步加严的同时，油品质量也在升级。2000 年以来，我国车用汽、柴油质量标准不断严格，升级速度不断加快。车用汽油的发展方向是无硫化、降低烯烃、芳烃和夏季蒸气压值；车用柴油的发展方向是无硫化、提高十六烷值和降低多环芳烃含量。未来非道路国五标准的出台或对非道路领域用油品质量的提升起到促进作用。

4.3 保有量预测

目前我国正处于经济高速发展时期，对基建、交通运输、房地产等工程的需求量不断加大，因此未来我国还需加大力度进行工程建设，满足日益增加的需求。而在对基建、筑路的过程中需要大量的挖掘机进行工程作业，因此未来随着我国市政工程以及筑路等工程的增加，对我国工程挖掘机的需求也会随之增加，从而挖掘机保有量呈现稳定上升趋势。

对于装载机，2012-2020 年中国装载机整体均为产量高于销量[41]，整体供大于求，在行业波动“谷”期，产销差距更大，产品库存积压情况明显，最终造成严重的产能过剩和低使用率。随着去产能化工作不断推进，未来装载机的保有量将呈现下降趋势。

拖拉机保有量呈下降趋势。一是因为种地收入普遍偏低，不及打工收入，且农村存在土地托管形式，即本人不想种地，将自己的土地委托给其他人管理，造成拖拉机需求量减少，需求量的增加不敌淘汰量的增加，最终造成保有量呈下降趋势。二是因为拖拉机未来会向大型化发展，因此保有量会下降，但动力总功率呈现上升趋势。

在各类非道路移动机械保有量预测方面，先根据《中国农业机械工业年鉴》、《全国农业机械化发展统计公报》及其他网上公开的 2012-2021 年挖掘机、装载机、拖拉机保有量数据，绘制散点图及线性趋势线，再根据趋势线公式预测 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年各类非道路移动机械保有量，见表 4-1。根据趋势线公式预测 2060 年保有量时得出的数据小于 0，因此后续表中 2060 年装载机的保有量、电动化率、油耗和碳排放数据均不做展示。

表 4-1：挖掘机、装载机、拖拉机保有量预测

（万台）	2025	2030	2035	2050	2060
挖掘机	179.86	196.29	212.72	262.01	294.87
装载机	125.33	104.11	82.90	19.25	/
拖拉机	2,100.63	1,993.95	1,887.28	1,657.25	1,353.90

4.4 基准情景

伯克利国家实验室开发的自下而上的能源终端模型——“中国 2050 需求、资源和能源分析模型（DREAM）”，旨在研究能效改善、提升纯电动汽车及燃料电池汽车占比等不同技术路径对中国重卡部门降低石油消耗的潜在影响[33]。本报告在基准情景中，参考上述模型得出的对于能效提升率和纯电动化率预测，并假设各类非道路移动机械的年工作小时数不变，使用量化计算的方法，预测 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年各类非道路移动机械的能效提升率、电动化率和替代燃料应用率，从而计算出挖掘机、装载机和拖拉机在上述不同时间节点下的总节油量和碳减排总量。

在能效提升率预测方面，根据《路径评估》报告中“参考情景”下重卡的能效提升速率（每年提高 0.6～0.7%），预测非道路移动机械的能效能够以每年提高 0.6%的速度上升。

在各类非道路移动机械电动化率预测方面，我国目前传统工程机械的能源主要是柴油，新能源工程机械的渗透率不足 1%[42]。对比新能源汽车，截至到 2022 年底国内新能源汽车渗透率已经达到 25.6%，截至 2023 年 9 月底全国新能源汽车保有量达 1,821 万辆，占汽车保有量的 5.5%[43]。参考国内新能源汽车渗透率及保有量的快速提升，综合《路径评估》报告中“新能源晚期采用情景”中的重卡的纯电动化率预测，本报告认为在目前国内的政策推动、技术进步和环保压力倒逼的现状下，新能源工程机械和农业机械的发展速度在未来将稳步加快。工程机械中，相对于挖掘机，装载机受到环保压力更大，政策动力迫切，应用场景相对集中，更易新能源化改造，电动化进程较快，有望成为最先规模化替换的品类。基于目前电动化装载机保有量已超过 1%，本报告预测 2025 年装载机纯电动化率可达到 3%；挖掘机电动化进程相对缓慢，本报告预测 2025 年挖掘机纯电动化率可达到 1%。而对于拖拉机，由于其在使用场景中做工时瞬时负荷变化大，对电池性能要求较高，且目前 60%的拖拉机在农户手中，充换电基础设施不完善，购买成本高导致电动化进程更加缓慢。本报告在基准情景下采取相对保守的预测，2025-2050 年挖掘机纯电动化率仍接近于 0，2060 年纯电动化率可达到 1%。

而在替代燃料应用率预测方面，目前我国尚未有该类机械商业化应用，也没有相关政策推动，替代燃料成本、使用安全性、加氢基础设施建设欠缺等问题会长期存在，行业专家们对此条路径的发展均认为不太明朗。未来替代燃料在非道路移动机械行业的应用前景取决于国家政策的倾斜，若国家出台政策大力支持替代燃料发展，增强基础设施建设、降低原材料使用成本，则非道路移动机械替代燃料应用率将有大幅度提升。本报告基于现有国家政策及发展现状，对替代燃料应用率采取相对保守的预测，挖掘机及装载机 2060 年替代燃料应用率可达到 0.5%，而拖拉机替代燃料应用进程较缓，2060 年可达到 0.01%。

基准情景下，挖掘机、装载机、拖拉机在 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年能效提升

率、纯电动化率和替代燃料应用率预测见表 4-2，各节油减碳路径下各类机械的保有量占比预测见表 4-3。

表 4-2：挖掘机、装载机、拖拉机能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测（基准情景）

	2025E			2030E			2035E			2050E			2060E		
	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率
挖掘机	0.61%	1%	≈0	0.63%	3%	≈0	0.64%	5%	≈0	0.71%	10%	0.1%	0.75%	20%	0.5%
装载机	0.61%	3%	≈0	0.63%	5%	≈0	0.64%	10%	≈0	0.71%	20%	0.1%	0.75%	30%	0.5%
拖拉机	0.61%	≈0	≈0	0.63%	≈0	≈0	0.64%	0.1%	≈0	0.71%	0.5%	≈0	0.75%	1%	0.01%

表 4-3：各节油减碳路径下各类机械的保有量占比预测（基准情景）

挖掘机						
		2025E	2030E	2035E	2050E	2060E
高效路径		99%	97%	94.9%	89.4%	78.5%
电动化路径	纯电	1%	3%	5%	10%	20%
	混动	≈0	≈0	0.1%	0.5%	1%
替代燃料路径		≈0	≈0	≈0	0.1%	0.5%
装载机						
		2025E	2030E	2035E	2050E	2060E
高效路径		97%	95%	89.9%	79.4%	68.5%
电动化路径	纯电	3%	5%	10%	20%	30%
	混动	≈0	≈0	0.1%	0.5%	1%
替代燃料路径		≈0	≈0	≈0	0.1%	0.5%
拖拉机						
		2025E	2030E	2035E	2050E	2060E
高效路径		100%	100%	99.4%	98.5%	96.99%
电动化路径	纯电	≈0	≈0	0.1%	0.5%	1%
	混动	≈0	≈0	0.5%	1%	2%
替代燃料路径		≈0	≈0	≈0	≈0	0.01%

根据挖掘机、装载机、拖拉机预测的保有量及各节油减碳路径下各类机械的保有量占比，可计算出 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年各节油减碳路径下各类机械的保有量，根据各类机械的当前油耗及各节油减碳路径的节油潜力可预测机械节油量，二者相乘可得到基准情景下 2025 年、2030

年、2035 年、2050 年和 2060 年各类机械每年的总节油量及碳减排总量。本报告假设 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年各类机械年度工作小时数与《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》中提供的各类机械年度工作小时数参考值相同[22]。不同路径的节油潜力参考欧洲建筑设备委员会（CECE)的统计数据[32],电动化路径中混动化的节油潜力为 25%,替代燃料应用路径的节油潜力为 33.5%[44]。计算公式见附录 1。

4.4.1 挖掘机

为了更准确地预测基准情景下挖掘机的节油量及碳减排量，本报告在表 4-4 中挖掘机保有量预测数值基础上，延续本报告 2.1.1 章节中《中国工程机械工业年鉴》中对于挖掘机的分类，按照整机质量分为大型、中型和小型，根据各吨位挖掘机保有量占比、表 4-2 基准情景下挖掘机的能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测及表 4-3 中基准情景下挖掘机各节油减碳路径下（各路径详情见本报告第五章）的保有量占比，预测挖掘机截至不同时间节点的总节油量及碳减排总量，见表 4-4。

表 4-4：挖掘机各路径节油减碳潜力（基准情景）

挖掘机						
节油量（万吨）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		10.42	11.50	12.39	15.95	16.65
电动化路径	纯电	17.25	56.47	101.99	251.25	565.53
	混动	0	0	0.51	3.53	7.07
替代燃料应用路径		0	0	0	0.84	4.74
合计		27.66	67.97	114.89	271.58	593.99
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		32.76	36.18	38.97	50.16	52.36
电动化路径	纯电	54.25	177.60	320.78	790.22	1,778.67
	混动	0	0	1.60	11.12	22.23
替代燃料应用路径		0	0	0	2.65	14.90
合计		87.00	213.78	361.35	854.14	1868.16

4.4.2 装载机

目前各类年鉴及网上公开数据中未找到按照大、中、小型装载机分类的细分保有量数据，若采用装载机行业总保有量及平均使用油耗计算并预测油耗将导致数据误差过大，故本报告采用网上公开的装载机销量占比进行估算：公开数据显示，3 吨以下、3 吨及 5 吨装载机销量占全行业 89%，可见上述三种吨位的装载机为行业主要销售机型。本报告假设装载机保有量占比与国内销售量占比相同，从而预测 2025 年、2030 年、2035 年和 2050 年 3 吨以下、3 吨及 5 吨装载机的保有量，再根据表 4-2 基准情

景下装载机的能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测及表 4-3 中基准情景下装载机各节油减碳路径下的保有量占比，预测装载机截至不同时间节点的总节油量及碳减排总量。因上述三种吨位的装载机保有量占装载机总保有量的近 90%，假设上述三种吨位装载机油耗及碳排放量约等于装载机的总节油量及碳减排总量，具体见表 4-5。

表 4-5：装载机各路径节油减碳潜力（基准情景）

装载机					
节油量（万吨）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**
高效路径		6.07	5.10	3.90	0.89
电动化路径	纯电	30.76	42.59	67.82	31.50
	混动	0	0	0.17	0.39
替代燃料应用路径		0	0	0	0.05
合计		36.83	47.69	71.89	32.83
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**
高效路径		19.08	16.03	12.27	2.79
电动化路径	纯电	96.75	133.94	213.31	99.06
	混动	0	0	0.53	1.24
替代燃料应用路径		0	0	0	0.17
合计		115.83	149.98	226.12	103.26

4.4.3 拖拉机

为了准确地预测基准情景下拖拉机的节油量及碳减排量，在表 4-4 中拖拉机保有量预测数值基础上，延续本报告 2.1.3 章节中《中国农业机械工业年鉴》中对于拖拉机的分类，按照整机质量分为大型、中型和小型，根据各吨位拖拉机保有量占比，表 4-2 基准情景下拖拉机的能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测，及表 4-3 中基准情景下拖拉机各节油减碳路径下的保有量占比，预测拖拉机截至不同时间节点的总节油量及碳减排总量，见表 4-6。

表 4-6：拖拉机各路径节油减碳潜力（基准情景）

拖拉机						
节油量（万吨）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		12.26	12.02	11.48	11.09	9.42
电动化路径	纯电	0	0	1.81	7.93	12.95
	混动	0	0	2.26	3.96	6.48
替代燃料应用路径		0	0	0	0	0.04
合计		12.26	12.02	15.55	22.98	28.89
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**

高效路径		38.55	37.79	36.12	34.87	29.63
电动化路径	纯电	0	0	5.68	24.93	40.73
	混动	0	0	7.10	12.46	20.37
替代燃料应用路径		0	0	0	0	0.14
合计		38.55	37.79	48.90	72.26	90.87

