2021年10月

基于国际对标的海南省机动车大气污染物排放控制政策建议

崔洪阳、何卉
国际清洁交通委员会

黄志辉、王军方
中国环境科学研究院机动车排污监控中心

icct
国际清洁交通委员会

致谢

本研究是在洛克菲勒兄弟基金会和能源基金会（中国）的慷慨资助下、在海南省生态环境厅的大力支持下完成的。我们感谢Michael Walsh、Felipe Rodríguez、郝春晓、陈健华、徐文帅等专家对报告初稿进行的审阅及提出的建设性意见。报告中可能存在的疏漏和不完善之处均由作者负责。

国际清洁交通委员会简介

国际清洁交通委员会（ICCT）是一家独立的非盈利研究机构，为世界各地的环境管理部门提供专业客观的科学研究和技术分析。ICCT的目标是大幅减少陆运、海运、空运等各类交通源的大气污染物和温室气体排放，从而改善空气质量、保护公众健康、减缓气候变化。

机动车排污监控中心简介

中国环境科学研究院机动车排污监控中心（VECC）是中国机动车环保管理的唯一技术支持单位，为生态环境部提供移动源全过程排放监控技术和管理政策的支持，承担生态环境部新生产移动源排放的达标管理与信息公开、环保生产一致性检查和在用符合性检查等工作。

International Council on Clean Transportation
1500 K Street NW, Suite 650
Washington, DC 20005

communications@theicct.org | www.theicct.org | @TheICCT

© 2021 International Council on Clean Transportation

执行摘要

中国最南端的海南省正在建设成为全球最大的自由贸易港的过程之中。这一热带海岛省份将生态环境改善作为自由贸易港建设的重中之重，计划在2035年将生态环境质量提升至世界领先水平，助力吸引投资、商贸、人才和游客。

在空气质量方面，代表世界领先水平的是世界卫生组织（WHO）的指导值。 尽管海南省的空气质量已经是全国最优，但要实现WHO的指导值还有很长的路要走。2019年，海南省的细颗粒物（$PM_{2.5}$）年均浓度为16微克/立方米，比WHO指导值（5微克/立方米）高出220%；同年，海南省的臭氧日最大8小时平均浓度的第90百分位数为118微克/立方米，较上一年高出10%，较WHO针对日最大8小时平均浓度的指导值（100微克/立方米）高出18%。

机动车是海南省$PM_{2.5}$污染的首要来源（占比30%）和臭氧污染的重要来源，是海南省实现其空气质量目标的需要破除的最大障碍。在这一背景下，本报告通过对标国际最佳实践的方式为海南省未来十五年的机动车大气污染物排放控制提出了政策建议。我们的核心研究结论和政策建议如表ES-1所示。

表ES-1 政策建议一览表

政策类型		对现有政策的评估	政策建议
电动汽车推广	轻型车		· 利用更全面、更有力、更具创新性的政策手段助力实现全面电动化目标
	重型车		· 为重型货车制定明确的电动化路线图 · 采用兼顾供给和需求两侧的全面的政策手段加速电动重型货车的推广
	电网清洁化		· 大幅增加发电量中可再生能源电的占比，持续提升电网的清洁化程度
新车排放标准及合规监管	轻型车		· 有效地实施轻型车国六排放标准 · 密切关注国七和欧七排放标准的制定 · 提前实施国七排放标准，助力推动轻型车全面电动化目标的如期实现
	重型车		· 有效地实施重型车国六排放标准 · 密切关注国七和国七排放标准的制定 · 提前实施国七排放标准，推动重型车向超低NOx和零排放转型
	合规监管		· 充分利用包括遥感监测在内的多种新型技术手段来提高排放标准合规监管的有效性
在用车减排	在用车排放检测		· 在I/M检测中加强对OBD数据的应用 · 采用包括遥感监测数据在内的多种排放检测数据来补充和交叉验证I/M检测数据
	在用车队法规		· 出台在用车队法规，与经济激励相结合，推动在用车队在能够替换成零排放汽车的情况下替换为零排放汽车，在不能替换成零排放汽车的情况下通过改造、发动机更换、淘汰更新等方式达到新车排放标准
	怠速法规		· 出台怠速法规以减少在用车的怠速排放
油品质量标准及合规监管	车用汽油		· 有效地实施车用汽油国六标准 · 进一步加严汽油RVP限值
	车用柴油		· 有效地实施车用柴油国六标准
	合规监管		· 建立一套完备的覆盖整个燃油供应链的认证、数据报告、抽查、和责任追踪制度 · 增加油品质量抽查的频次和样本数 · 对不合规企业进行有震慑力的处罚 · 强化部门间的分工协作，环境部门直接参与到油品质量的合规监管，并负责针对与排放相关的参数进行油品质量抽查
低/零排放区			· 基于全面的可行性研究制定低/零排放区的划定方案 · 以先试点后拓展的方式分阶段实施低/零排放区

