

中国重型车节能减排进程： 2012-2021年间二氧化碳与污染物排 放趋势

作者：毛世越、Felipe Rodriguez（国际清洁交通委员会）

关键字：重型商用车、CO₂排放趋势、污染物排放趋势、趋势研究

执行摘要

重型车是支撑现代社会生产生活的重要生产资料，但同时也是能源消耗与空气污染的一大重要来源。截止 2021 年，柴油重型车的市场份额依然高达约 90%，仍然是整个市场的绝对主力车型。过去十年间，中国重型车行业的减排技术不断更新换代，监管框架日益完善。2020年，中国承诺要“力争 2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和”（Xinhua News, 2021）。因此，如何有效降低重型车的污染物排放与温室气体排放成为了一项业界重要的课题。本研究旨在对重型车过去十年的发展历程进行系统性的回顾，重点关注车辆的油耗表现（折算相应的CO₂排放）、污染物减排技术发展趋势以及主要的车辆参数趋势等。具体而言，本研究将从以下几个方面重点探讨重型车的发展历程，例如关键参数（如整备质量、发动机功率、能量密度）、各主要类型重型车的二氧化碳排放量，以及尾气污染物排放及控制技术的发展。本研究介绍了以下六类车型的发展进程，即城市客车、城际客车、自卸汽车、中型载货汽车、重型载货汽车和半挂牵引车。

图ES-1 总结了4个柴油重型车重要的技术指标在2012-2021年度的发展趋势，分别是总质量、功率、排量和二氧化碳排放，其中二氧化碳排放量是通

致谢：IKI 项目在德国联邦经济事务和气候行动部的领导下开展工作，同时与其资助方德国联邦环境、自然保护、核安全与消费者保护部以及德国外交部保持紧密合作。

本研究作者感谢合作方彭颀与马冬（中国环境科学研究院机动车排污监控中心）为本研究提供的柴油发动机污染物排放及市场相关信息；此外，作者感谢所有内部及外部的评审专家对本研究的帮助，包括何卉、杨柳含子、Anirudh Narla（国际清洁交通委员会），柳邵辉、贾莉洁（中国汽车技术研究中心有限公司），秦兰芝（能源与交通创新中心），同时也感谢清华大学张翌晨同学对本文的文字校对和翻译工作，以及Gary Gardner先生提供的写作建议。

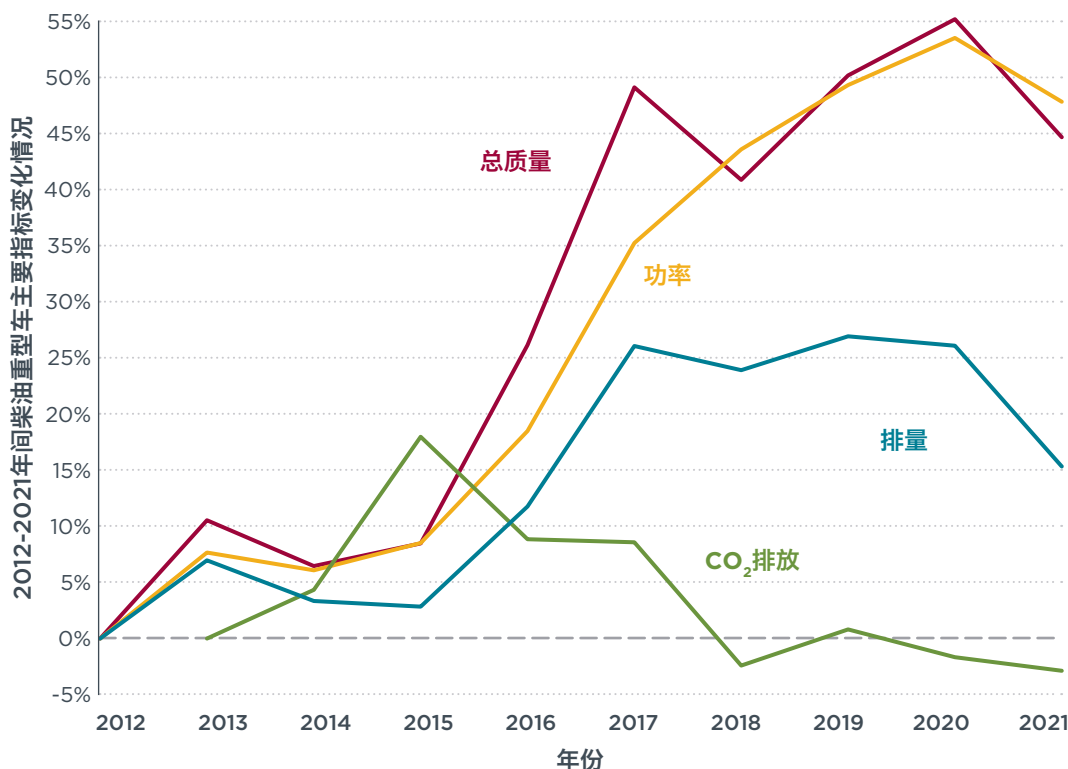
本研究所有内容仅反映本文作者的个人观点，评审专家及资助方不对本文的任何观点负责。



www.theicct.org
communications@theicct.org
[twitter @theicct](https://twitter.com/theicct)

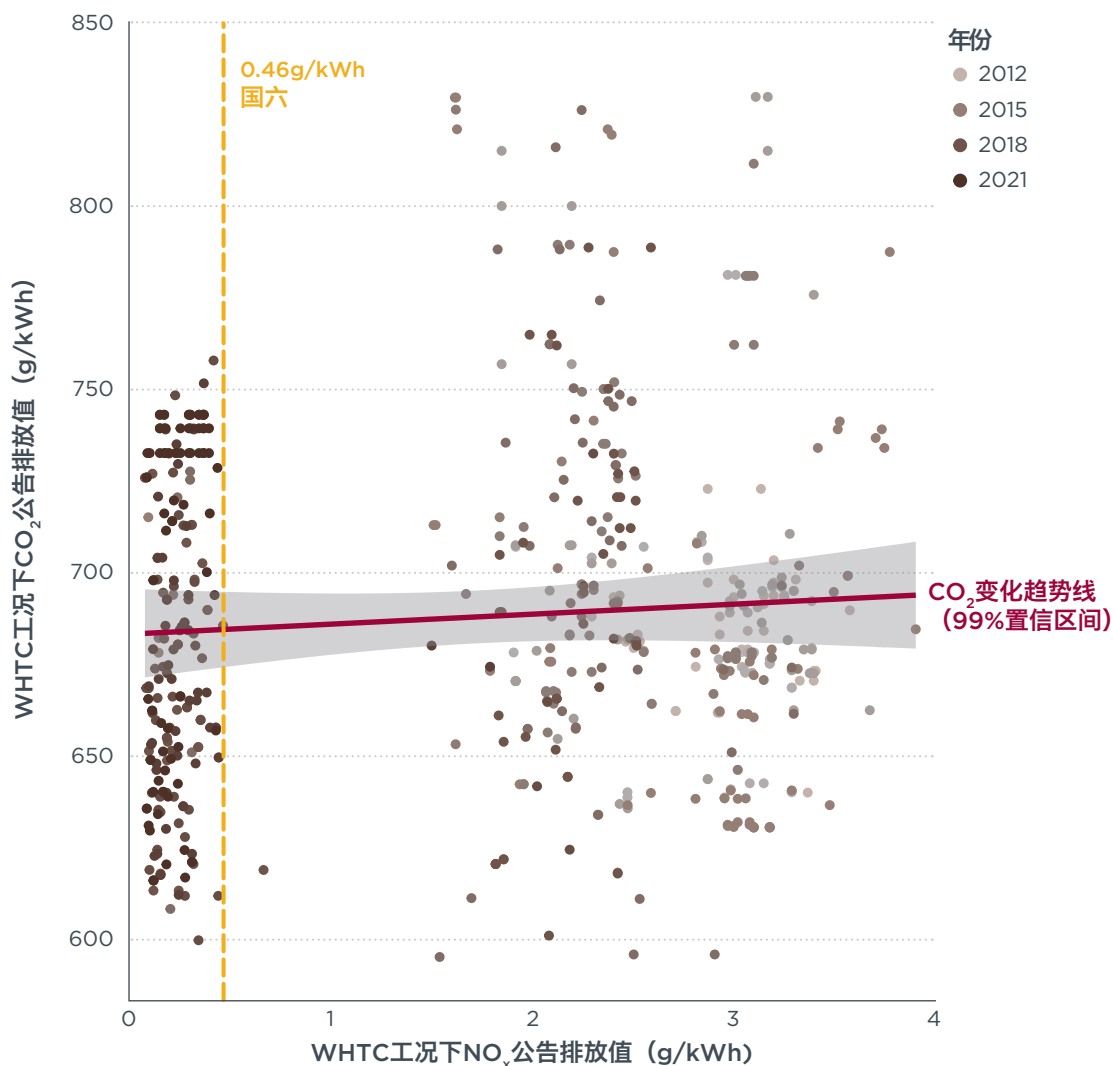


过相应车型的柴油油耗换算得来的。对于重型车车队而言，总质量、功率以及排量等参数在过去的十年间分别增长了15%-50%不等，反映出我国重型车整体上呈现大型化与重型化的显著趋势。与此同时，全车队二氧化碳排放自2013年起经历了显著的波动，2021年整体略优于（~2%）2013年水平，这主要归功于自2012年起相继实施的重型车三个阶段油耗标准。



图ES-1. 2012-2021年间柴油重型车主要指标变化情况，由于2012年CO₂结果可靠性较差，故CO₂排放趋势线自2013年起绘制

此外，本研究还希望了解这一时期的污染物和温室气体减排进展。图 ES-2 展示了重型车发动机温室气体与污染物排放量之间的协同变化情况。过去十年间，中国的污染物排放标准日趋严格，2021年最新的国六标准正式实施。自国六标准起，中国采用WHTC工况循环对重型车柴油机的氮氧化物排放进行测试，并设定了0.46g/kWh的限制标准。不过，中国尚未从发动机层面对二氧化碳排放设定具体的限制标准，从而导致二氧化碳的排放水平并没有随着污染物排放限值标准的日趋严格而有明显下降（图ES-2）。根据过去十年的柴油机二氧化碳排放趋势，各年度柴油机二氧化碳平均排放基本保持在680-690g/kWh左右。



图ES-2. 2012-2021年柴油发动机CO₂和NO_x排放值变化情况

根据本研究的结果，我们提出以下几项政策建议：

1. 将工程类专用车也整体纳入下一阶段的油耗标准，以便充分覆盖高能耗车辆类别。工程类专用车是指具有特定功能（如环卫、工程等）的车辆。目前我国重点针对五类重型车实施了燃料消耗量限值管理，即载货汽车、自卸汽车、半挂牵引车、城市客车及城际客车，而工程类专用车则尚未被纳入。工程类专用车约占2021年总体重型车市场份额的10%，因此有必要尽快将此类车辆的燃油消耗及CO₂排放纳入监管体系。另一方面，部分专用车与其它车型之间的范围界限仍然模糊，这为规避油耗监管提供了一定的空间。
2. 应制定更全面综合的污染物和温室气体排放标准以指导重型车的发展。目前，中国还没有从发动机和车辆层面控制温室气体排放。从目前的油耗标准转向温室气体排放标准，将涵盖如一氧化二氮、甲烷等更多的温室气体，这有利于公众了解重型车的实际温室气体排放情况。此外，一个全面的温室气体排放标准将为重型车行业通过技术组合实现污染物和温室气体协同减排提供长期的指导方向。中国在2021

年启动了全国碳交易市场，并正在纳入更多行业。完善针对重型车的温室气体排放法规也有助于为未来道路交通行业纳入碳交易市场奠定坚实的基础。

3. 尽管重型车的电动化转型非常重要，但当前阶段仍需鼓励清洁柴油发动机的技术发展。在本研究中，我们发现中国重型车行业已经在通过利用更加先进的车辆技术（如共轨喷油）来提高燃油效率和降低污染物排放。推广清洁柴油技术可以使重型车更为顺利且经济地向电动化转型。此外，中国曾采用双积分的手段成功推广了电动乘用车的普及，对于重型车，我们建议在未来的商用车积分政策中能恰当地激励为提升发动机燃油效率和性能所做出的努力。

简介及政策背景

随着制造业的蓬勃发展和重型车（HDV）需求量的不断增加，目前中国已成为全球最大的重型车市场（Mao & Rodríguez, 2021）。在过去的十年间，中国重型车市场增长迅速，2021年的重型车销量达到了140万辆（图1），这无疑加剧了对这支庞大车队产生的气候和城市空气污染影响的担忧。

2020年，中国重型车的NO_x排放量占道路车队总排放量的78.5%，大型客车的NO_x排放量占比达到11.7%。另外，重型车的颗粒物（PM）排放量占道路车辆排放总量的90.6%（MEE, 2021）。为应对这一挑战，中国国务院于2018年启动了“打赢蓝天保卫战”三年行动计划，其中特别强调了重型柴油车的污染物排放控制（Zhang等人，2020）。此外，为进一步减少柴油发动机和重型车污染物排放量，中国还积极推行了《清洁柴油机行动计划》。中国采取了一系列战略举措来实现减排目标，其中包括制定全新的法律法规、在用车和发动机测试、更严格的新车温室气体排放法规等（Yang等人，2021）。第六阶段机动车排放标准（简称“国六”）是目前最新且最严格的重型车排放标准，其基于之前的一系列排放测试标准改编而来，其中大幅修改了测试方案和方法，旨在更准确地反映真实排放量（MEE et al., 2021）。