综合表 4-4～表 4-6，基准情景下挖掘机、装载机、拖拉机 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年节油量及减碳量预测见图 4-2 和图 4-3。

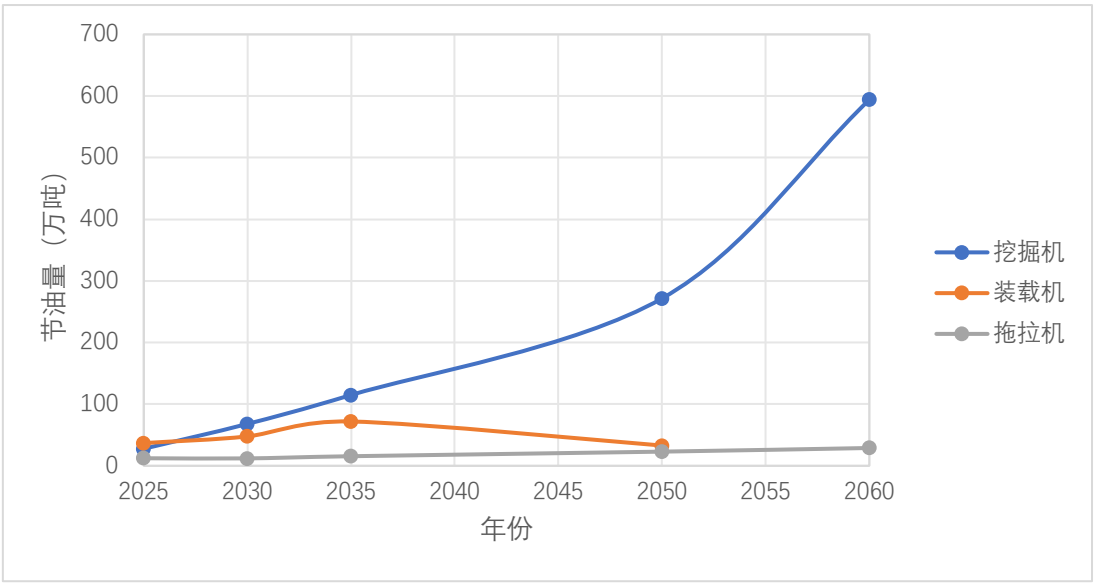


图 4-2：基准情景下挖掘机、装载机、拖拉机各自年度节油量及节油总量预测

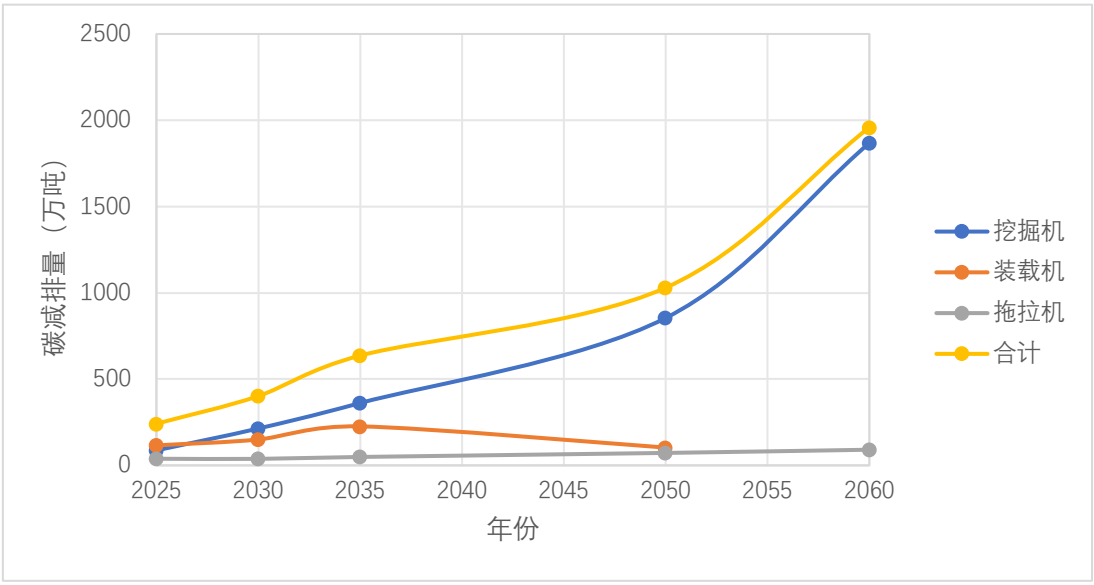


图 4-3：基准情景下挖掘机、装载机、拖拉机各自年度碳减排量及减碳总量预测

4.5 政策强化情景

在政策强化情景中，本报告预计未来我国会出台新的政策更快推动新能源工程机械和农业机械发展，以及建立更加明确的新能源化目标，与基准情景相比，政策加速非道路移动机械行业新能源技术创新改革与机械的市场应用。本报告参考《路径评估》报告中更为激进的“短期策略情景”和“新能源早期采用情景”中对于能效改善、纯电动化率和替代燃料率的预测，新能源化及替代燃料非道路移动机械发展相对迅猛。假设各类非道路移动机械的年工作小时数不变，使用量化计算的方法，预测 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年各类非道路移动机械的能效提升率、电动化率和替代燃料应用率，从而计算出挖掘机、装载机和拖拉机上述不同时间节点下的总节油量和碳减排总量。

在能效提升率预测方面，根据《路径评估》报告中“短期策略情景”下重卡的能效提升速率（每年提高 1.4～1.5%），预测非道路移动机械的能效能够以每年提高 1.5%的速度上升。

在电动化率和替代燃料应用率预测方面，本报告认为政策强化情景下的工程机械和农业机械的电动化率增长速度会比基准情景下更快，也会以更快的速度降低对柴油的需求；而替代燃料应用率的预测虽然依旧保守，但比基准情景下的应用率偏高。

政策强化情景下，挖掘机、装载机、拖拉机在 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测见表 4-7，各节油减碳路径下各类机械的保有量占比预测见表 4-8。

表 4-7：挖掘机、装载机、拖拉机能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测（政策强化情景）

	2025E			2030E			2035E			2050E			2060E		
	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率	能效提升率	纯电动化率	替代燃料应用率
挖掘机	1.55%	1%	≈0	1.66%	4%	≈0	1.79%	8%	≈0	2.24%	15%	0.15%	2.60%	25%	0.6%
装载机	1.55%	3%	≈0	1.66%	8%	≈0	1.79%	13%	≈0	2.24%	25%	0.12%	2.60%	35%	0.6%
拖拉机	1.55%	0.1%	≈0	1.66%	2%	≈0	1.79%	5%	≈0	2.24%	10%	0.02%	2.60%	15%	0.05%

表 4-8：各节油减碳路径下各类机械的保有量占比预测（政策强化情景）

挖掘机

各节油路径保有量占比		2025E	2030E	2035E	2050E	2060E
高效路径		99%	96%	92%	84%	73%
电动化路径	纯电	1%	4%	8%	15%	25%
	混动	≈0	≈0	0.15%	0.75%	1.25%
替代燃料应用路径		≈0	≈0	≈0	0.15%	0.6%
装载机						
各节油路径保有量占比		2025E	2030E	2035E	2050E	2060E
高效路径		97%	92%	86.9%	74.3%	63%
电动化路径	纯电	3%	8%	13%	25%	35%
	混动	≈0	≈0	0.12%	0.6%	1.2%
替代燃料应用路径		≈0	≈0	≈0	0.12%	0.6%
拖拉机						
各节油路径保有量占比		2025E	2030E	2035E	2050E	2060E
高效路径		100%	99%	97.7%	95.7%	94%
电动化路径	纯电	≈0	0.5%	0.8%	1.5%	2%
	混动	≈0	1%	1.5%	2.8%	4%
替代燃料应用路径		≈0	≈0	≈0	0.02%	0.05%

根据挖掘机、装载机、拖拉机预测的保有量及各节油减碳路径下各类机械的保有量占比，可计算出2025年、2030年、2035年、2050年和2060年各节油减碳路径下各类机械的保有量，根据各类机械的当前油耗及各节油减碳路径的节油潜力可预测各类机械的节油量，二者相乘可得到政策强化情景下2025年、2030年、2035年、2050年和2060年各类机械的每年的总节油量及碳减排总量。不同路径的节油潜力参考欧洲建筑设备委员会（CECE）的统计数据[32]，电动化路径中混动化的节油潜力为25%，替代燃料应用路径的节油潜力为33.5%[44]。计算公式见附录2。

4.5.1 挖掘机

为了更准确地预测政策强化情景下挖掘机的节油量及碳减排量，本报告在表4-4中挖掘机保有量预测数值基础上，延续本报告2.1.1章节中《中国工程机械工业年鉴》中对于挖掘机的分类，按照整机质量分为大型、中型和小型，根据各吨位挖掘机保有量占比、表4-7政策强化情景下挖掘机的能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测及表4-8中政策强化情景下挖掘机各节油减碳路径下的保有量占比，预测挖掘机截至不同时间节点的总节油量及碳减排总量，见表4-9。

表4-9：政策强化情景下挖掘机行业各路径节油减碳潜力

挖掘机					
节油量（万吨）	**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**

高效路径		26.39	30.08	33.60	47.38	53.82
电动化路径	纯电	17.25	75.29	163.19	376.88	706.91
	混动	0	0	0.76	5.30	8.84
替代燃料应用路径		0	0	0	1.26	5.68
合计		43.63	105.38	197.56	430.82	775.26
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		82.99	94.61	105.68	149.01	169.28
电动化路径	纯电	54.25	236.80	513.25	1,185.33	2,223.33
	混动	0	0	2.41	16.68	27.79
替代燃料应用路径		0	0	0	3.97	17.88
合计		137.24	331.42	621.34	1354.99	2438.28

4.5.2 装载机

与基准情景一致，本报告采用网上公开的装载机销量占比，并假设装载机保有量占比与国内销售量占比相同，从而预测 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年 3 吨以下、3 吨及 5 吨装载机的保有量，再根据表 4-7 政策强化情景下装载机的能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测及表 4-8 中政策强化情景下装载机各节油减碳路径下的保有量占比，预测装载机截至不同时间节点的总节油量及碳减排总量。因上述三种吨位装载机的保有量占装载机总保有量的近 90%，假设上述三种吨位装载机总油耗及碳排放量约等于装载机的总节油量及碳减排总量，具体见表 4-10。

表 4-10：装载机行业各路径节油减碳潜力（政策强化情景）

装载机					
节油量（万吨）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**
高效路径		15.37	13.05	10.57	2.62
电动化路径	纯电	30.76	68.14	88.17	39.37
	混动	0	0	0.20	0.47
替代燃料应用路径		0	0	0	0.06
合计		46.13	81.19	98.94	42.53
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**
高效路径		48.34	41.03	33.24	8.25
电动化路径	纯电	96.75	214.31	277.30	123.83
	混动	0	0	0.64	1.49
替代燃料应用路径		0	0	0	0.20
合计		145.09	255.34	311.18	133.77

4.5.3 拖拉机

为了更准确地预测政策强化情景下拖拉机的节油量及碳减排量，在表 4-4 中拖拉机保有量预测数值基础上，延续本报告 2.1.3 章节中《中国农业机械工业年鉴》中对于拖拉机的分类，按照整机质量

分为大型、中型和小型，根据各吨位拖拉机保有量占比，表 4-7 政策强化情景下拖拉机的能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测，及表 4-8 中政策强化情景下拖拉机各节油减碳路径下的保有量占比，预测拖拉机截至不同时间节点的总节油量及碳减排总量，见表 4-11。

表 4-11：拖拉机各路径节油减碳潜力（政策强化情景）

拖拉机						
节油量（万吨）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		31.05	31.28	31.63	34.01	31.66
电动化路径	纯电	0	9.54	14.44	23.78	25.90
	混动	0	4.77	6.77	11.10	12.95
替代燃料应用路径		0	0	0	0.11	0.22
合计		31.05	45.58	52.85	68.99	70.73
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		97.66	98.37	99.49	106.96	99.58
电动化路径	纯电	0	29.99	45.42	74.79	81.47
	混动	0	15.00	21.29	34.90	40.73
替代燃料应用路径		0	0	0	0.33	0.68
合计		97.66	143.36	166.20	216.99	222.46