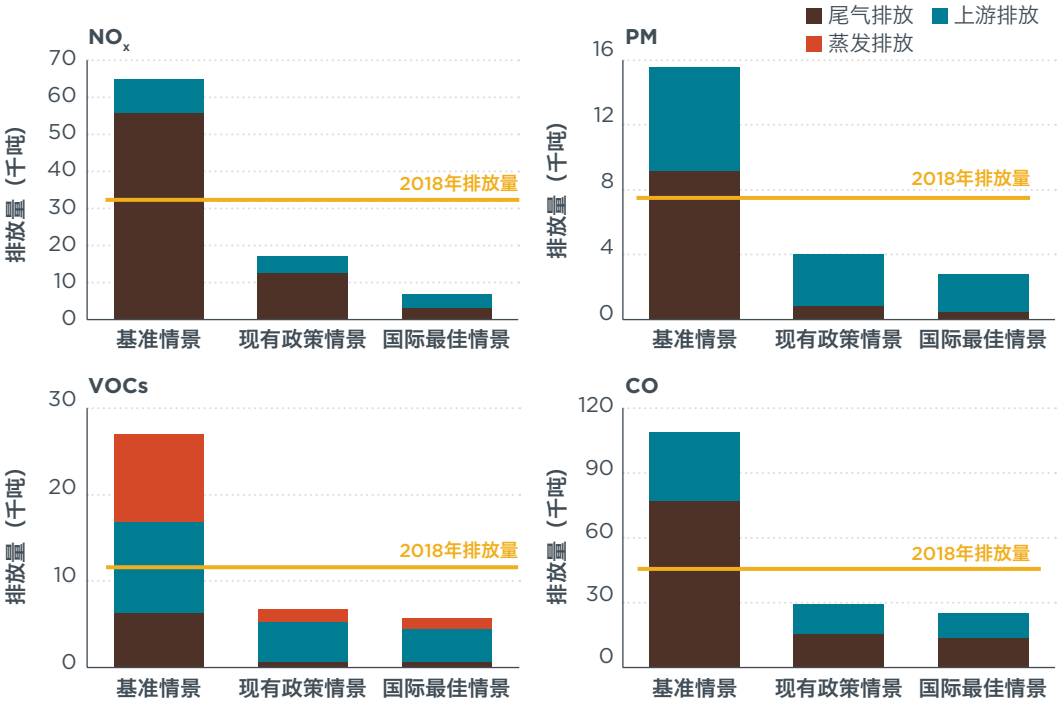
蓝色：与国际最佳实践水平相当
黄色：与国际最佳实践相比在严格程度或者全面性上有待提升
棕色：缺失此类政策

本报告还模拟了海南省将以上政策建议落地后能够获得的大气污染物减排收益。如图ES-1所示，我们分析了三个政策情景，包括基准情景、现有政策情景、和国际最佳情景。基准情景下，海南省在基准年（2018年）后不再实施新的政策措施；现有政策