另一方面，根据生态环境部门于2019年开展的一项调查，重型车的温室气体排放量约占所有车型排放总量的一半，约占中国所有行业总温室气体排放总量的3%（MEE, 2020）。中国国家主席习近平曾宣布，中国要在2030年前实现碳达峰，到2060年实现碳中和（IEA, 2021）；基于上述国家目标，重型车队温室气体减排已成为实现交通领域碳中和的重点攻坚领域。不过，污染控制技术可以在付出可接受成本的前提下减少超过95%的发动机排放量，但将温室气体排放量降低到类似水平的成本却非常高（Dan Meszler, 2019; Meszler et al., 2018）。内燃机车辆可通过改进发动机、轻量化技术、安装低阻力轮胎和空气动力学装置来减少能耗和温室气体排放量，但是这些措施可实现的减排效果都存在一定局限性。要想大幅削减温室气体排放量，推进重型车队电动化是非常有必要的。

中国从2000年开始就制定了一系列车辆排放标准来管控机动车污染物排放。相比之下，重型车温室气体排放则缺乏相应监管，到目前为止并未采取任何直接监管措施；不过中国在2012年首次发布了油耗标准，借助于这些标准对二氧化碳排放进行间接管理。这些标准在连续三个阶段内逐步调整了针对不同类别和重量等级重型车的燃料消耗量限值。中国严格管控货车燃料消耗量的最直接原因在于减少原油消耗量，因为目前中国超七成的原油依赖进口（IEA，2020）。中国尚未从温室气体排放及其对全球变暖影响的层面考虑对重型车采取监管行动。不过，随着中国宣布碳达峰和碳中和目标的宏伟愿景，这种情况即将发生改变。基于这些长远的目标（未来40年），中国正在加快步伐并采取更加有效的行动来降低温室气体排放和能源消耗，其中最引人注目的是在过去十年间对于新能源汽车的大力推广。

在之前发布的一篇文章中，ICCT曾对中国第一阶段和第二阶段油耗标准在降低燃料消耗量方面的有效性进行了回顾性评估（Mao 等人，2021）。在本文中，我们将评估相关标准在更长时间段（2012年-2021年）内的影响，并将研究范围扩大到现行的第三阶段油耗标准。

本文将会采用如下结构进行探讨：我们会首先阐述中国重型车市场的政策背景和发展现状，然后详细介绍本研究中采用的方法，并针对车辆基本参数与重点车型的二氧化碳排放趋势做详细的介绍。我们还对重型车传统柴油发动机的能效技术和发展趋势做详细的探讨，并呈现当前市场二氧化碳与主要空气污染物（以NO_x为例）的协同变化情况。最后本文将提供相应的政策建议，为中国制定未来的重型车温室气体和污染物排放法规提供参考。

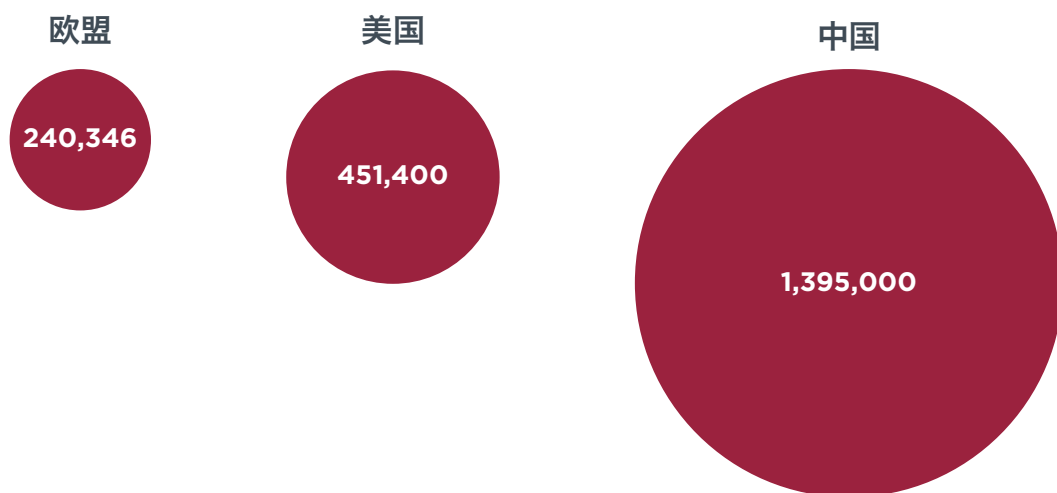


图 1 2021年欧盟、美国和中国重型车销量对比（ACEA, 2022; cvworld.cn, 2022; Statista, 2022）

本研究中关于重型车的定义、范围和分类

本研究采用的数据集来自第三方统计机构，该数据集包括2012-2021年间重型车的型式批准信息及销量信息。根据相关国家标准（GB 30510），本

文仅分析最大设计/组合总质量（GVW/GCW¹）超过 3500 kg的柴油车型，其他车辆信息作剔除处理。该数据集包含大约 2100 万条重型车车型信息（其中包括1930 万条柴油车型信息）用于分析。

中国的重型车主要由柴油车组成，这也反映在我们的数据集中。图 2与图 3展示了2012-2021 年间重型车销量的细分结构。在过去十年间，重型车行业规模从年产约 170 万辆增长到 300 万辆，其中柴油车型从年产 163 万辆增长到 273 万辆。化石燃料车型仍然是整个市场的主流，2021 年占总销量的 96% 以上；电动车型在2021 年的产量约为 10.5 万辆。电动及燃料电池等新能源车型在研究覆盖的十年间增长了约4%，这主要是由于中国政府 and 行业组织在过去十年一直大力推广低碳交通，使得新能源车型销量稳步上涨。不过，由于新能源车型并非本研究的主要内容，在进行本研究时将予以剔除。

本研究的范围几乎与自2012 年以来新生产的整个重型车队相吻合，各年份吻合程度如图4 所示。

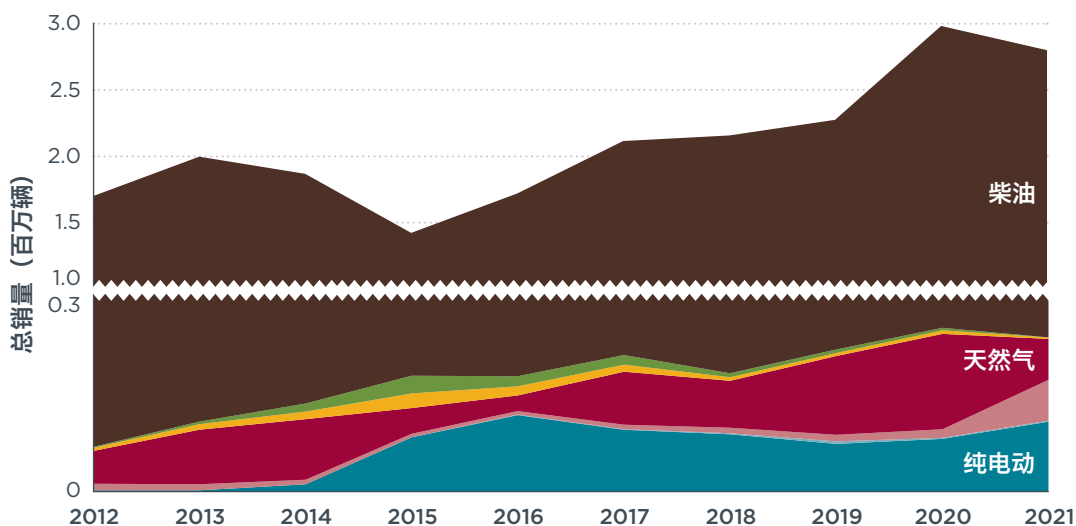


图 2 2012-2021年不同燃料类型的重型车销量

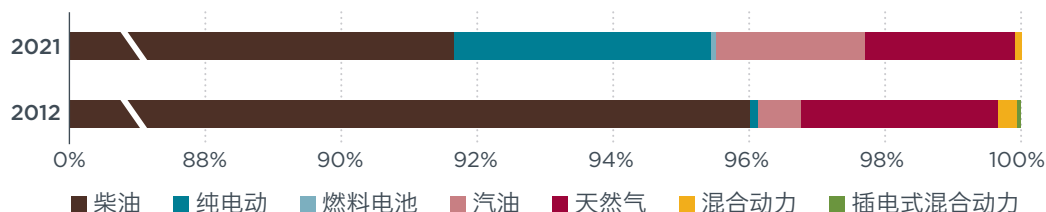


图 3 2012和2021年重型车各燃料类型占比

1 最大组合总质量（GCW）是半挂牵引车专用的一项指标。

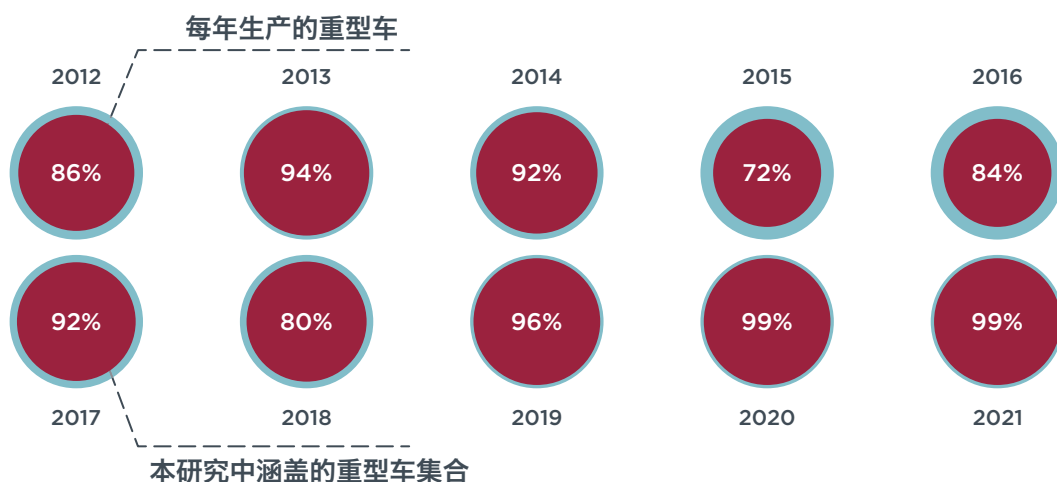


图 4 本研究的范围

国家标准GB/T 15089-2001确立了现行的车型分类原则，中国与欧洲车辆分类系统一致，将所有机动车分为四类：即L类（两轮车和三轮车），M类（载客车辆或客车）、N类（货车）和O类（挂车）。本研究将仅涵盖N类和M类车辆，并作进一步类别细分。

本研究涵盖了最大设计/组合总质量（GVW/GCW）超过 3.5 吨的五类重型车，即载货汽车、自卸汽车、半挂牵引车、城市客车和城际客车。此范围与中国现行的第三阶段重型车油耗标准（GB 30510-2018）一致。

表 1 本研究选取的车辆类型及对应质量段

车辆类型	质量段 (吨)
中型载货汽车	3.5 - 4.5
重型载货汽车	16 - 20
自卸汽车	25 - 31
半挂牵引车	46 - 49
城际客车	3.5 - 4.5
城市公交	5.5 - 7

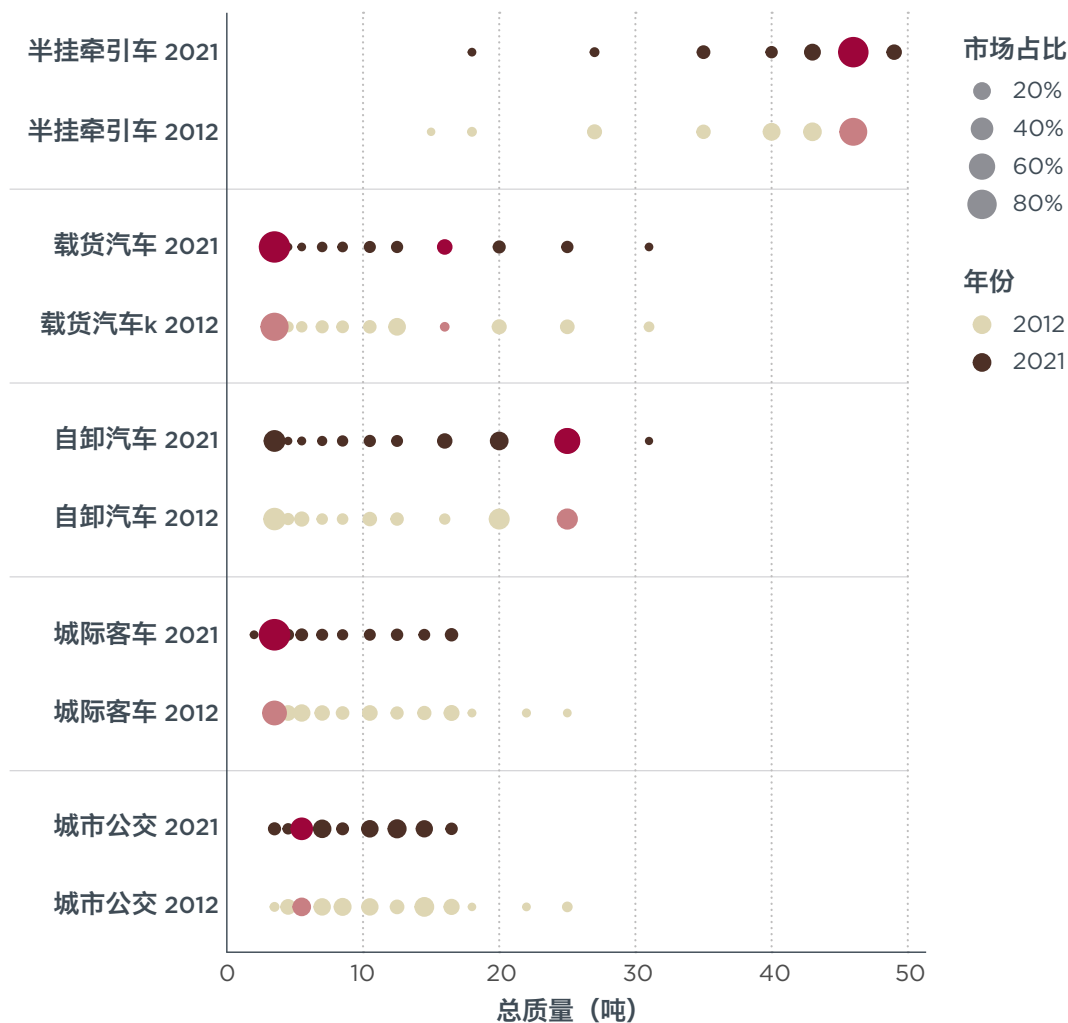


图 5 2012及2021年车型样本分布及本研究选取的各车辆类型重点质量段（红色圆圈）

本研究分析了 2012-2021 年间生产和销售的重型车车型，其中涵盖了第一阶段至第三阶段车型。在切换至新阶段标准时，所有完成新型式认证的车辆均需符合更严格的油耗标准。在之前的一项研究中（Mao 等人，2021），ICCT 探究了2012-2017 年间第二阶段相对于第一阶段的改进以及第三阶段的潜在发展方向。本项工作仍将参考上述研究的一些关键信息。