综合表 4-9 至表 4-11，政策强化情景下挖掘机、装载机、拖拉机 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年节油量及减碳量预测见图 4-4 和图 4-5。

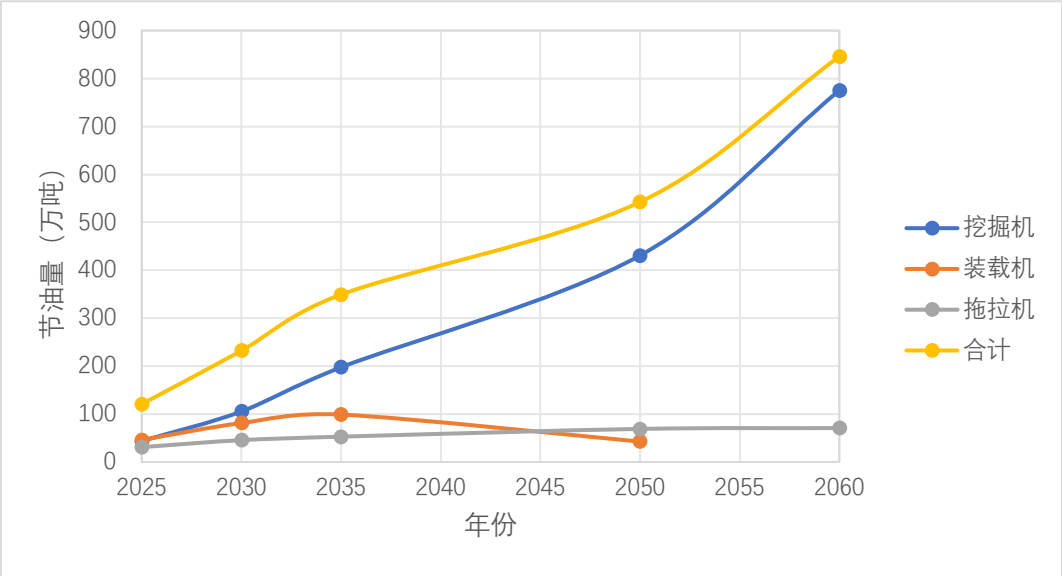


图 4-4 政策强化情景下挖掘机、装载机、拖拉机各自年度节油量及节油总量预测

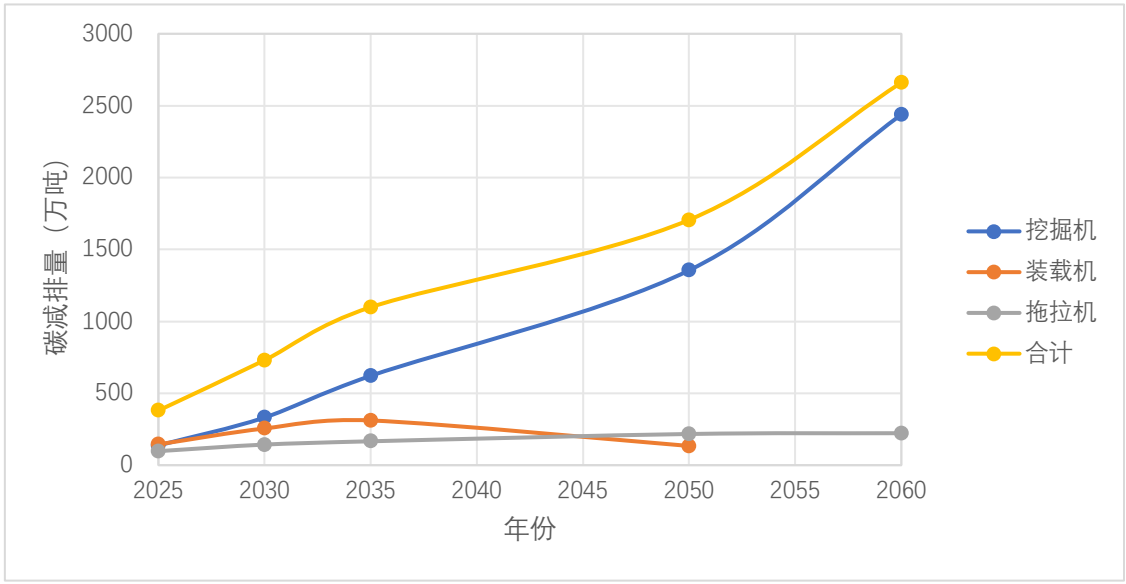


图 4-5 政策强化情景下挖掘机、装载机、拖拉机各自年度碳减排量及减碳总量预测

4.6 基准情景和政策强化情景下三种机械油耗总量及碳排放总量预测

参考表 4-1 挖掘机、装载机、拖拉机保有量预测、表 4-3 及表 4-8 基准情景和政策强化情景下各节油减碳路径下各类机械的保有量占比预测，可计算出 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年各节油减碳路径下各类机械的保有量，根据各类机械的当前油耗及各节油减碳路径的节油潜力可预测各类机械的油耗，二者相乘可得到基准情景和政策强化情景下 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年各类机械的年度总油耗及碳排放总量。两种情景下挖掘机、装载机及拖拉机的油耗及碳排放总量变化趋势见图 4-6 及图 4-7。计算公式见附录 4。

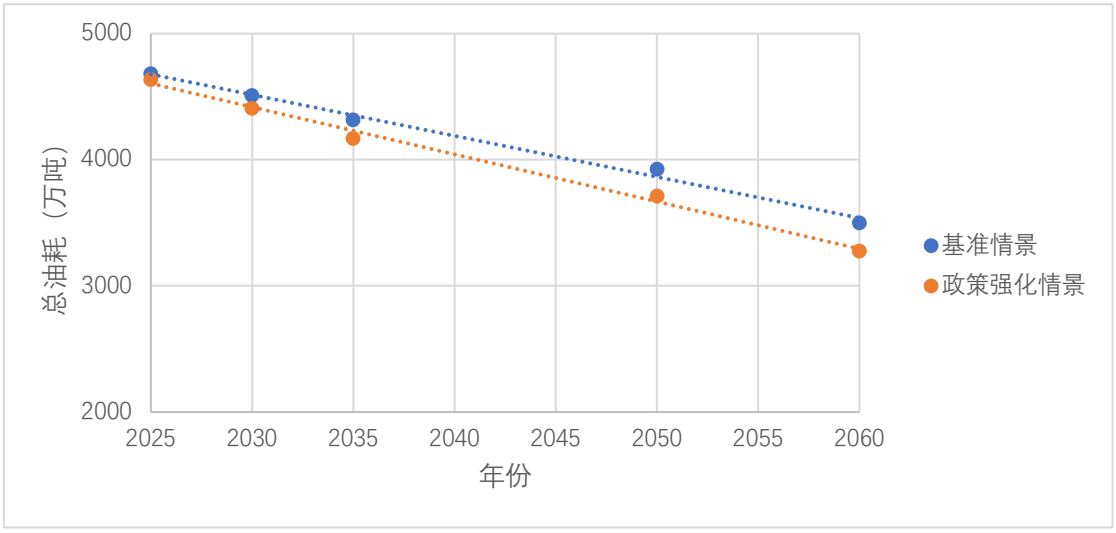


图 4-6 两种情景下挖掘机、装载机及拖拉机的油耗总量变化趋势

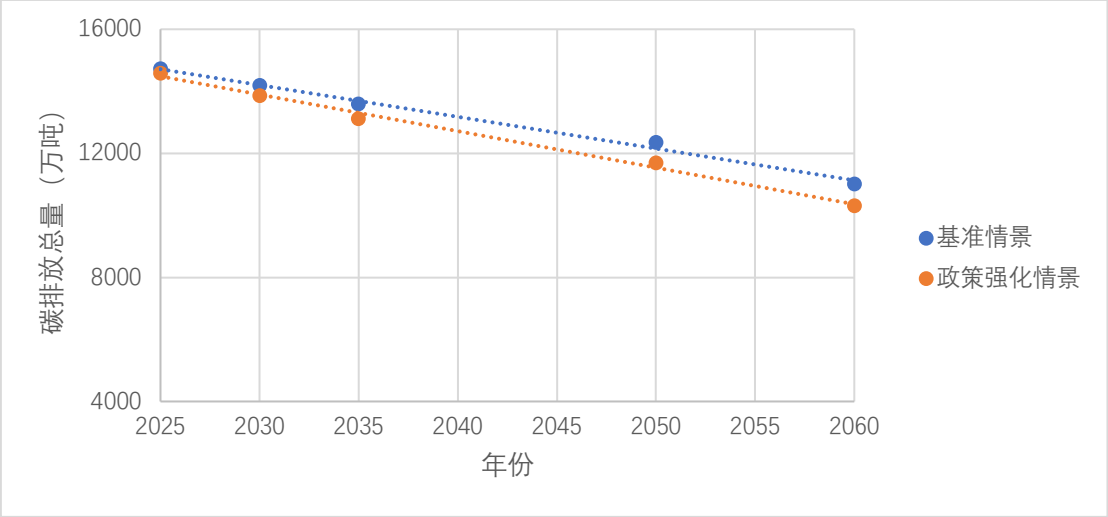


图 4-7 两种情景下挖掘机、装载机及拖拉机的碳排放总量变化趋势

由图可见，未来三种典型非道路移动机械（挖掘机、装载机、拖拉机）总油耗及碳排放总量均呈现下降趋势，政策强化情景下油耗及碳排放量相比于基准情景降速更快，但幅度不太明显。政策强化情景下，虽然未来我国会出台新的政策更快推动新能源工程机械和农业机械发展，电动机械及替代燃料在非道路移动机械上的应用发展相对迅猛，但油耗总量及碳排放总量依然可观。截至 2060 年，政策强化情景比基准情景下能减少油耗约 223 万吨，减少二氧化碳排放量约 702 万吨。因此，该领域是最难节油和最难减排的领域之一，更加需要国家通过政策扶持和引导，持续探索更为有效的节油减碳路径，以便更好地降低非道路移动机械行业油耗及碳排放，实现整个行业绿色低碳化发展。

5 非道路移动机械的主要节油减碳路径

在过去的很长一段时间内，我国非道路移动机械领域一方面加快步伐攻克国外设备的核心技术难题，另一方面以国内市场需求为导向加快产能提升，过去高耗能、环保标准低的非道路移动机械设备为我国的经济发展做出了不可忽视的贡献，而在“双碳”政策、绿色发展的战略下，伴随供给侧结构性改革和绿色发展的理念要求，“耗能大户”非道路移动机械如何降低碳排放量备受关注，节能减排的需求尤为迫切，以电动化为代表的新能源工程机械设备成为实现工程机械产业转型升级的必经之路。

为推进新能源非道路移动机械行业节油减碳进程，国家相关部门通过税收减免等宏观调控政策，鼓励企业生产制造高效、低碳、环保的非道路移动机械，引导配套企业采用高效、低碳、环保发动机。对高耗能、高排放产品采用政策性手段强制淘汰，加快高效低碳清洁产品的普及应用，推动我国非道路移动机械产业向绿色、低碳、智能化等方向发展，详见表 5-1。

表 5-1：推动我国非道路移动机械产业国家政策

时间	文件名称	内容
2017 年	工业和信息化部、国家发展改革委、科技部《汽车产业中长期发展规划》	加大汽车节能环保技术的研发和推广。推动先进燃油汽车、混合动力汽车和替代燃料汽车研发，突破整车轻量化、混合动力、高效内燃机、先进变速器等关键技术。
2018 年	生态环境部《非道路移动机械污染防治技术政策》	非道路移动机械产品应向低能耗、低污染的方向发展。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，逐步达到超低排放、零排放。
2020 年	工信部《推动公共领域车辆电动化行动计划》	推进工程机械电动化，加快工程机械行业向新能源转型。
2022 年	国家发展改革委、国家能源局《“十四五”现代能源体系规划》	对工程机械行业新能源发展明确了转型方向。“十四五”时期现代能源体系建设的主要目标之一是：能源低碳转型成效显著，提高非化石能源消费比重。