情景反映的是海南省截至2020年底已经采纳并将在2035年之前实施的政策措施；而国际最佳情景反映的则是本研究建议海南省在2035年之前实施的更加严格的政策措施。

在基准情景下，海南省机动车的氮氧化物（NOx）、颗粒物（PM）、挥发性有机化合物（VOCs）和一氧化碳（CO）排放量将在未来十五年内持续增长，并在2035年达到2018年的两倍。这主要是因为海南省在建设自由贸易港的过程中，客运和货运交通量都将显著增长。

如果海南省能够将现有的政策措施全部落实到位，尤其是按计划完成其所提出的电动汽车推广目标和电网清洁化目标，那么海南省2035年的NOx、PM、VOCs和CO排放量将分别较基准情景下降74%、74%、75%和73%。如果在此基础上，海南省还能够将本研究基于国际最佳实践所提出的一揽子政策建议付诸实践，那么就能够将以上四类污染物的排放量进一步降低57%、29%、14%和14%。需要说明的是，受数据可获得性和政策设计的不确定性的影响，本研究为海南省提出的政策建议中有一部分没有纳入国际最佳情景，因此以上关于污染物减排收益的模拟结果是保守的。



图ES-1 三个政策情景下海南省2035年的机动车大气污染物排放模拟结果

目录

执行摘要 i

英文缩写 iv

引言 1

政策对标 3

电动汽车推广 3

轻型车电动化 3

重型车电动化 4

电网清洁化 5

新车排放标准及合规监管 5

轻型车排放标准 6

重型车排放标准 8

排放标准的合规监管 9

在用车减排 10

在用车排放检测 10

在用车队法规 11

怠速法规 11

油品质量标准及合规监管 12

车用汽油标准 12

车用柴油标准 13

油品质量标准的合规监管 13

低/零排放区 15

政策建议小节 16

减排潜力评估 18

政策情景设计 18

评估方法学 18

评估结果 19

结语 21

参考文献 22

英文缩写

APS	辅助动力系统
BEV	纯电动汽车
CARB	加州空气资源局
CO	一氧化碳
DPF	柴油颗粒物捕集器
EPA	美国环保署
FCEV	燃料电池汽车
GPF	汽油颗粒物捕集器
ICCT	国际清洁交通委员会
MIL	故障指示灯
NH_3	氨气
NMHC	非甲烷碳氢
NMOG	非甲烷有机气体
NO_x	氮氧化物
N_2O	一氧化二氮
OBD	车载自动诊断系统
ORVR	车载油气回收系统
PEMS	车载排放测试系统
PHEV	插电式混合动力汽车
PM	颗粒物
PN	颗粒数
THC	总碳氢
U.S.	美国
VECC	机动车排污监控中心
VOCs	挥发性有机化合物
WHO	世界卫生组织

引言

海南是中国最南端的热带海岛省份，面积与荷兰相似，人口900余万。一直以来，海南都以中国最受欢迎的沙滩度假圣地闻名于世。2018年之后，海南又被中央赋予了新的战略定位，一是中国面向太平洋和印度洋的重要门户，二是中国经济开放和绿色发展的新名片（中共中央 国务院，2018）。由于海南毗邻东盟成员国，因此也是中国整合东南亚经济板块的前沿阵地及海上丝绸之路的重要节点（图 1）。

图 1 海南的基本情况和战略位置

2020年6月，中央政府发布了《海南自由贸易港建设总体方案》，计划将海南岛全岛建设成为自由贸易港（中共中央 国务院，2020）。海南自贸港有两个特殊之处，一是覆盖的地域面积全球最大，远超现存的香港、新加坡等自贸港；二是将生态环境放在最高的优先级，在自贸港建设发展过程中，其他任何问题都要为生态环境让路（周頔等，2021）。海南省计划在2035年将生态环境质量提升至世界领先水平，为自贸港建设与发展吸引投资、商贸、人才和游客。