柴油重型车市场概述

2012-2021年间，中国柴油重型车市场发展迅速，尽管期间也遭遇一些波折。重型车总销量在 2015 年出现下滑，但从 2016 年开始大幅反弹。2020年是柴油重型车市场在近十年增速最快的一年，2021年销量相比2020年略下降了3.6%。由于柴油重型车的商用属性，其销量的变化情况也基本反应了过去十年中国整体宏观经济发展态势。

过去十年间，东风汽车、一汽集团、福田汽车、江汽集团、江铃汽车和中国重汽等几家主要整车企业占据了重型车市场的主导地位，如图6 所示。在此期间，前四大整车企业一直保持销量领先地位。

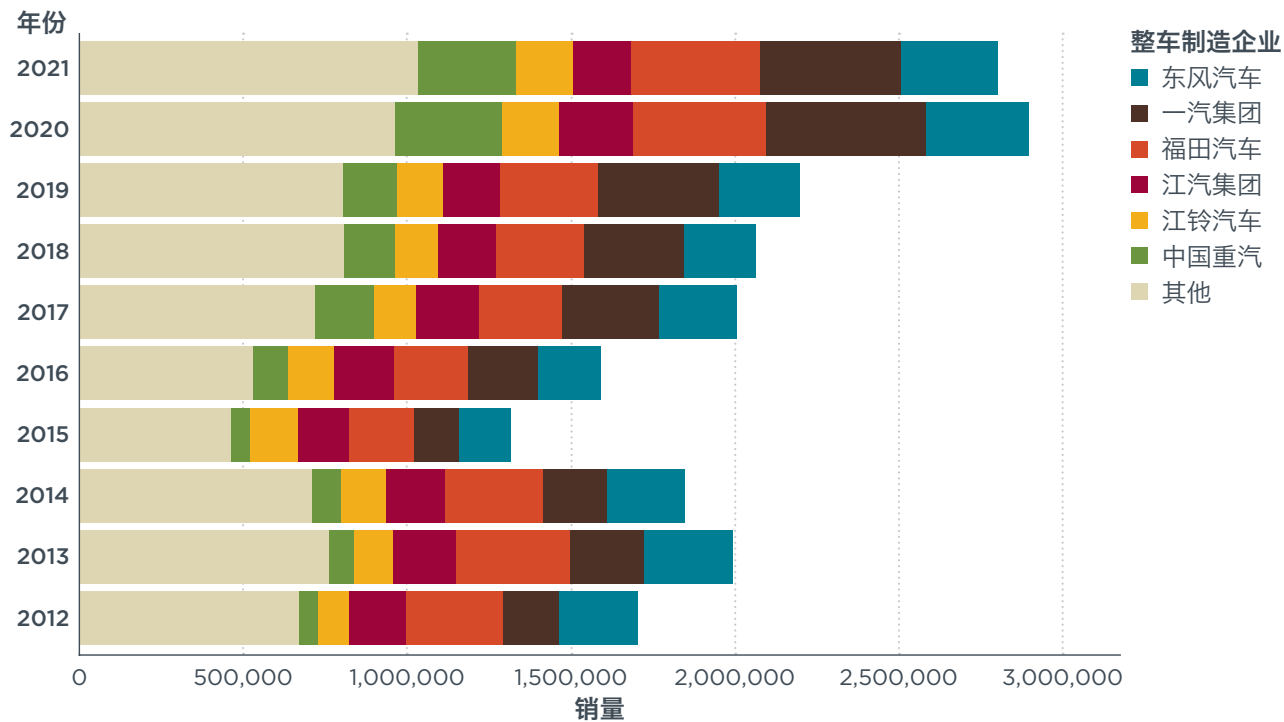


图 6 整车企业重型车销量

车辆基本参数

整备质量

整备重量是指车辆的总重量，包括标准设备和柴油、汽油等必要消耗品

(Waring, 2022)。对于有代表性的细分市场 and 重量级别，大多数车型的平均整备质量大致相同。城际客车、半挂牵引车和中型载货汽车的整备质量未发生明显变化；城市客车和自卸汽车的整备质量在2017-2020年间略有增加，但在2021年再次下降。重型载货汽车的整备质量变化最为显著，从2012年到2021年下降了27%，并在2016年达到峰值（图7）。这主要是由于交通运输部（MOT）自2016年9月以来针对货车的监管变化（交通运输部，2016）。交通部更新了重型载货汽车的分类方法，即基于车轴数和GVW进行分类，具体来说，对于本研究中涉及的重型载货汽车（16吨 < GVW ≤ 20吨），新生产的双轴货车的GVW不允许超过18吨，因此从2017年开始，重型载货汽车必须通过降低整备质量以确保足够的有效载荷（有效载荷 = GVW - 整备质量）。

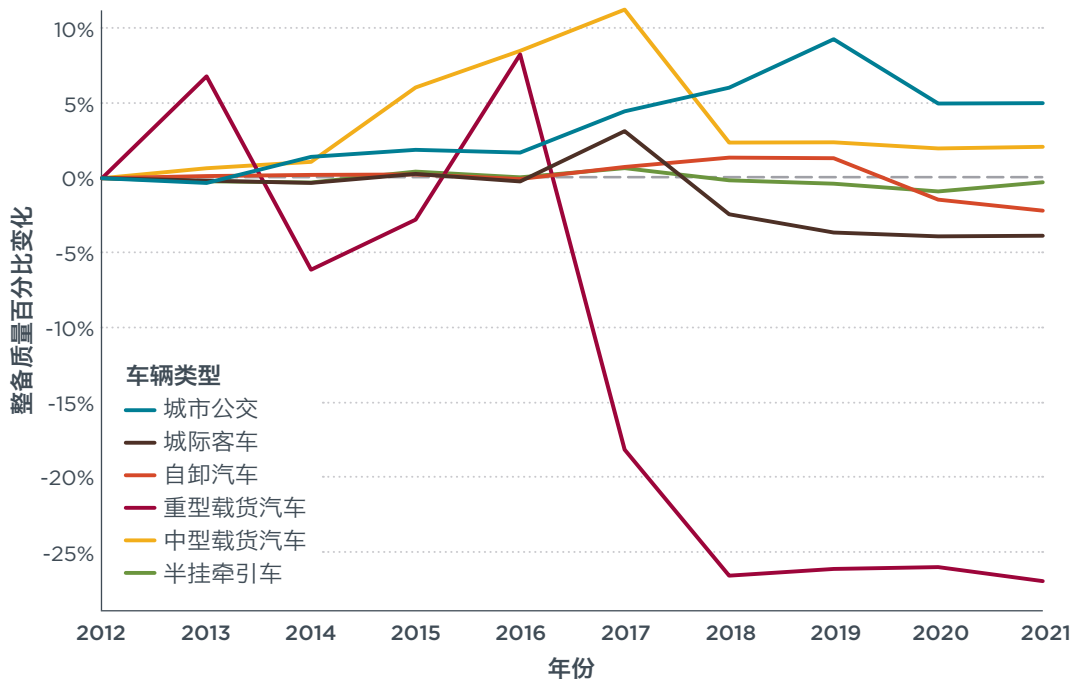


图 7 2012-2021年各车型整备质量变化趋势

发动机功率、能量密度和排量

不同车型的发动机功率和排量呈现出不同变化趋势。在此期间，自卸汽车和半挂牵引车的发动机功率分别增加了 30% 和 28%，而发动机排量增加了10%。增长幅度的差异表明，这些年来发动机的能量密度（即单位排量的输出功率）一直在增加。中型载货汽车、城市客车和城际客车的这两个指标却呈现出相反的趋势，即发动机功率增加了约 5%-25%，而发动机排量却下降了 5%-10%。重型载货汽车是唯一一类功率和排量均显著下降的车型，它们分别下降了 8% 和 32%（图8），这主要是由整备质量变化（图7）导致的。

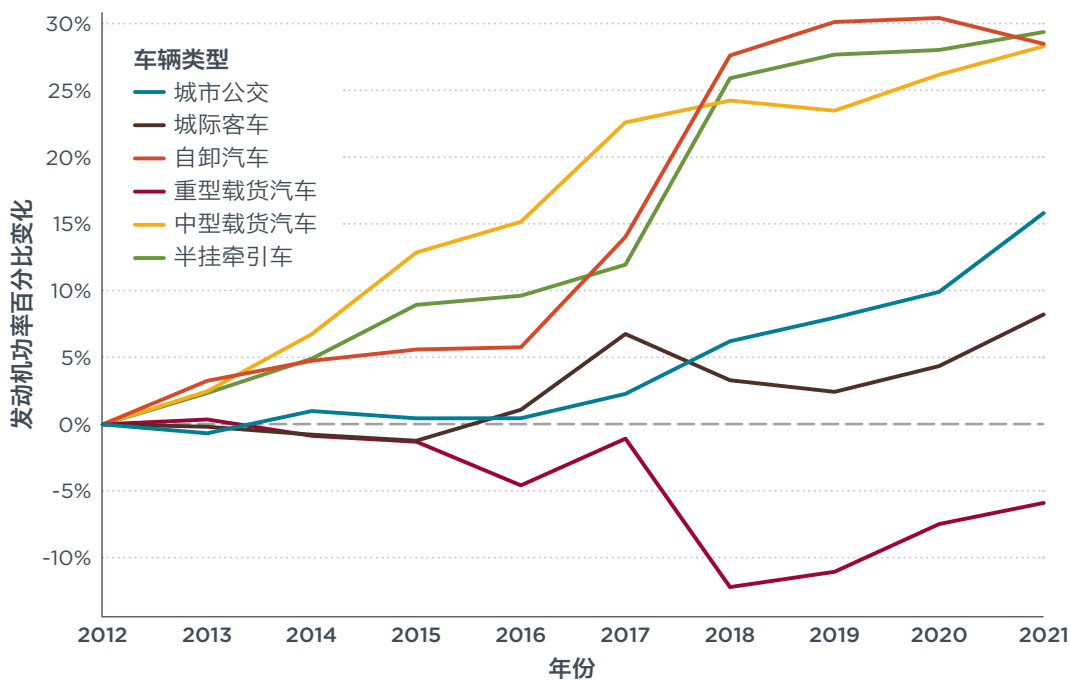


图 8 2012-2021年发动机功率变化趋势

图 9 展示了2012-2021年间发动机功率的变化趋势。到2021年，虽然50-100 kW 和 100-150 kW 仍然是最受欢迎的功率等级，但是更大功率发动机的市场份额也有所增加。具体来说，300-350 kW 功率发动机的市场份额从 1%（2012年）快速增长到 18%（2021年），功率大于400 kW 的发动机从 0.01%（2012年）增长到 5.8%（2021年）。另一方面，近年来功率小于50kW的发动机几乎从市面上消失，这意味着在此期间重型车朝着更大尺寸和更大功率的方向发展。