中国石油消费总量控制和政策研究项目（简称：油控研究项目）在 2019 年发布的《中国石油消费总量达峰与控制方案研究》报告中总结了交通、石化、非道路移动机械和其他领域的石油消费特点，并提出了五大控油途径，分别是减量、高效、替代、结构优化和清洁利用。参考该油控报告中的这五大控油途径，同时结合上述我国近些年针对非道路移动机械提出的政策，本报告针对非道路移动机械领域提出了三条节油减碳路径，分别为：高效发动机路径，电动化路径和替代燃料应用路径。

5.1 主要节油减碳路径探索

5.1.1 高效发动机路径

柴油发动机利用柴油燃料在高压下点火燃烧，并推动活塞运动，将化学能转化为机械能，从而驱动动力系统。和汽油发动机相比，柴油发动机的点火方式不同，它采用了高压点火的方式，保证较稠密的柴油能够更快速地点火，从而释放出更多的能量。此外，柴油发动机所需的燃料空气比例较低，使得其热效率更高，进一步提高了燃油利用率和动力输出。

为满足未来低碳化的应用需求,不断提高发动机效率始终是主旋律，燃烧优化是实现发动机高效化的关键技术手段。高效发动机路径主要通过提高非道路移动机械的发动机能效从而减少柴油消耗和碳排放。

研究发现，对于发动机耗油量，其动能的损失主要包括下列几个部分：用功、热传导损害、排气管损害及其燃烧损害等[45]。因而，为了全方位改进发动机的热效，需要在不影响动能输出的前提下，通过合理的变化方式完成整个整合工作，通过燃烧系统和模式优化、喷油规律优化、进气管理、新型减摩材

料使用、发动机热管理和余能回收等技术改造减少燃烧、传热、附件驱动、摩擦和排气损失，全方位减少其余部分能量占比。在各种方式方法的应用中，通过整体的提升，能够提高热效率。

通过以下方法可以通过改进柴油燃烧方式，有效降低发动机热损耗，提高可燃烧速率：一是通过提高全部压缩比例，以保证发动机的热值能够达到合理的运用。为了防止其压缩比例太高而发生暴震的情况，需要通过有关的循环，以保证在空气压缩比的情形下，完成更高发动机热效运用。

二是通过稀薄燃烧技术提升发动机的工作过程，降低一部分负载的泵气损失，提高热效。

三是通过冷却废气再循环减少一部分负载发生的泵气损失，除此之外也可以降低燃烧环境温度。在燃烧环节中，由于其燃烧速率减少，也会产生燃烧期快速增长的难题，导致燃烧不稳，不利于燃烧率提高。为了改善该类状况，需提高缸体湍流强度。根据进气系统改装设计方案或燃烧室设计，推动缸体气体流动性，扩大废气再循环占比，改进受热效率。

四是在进一步降低热损耗中，根据充量压燃的办法，能够对全部发动机加以控制。减少在燃烧时发生的换热损害，可以借助有关的活塞杆隔热板，减少热损耗，进行合理热传导。除此之外，可以利用该类技术性，改进发动机整个智能管理系统。比如，在发动机审核中，通过电子节温器进行冷冻液的自动提供，进行循环系统，并把发动机维持在科学合理的工作范围内。提高机械能。选用轻量化材料，以高效化配件，减少机械损失。

该路径的节油潜力主要取决于非道路移动机械用柴油机的能效，提高能效即可相应减少柴油消费。

5.1.2 电动化路径

电动化路径主要指使用纯电或混动的非道路移动机械替代传统柴油机械，从而达到大幅减少柴油消耗和碳排放。

随着全球气候变化和“双碳”目标的不断推进，传统燃油车的排放标准日趋严格，交通领域低碳化和电动化进程加快。除了道路交通，非道路移动机械同样具有高能耗、高排放的“双高”特点，其电动化也备受关注。在国家实现“双碳”目标、构建双循环新发展格局的背景下，环保意识的提高和政府政策的支持将进一步促使市场对绿色、低碳的机械产品的需求增加，也将进一步推动机械电动化的发展。因此，电动化转型已成为非道路移动机械行业发展的必然趋势。

5.1.2.1 纯电动化路径

纯电非道路移动机械具有能够大幅度降低噪音、热量排放，电动化发展的同时也促进了机械的智能化发展，纯电非道路移动机械可实现远程操控，从而降低使用成本、人力成本，以及安全事故隐患。此外，在高海拔地区且施工现场桥、隧道多的场景下，例如青藏线、川藏线的建设过程中，传统燃油非

道路移动机械使用效率低，且燃油机械产生的有害气体在隧道等近乎密闭空间无法有效疏散对人员健康造成威胁，而纯电非道路移动机械具有“零尾气排放”更环保、可随时换电的特点，在一些特殊作业情况下是传统非道路移动机械的良好替代。

从成本端看，相对于传统燃油机械，电动机械的经济性是通过使用过程体现的。由于电池价格较高，导致电动非道路移动机械造价偏贵，价格上相对传统柴油非道路移动机械不具备优势，但随着电池技术和电动驱动技术的成熟和普及，电动机械的制造成本会逐渐下降。最重要的是，电动机械在运营过程中的成本相对较低，如更低的燃料费用、更少的维护成本等，经济性在频繁使用中被不断放大，进一步提升了电动机械的竞争力。经测算，当前非道路移动机械在使用端成本较燃油工程机械有较大优势，节约的成本完全可以覆盖购置端成本，且购机五年后纯电工程机械的运营成本少于燃油工程机械。

电动工程机械在能源利用效率方面具有明显优势。相较于传统的燃油机械，电动机械具有更高的能量转换效率和能源利用率，同时能够通过回收制动能量等技术进一步提高能源利用效率。电动马达也确保了全转速区间的动力输出，在燃油车所不擅长的低转速作业中也能确保强有力的挖掘力。这将带来更低的运营成本和更好的经济回报。此外，高容量锂离子电池、超级电容器等能量存储技术的发展，使得电动机械在续航里程、充电效率和功率输出方面有了显著的进步。非道路移动机械作为生产资料，电动化相比燃油的全生命周期成本逐步具备吸引力和经济性，电动化成为非道路移动机械绿色发展的重要方向之一。

在维修保养方面，由于没有搭载发动机，所以不再需要清扫空气滤清器等过滤器，不再需要检查机油、补给燃料，费时费力的日常检查和保养作业将得到大幅度减轻。此外，由于纯电动化路径不涉及柴油发动机的使用，因此该路径的节油潜力为 100%。

5.1.2.2. 混合动力化路径

除了纯电动化路径以外，由于某些非道路移动机械由于使用工况不便于换电及电池功率不能满足做工需要等因素，不能 100%实现纯电动化，混合动力成为了另一种解决方案。

混动机械的优势之一是同时兼顾了传统内燃机优良的动力性和纯电动机械的低排放特性。混合动力技术是将多种动力源进行控制，将燃油化学能转化为机械能，然后再经过发电机转换为电能，根据工况需要，其中一部分电能流向蓄电池储能备用，另一部分流经电动机转化为输出转矩，使其达到最优的能源分配，来改善发动机的燃油经济性及排放性能。目前混合动力技术在汽车领域已经得到了广泛应用，给混合动力工程机械也带来了借鉴意义。此外，混合动力工程机械上用的发动机比内燃机工程机械发动机功率小，由于电机辅助，发动机可以更长时间工作在低油耗和低排放区域，从而降低燃

油消耗和降低碳排放。混动机械可以帮助降低燃料消耗超过 25%[32]。

现阶段，机械工程中所使用的混合动力技术通常包含：油电混合技术、油液混合技术、油电液混合技术等。混合动力技术在实际的应用过程中通常使用油电混合方案，在具体的工作环节中，利用电池、电容器等部件，对柴油机的功率和扭矩进行均衡调节，从而实现小功率柴油机驱动大容量机械的效果。该类机械选配小功率柴油发动机，机器的传动系统通过驱动电机提供动力，并通过机械的行车制动反向给机器锂电池充电，来实现机器行走系统的动力储能。

对于装载机，混动化优势在于能够节省能源，减少污染，提高装载机的效率，使用寿命比传统装载机长，以及维护成本更低。同时，随着科技的发展，混动装载机的性能也会得到提升，使其更加可靠，更有效率。对于拖拉机而言，200 马力及以上的重型高端电动拖拉机动力换向、动力换挡拖拉机改成油电混动，最大的好处是极大的简化结构，比如复杂而精密的变速器、液压传动装置等由机电传动和电脑控制系统替代。日前，柳工发布了新型混动拖拉机产品，该产品使用增程式混动发动机，不用额外充电，使用燃油为行走系统及输出系统供电，相较于传统燃油拖拉机具有减少油耗的优势。此外，混动拖拉机相比于传统燃油和纯电拖拉机具有延伸功能，可以为拖拉机自身后面的拖拽农机提供电源。

5.1.3 替代燃料应用路径

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础，能源尤其是石油资源的匮乏、全球环境的恶化已成为当今世界社会发展的两大难题。在我国富煤、贫油、少气的能源结构下，发展替代清洁燃料以部分取代传统石油基燃料即汽油和柴油，对于缓解我国石油资源匮乏和需求之间的矛盾、降低石油对外依存度、保障国家能源安全有重大意义。

替代燃料如氢、生物柴油、甲醇等都是燃油的低碳替代燃料。氢燃料电池的效率比锂离子电池更高，发电热效率可达 65%～85%，发电效率高于固体氧化物燃料电池。跟内燃机相比，氢燃料电池能量转换过程效率高，无噪声，排放物仅仅是水；跟纯电和混动机械相比，氢燃料电池能量密度高，更适用于大功率工程/农业机械。然而目前氢燃料电池制造成本较高，如果能把关键材料用量降下来，它将比锂电池成本低。除成本因素之外，目前推广氢燃料电池还有几项瓶颈问题，如氢燃料获取、储存和运输困难，氢燃料添加站点稀少等。

5.2 各节油减碳路径发展现状与面临挑战

5.2.1 高效发动机路径

相比公路运输机械发动机，非道路移动机械发动机功率大、启动快、负载变化大、作业周期长，因

此对于发动机效率有着较高的要求。然而，无论是汽油发动机还是柴油发动机，提升热效率难度都很大。目前，量产汽油机热效率一般在25%～35%左右，柴油机则高一些，在35%～45%左右[46]。自世界第一台柴油机诞生后的120多年里，热效率提升进程十分缓慢，直到如今才从25%提升到45%，并且未来的提升空间和潜力也比较有限。另外，发动机热效率的提升还需要巨大的研发资金投入。潍柴于2020年正式发布热效率达到50.26%配套于商业领域的重卡的柴油发动机，累计研发投入300亿元，占期间费用比例的48%。因此发动机热效率每个0.1%的提升都非常不易。

为了满足环保标准的要求，非道路移动机械发动机常常采用高压缩比设计、高效燃烧控制以及先进的排放控制技术。目前制造企业为客户提供定制服务，根据客户实际的机械应用场景及负载情况，按需匹配发动机动力和液压动力，使得燃料可以更好地充分燃烧，减少了燃油的浪费。但是，发动机的使用效率提升空间有限，提高热效率难度很大，短期内取得较大突破难度不小。

虽然发动机的热效率提升难度很大，提升潜力有限，但国内内燃机行业针对非道路用发动机未来的热效率提升依然提出了明确目标。2021年由中国内燃机工业协会发布的《内燃机产业高质量发展规划（2021-2035）》[47]中指出，要开发非道路专用发动机技术，发展非道路燃气和混合动力发动机及动力系统，全面提升非道路发动机品质。到2025年，自主开发的专用发动机推广应用，柴油机产品有效热效率提升达到45%以上，满足非道路第五阶段排放法规；到2030年，非道路（工程、农业）用柴油机有效热效率达到47%以上，有害排放满足更加严格排放法规的要求，达到国际先进水平；2035年，非道路（工程、农用）用柴油机有效热效率达50%以上，高效节能发动机及混合动力成为主流，柴油机有害排放控制、热效率和耐久性达到国际领先水平。