在空气质量方面，代表世界领先水平的是世界卫生组织（WHO）的指导值。尽管海南省的空气质量已经是全国最优，但要实现WHO的指导值还有很长的路要走。2019年，海南省的细颗粒物（$PM_{2.5}$）年均浓度为16微克/立方米，比WHO指导值（5微克/立方米）高出220%。作为一个热带海岛省份，海南全年高温，因此也在臭氧污染控制方面面临突出挑战。2019年，海南省的臭氧日最大8小时平均浓度的第90百分位数为118微克/立方米，较上一年高出10%，较WHO针对日最大8小时平均浓度的指导值（100微克/立方米）高出18%（海南省生态环境厅，2020；WHO，2021）。

基于最新的官方源解析结果，机动车是海南省$PM_{2.5}$污染的首要来源，贡献率高达30%（孙秀英等，2020）。同时，由于机动车是臭氧污染的两种气态前体物 - 氮氧化物（NOx）和挥发性有机化合物（VOCs） - 的重要来源，因此也在臭氧污染防治方面

起到关键作用。海南的环境政策制定者明确指出：机动车是海南省实现其空气质量目标需要克服的最大障碍（康景林，2019）。

在这一背景下，国际清洁交通委员会（ICCT）和中国环境科学院机动车排污监控中心（VECC）联合撰写了这份研究报告。我们通过对标国际最佳实践的方式为海南省未来十五年的机动车大气污染物排放控制提出了政策建议；同时，我们还模拟了海南省将这些政策建议落地后能够获得的大气污染物减排收益。

政策对标

本章将海南省截至2020年底已经采纳的政策措施与国际最佳实践进行对比。我们一共分析了五大类政策，包括电动汽车推广、新车排放标准及合规监管、在用车减排、油品质量标准及合规监管、以及低/零排放区，每一大类政策还细分为几个小类政策措施。对于每一小类政策措施，我们都探究了海南的政策实践与国际最佳实践之间的差距，并提出了相对应的政策建议。

电动汽车推广

加速汽车电动化转型并配合电网的清洁化，是海南省降低机动车污染物排放的最重要的战略措施。本报告中所称的电动汽车包括纯电动汽车（BEV）、插电式混合动力汽车（PHEV）和燃料电池汽车（FCEV）。在接下来的三个小节中，我们将分别讨论轻型车电动化、重型车电动化、以及电网的清洁化。

轻型车电动化

在轻型车电动化方面，海南省的目标是到2030年将汽柴油轻型车的新销量降为零。截至2020年底，海南省在轻型车电动化方面已经取得了令人瞩目的进展，但这些进展与其所提出的目标相比仍然较为有限。要实现其宏伟的全面电动化目标，海南省还需要更强有力的政策努力。

如图 2所示，海南省计划在2020年实现轻型货车新销量的100%电动化，同时计划在2020年、2025年和2030年将私人乘用车新销量的电动化率分别提升至40%、80%和100%（海南省人民政府，2019）。这些针对轻型车的全面电动化目标在全球范围内都是非常领先的，如果能够按期实现，可以为海南省带来非常可观的大气污染物减排收益。但是，截至2020年底，海南省轻型货车新销量和私人乘用车新销量的电动化率分别只有4.2%和12.7%，均远不及其针对2020年提出的100%和40%的目标。