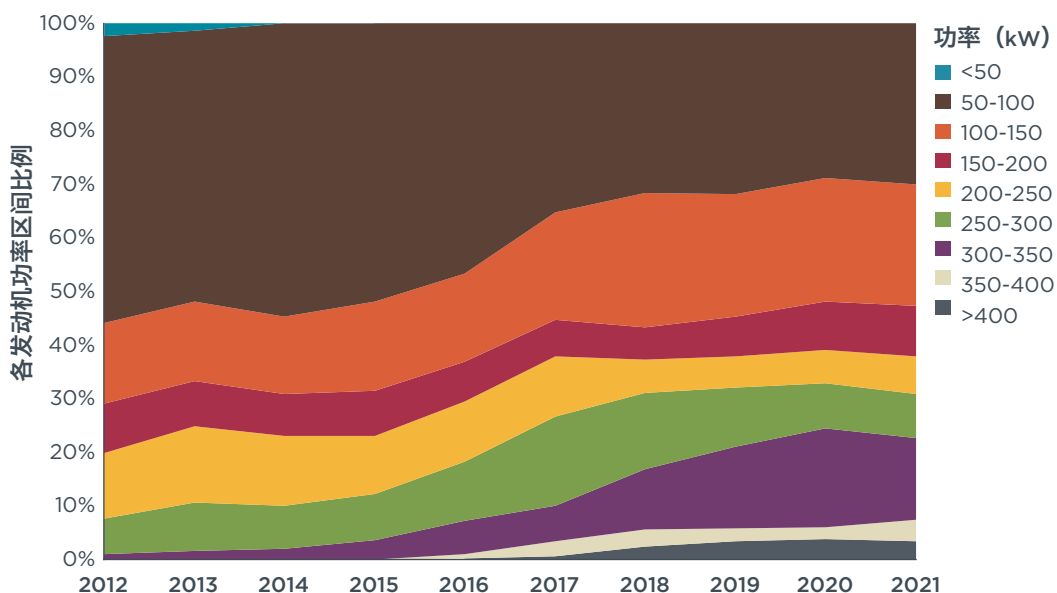


图 9 2012-2021年发动机功率变化趋势

各类车型发动机的能量密度呈单调上升趋势。在过去十年中，城市客车和重型载货汽车的能量密度增速最快，分别增长了 45% 和 40%。在此期间，半挂牵引车和自卸汽车的增速最慢，但也增长了 15%。更高的能量密度意味着同样的发动机排量输出的功率更大，这也反映出发动机技术的进步。

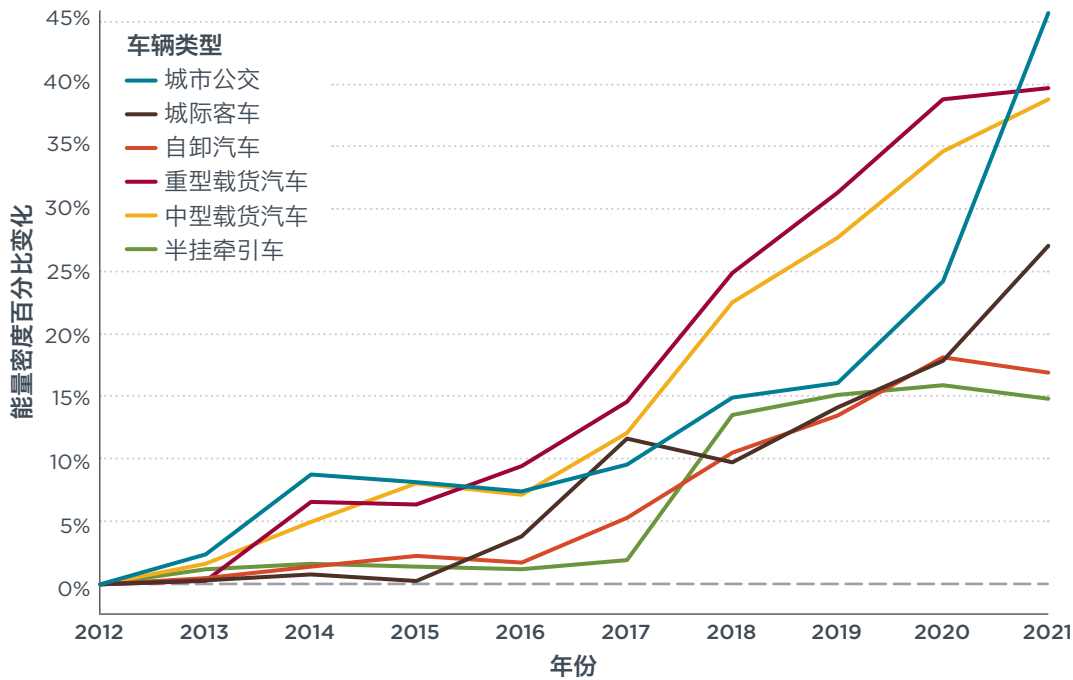


图 10 2012-2021年发动机能量密度变化趋势

主要车型二氧化碳排放趋势²

表2相应地说明了受油耗标准管制的车型情况。在第一阶段最先被管制的是城际客车、载货汽车和半挂牵引车；城市客车和自卸汽车则从第二阶段开始被纳入。在本章中，我们将分析每个车型最具代表性的重量范围的二氧化碳排放趋势。

表 2 受油耗标准管制的车型，○ 代表被纳入管制的车型

车型	第一阶段 (2012-2015)	第二阶段 (2015-2019)	第三阶段 (2019-现在)
城市客车		○	○
城际客车	○	○	○
载货汽车	○	○	○
自卸汽车		○	○
半挂牵引车	○	○	○

城市客车

尽管在2014年至2017年间有短暂的增长，过去十年城市客车的平均二氧化碳排放量仍有所下降。2021年新注册城市客车车队的二氧化碳排放量中位数也比2012年大幅下降约13%。随着中国在过去十年间大力推广城市客车电动化，柴油城市客车（5.5 吨 < GVW ≤ 7 吨）的销量骤减了约 85%（图11）。

过去十年，中国也对柴油城市客车实施了更为严格的油耗限制，二氧化碳排放³控制也随之加严。2012年实施的中国第一阶段重型车油耗标准中并未将城市客车纳入监管范畴；在后续修订的第二阶段标准中首次针对城市客

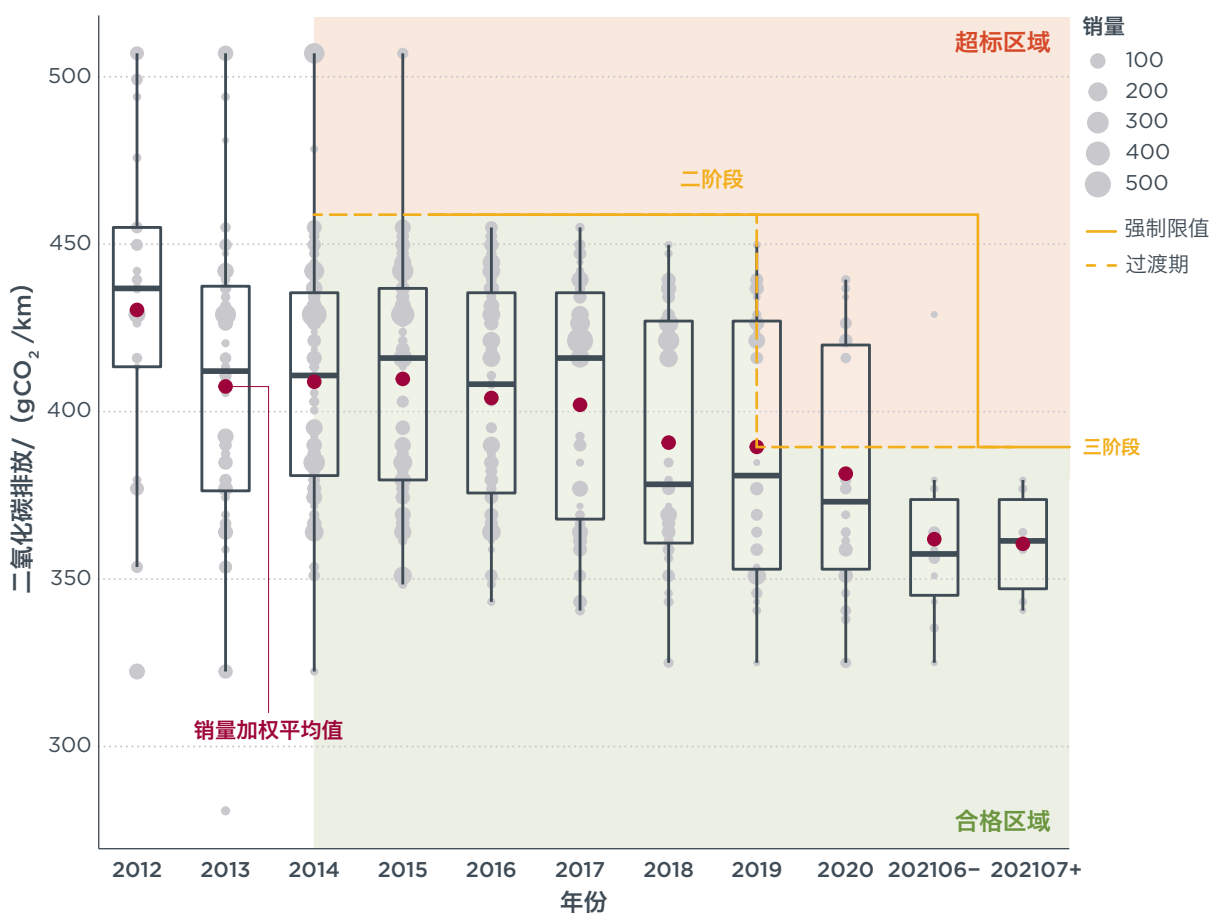
² 2021年数据已与另一独立的第三方数据来源交叉验证：www.chinacar.com.cn

³ 虽然燃料消耗量可能无法完全代表通过直接转换得出的二氧化碳排放总量，但为了便于分析，我们在本小节中仍然遵循燃料消耗量限值标准中规定的转换系数 2600 gCO₂/ (L柴油*100km)。

车 (5.5 吨 < GVW ≤ 7 吨) 设定了 17.5 L/100km (455 gCO₂/km) 的限值。从 2019 年开始实施的第三阶段标准加严了要求, 将限值降至 14.7 L/100km (约 382 gCO₂/km)。由于中国实行单车限值, 这不同于美国基于车队平均油耗的要求, 因此每辆新车只有符合要求才能生产和销售。但是由于第二阶段和第三阶段标准都在七月份生效, 上半年生产的一些老款车型不受控于更新的标准限制, 所以每年仍会出现个别离群值。此外, 第三阶段标准设定了两年的实施过渡期, 因此 2020 年市面上仍有一些老款车型在出售。自 2021 年 7 月以来, 城市客车的燃油效率进一步提升, 所有车型均符合第三阶段标准要求。

中国正处于制定下一阶段油耗标准的初期阶段, 以期对各类车型实施综合灵活的监管。下一阶段标准将采用中国重型商用车辆行驶工况 (CHTC) 和全新的测试程序, 相信届时将对城市客车的燃油效率及油耗提出更严格的要求。

表 3 列出了 2021 年城市客车整车企业的二氧化碳排放量信息。2021 年的平均值是 ~363g/km, 头部制造商安凯客车的二氧化碳排放量比该值低 0.7%。⁴



注: 图中红点表示每年的平均二氧化碳排放量; 根据中国第三阶段重型车燃料消耗量测试标准, 所有排放量数值均由燃料消耗量转换而来, 转换系数为 2600g CO₂/ (升柴油 * 100 km)。黄色实线表示针对所有已获得型式批准车型的标准限值, 而黄色虚线表示仅针对新注册车型的“过渡性”要求。具体而言, “202106-”和“202107+”分别表示 2021 年上半年 (1 月至 6 月) 和下半年 (7 月至 12 月)。

图 11 2012-2021 年间城市客车的二氧化碳排放量

4 第三阶段标准规定新注册的城市客车须在 2019 年 7 月之前符合新标准要求, 所有车型须在 2021 年 7 月之前符合新标准要求。

表 3 2021年城市客车整车企业的二氧化碳排放量

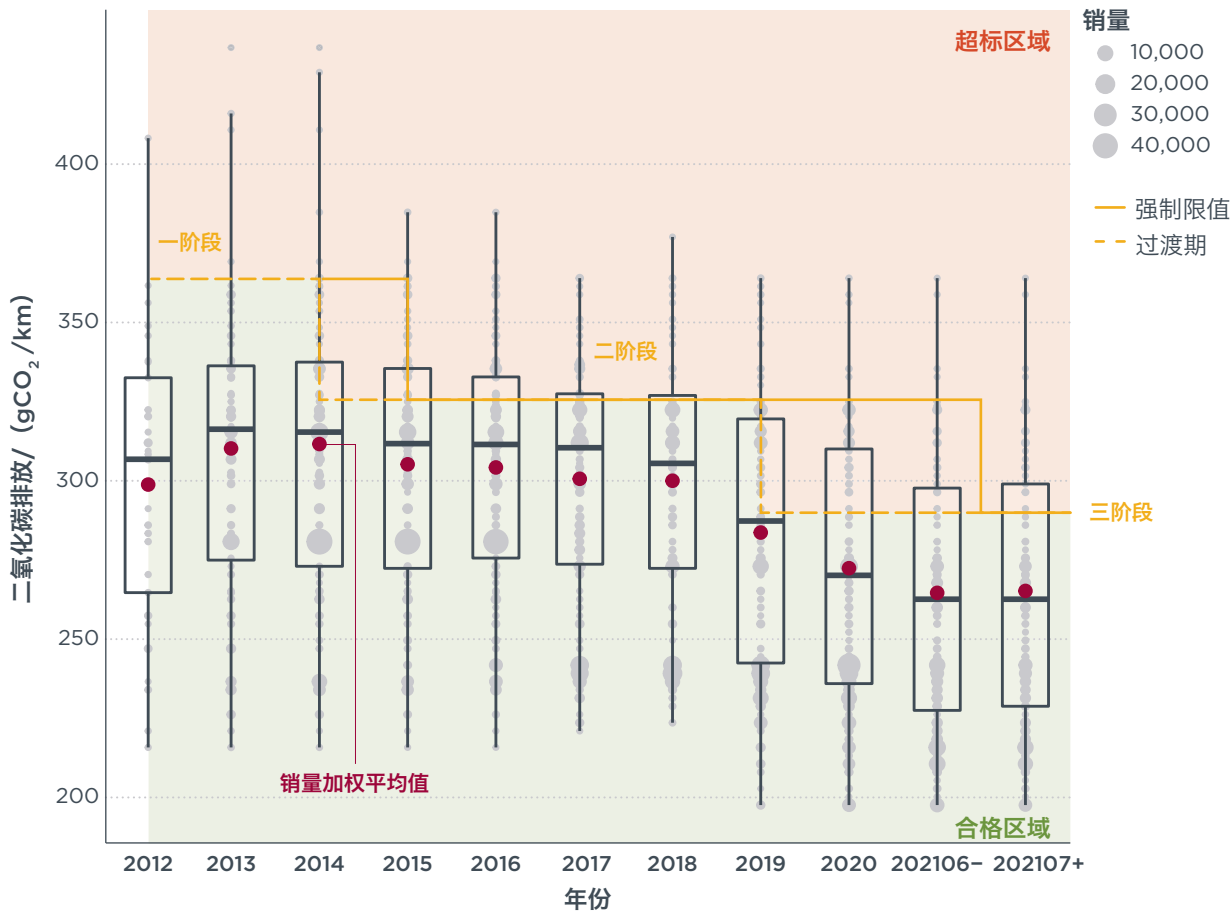
整车企业	2021年平均二氧化碳排放量(g/km)	均值偏差(%)	销量(%)
安凯客车	360.9	-0.7	60.4
宇通客车	372.8	2.6	16.2
东风汽车	373.4	2.7	9.0
中通客车	353.2	-2.8	6.3
其他	361.1	-0.6	8.1