此外，非道路移动机械后市场管理相对缺位，中国工程械工业协会会长苏子孟指出，现有大量老旧工程机械没有退出机制，近千多万台二手工程机械中有两三百万台为国零、国一排放，存在安全隐患多、设备状态差、使用效率低、排放不达标等问题[48]。建立老旧工程机械退出机制是工程机械行业“十四五”发展规划提出的重点任务之一，亟需出台相关政策鼓励二手机资源的加快使用和综合利用、建立有效退出机制等方面加强和促进二手工程机械的管理和发展。

5.2.2 电动化路径

5.2.2.1 纯电动化路径

全工程机械行业都在朝着纯电动化迈进，因其使用成本低，是各企业的研发方向。目前，电池技术已经比较成熟，几乎可以完全使用动力电池驱动做工，使用场景广泛。尤其是在空气稀薄的地方，例如矿井下或高海拔地区，电动机械的需求远高于燃油机械。

但同时也面临很多挑战。一是技术限制。目前电动化主要依赖于高性能电池，虽然各非道路移动机械的生产商大力应用新技术，积极推动电池系统创新，但电池能量密度和容量等方面仍存在限制，并非所有类型和尺寸的移动设备都可以实现纯电动化，有时会出现电池电功率不足以满足机械操作，包括启动、加速和瞬态操作等。尤其是对于拖拉机，其在使用场景中做工时负荷不稳定，瞬时负荷变化大，对电池性能要求较高，当前电池技术不够成熟无法支撑如此高负荷的需求。另有统计数据显示，目前60%的拖拉机在农户手中，将现有传统燃油拖拉机更换为纯电动拖拉机导致农闲时期电池闲置，放置过程中会致使电动自放电导致电动耗损及电池亏电损坏，影响电池寿命，外加农村地区充换电基础设施不完善，电池充电时间长，纯电动拖拉机短期内还无法取代传统燃油拖拉机。此外，非道路移动机械作业条件相对比较差，工作环境恶劣，需要针对特有工况设计生产防震动、防燃油、防喷溅、防冲击的电池。且对于需要长时间作业的非道路移动机械，用户更关注其续航能力和使用时间，因此，需要不断研发创新，提高电池的续航时间和耐久性。另外，非道路移动机械对设备的整体性能和可靠性要求较高，电动化设备需要保持与传统内燃机设备相当的工作能力、承载能力和适应不同环境的能力，通常需要较大功率的电机，如挖掘机、装载机、拖拉机等。研发高功率、高效率的电机技术是一个挑战，需要解决散热、重量和可靠性等问题。

二是基础设施不完善。充换电基础设施建设问题是设备制造商面临的另一大挑战。对于钢厂、港口等电力供应基础较好的场景，充换电问题比较容易解决。但对于地产开发、市政建设、大型基建等场景，大多数工地在项目开始时都没有电力供应，无论是单独拉电缆还是建设充电站都会带来建设成本高的问题。且如果项目工期较短，单独拉电缆或建设充电站只是作为短期使用将会造成资源浪费及性价比不高的问题。如果采取换电模式，需要根据电池需求量及电池大小定制换电站，导致建设成本高；如果采取送电模式，若工地在偏远地区，新能源车远距离送电这一方式较难实现；而利用油车送电的方式，则也变相产生了大量油耗和碳排放。充电设施的建设和管理问题亟待解决。

三是成本压力。与传统内燃机设备相比，电动化设备的初始投资成本较高，包括电动机、电池、充电设施等的购买和安装费用。电池是电动化的核心部件，占电动（工程）机械总成本的40%～50%。机械所用电池需要生产企业单独定制、无法大规模生产，导致电池成本高，对整体成本构成一定压力，使用方购买电动机械经济压力大，后期换电池也是一笔不小的费用。电池成本高影响了新能源非道路移动机械的推进，不过随着电池技术的进步和市场规模的扩大，预计电池成本会逐渐降低。

5.2.2.2 混合动力化路径

相比于纯电动化，混合动力化优势主要在于：混动的动力大多采用电驱动无级变速，具有速比连续、结构简单、效率高、响应快、扭矩储备大的特点；对充电等基础设施要求低，适用范围广；动力要

求低，燃油成本减少；结构简单，制造成本和制造难度降低等优势。且混合动力配置可以提供显著的运营成本优势以及性能稳定性，混合动力技术更适合更大的重型设备应用。

然而，混动也存在着一些问题和挑战。一是成本高。因涉及混合动力、能量回收等部件，混动机械购买成本高，维修费用高导致使用成本高，且残值低，不利于二次售卖。二是无法控制实际节油减碳效果。无法控制用户使用电还是燃油，若一直使用燃油则对节油降碳并无意义；若一直使用电而非燃油，则会导致油箱压力增加从而产生排气，造成空气污染。

5.2.3 替代燃料应用路径

未来替代燃料非道路移动机械发展趋势主要取决于获取便利性及成本。目前国外已有氢燃料拖拉机实际应用的案例，农户在自家农场使用农作物秸秆制氢，既解决了氢燃料来源问题又降低了原材料成本，实现完整农业循环。然而，当前国内研究、生产和销售替代燃料非道路机械的企业较少，实际应用也较少，主要有三点原因：

一是资源获取难。目前，我国生物柴油行业的财政支持政策较少，生物柴油仍处于试点阶段，价格高导致国内生物柴油市场的消费量较少。而在出口市场方面，近年来我国生物柴油的出口量快速增长，导致国内生物柴油量较少。而甲醇汽油使用地域性强，除山西、贵州、宁夏等煤资源丰富地区较容易获取廉价的甲醇外，其余地区较难将甲醇作为燃料。另外，考虑到煤炭资源、水资源以及燃烧高比例甲醇汽油对汽车动力系统改造的成本，以及对人健康的影响，未来大规模推广可能性较小。制氢过程本身需要消耗大量能量，而且储运难度很大，因此距离大规模商业化应用也困难重重。

二是使用成本高。生物柴油原料成本和生产成本较高，销售企业对生物柴油推广应用存在顾虑，无法有效推广。当前，氢燃料电池尚处于商业化早期，燃料电池+储氢罐+快充型电池的总成本是纯电动汽车动力电池的 2～3 倍。氢燃料原材料、运输、建立加氢站等成本高，且目前没有地方财政支持造成目前商业化运行困难，需要看未来氢燃料的成本下降趋势。

三是企业接受度差。使用生物燃料会影响设备的实际使用功率，导致能效比低。更换油品成本高，且替代燃料路径技术上还不够成熟，导致客户接受差。

6 非道路移动机械的节油减碳路径选择

6.1 各机械类型节油减碳路径选择和时间表

由于情景分析的特点，基准情景和政策强化情景在不同阶段的节油量和减碳量有差别。为了推动我国非道路领域的能效提升和绿色低碳转型，促进相关企业的国际竞争力和该领域的高质量发展，经过

与业内资深专家们的多次讨论，基于情景分析的结果，本报告最终以政策强化情景下更加激进的机械能效提升潜力、电动化率及替代燃料应用率预测数据为基础[49]，采用定量和定性结合的分析方法，预测未来各路径的节油减碳潜力，以期通过政策的出台倒逼非道路领域的绿色低碳发展。

本报告认为政策强化情景下的工程机械和农业机械的电动化率增长速度会比基准情景下更快，也会以更快的速度降低对柴油的需求；而替代燃料应用率的预测虽然依旧保守，但比基准情景下的应用率偏高。根据表 4-1 挖掘机、装载机、拖拉机保有量预测、图 2-5 2021 年大、中、小型挖掘机保有量及占比、图 2-8 装载机主要机型销量占比、图 2-13 2020 年大、中、小型拖拉机保有量及占比表 4-8 政策强化情景下各节油减碳路径机械的保有量占比预测及各路径节油潜力，计算出 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年及 2060 年高效发动机路径、电动化路径及替代燃料路径的节油潜力，节油潜力最大的路径即为对应的最优节油减碳路径。不同路径的节油潜力参考欧洲建筑设备委员会（CECE）的统计数据[32]，电动化路径中混动化的节油潜力为 25%，替代燃料应用路径的节油潜力为 33.5%[4444]。计算公式见附录 3。

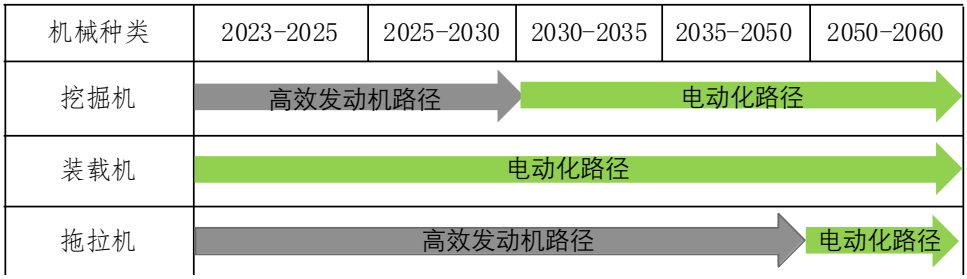


图 6-1：2025-2060 年挖掘机、装载机、拖拉机的最优节油减碳路径

如图 6-1 所示，在三种非道路移动机械类型中，本报告预测装载机在这三种机械类型中最先实现电动化替代，主要原因有三点：第一，根据生态环境部公布的数据，装载机的 HC、NO_x 以及 PM 共 3 项核心排放指标位于工程机械中第一或第二的位置，因此装载机受到环保压力最大，政策动力迫切。第二，使用场景集中，主要为矿场、钢厂及港口等高能耗场景，减排压力大，企业客户多，更易电动化改造，且多为短途封闭使用，电动化更方便。第三，装载机单品品类的潜力大，市场规模约为 850 到 1,100 亿元，市场需求的驱动力大，有望成为最先规模化替换的品类。

图 6-1 中挖掘机和装载机的电动化路径指纯电动化，而与挖掘机和装载机不同，拖拉机的电动化路径中既包含了纯电动化也包含了混动化，本报告并未明确指出 2050 年后具体采用哪一种电动化路径。主要原因之一是拖拉机面向的客户群体是农户，对拖拉机的购置成本更为敏感，因此未来哪一种电动拖拉机的发展规模较难评估。若“三电”系统的价格一直居高不下，则农户对电动拖拉机的购置欲望会

非常低，尤其是纯电拖拉机；但若随着技术的成熟和成本的降低，将对纯电拖拉机是绝对的利好。另一个原因是不同吨位的拖拉机未来的电动化发展路径可能存在差异。大型拖拉机的使用工况比中小拖拉机更为恶劣，对电池容量和续航能力要求更为严格，因此本报告预测混合动力将是大拖的主要发展方向，纯电可能会是中小拖的主要发展方向。总体来看，短期内拖拉机仍以传统燃油发动机为主，未来5～10 年在拖拉机领域电动化加大研究和配套应用，未来 10～20 年混动/纯电动拖拉机的发展规模才会有较大提高。

综上，短期内对于挖掘机和拖拉机，电动化机械和其他新能源机械发展仍面临技术限制、高成本等挑战，且技术尚在研发阶段，不能满足实际应用需要；对于装载机，纯电动机械突破市场示范起步“瓶颈”，进入快速普及发展阶段，成为最先规模化电动化替换的品类，因此挖掘机和拖拉机的最优节油减碳路径仍为高效发动机路径，装载机的最优节油减碳路径为电动化路径（纯电为主）。中期来看，纯电动化迅速在挖掘机行业普及，在拖拉机行业开始形成初步的规模效应，但传统燃油机械仍为主流。长期来看，电动化（包括纯电动和混动）也可较成熟地应用在拖拉机上，成为拖拉机节油减碳的最佳路径。由于替代燃料应用率小，各类机械在替代燃料应用路径下的保有量占比也远小于高效路径和电动化路径，导致计算后该路径的节油减碳量很小，因此各阶段的最佳节油减碳路径中均不考虑该条路径，该路径也没能体现在图 6-1 和图 6-2 中。