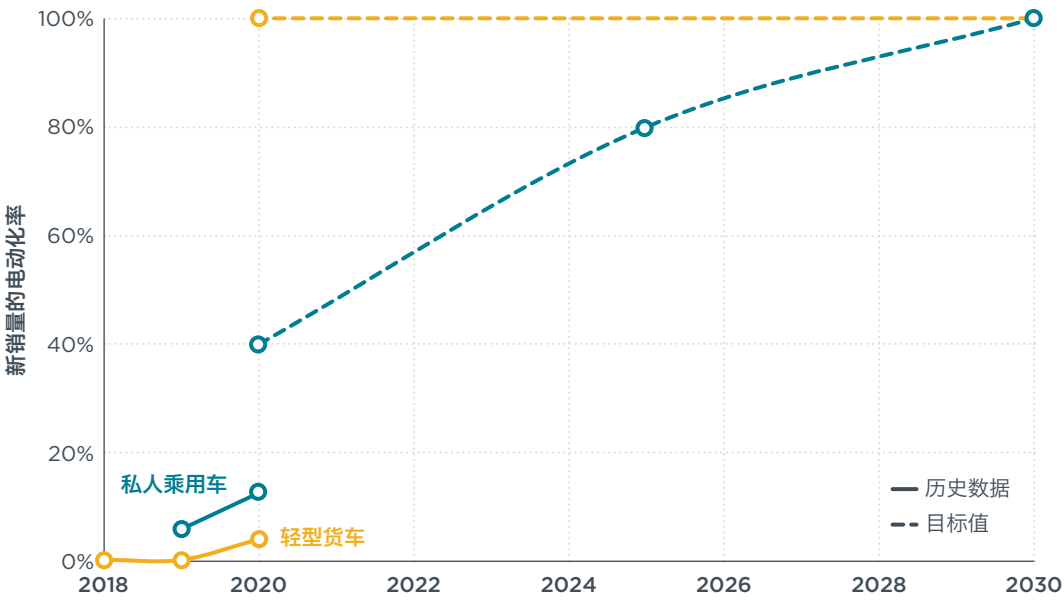


图 2 海南省轻型车新销量的电动化率（包括历史数据和目标值）

图 2的数据表明，海南省需要引入更全面、更有力、更具创新性的政策手段来进一步激励当地电动汽车的推广。可供考虑的政策手段通常包括汽车法规、财税激励、充电基础设施建设、消费者宣传推广等，这四类政策措施分别旨在提升电动汽车的车型

多样性、成本竞争力、使用便利性、以及消费者认知度和认可度。但是，需要强调的是，在电动汽车推广政策设计方面不存在一体适用的解决方案。海南省不能完全照搬领先市场的政策措施，而需要根据本地的实际情况探索出最适合的政策设计，并通过持续的政策实践和及时的效果评估来不断调整和优化其政策设计。

尽管不存在一体适用的解决方案，海南仍然可以从领先市场的政策实践中汲取经验。例如，欧洲和加州的成功经验表明：严格的新车排放标准和电动汽车强制法规可以有效拉升汽车新销量的电动化率（崔洪阳等，2021a）。中国现阶段的新车排放标准（国六排放标准）和电动汽车强制法规（双积分政策）的严格程度尚不足以助力海南省实现其宏伟的全面电动化目标。此外，全球范围内的领先城市已经开始引入零排放区等极具创新性的政策手段来加速从传统燃油车到电动汽车的转型（崔洪阳等，2021b），这些城市层面的创新性的政策实践也值得海南省参考借鉴。

政策建议：我们建议海南省采用更全面、更有力、更具创新性的政策手段来助力实现其所提出的全面电动化目标，尤其是引入更严格的新车排放标准和电动汽车强制法规、以及划定零排放区等。

重型车电动化

基于VECC前期为海南省编制的机动车排放清单，海南省机动车的NOx排放量有79%来自于重型车。对于公交车，海南省已经在2020年实现了新增量100%电动化；但是对于重型货车，海南省尚缺乏清晰的电动化路线图。

与轻型车和公交车相比，重型货车电动化确实在技术可行性和成本竞争力方面存在更大的不确定性。考虑到这个因素，海南省尚未针对重型货车提出任何明确的电动化目标，并且计划在近中期将天然气重型货车作为替代性的清洁技术方案进行推广（海南省人民政府，2019）。但是，最新的研究显示，在现有的机动车排放控制技术发展格局下，天然气汽车比柴油车更加清洁的传统认知已经不再适用（Rodríguez，2020）。从机动车排放控制的角度出发，天然气汽车已经不再具有先进性，继续力推天然气汽车的成本收益极低，电动化技术才是值得通过政策手段加速推广的真正的清洁技术。