城际客车

2012 年实施的第一阶段重型车油耗标准首次将城际客车纳入监管范畴。之后，第二阶段和第三阶段标准对城际客车设定了更严格的限值。针对最具代表性的质量段（即3.5吨< GVW ≤ 4.5吨）城际客车设定的燃料消耗量限值分别为14 L/100km（第一阶段）、12.5 L/100km（第二阶段）和 10.6 L/100km（第三阶段）。通过 2600 g CO₂/（L柴油*100km）转换系数直接计算出各阶段的二氧化碳排放量限值分别为 364 gCO₂/km、325 gCO₂/km 和 275.6 gCO₂/km，如图 12 所示。

过去十年间，柴油城际客车的认证油耗值以及相对应的二氧化碳排放量呈稳定下降趋势。在过去三年中，得益于第三阶段标准的实施，平均二氧化碳排放量下降了约 15%。柴油城际客车二氧化碳排放在早期几乎没有改善，第二阶段标准也没有对其改善油耗产生太大影响。在第二阶段和第三阶段销售的城际客车中，约有20%超过限值，这意味着销售的是获得上一阶段型式批准的车型。也就是说，油耗标准的积极作用在实践中被延后，日益严格的法规不能带来应有程度的实际改善。

表4总结了2021年城际客车整车企业的二氧化碳排放量信息。城际客车的头部整车企业，如江铃汽车和上汽集团，它们的二氧化碳排放量比平均水平低 4.4%，而较小的整车企业（即“其他”）则表现较差。



注：图中红点表示每年的平均二氧化碳排放量；根据中国第三阶段重型车燃料消耗量测试标准，所有排放量数值均由燃料消耗量转换而来，转换系数为 $2600\text{g CO}_2/(\text{升柴油} \times 100\text{ km})$ 。黄色实线表示针对所有已获得型式批准车型的标准限值，而黄色虚线表示仅针对新注册车型的“过渡性”要求。具体而言，“202106-”和“202107+”分别表示2021年上半年（7月至6月）和下半年（7月至12月）。

图 12 2012-2021年间城际客车的二氧化碳排放量

表 4 2021年城际客车整车企业的二氧化碳排放量

整车企业	2021年平均二氧化碳排放量(g/km)	均值偏差(%)	销量(%)
江铃汽车	223.1	-4.3	38.7
上汽集团	222.9	-4.4	33.7
福田汽车	242.2	3.9	10.3
东风汽车	255.5	9.6	3.5
其他	273.5	17.3	13.7

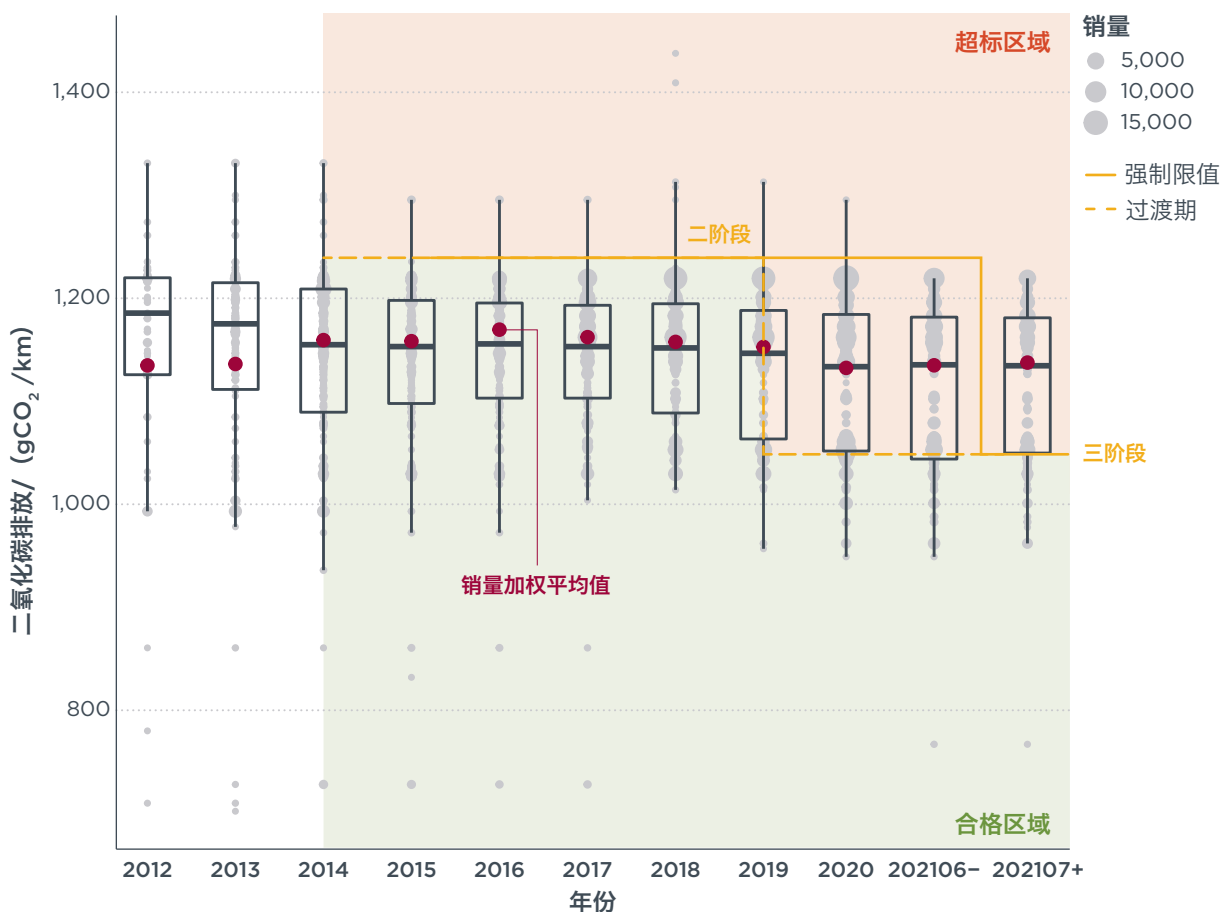
自卸汽车

自卸汽车是指运输矿石、沙子等原材料且具备起重功能的一类货车。第二阶段重型车油耗标准首次将自卸汽车纳入监管范畴。第二阶段标准针对自卸汽车（ $25\text{ 吨} < \text{GVW} \leq 31\text{ 吨}$ ）设定的燃料消耗量限值为 $47\text{ L}/100\text{ km}$ （ $1222\text{ gCO}_2/\text{km}$ ）；第三阶段标准加严了限值，为 $41\text{ L}/100\text{ km}$ （ $1066\text{ gCO}_2/\text{km}$ ）。

图13展示了过去十年间自卸汽车的二氧化碳排放趋势。在2012-2021年间，自卸汽车的燃料消耗量几乎无任何改善；其中，新注册自卸汽车的平均二氧化碳排放量保持在 $1100\text{ gCO}_2/\text{km}$ 和 $1150\text{ gCO}_2/\text{km}$ 之间。尤其值得

关注的是，2021年7月以后销售的自卸汽车并未达到新通过的第三阶段标准。

表5显示了自卸汽车（25吨 < GVW ≤ 31吨）整车企业的二氧化碳排放量信息。东风汽车生产的自卸汽车的二氧化碳排放量比平均水平低5.2%；较小的整车企业（即“其他”）比平均值低了8%。



注：图中红点表示每年的平均二氧化碳排放量；根据中国第三阶段重型车燃料消耗量测试标准，所有排放量数值均由燃料消耗量转换而来，转换系数为 $2600g\ CO_2 / (升柴油 * 100\ km)$ 。黄色实线表示针对所有已获得型式批准车型的标准限值，而黄色虚线表示仅针对新注册车型的“过渡性”要求。具体而言，“202106-”和“202107+”分别表示2021年上半年（1月至6月）和下半年（7月至12月）。

图 13 2012-2021年间自卸汽车的二氧化碳排放量

表5 2021年城际客车整车企业的二氧化碳排放量

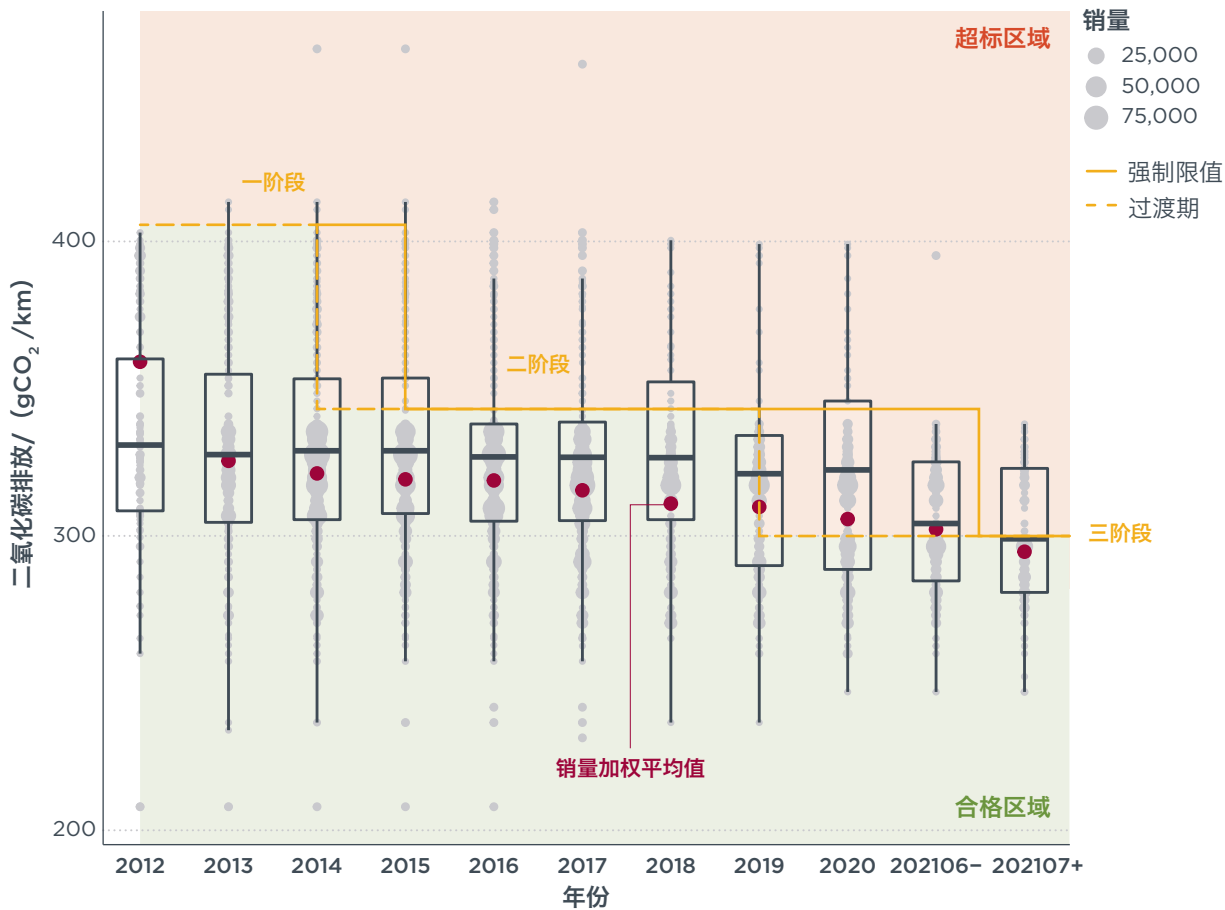
整车企业	2021年平均二氧化碳排放量(g/km)	均值偏差(%)	销量(%)
陕西汽车	1157.0	8.9	17.0
东风汽车	1007.3	-5.2	15.2
中国重汽	1041.9	-1.9	14.9
上汽红岩	1121.0	5.6	14.0
一汽集团	1097.5	3.3	13.0
福田汽车	1026.6	-3.3	8.6
其他	977.5	-8.0	17.3