6.2 各机械类型在典型应用场景下节油减碳路径优先级及节油潜力

挖掘机主要应用场景为矿山开采、大型基建、市政建设、地产开发及园林水利，其中矿山开采、大型基建场景中主要应用大型挖掘机，市政建设、地产开发及园林水利场景中主要应用小中型挖掘机。装载机主要应用场景为矿山开采、大型基建、地产开发及水利建设，其中矿山开采、大型基建场景中主要应用大型装载机，地产开发及水利建设场景中主要应用小中型装载机。拖拉机主要应用在耕地、种地、把地、收获、打药、除草六个场景，大中小型拖拉机都可以在以上场景工作，区别在于耕地面积大小，因此大、中、小型拖拉机无明显典型使用场景，但在耕地场景下对拖拉机功率要求较高。

6.2.1 最佳节油减碳路径选择依据

对于同一机械类型的不同应用场景，占比和最佳节油减碳路径的选择也不同。本报告依据机械吨位、使用场所是否固定、充电难易度共三个维度来选择最佳节油减碳路径。

对于挖掘机，大型挖掘机主要应用场景为矿山开采和大型基建，在纯电动化进程中对于电池能量密度、耐久性、续航能力和电机功率要求较高，因此纯电动化进程相较于中型和小型挖掘机稍慢。对于挖掘机和装载机，地产开发、矿山开采等场景为固定场所，不太涉及长途运输，且开采工作一般不会短

时间内结束，拉电缆、建设充电站是可持续应用的，因此纯电动化机械替代的实现难度相对低。市政建设、园林水利场景为非固定场所，涉及长途运输，但多在市区，也方便充电换电，纯电动化机械替代难度也相对低。对于拖拉机，其在使用场景中做工时负荷不稳定，尤其是对于大型拖拉机，瞬时负荷变化大，对电池性能要求较高，短期内纯电动化电池技术不够成熟无法支撑如此高负荷的需求。考虑到混动拖拉机具有可以为后面的拖拽农机提供电源的延伸功能，因此中长期来看，混动化为大型拖拉机的最佳节油减碳路径、纯电动化为中小型拖拉机的最佳节油减碳路径的可能性较高。挖掘机、装载机和拖拉机在其各自典型应用场景下，不同节油减碳路径下的保有量占比预测见表 6-1。

表 6-1：各类机械在其典型应用场景下不同节油减碳路径下的保有量占比预测

挖掘机-矿山开采场景						
各节油路径保有量占比		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		99%	98.5%	97%	91%	83%
电动化路径	纯电	1%	1.5%	3%	8%	15%
	混动	≈0	≈0	0.15%	0.75%	1.25%
替代燃料应用路径		≈0	≈0	≈0	0.15%	0.6%
挖掘机-市政建设场景						
各节油路径保有量占比		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		99%	96%	92%	84%	73%
电动化路径	纯电	1%	4%	8%	15%	25%
	混动	≈0	≈0	0.15%	0.75%	1.25%
替代燃料应用路径		≈0	≈0	≈0	0.15%	0.6%
装载机-地产开发场景						
各节油路径保有量占比		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		97%	92%	86.9%	74.3%	63%
电动化路径	纯电	3%	8%	13%	25%	35%
	混动	≈0	≈0	0.12%	0.6%	1.2%
替代燃料应用路径		≈0	≈0	≈0	0.12%	0.6%
拖拉机-种地场景						
各节油路径保有量占比		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		100%	99%	97.7%	95.7%	94%
电动化路径	纯电	≈0	0.5%	0.8%	1.5%	2%
	混动	≈0	1%	1.5%	2.8%	4%
替代燃料应用路径		≈0	≈0	≈0	0.02%	0.05%

典型应用场景下各机械节油减碳潜力计算方式同本报告 4.4 及 4.5 章节。得出不同时间阶段挖掘机、装载机、拖拉机在各典型应用场景下最优节油减碳路径，见图 6-2。其中，挖掘机和装载机的电动化路径主要指纯电动化路径，拖拉机的电动化路径包含纯电动化和混动化。

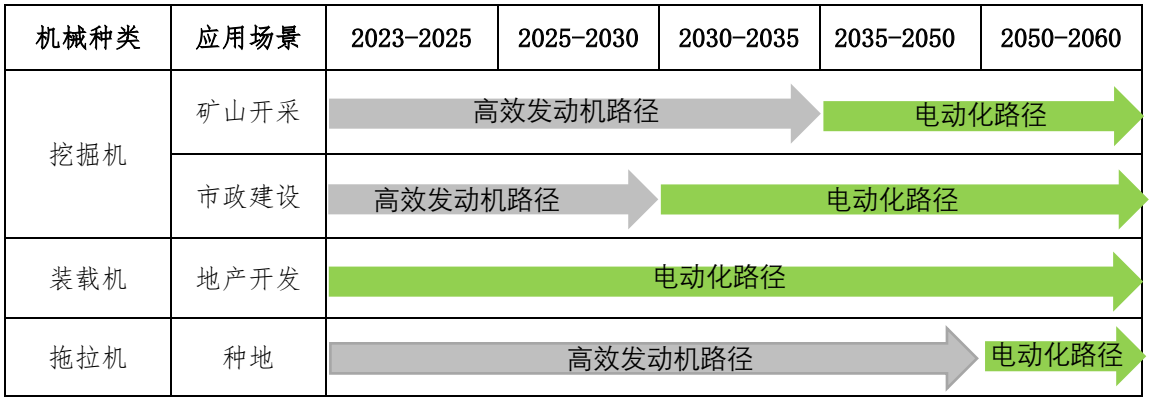


图 6-2：2025-2060 年挖掘机、装载机、拖拉机在典型应用场景下最优节油减碳路径

6.2.2 典型应用场景下非道路移动机械的节油减碳潜力计算

本报告选取矿山开采（大型）及市政建设（中型）场景下挖掘机、地产开发场景下装载机及种地场景下拖拉机为各机械的典型应用场景。根据各类机械保有量预测数值、各类机械在其典型应用场景下保有量占比、图 6-1 典型应用场景下各节油减碳路径机械的保有量占比预测可计算出挖掘机、装载机、拖拉机在其典型应用场景下节油量及碳减排量，见表 6-2。

表 6-2：典型应用场景下各节油减碳路径节油减碳潜力

挖掘机-矿山开采场景						
节油量（万吨）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		5.08	5.44	5.76	6.78	7.18
电动化路径	纯电	3.32	4.98	9.95	26.54	49.76
	混动	0	0	0.12	0.62	1.04
替代燃料应用路径		0	0	0	0.17	0.67
合计		8.39	10.42	15.84	34.10	58.64
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		15.96	17.11	18.12	21.31	22.57
电动化路径	纯电	10.43	15.65	31.30	83.47	156.50
	混动	0	0	0.39	1.96	3.26
替代燃料应用路径		0	0	0	0.52	2.10
合计		26.40	32.76	49.81	107.26	184.43
挖掘机-市政建设场景						
节油量（万吨）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		4.43	4.63	4.77	5.46	5.51
电动化路径	纯电	2.90	11.59	23.17	43.45	72.41

	混动	0	0	0.11	0.54	0.91
替代燃料应用路径		0	0	0	0.15	0.58
合计		7.33	16.21	28.05	49.60	79.41
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		13.94	14.56	15.01	17.18	17.34
电动化路径	纯电	9.11	36.44	72.88	136.64	227.74
	混动	0	0	0.34	1.71	2.85
替代燃料应用路径		0	0	0	0.46	1.83
合计		23.05	51.00	88.22	155.98	249.75
装载机-地产开发场景						
节油量（万吨）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		1.23	1.04	0.85	0.21	/
电动化路径	纯电	2.46	5.45	7.05	3.15	/
	混动	0	0	0.02	0.04	/
替代燃料应用		0	0	0	0.01	/
合计		3.69	6.49	7.92	3.40	/
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		3.87	3.28	2.66	0.66	/
电动化路径	纯电	7.74	17.14	22.18	9.91	/
	混动	0	0	0.05	0.12	/
替代燃料应用路径		0	0	0	0.02	/
合计		11.61	20.43	24.89	10.70	/
拖拉机-种地场景						
节油量（万吨）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		5.18	5.21	5.27	5.67	5.28
电动化路径	纯电	0	1.59	2.41	3.96	4.32
	混动	0	0.79	1.13	1.85	2.16
替代燃料应用路径		0	0	0	0.02	0.04
合计		5.18	7.60	8.81	11.50	11.79
碳减排量（万吨 CO_2）		**2025E**	**2030E**	**2035E**	**2050E**	**2060E**
高效路径		16.28	16.39	16.58	17.83	16.60
电动化路径	纯电	0	5.00	7.57	12.46	13.58
	混动	0	2.50	3.55	5.82	6.79
替代燃料应用路径		0	0	0	0.06	0.11
合计		16.28	23.89	27.70	36.16	37.08

7 主要结论

通过研究本报告认为：在短期内，提高非道路用柴油机能效是非道路移动机械最主要的节油减碳路径；长期来看，电动化路径会成为最佳节油减碳路径；而替代燃料应用路径未来能够得到积极发展或依然处于技术储备阶段，主要在于国家战略方向和技术进展，本报告对替代燃料应用率的预测只做

保守预测。

本报告针对梳理和分析非道路移动机械领域的行业发展现状、面临的问题和挑战等，提出针对该领域的三条节油减碳路径，并计算不同路径的节约柴油量和二氧化碳减排量，旨在希望通过本研究能引起国家对该领域的重视，使得政策有倾斜，促进电气化发展，推动我国难节油难减排领域的低碳化发展。本研究认为非道路移动机械领域非常重要并需要引起重视的原因主要有以下四点：

第一，非道路移动机械领域是我国除了道路交通和石化化工领域的高耗油领域之一，影响我国能源安全。我国的能源储量具有富煤、贫油、少气的特点，作为世界上最大的石油进口国，石油对外依存度高达 71.2%，远超国际上 50%的安全警戒线。为了减少由于石油大量消费带来的能源安全问题，我国在道路交通和石化化工领域制定了明确的政策目标和路径：道路交通领域加速电气化发展，新能源汽车渗透率截至 2022 年已达到 25.6%；石化化工领域推动高质量发展。不过针对非道路移动机械领域，我国还没有出台明确的政策目标。本报告估算，工程机械和农业机械中的挖掘机、装载机和拖拉机这三种机械的总油耗约为 4882 万吨。随着未来城市基建、矿业等产业的不断发展，对于施工用机械的需求也会增多，若不加大对传统柴油机械的替代，由此造成的油耗也会更多。不仅对我国能源安全产生不利影响，也将会成为“双碳”目标实现的掣肘。

第二，非道路移动机械领域是最难减排的领域之一，且碳排放较高，影响我国“双碳”目标实现。目前，我国对污染物排放的重视度较高，据生态环境部统计，2022 年非道路移动源污染物排放总量为 556.8 万吨，约占我国移动排放源总量的 1/4。而关于碳排放本报告估算，仅挖掘机、装载机和拖拉机在使用/作业时的二氧化碳排放总量便已达到 1.54 亿吨，约占我国二氧化碳排放总量的 1.4%。而且我国目前新能源工程机械的渗透率不足 1%，农业机械更低，未来的减碳潜力很大。道路交通电气化的迅猛发展和石化化工领域的高质量发展势必带来碳排放大幅降低，若现在不做努力，非道路移动机械领域未来的油耗和碳排放占比会更加凸显。因此，加强对非道路移动机械领域的碳排放管理和控制迫在眉睫。

第三，非道路移动机械应用领域非常广泛，是我国经济建设发展中的重要工具，但一直以来受到的关注度较低，导致该领域体制机制欠缺，标准体系化不能很好推进。如充换电方面没有行业统一标准。电池外形尺寸、接口标准、通信协议的不统一不仅会造成充换电模式无法互通，导致重复建设，大量浪费能源资源的问题，也会影响充电设施运营维护的效率和质量，甚至阻碍非道路移动机械电动化的快速发展。因此在目前非道路移动机械领域电动化发展的初期，尽快并提前制定好行业统一标准尤为重要。此外，二手机械的退出机制尚缺，淘汰工作开展不顺，也阻碍着新能源机械在市场的推广应用。统一的标准出台和健全的体制机制建设尤为重要。

第四，本报告中提出的三条路径（高效发动机、电动化和替代燃料应用路径）对推动非道路移动机械领域的节油减碳有较显著的效果。经本报告估算，在政策强化情景下，到2030年挖掘机、装载机和拖拉机的纯电动化率将分别达到4%、8%和2%，这三种机械的节油总量将超过232万吨，碳减排总量超过730万吨；到2060年，挖掘机、装载机和拖拉机的纯电动化率将分别达到25%、35%和15%，这三种机械的节油总量和碳减排总量能够分别提高至约846万吨和2660万吨。因此，若国家更加重视非道路移动机械行业的绿色低碳化发展，出台一系列更加激进的激励政策，则未来行业新能源化发展前景将更加乐观，节油减碳效果更加显著，有助于缓解我国石油资源匮乏和高需求之间的矛盾和尽早实现“双碳”目标。

基于非道路移动机械领域节油减碳的重要性和目前面临的问题，本报告在第八章中提出了7条政策建议，以期加速我国非道路移动机械可持续和低碳化发展。

8 政策建议

8.1 加强对非道路移动机械污染物排放及油耗监管

为了降低非道路移动机械污染排放及油耗，国家相关部门可对非道路移动机械的生产商和燃料供应商进行许可证管理，并对机械加装实时油耗及电耗监控系统，制订非道路机械排放跟踪调查和保养计划，后续根据实际工况在现有非道路移动机械国四标准的基础上，制定并出台对污染物设定更高要求、新增油耗及碳排放标准的国五标准，并建立相应的认证认可机制，健全整个行业的碳排放监测、报告、核查管理体系，对各典型应用场景的机械实施碳排放指标考核，以此倒逼非道路移动机械低碳转型。

城市低排放区已成为世界许多国家和地区用于解决交通空气污染问题的重要措施。为促进区域空气质量改善，针对非道路移动机械可专门设定污染物排放限值的燃料限制区，当地环保部门及行业协会积极推进排放控制区的划定、管控、评估工作，推动各地依法划定禁止使用高排放非道路移动机械区域。

8.2 加快企业技术革新

为缓解环保压力，非道路移动机械用柴油机的更新换代在所难免，一些规模小、技术力量薄弱、污染物排放多的企业将会逐渐被淘汰，加快企业技术革新也对保障我国能源安全也具有重要意义。

国家对新能源非道路移动机械生产企业给予政策支持，逐步推广电动、氢燃料、混合动力等种类的

非道路移动机械，面对数字化、智能化和绿色低碳的转型挑战，作为非道路移动机械的生产商、燃料供应商等相关企业需要更完善高效的整体解决方案以寻求持续发展的破局之道。要响应国家节能减排的号召，大力应用新技术、新工艺、新材料，提高自主开发能力和创新能力，加大国产发动机和关键零部件研发力度，加强正向设计，继续电控系统、传动系统、高端电池等核心零部件的技术攻关，增加电池安全性、防爆性、可靠性、耐久性，同时降低电池成本，规范促进新能源非道路移动机械发展。

8.3 加强政策激励和引导，利用经济手段促进行业低碳化发展

我国工程机械行业电动化的快速发展主要是整个行业充分市场化竞争的结果，而农业机械电动化起步晚发展慢，国家尚未出台明确推动农机电动化的相关政策，购机补贴中也没有专门提出针对电动农机的补贴条款。对于新能源工程机械和农业机械的购买者，由于各地环保政策不同，压力不同，导致对新能源产品需求的迫切程度不同，因此建议因地制宜出台适应当地的激励政策和绿色低碳目标及路径。

目前全国范围内针对农机已实施报废更新补贴政策，如：拖拉机的报废补贴标准根据马力段的不同从 1,000 元到 12,000 元不等[50]。当地政府可对提前淘汰的高排放的老旧机械在原有补贴的基础上进行每台补贴升级，推进老旧机械的更新淘汰和深度治理。同时，对二手非道路移动机械进行收购，回收旧车的费用直接抵扣新车购置费。

此外，实施绿色政府采购制度，在政府采购时对于使用新能源动力的非道路移动机械的单位给予适当加分。

增加碳排放权交易配额，购买新机一次性给予碳排放交易补贴，限定用户购买电动产品使用年限，每年抵扣碳排放量，成功减排可以出售多余的配额，超额排放则要在碳市场上购买配额。

8.4 建立二手非道路移动机械的退出和报废机制

非道路移动机械尾气排放是大气污染的重要来源，其排放量在移动源中占比较大，狠抓移动源污染治理，积极开展源头防治，加快推进国二及以下排放标准非道路移动机械报废更新，持续开展高排放老旧非道路移动机械更新迭代工作，增加机械淘汰退出等级制度，促进新旧动能转换，为高端、电动化机械腾出市场是深入打好蓝天保卫战的重要举措。

为做好二手非道路移动机械报废淘汰工作，各地环保部门要建立二手非道路移动机械退出机制，全面落实专职人员责任。首先要强化宣传，采用集中解读、发放宣传资料，制作横幅、发放告知书到户等方式，把政策宣传贯彻到位，做到“不漏一户，不少一人”。其次，要建立二手机提前淘汰补贴政策，

按照机型大小及提前报废年份设定不同等级的补贴金额。以使用年限为 12 年的大中型拖拉机为例，提前 5 年报废的，每台补助 2.0 万元；提前 4 年报废淘汰的，每台补助 1.6 万元，即按照上年标准的 80%补助，以此类推，补贴资金一次性发放。此外，要切实强化与综合执法、交通等相关部门的联动，共同开展专项整治行动，加强路检路查，增加执法频次。

8.5 促进非道路移动机械标准化进程

标准是经济活动和社会发展的技术支撑，是国家基础性制度的重要方面。标准化在推进国家治理体系和治理能力现代化中发挥着基础性、引领性作用。新时代推动高质量发展、全面建设社会主义现代化国家，迫切需要进一步加强标准化工作。

我国对非道路移动机械的油耗情况的关注度较低，行业内暂无统一的产品质量等相关标准，因此建议中国工程机械工业协会、中国农业机械工业协会及相关行业协会联合头部企业对非道路移动机械充电口、电池、防水性能、防碰撞性能等相关关键零部件及性能制定规范统一的检测方法和测试设备，制定切实可行、行业统一的路径和标准供工程机械和农业机械行业的相关企业参考和落实，确保产品一致性从而保障产品品质。

8.6 组建跨部委工作组并搭建行业信息共享平台

在这个数字化、网络化的时代，推动行业信息共享已经成为了促进各行各业发展的关键。首先，通过信息共享，行业内企业可以了解市场环境的动态变化，获取最新的市场需求信息从而调整自己的产品策略和经营模式，提高竞争力。其次，信息共享可以加快行业内各企业之间的沟通和协作，减少信息不对称造成的资源浪费和冲突，有效推动行业发展。最后，信息共享还可以促进创新和协同创业，为行业内企业提供更多的合作机会和创业平台，推动行业整体实力的提升。

为了实现行业合作的最大化效益，建立一个信息交流平台势在必行。第一，政府可以本着“标准先行，数据共享”的理念，建立共享平台进行财政支持、技术目录等最新政策和有限定范围的行业信息共享，推动行业信息共享的进程。通过设立行业信息中心，整合和发布最新的行业信息，提供数据分析和研究报告，为企业提供决策支持。政府还可以建立行业专家库，为企业提供咨询和指导服务。第二，行业协会作为第三方可以发挥自身组织优势，牵头举办行业论坛、会议等活动搭建交流平台，提供信息分享和交流的机会。通过建立行业协会的专属网站或论坛，提供在线交流和资源共享的平台，方便各企业之间的互动和合作。

8.7 推动农业机械电动化和农村可再生能源协同发展新模式

随着我国乡村振兴战略的推进，绿色发展已成为现代化农业发展的主旋律。作为农业生产的主要工具，我国农业机械基本处于传统内燃机驱动的发展现状，电动农机整体起步晚，距离大规模应用还有一定距离。将农机电动化与农村分布式光伏产业结合的新型发展模式，不仅契合了我国绿色低碳发展趋势，也能够帮助农业实现可持续发展目标。

建议我国尽快推电动农机和农村光伏协同发展的主要原因有两点。第一，我国农机和光伏发电补贴制度较好，有利于未来电动农机的推广。《农业农村部办公厅、财政部办公厅关于印发〈2021—2023年农机购置补贴实施指导意见〉的通知》和《农业机械报废更新补贴实施指导意见》中明确规定了对各类农机的补贴标准，而且我国对光伏发电一直有政策倾斜和财政补贴，可以很大程度上减小农民的经济负担。若未来国家专门针对电动农机给予补贴，则对电动农机的推广和农民对于电动农机的接受度提高会是绝对利好。

第二，我国农村具备电动农机充电配套保障条件。相较城市而言，农村地区地域广袤，人口密度低，具备良好的农机停放和充电空间。另外，随着国家近些年大力布局农村光伏建设，农村地区电力基础设施已逐步完善，可为电动农机提供动力来源。目前，对比道路交通车辆、工程机械和工业用车，农机的电动化发展相对落后。考虑到未来农机电动化也会成为趋势，鼓励农村使用现有分布式光伏发电为电动农机充电，一是能够促进农机生产企业积极研发和生产电动农机；二是能够加速农民积极响应国家号召安装光伏板，从而助力可再生能源发展；三是能够促进可再生能源的就地消纳。因此，我国亟需提前布局电动农机和农村光伏的协同发展路径。

附录 1 基准情景下当年机械节油及减碳量计算

基准情景下当年机械节油量（万吨）=机械高效路径节油量（万吨）+机械电动化路径节油量（万吨）+机械替代燃料应用路径节油量（万吨），其中：

机械高效路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年高效路径保有量占比×机械当年能效提升潜力×柴油密度（0.85kg/L），其中机械当年能效提升潜力=0.6%×$(1+0.6\%)^{n-2023}$，n 为预测年份。本报告中能效提升潜力等同于油耗降低潜力。

机械电动化路径节油量（万吨）=机械纯电动化路径节油量（万吨）+机械混动化路径节油量（万吨），其中机械纯电动化路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年纯电动化路径保有量占比；机械混动化路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年混动化路径保有量占比×混动化路径节油潜力（25%）。

机械替代燃料应用路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年替代燃料应用路径保有量占比×替代燃料应用路径节油潜力（33.5%）。

基准情景下当年机械减碳量（万吨 CO_2）=机械高效路径减碳量（万吨 CO_2）+机械电动化路径减碳量（万吨 CO_2）+机械替代燃料应用路径减碳量（万吨 CO_2），其中：

各路径减碳量（万吨 CO_2）=各路径节油量（万吨）×低位发热量（43.33GJ/吨）×单位热值含碳量（0.02020tC/GJ）×碳氧化率（98%）×CO_2/C 折算因子（44/12）[23]

附录 2 政策强化情景下当年机械节油及减碳量计算

政策强化情景下当年机械节油量（万吨）=机械高效路径节油量（万吨）+机械电动化路径节油量（万吨）+机械替代燃料应用路径节油量（万吨），其中：

机械高效路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年高效路径保有量占比×机械当年能效提升潜力×柴油密度（0.85kg/L），其中机械当年能效提升潜力=1.5%×$（1+1.5\%）^{n-2023}$，n 为预测年份，本报告中能效提升潜力等同于油耗降低潜力。

机械电动化路径节油量（万吨）=机械纯电动化路径节油量（万吨）+机械混动化路径节油量（万吨），其中机械纯电动化路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年纯电动化路径保有量占比；机械混动化路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年混动化路径保有量占比×混动化路径节油潜力（25%）。

机械替代燃料应用路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年替代燃料应用路径保有量占比×替代燃料应用路径节油潜力（33.5%）。

政策强化情景下当年机械减碳量（万吨 CO_2）=机械高效路径减碳量（万吨 CO_2）+机械电动化路径减碳量（万吨 CO_2）+机械替代燃料应用路径减碳量（万吨 CO_2），其中：

各路径减碳量（万吨 CO_2）=各路径节油量（万吨）×低位发热量（43.33GJ/吨）×单位热值含碳量（0.02020tC/GJ）×碳氧化率（98%）×CO_2/C 折算因子（44/12）[23]