中型及重型载货汽车

2012 年实施的第一阶段重型车油耗标准首次将载货汽车纳入监管范畴。图 14和图 15分别展示了中型和重型载货汽车的二氧化碳排放量趋势。针对中型载货汽车（3.5吨 $<$ GVW \leq 4.5 吨）设定的燃料消耗量限值分别为 15.5 L/100km（403 gCO₂/km）（第一阶段）、13 L/100km（338 gCO₂/km）（第二阶段）和 11.5 L/100km（299 gCO₂/km）（第三阶段）；针对重型载货汽车（16 吨 $<$ GVW \leq 20 吨）设定的燃料消耗量限值分别为 35 L/100km（910 gCO₂/km）（第一阶段）、31.5 L/100km（819 gCO₂/km）（第二阶段）和 27 L/100km（702 gCO₂/km）（第三阶段）。

与其他货车类别一样，2021 年中型和重型载货汽车的二氧化碳排放量相对于 2012 年的改善非常有限。在此期间，中型载货汽车的二氧化碳排放量下降了约 10%，但重型载货汽车几乎没有改善。具体而言，2016-2018 年间仅不足 1% 的新中型载货汽车未达到第二阶段标准，而临近第三阶段标准正式实施时，大部分（2021年上半年约50%，2021年下半年约85%）新生产的中型载货汽车尚未能符合新标准；类似地，重型载货汽车在 2021 年下半年未能满足新标准的车辆占比达到约 75%，其车队二氧化碳排放量加权平均值相比六月份之前降低了约 5%。总的来说，新注册车辆的改善效果不如新标准的预期，这也意味着应该考虑采取更多手段来提升载货汽车的燃油效率。

表6和表7列出了2021年中型和重型载货汽车整车企业的二氧化碳排放量信息。对于中型载货汽车，江铃汽车生产的车型的二氧化碳排放最低。对于重型载货汽车，头部企业东风汽车生产的车型的二氧化碳排放量比平均水平低3.3%。

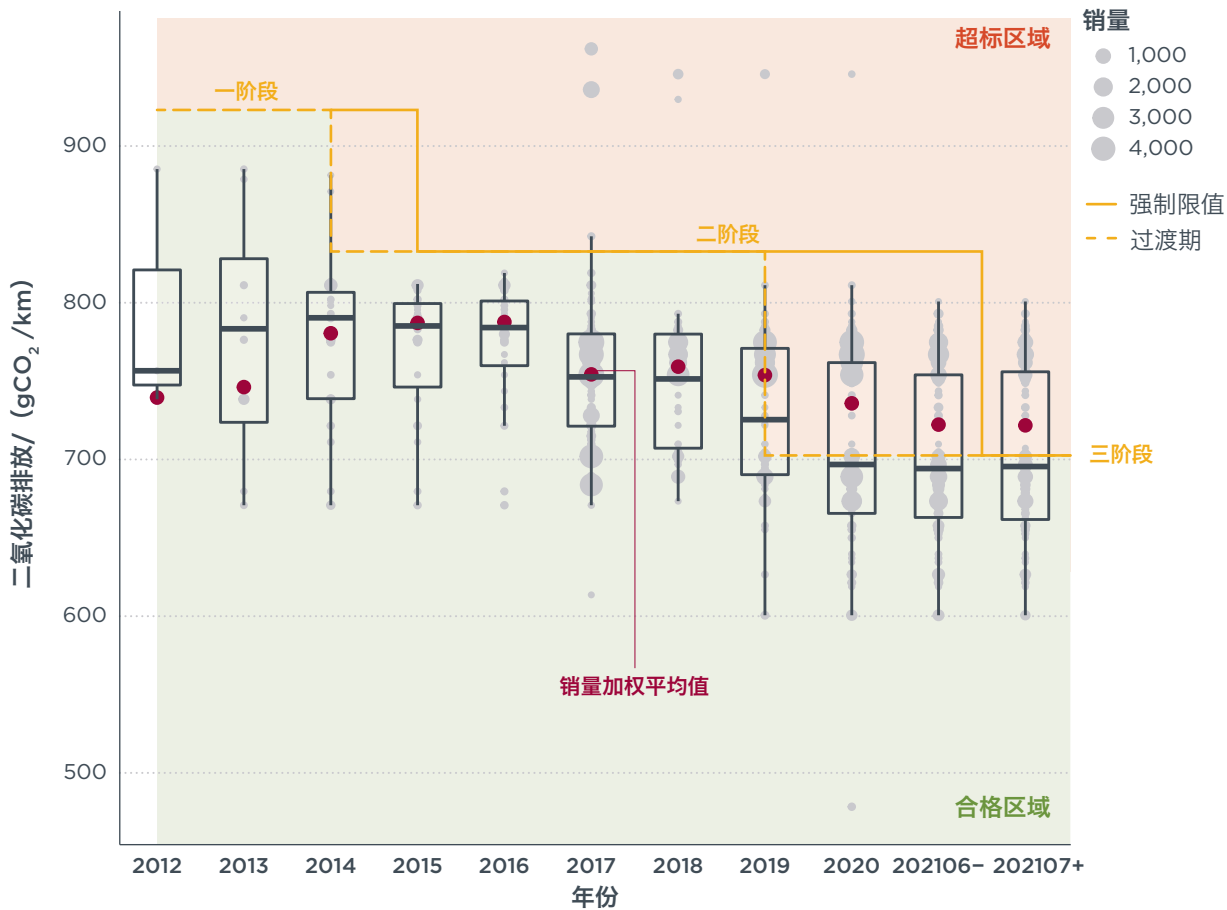


注：图中红点表示每年的平均二氧化碳排放量；根据中国第三阶段重型车燃料消耗量测试标准，所有排放量数值均由燃料消耗量转换而来，转换系数为 $2600g\ CO_2/(升柴油 * 100\ km)$ 。黄色实线表示针对所有已获得型式批准车型的标准限值，而黄色虚线表示仅针对新注册车型的“过渡性”要求。具体而言，“202106-”和“202107+”分别表示2021年上半年（1月至6月）和下半年（7月至12月）。

图 14 2012-2021年间中型载货汽车整车企业的二氧化碳排放量

表6 2021年中型载货汽车整车企业的二氧化碳排放量

整车企业	2021年平均二氧化碳排放量(g/km)	均值偏差(%)	销量(%)
一汽集团	301.8	0.6	7.8
福田汽车	299.2	-0.3	22.6
江汽集团	305.2	1.7	20.4
江铃汽车	284.8	-5.1	12.4
中国重汽	294.0	-2.0	9.9
其他	305.7	1.9	26.8



注：图中红点表示每年的平均二氧化碳排放量；根据中国第三阶段重型车燃料消耗量测试标准，所有排放量数值均由燃料消耗量转换而来，转换系数为 2600g CO₂/ (升柴油 * 100 km)。黄色实线表示针对所有已获得型式批准车型的标准限值，而黄色虚线表示仅针对新注册车型的“过渡性”要求。具体而言，“202106-”和“202107+”分别表示 2021 年上半年（1 月至 6 月）和下半年（7 月至 12 月）。

图 15 2012-2021年间重型载货汽车整车企业的二氧化碳排放量

表7 2021年重型载货汽车整车企业的二氧化碳排放量

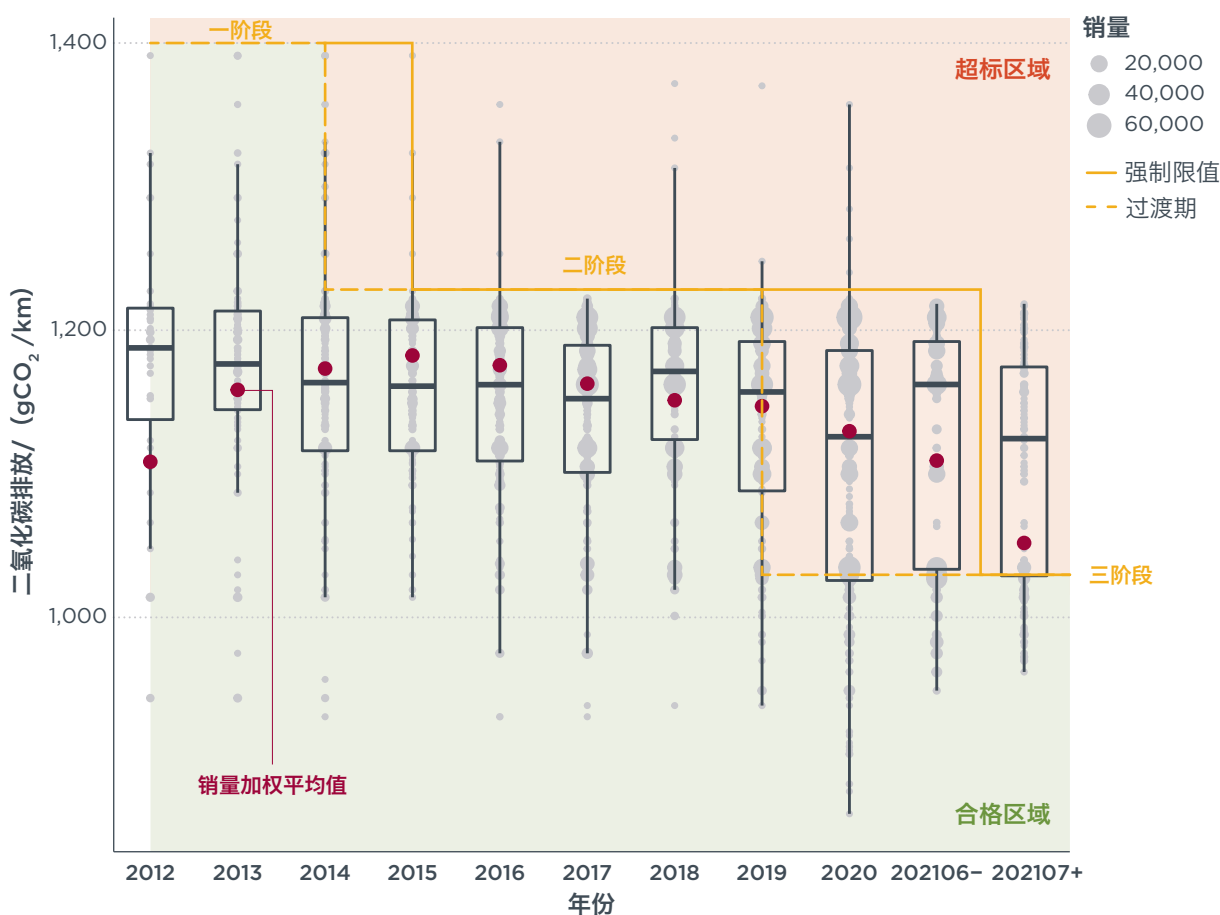
整车企业	2021年平均二氧化碳排放量(g/km)	均值偏差(%)	销量(%)
东风汽车	697.8	-3.3	29.9
一汽集团	740.0	2.4	29.1
福田汽车	708.3	-1.9	14.1
江汽集团	743.9	3.0	11.7
中国重汽	711.1	-1.5	7.2
其他	750.5	3.9	7.6

半挂牵引车

近十年来，半挂牵引车已成为燃料消耗量法规最关注的车型之一。第一阶段油耗标准首次将半挂牵引车纳入监管范畴，并在后续阶段实施了更严格的限值要求。具体而言，针对半挂牵引车（46 吨 < GCW ≤ 49 吨）设定的燃料消耗量限值分别为 54 L/100km（第一阶段）、47 L/100km（第二阶段）和 40 L/100km（第三阶段），这相当于 1404 gCO₂/km、1222 gCO₂/km 和 1040 gCO₂/km 的二氧化碳排放量（图 16）。自第一阶段和第二阶段标准实施以来，绝大多数（98%）新注册的半挂牵引车符合这两项标准要求，仅有 2% 的车型超过了第二阶段标准限值。然而，2021年的平均燃料消耗量大幅超出第三阶段标准限值。根据车辆注册

数据显示，尽管2021年下半年销售的半挂牵引车的平均排放量比上半年降低了10%，但是其中仍有约50%的车型超过了第三阶段标准限值。这意味着，与自卸汽车类似，更严格的新油耗标准可能没能实现半挂牵引车的二氧化碳排放降低。

表8说明了2021年半挂牵引车整车企业的二氧化碳信息。东风汽车、中国重汽和陕西汽车生产的车型二氧化碳排放量低于平均水平。具体来说，东风汽车生产的半挂牵引车二氧化碳排放量比平均水平低4.6%。



注：图中红点表示每年的平均二氧化碳排放量；根据中国第三阶段重型车燃料消耗量测试标准，所有排放量数值均由燃料消耗量转换而来，转换系数为 2600g CO₂/ (升柴油 * 100 km)。黄色实线表示针对所有已获得型式批准车型的标准限值，而黄色虚线表示仅针对新注册车型的“过渡性”要求。具体而言，“202106-”和“202107+”分别表示 2021 年上半年（1月至 6 月）和下半年（7 月至 12 月）。