附录 3 机械各节油减碳路径节油量计算

机械高效路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年高效路径保有量占比×机械当年能效提升潜力×柴油密度（0.85kg/L），其中机械当年能效提升潜力=1.5%×$（1+1.5\%）^{n-2023}$，n 为预测年份，本报告中能效提升潜力等同于油耗降低潜力。

机械纯电动化路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年纯电动化路径保有量占比。

机械混动化路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年混动化路径保有量占比×混动化路径节油潜力（25%）。

机械电动化路径节油量（万吨）=机械纯电动化路径节油量（万吨）+机械混动化路径节油量（万吨）

机械替代燃料应用路径节油量（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年替代燃料应用路径保有量占比×替代燃料应用路径节油潜力（33.5%）。

附录 4 基准情景和政策强化情景下三种机械各节油减碳路径总油耗及碳排放总量计算

基准情景下当年机械油耗（万吨）=机械高效路径油耗（万吨）+机械电动化路径油耗（万吨）+机械替代燃料应用路径油耗（万吨），其中：

机械高效路径油耗（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年高效路径保有量占比×（1-机械当年能效提升潜力）×柴油密度（0.85kg/L），其中机械当年能效提升潜力=0.6%×$（1+0.6\%）^{n-2023}$，n 为预测年份，本报告中能效提升潜力等同于油耗降低潜力。

机械电动化路径油耗（万吨）=机械纯电动化路径油耗（万吨）+机械混动化路径油耗（万吨），其中机械纯电动化路径油耗（万吨）=0；机械混动化路径油耗（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数(h)×油耗(L/h)×该类机械当年混动化路径保有量占比×(1-混动化路径节油潜力(25%))。

机械替代燃料应用路径油耗(万吨)=该类机械当年保有量(万台)×年工作小时数(h)×油耗(L/h)×该类机械当年替代燃料应用路径保有量占比×（1-替代燃料应用路径节油潜力（33.5%））。

基准情景下当年机械碳排放总量（万吨 CO_2）=机械高效路径碳排放量（万吨 CO_2）+机械电动化路径碳排放量（万吨 CO_2）+机械替代燃料应用路径碳排放量（万吨 CO_2），其中：

各路径碳排放量（万吨 CO_2）=各路径节油量（万吨）×低位发热量（43.33GJ/吨）×单位热值含碳量（0.02020tC/GJ）×碳氧化率（98%）×CO_2/C 折算因子（44/12）[23]

政策强化情景下当年机械油耗（万吨）=机械高效路径油耗（万吨）+机械电动化路径油耗（万吨）+机械替代燃料应用路径油耗（万吨），其中：

机械高效路径油耗（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数（h）×油耗（L/h）×该类机械当年高效路径保有量占比×（1-机械当年能效提升潜力）×柴油密度（0.85kg/L），其中机械当年能效提升潜力=1.5%×$（1+1.5\%）^{n-2023}$，n 为预测年份，本报告中能效提升潜力等同于油耗降低潜力。

机械电动化路径油耗（万吨）=机械纯电动化路径油耗（万吨）+机械混动化路径油耗（万吨），其中机械纯电动化路径油耗（万吨）=0；机械混动化路径油耗（万吨）=该类机械当年保有量（万台）×年工作小时数(h)×油耗(L/h)×该类机械当年混动化路径保有量占比×(1-混动化路径节油潜力(25%))。

机械替代燃料应用路径油耗(万吨)=该类机械当年保有量(万台)×年工作小时数(h)×油耗(L/h)×该类机械当年替代燃料应用路径保有量占比×（1-替代燃料应用路径节油潜力（33.5%））。

基准情景下当年机械碳排放总量（万吨 CO_2）=机械高效路径碳排放量（万吨 CO_2）+机械电动化路

径碳排放量（万吨 CO_2）+机械替代燃料应用路径碳排放量（万吨 CO_2），其中：

各路径碳排放量（万吨 CO_2）=各路径节油量（万吨）×低位发热量（43.33GJ/吨）×单位热值含碳量（0.02020tC/GJ）×碳氧化率（98%）×CO_2/C 折算因子（44/12）[23]

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.

尾注

[1] 中国统计摘要 2023. 国家统计局

[2] Bp 世界能源统计年鉴. (2022).

[3] 数据概览：2022 年能源相关数据. 国家发改委. (2023-01-31). https://www.ndrc.gov.cn/fgsj/tjsj/jjsjgl1/202301/t20230131_1348086.html.

[4] 2022 年 12 月全国进口重点商品量值表（美元值）. 中国海关总署. (2023-01-13). http://www.customs.gov.cn//customs/302249/zfxxgk/2799825/302274/302275/4794311/index.html.

[5] 联合国. 国际能源署：得益于清洁能源增长，2022 年全球二氧化碳排放量低于预期. (2023-03-02). https://news.un.org/zh/story/2023/03/1115747.

[6] CO2 Emissions in 2022. IEA. (2023-03). https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022.

[7] 针对 1 吨标准煤完全燃烧产生的“CO_2”的“C”排放系数（单位：吨碳/吨标煤（tc/tce）），国家发改委能源所推荐值为 0.67，根据此计算可得：1 吨标准煤的 CO_2 排放量为 2.46 吨。

[8] 《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）、《大气污染防治法》第十三条第三款）。

[9] 《中国移动源环境管理年报(2023 年)》，生态环境部，2023 年 12 月.

[10] 刘鹏,汤静妍,胡明伟,等.中国与欧美非道路移动机械排放标准对比分析[J].中国环境管理，2021，13(3):8.

[11] 中国环境科学研究院. 《环境污染物排放关键技术标准研制》课题总研究报告[R]. 北京：中国环境科学研究院，2011：236～237.

[12] 李东玲，吴烨，等. 我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究[J]. 环境科学，2012，33(2)：518～ 524.

[13] 《非道路移动机械控制管理政策体系研究报告》. 生态环境部机动车排污监控中心. 2019. https://www.efchina.org/Reports-zh/report-ctp-20190512-3-zh

[14] 《中国非道路移动机械低碳排放的潜力分析及政策建议》. 南开大学、中汽研汽车检验中心（天津）有限公司. 2023. https://www.efchina.org/Reports-zh/report-ctp-20231001-zh

[15] 《非道路移动机械及其装用的柴油机污染物排放控制技术要求（征求意见稿）编制说明》，标准编制组，2018

[16] 《中国工程机械工业年鉴》，中国工程机械工业协会，2022

[17] T/CCMA 0001—2011《工程机械定义及类组划分》，中国工程机械工业协会，2011

[18] 《中国移动源环境管理年报（2021》，生态环境部，2021.

[19] 工程机械制造行业产业链全景梳理及区域热力地图. 前瞻产业研究院. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1765494312981027215&wfr=spider&for=pc.

[20] 2022 年中国工程机械行业产业链上中下游市场剖析. 中商产业研究院. https://www.askci.com/news/chanye/20220526/1639391869339_5.shtml.

[21] 据中国工程机械工业协会统计数据显示，2021 年我国挖掘机保有量为 195.7～212 万台，此处数据取中间数。

[22] 《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》，原环境保护部，2014

[23] 由油耗转化为碳排放量(万 tCO_2)计算公式为：柴油净消耗量（万 t）*低位发热量（43.33GJ/t）*单位热值含碳量（0.0202tC/GJ）*碳氧化率（98%）*CO_2/C 折算因子 44/12，低位发热量、单位热值含碳量、碳氧化率数值来源于国家发改委《陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》

[24] 2022 中国农业机械产业链、政策、市场现状、竞争格局及发展趋势. 智研咨询. https://www.sohu.com/a/651192336_120950203.

[25] 2023 年中国农业机械产业链上中下游市场分析. 中商产业研究院. https://www.askci.com/news/chanye/20230607/153928268612356777633268_7.shtml.

[26] 农业机械行业分析报告. 张晓龙. https://www.tfzq.com/ueditor/php/upload/file/20230517/1684286735133725.pdf.

[27] 《中国农业机械工业年鉴》,中国农业机械工业协会，2021

[28] 《非道路移动机械控制管理政策体系研究报告》. 中国环境科学研究院机动车排污监控中心. https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-ctp-20190512-3/%E9%9D%9E%E9%81%93%E8%B7%AF%E7%A7%B

B%E5%8A%A8%E6%9C%BA%E6%A2%B0%E7%AE%A1%E7%90%86%E6%94%BF%E7%AD%96%E5%88%86%E6%9E%90%E6%8A%A5%E5%91%8A.pdf.

[29] 非道路移动机械. 伦敦市政厅. https://www.london.gov.uk/programmes-and-strategies/environment-and-climate-change/pollution-and-air-quality/nrmm.

[30] 高排放非道路移动机械处罚典型案例. 北京市朝阳区人民政府. http://www.bjchy.gov.cn/dynamic/news/8a24fe837b4bd461017b4c9f9e54009d.html.

[31] 西安市人民政府. 西安市人民政府关于调整禁止使用高排放非道路移动机械区域的通告. 网址：http://www.xa.gov.cn/gk/zcfg/gfxwj/zfgfxwj/6422516af8fd1c163f7045ff.html.

[32] CECE & CEMA. New brochure - CECE and CEMA: Optimising our industry 2 reduce emissions. (2018.04.15). https://www.cece.eu/news/new-brochure-cece-and-cema-optimising-our-industry-2-reduce-emissions.

[33] 《中国重型货运部门减油路径评估》，劳伦斯伯克利实验室，2020 年 6 月.

[34] 《中国宏观经济形势分析与预测年度报告（2023-2024）》,上海财经大学,2023 年 11 月 18 日.

[35] 全国：房地产开发企业房屋施工面积（万平方米）
https://wap.ceidata.cei.cn/detail?id=v2qPf%2BP1o%2FI%3D

[36] 《2023-2028 年基建行业深度分析及投资战略研究咨询报告》，中研普华产业院，2023.

[37] 适应人口趋势完善发展政策. 任远. 复旦发展研究院. https://m.thepaper.cn/baijiahao_24934296.

[38] 为所有人建设一个有弹性的未来：在人口增长放缓的背景下实现 2030 年议程. 联合国人口基金. https://china.unfpa.org/zh-Hans/news/22071201.

[39] 适应人口趋势完善发展政策. 任远. 复旦发展研究院. https://m.thepaper.cn/baijiahao_24934296.

[40] 《交通运输碳排放及绿色发展现状》,海南省绿色金融研究院，2023 年 5 月.

[41] 2022 年中国装载机行业市场现状及竞争格局分析 寡头垄断竞争格局基本形成. 前瞻产业研究院（2022.1.17）. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1722189022225401102&wfr=spider&for=pc.

[42] 渗透率不足 1%，工程机械电动化会否成为下一个风口？
https://www.163.com/dy/article/GDC1GEDM0518VM2A.html

[43] 我国新能源汽车保有量达 1821 万辆. 中国政府网. https://www.gov.cn/govweb/lianbo/bumen/202310/content_6908192.htm.

[44] 数据源自 CECE 和 CEMA 的手册“使用替代能源可节省 10%～57%燃油消耗”，本报告中为了便于计算取平均数 33.5%。

[45] 谢永胜,张彬.关于汽车动力变革中内燃机发展趋势研究[J].中国科技期刊数据库 工业 A，2023(3):3.

[46] 张燕.机车动力间热流场 CFD 计算分析[D].大连交通大学[2023-12-12].DOI:CNKI:CDMD:2.1018.878834.

[47] 内燃机产业高质量发展规划（2021-2035）. 中国内燃机工业协会. （2021.07.09）https://www.sklear.cn/standard/Policies/202108/U020220121594576849807.pdf.

[48] 中国工程机械工业协会苏子孟：工程机械行业近两年运行情况及趋势展望. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1760877707620559060&wfr=spider&for=pc.

[49] 数据来源于表 4-7“政策强化情景下，挖掘机、装载机、拖拉机在 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年能效提升率、纯电动化率和替代燃料应用率预测”，及表 4-8“各节油减碳路径下各类机械的保有量占比预测”。

[50] 2022 年国家强农惠农富农政策措施选编. 中国农业农村部. (2022.06.15) . http://www.zcggs.moa.gov.cn/zczc/202206/t20220615_6402470.htm.