图 16 2012-2021年间半挂牵引车的二氧化碳排放量

表8 2021年半挂牵引车整车企业的二氧化碳信息

整车企业	2021年平均二氧化碳排放量(g/km)	均值偏差(%)	销量(%)
一汽集团	1151.5	2.3	28.2
中国重汽	1122.7	-0.2	19.3
东风汽车	1073.5	-4.6	15.4
陕西汽车	1120.4	-0.5	13.9
福田汽车	1153.2	2.5	12.8
其他	1109.1	-1.45	10.4

柴油发动机的能效技术发展趋势

过去十年间，重型车能效技术取得了长足进步。由于在车辆申请型式批准时发动机与车辆之间存在一定的信息差，因此本章节将基于五个发动机排量等级进行分析，即 $\leq 3L$ ，3-6L，6-9L，9-12L 和 $\geq 12L$ 。由于数据的可获得性，本章节发动机数据截止到2020年。

变速器

重型车常用的变速器有四种，即手动变速器（MT）、自动变速器（AT）、手自一体变速器（AMT）和无级变速器（CVT）。手动变速器仍然是重型车商最常用的传统变速器类型，该技术需要驾驶员在货车以不同速度行驶时控制换挡。自动变速器是一种升级的变速器技术，可通过算法自动换挡。其最大的优势在于，驾驶员无需将注意力时刻放在换挡上，更有利于行车安全。手自一体变速器是一种兼具手动和自动变速器功能的混合技术，通常基于传统的手动变速器，但使用自动驱动装置来操作离合器。无级变速器通过两个皮带轮和一条皮带或链条提供无限制传动比和无缝换挡，因此无级变速器通常比其他类型变速器更省油（Hearst Autos Research, 2020）。

图17展示了各种变速器技术的市场渗透率。结果表明，2012-2020年期间手动变速器是整个市场上横跨各个发动机排量等级（尤其是对于大多数发动机排量小于12L的轻型和中型载货汽车）的绝对主流变速器。虽然自动变速器和手自一体变速器等替代变速器技术在该排量车型上的应用略有增长，但其市场份额仍不超过10%。对于发动机排量大于12L的重型载货汽车，2012年自动变速器和手自一体变速器技术的市场份额达到27%，但到2020年下降到18%。无级变速器只在轻型和中型卡车中出现，这主要是因为它往往无法满足重型载货汽车的正常动力需求，与手动变速器相比，它的维护成本也很高，且耐用性较差，故无级变速器在中国的大质量段车型上应用十分困难(Hearst Autos Research, 2020)。

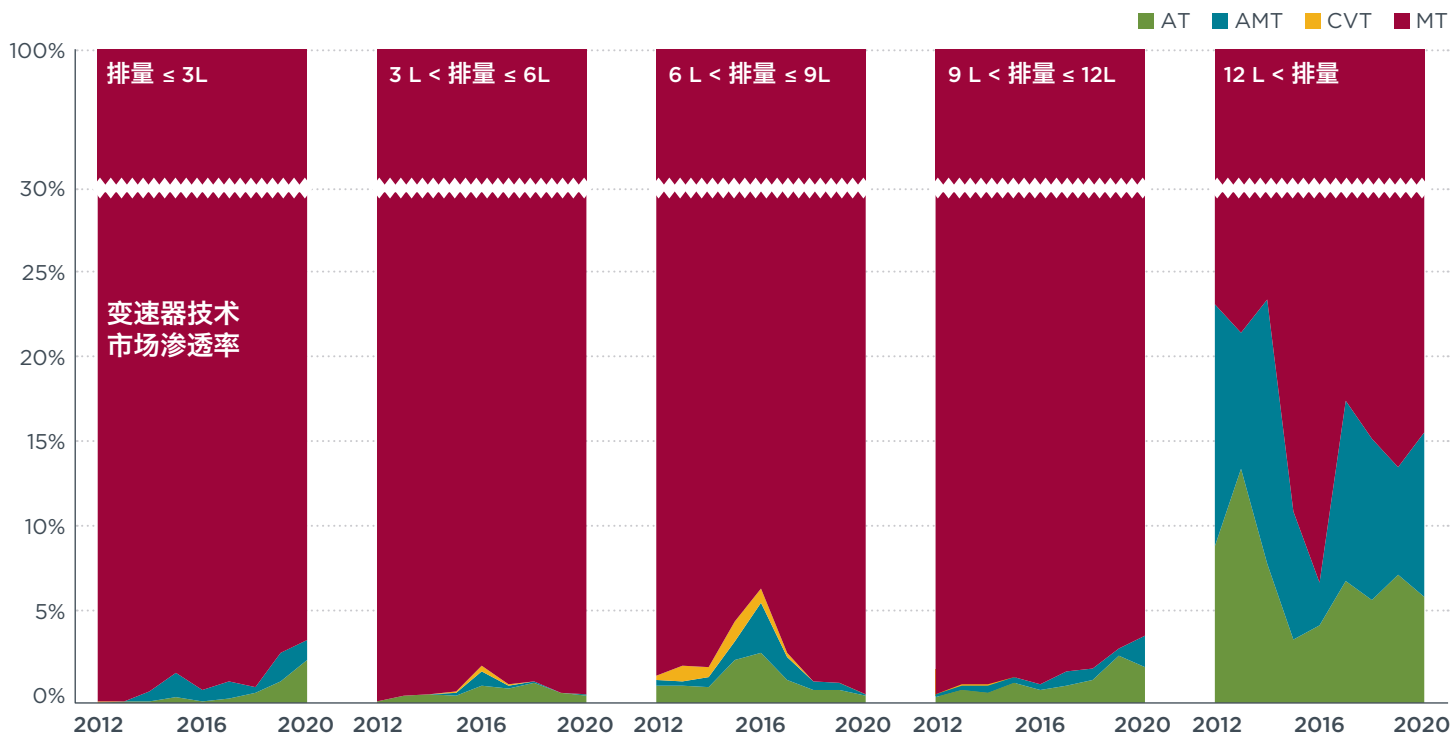


图 17 2012-2020年间各种变速器技术的市场渗透率

柴油喷射技术

喷油系统设计在很大程度上决定了柴油发动机的性能（燃油效率和排放量）。柴油喷射技术用于向发动机气缸供应燃料，柴油在气缸内燃烧并产生动力。高压共轨喷油是目前中国应用于柴油发动机和重型车的一种主流柴油喷射技术。高压共轨喷油通过提高燃料液滴表面的气化作用，使氧气与气化燃料的燃烧更充分，以提高燃油效率，降低污染物排放水平。

图 18 显示了过去十年间高压共轨喷油技术的市场渗透率发展情况，可以发现该技术在每个发动机排量级别的市场份额都不断增长。对于发动机排量小于 3L 的轻型车辆，高压共轨喷油技术市场份额不断增加，2020 年增长到 99% 左右。对于更大排量的发动机，该技术的主导地位相对较低，如大于 12L 的发动机中，高压共轨喷油技术市场占比为 62%，而剩余的 38% 采用了进气歧管和泵喷嘴等其他喷射技术。不过，近年来大排量发动机的高压共轨喷油技术市场占比也在持续攀升。由于高压共轨喷油技术在提高燃油效率的同时还可以提高车辆的扭矩等性能，因此有理由认为，这种技术在过去十年中有助于提高商用车队的燃烧效率和能量密度。不过，高压共轨喷油技术的关键组件（如喷油嘴、滤油器等）对于油品质量非常敏感，因此该技术的推广也对国内市场油品的提升提出了更高的要求。

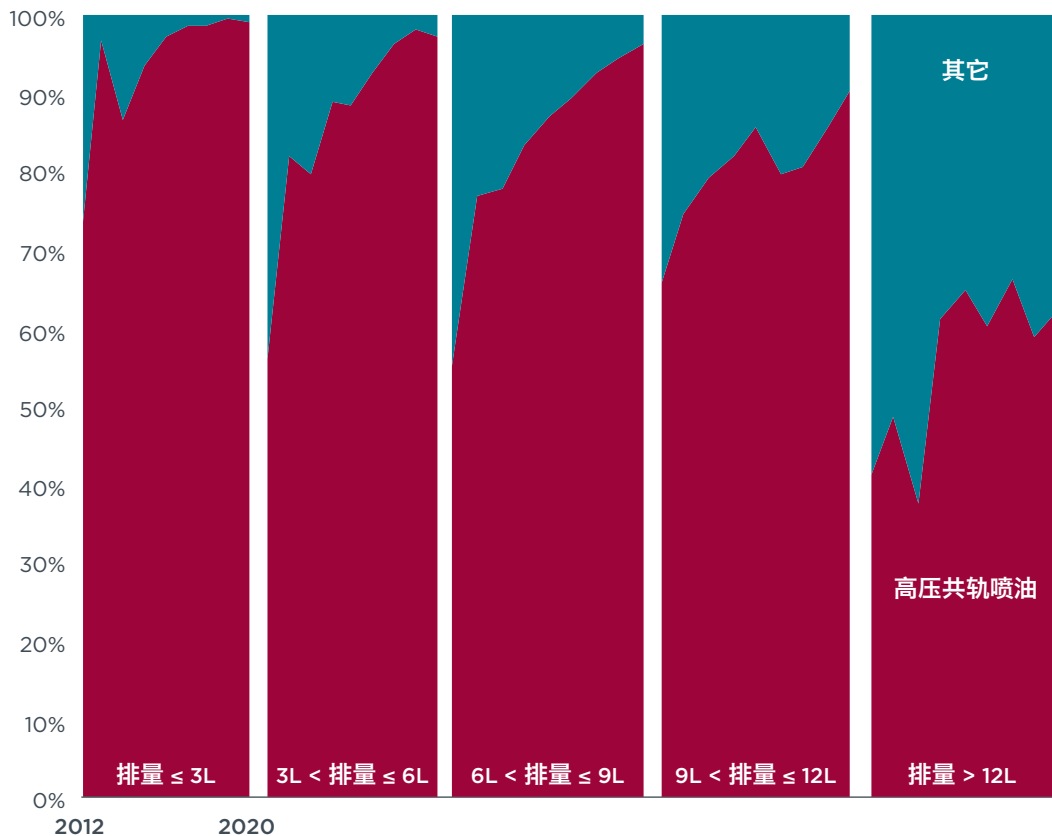


图 18 2012-2020年间不同柴油喷射技术的市场渗透率

污染物排放控制技术

21 世纪初，中国出台了国一排放标准用于控制汽车污染物排放，此后二十年商用车型采用了更先进的排放后处理技术来应对日益严格的排放法规。国四期间（即2013-2017年），应用最广泛的后处理排放控制技术包括选择性催化还原系统（SCR）、废气再循环系统（EGR）和柴油氧化催化器（DOC）。SCR 是中国重型车上最常用的一种技术，该技术通过注入汽车级尿素或氨进行转化来减少 NO_x 排放量，不过催化还原过程中会产生氮气和少许二氧化碳（Majewski, 2005）。DOC 是一种通过催化反应将一氧化碳、气相碳氢化合物和其他柴油颗粒物转化为无害产物的技术。此外，DOC 能够将一氧化氮氧化成二氧化氮，这有助于提升柴油颗粒捕集器和用于 NO_x 还原的 SCR 催化器的性能（Majewski, 2021）。EGR 是另一种用于减少氮氧化物排放的技术，通过再循环流出的空气，然后稀释进气流中的氧气浓度以提高气缸的燃烧效率（Jääskeläinen & Magdi K., 2020）。

柴油颗粒捕集器（DPF）因具有较高的颗粒物去除效率而在国五期间大力推广。DPF 是一种专门通过物理手段从尾气排放中捕获和去除柴油颗粒的技术。经过多年研发和更新换代，柴油颗粒捕集材料现已能够达到90% 以上的过滤效率（Majewski, 2020）。DPF 于 2016 年首次装车应用，自此便成为排放控制技术组合中不可或缺的一种高效技术。2020年，DPF 在后处理技术组合中的占比高达70%。随着国家对车辆污染物排放限值的日

益加严，单一的后处理减排技术日益无法满足需求，因此由一系列后处理技术组成的技术组合在近些年来受到越来越多的关注。

图 19 展示了 2012-2020 年间主流后处理技术组合的市场格局。具体而言，SCR 和 EGR 在此期间“引领”了两个主流技术组合。SCR（蓝色）组合在早期占据市场主导地位，但 EGR（红色）组合自 2019 年国六实施后开始崭露头角。在 2012 年，仍有 44% 的货车未配备任何后处理技术，不过从 2013 年开始，由于国四生效以后实施了更严格的排放控制要求，排放后处理技术逐渐成为新车型必不可少的配置。如今，在国六实施后市场出现了更高效的技术组合，如 2020 年 EGR+SCR+DOC+ASC+DPF 组合的市场占有率达到 48%，这一技术组合的出现也体现了政策对于商用车型日益严格的排放控制要求，相应地，整车企业也必须开发新型、廉价、高效的技术组合用以应对今后的监管需求。

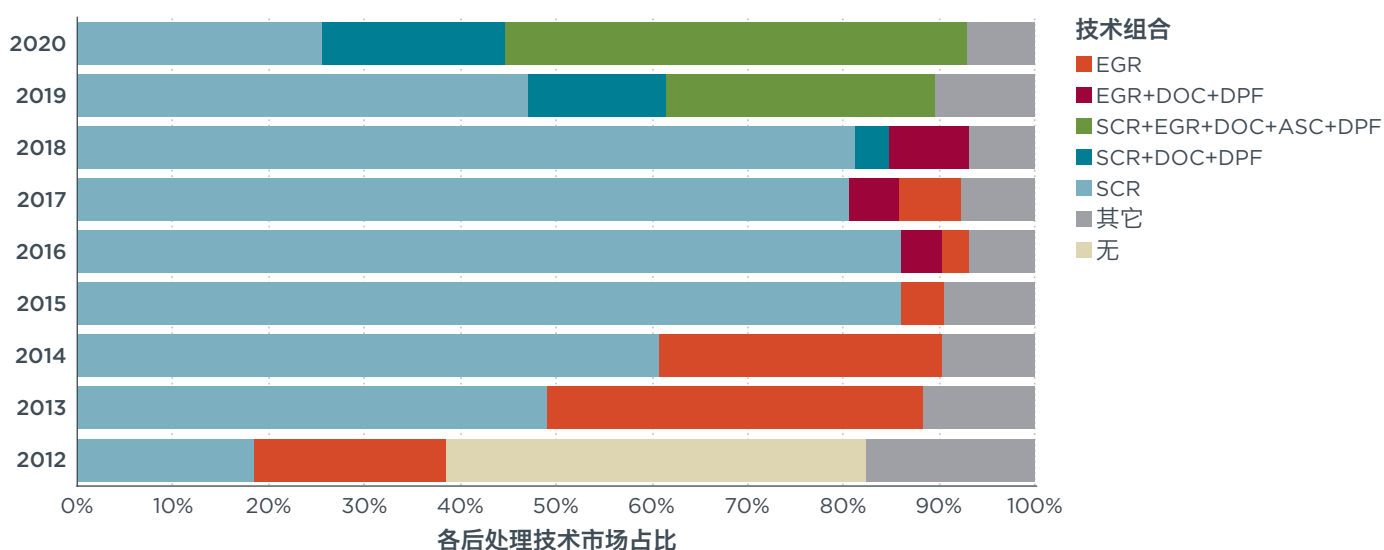


图 19 2012-2020 年间重型车采用的后处理技术

柴油发动机二氧化碳与氮氧化物排放变化趋势

图 20 显示了 2012-2021 年间重型车柴油发动机的二氧化碳与氮氧化物排放变化情况。在图中每一个点均代表了一款有代表性的重型车柴油发动机，涵盖了市场上主流的排量范围。过去十年间，中国的污染物排放标准日趋严格。自国六标准正式实施起中国采用 WHTC 工况循环对重型车柴油机的氮氧化物排放进行测试，并设定了 0.46g/kWh 的限制标准。不过，中国尚未从发动机层面对二氧化碳排放设定具体的限制标准，从而导致二氧化碳的排放水平并没有随着污染物排放限值标准的日趋严格而有明显下降（图 21）。根据过去十年的柴油机二氧化碳排放趋势，各年度柴油机二氧化碳平均排放基本保持在 680-690g/kWh 左右。

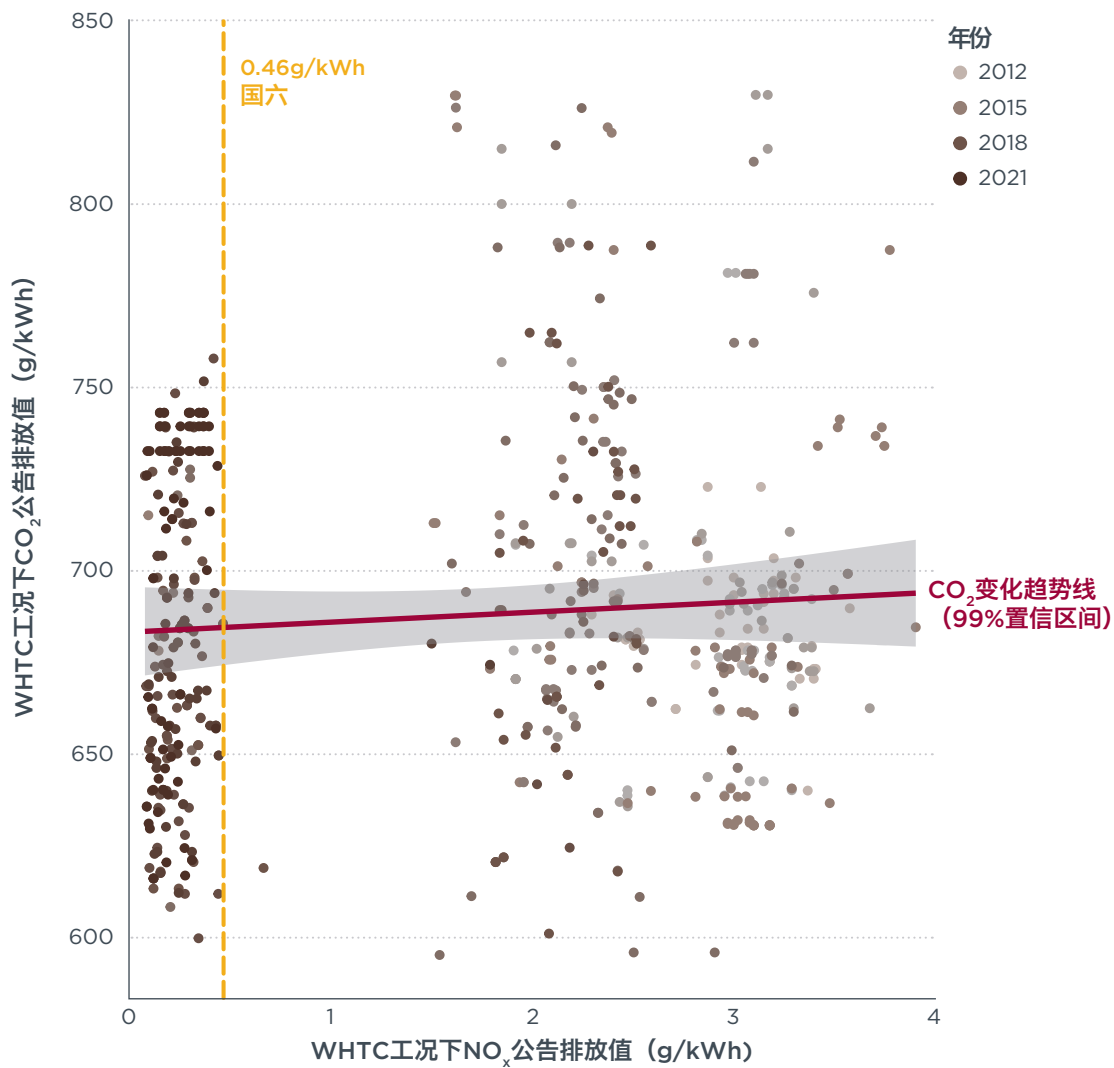


图 20 2012-2021年间柴油发动机CO₂和NO_x公告排放值的变化情况

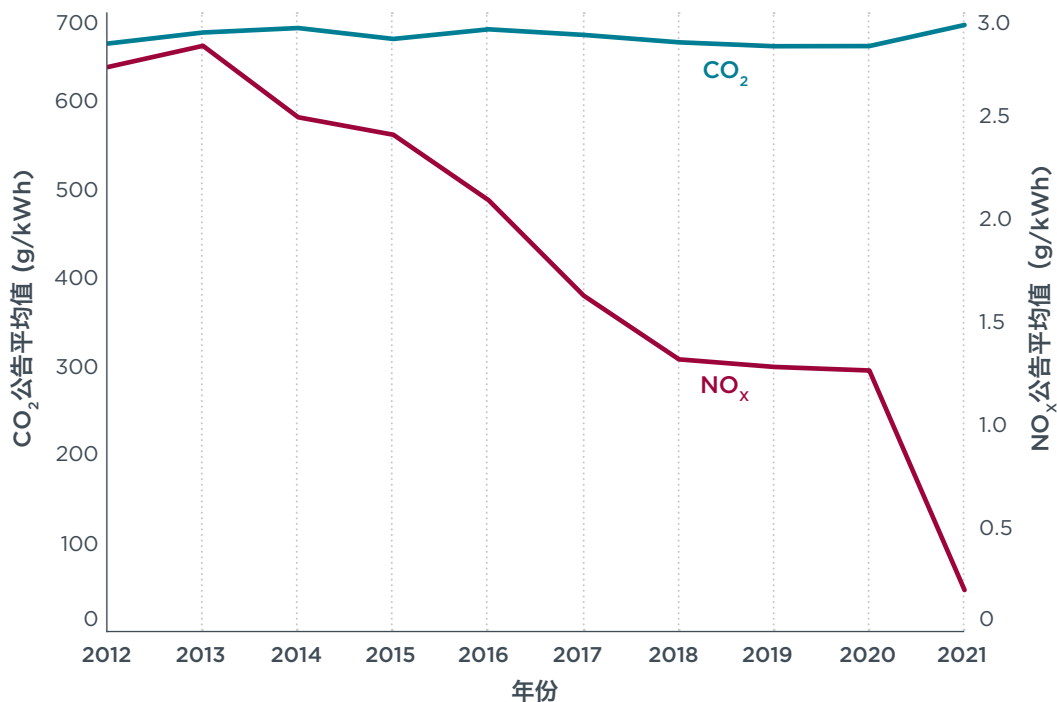


图 21 2012-2021年柴油发动机CO₂和NO_x公告平均值

政策建议

本研究回顾了中国传统内燃机重型车市场在过去十年间的发展历程。多年来，中国不断加大对重型车行业的行政监管（其中包括排放控制和降低燃料消耗量）力度，并且持续更新的排放标准大大推动了这一进程。然而，我们也发现重型车行业在提升清洁性和技术先进性方面仍面临诸多挑战。根据我们的研究结果，我们提出以下政策建议：

1. 将工程类专用车也整体纳入下一阶段的油耗标准，以便充分覆盖高能耗车辆类别。工程类专用车是指具有特定功能（如环卫、工程等）的车辆。目前我国重点针对五类重型车实施了燃料消耗量限值管理，即载货汽车、自卸汽车、半挂牵引车、城市客车及城际客车，而工程类专用车则尚未被纳入。工程类专用车2021年占总体重型车市场份额约10%，因此有必要尽快将此类车辆的燃油消耗及CO₂排放纳入监管体系。另一方面，部分专用车与其它车型之间的范围界限仍然模糊，这为规避油耗监管提供了一定的空间。
2. 应制定更全面综合的污染物和温室气体排放标准以指导重型车的发展。目前，中国还没有从发动机和车辆层面控制温室气体排放。从目前的油耗标准转向温室气体排放标准，将涵盖如一氧化二氮、甲烷等更多的温室气体，这有利于公众了解重型车的实际温室气体排放情况。此外，一个全面的温室气体排放标准将为重型车行业通过技术组合实现污染物和温室气体协同减排提供长期的指导方向。中国在2021年启动了全国碳交易市场，并正在纳入更多行业。完善针对重型车的温室气体排放法规也有助于为未来道路交通行业纳入碳交易市场奠定坚实的基础。

3. 重型车的电动化转型是重中之重，但在当前阶段，清洁柴油发动机技术的发展对重型车低碳化转型仍有积极作用。在本研究中，我们发现中国重型车行业已经在通过利用更加先进的车辆技术（如共轨喷油）来提高燃油效率和降低污染物排放。推广清洁柴油技术可以使重型车更为顺利且经济地向电动化转型。此外，中国曾采用双积分的手段成功推广了电动乘用车的普及，对于重型车，我们建议在未来的商用车积分政策中能恰当地激励为提升发动机燃油效率和性能所做出的努力。

参考文献

- ACEA. (2022). *Commercial vehicle registrations: +9.6% in 2021; -8.4% in December*. ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. <https://www.acea.auto/cv-registrations/commercial-vehicle-registrations-9-6-in-2021-8-4-in-december/>.
- cvworld.cn. (2022). 重卡139.5万辆收官! 轻卡211万辆 中卡、轻客领涨 2021商用车销量数据. <http://www.cvworld.cn/news/Onedata/220112/197487.html>
- Dan Meszler. (2019). *Heavy-duty vehicles in China: Cost-effectiveness of fuel-efficiency and CO₂ reduction technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025-2030 timeframe*. 65.
- IEA. (2021). *An energy sector roadmap to carbon neutrality in China*. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>
- MEE. (2020). *China Mobile Source Environmental Management Annual Report 2020*. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202008/P020200811521365906550.pdf>
- MEE. (2021). *China Mobile Source Environmental Management Annual Report 2021*. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202109/W020210910400449015882.pdf>
- MEE, MIIT, & General Administration of Customs. (2021). 关于实施重型柴油车国六排放标准有关事宜的公告. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/18/content_5608114.htm
- Meszler, D., Delgado, O., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2018). *EU HDVs: Cost effectiveness of fuel efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025-2030 timeframe*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/eu-hdvs-cost-effectiveness-of-fuel-efficiency-technologies-for-long-haul-tractor-trailers-in-the-2025-2030-timeframe/>
- Statista. (2022). *U.S. car and truck sales 2011-2021*. <https://www.statista.com/statistics/199981/us-car-and-truck-sales-since-1951/>
- Xinhua News. (2021). 韩正主持碳达峰碳中和工作领导小组第一次全体会议并讲话. http://www.gov.cn/xinwen/2021-05/27/content_5613268.htm



Please share your valuable insights about NDC-TIA knowledge product(s) by taking this short survey: <https://tinyurl.com/ndctia-survey>