全球范围内，加州是重型货车电动化的先行者。加州已经提出了到2035年所有短驳货车实现零排放、到2045年所有重型货车实现零排放的宏伟目标，值得强调的是，加州的这一目标针对的不仅仅是新增量，还包括存量。为了实现这一宏伟目标，加州已经通过了针对货车的电动汽车强制法规，要求货车供应商从2024年开始按要求逐步提升货车新销量的电动化率，具体要求如图 3所示（Buysse等，2020）。除了这种供给侧的政策外，加州还在需求侧进行政策配套。目前，加州正在制定新的强制法规，要求加州的中大型货车车队购买一定数量的零排放货车。此外，加州还为电动货车提供购置补贴和金融支持，并为电动货车所需的充电基础设施建设提供财税激励，以期促使电动货车尽快与柴油货车实现成本平价。

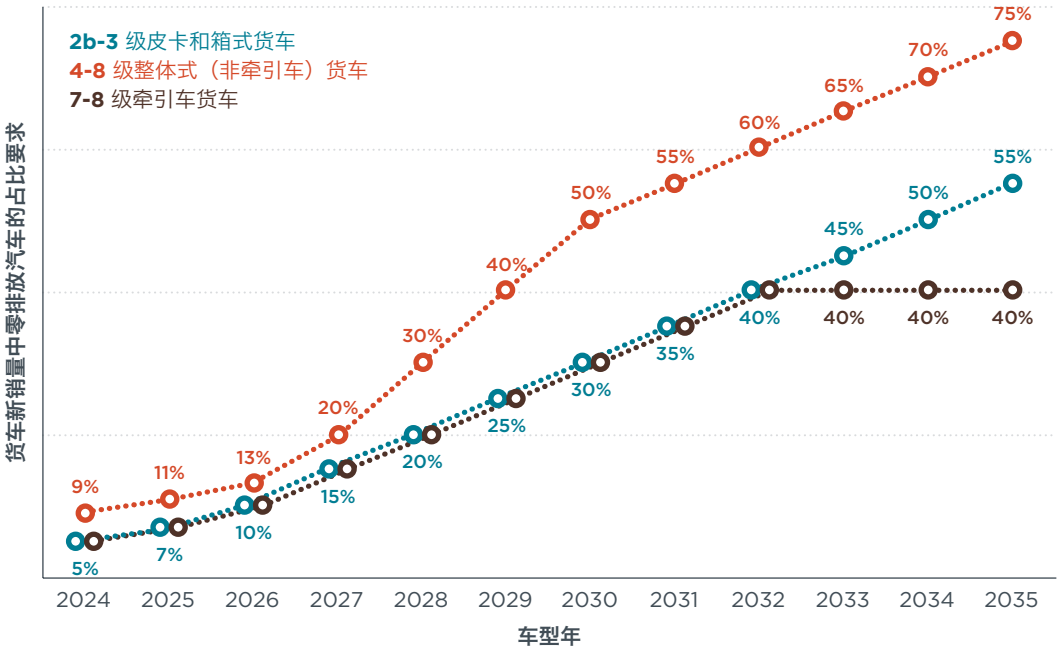


图 3 加州2024-2035年针对不同级别的货车的新销量电动化率要求

政策建议：我们建议海南省为重型货车制定明确的电动化路线图，并采用兼顾供给和需求两侧的全面的政策手段来加速电动重型货车的推广。

电网清洁化

电动汽车的推广能够带来多大的污染物减排收益，很大程度上取决于电网的清洁化程度有多高。目前，海南省的电网结构仍然是煤电主导，为了最大化电动汽车推广的减排收益，海南省还需要大幅提升可再生能源发电的占比。

从发电量的角度看，2018年，海南省有56%是煤电、4%是气电、26%是核电、14%是可再生能源电；2020年，煤电占比降低至50%，按照海南省的规划，煤电占比会在2025年进一步降低至30%（孙维锋等，2021）。从装机容量的角度看，2020年，海南省的煤电占比为33%，按照规划，未来煤电占比会持续降低，到2025、2030和2035年分别达到17%、15%和11%。根据现有规划，到2035年，海南省的电网结构将呈现核电为主、气电调峰的特点（孙维峰等，2021；林芳羽，2021；康景林，2019）。

全球范围内，加州是清洁电网的典型代表，其发电量构成中几乎已经没有煤电和油电。2019年，气电和可再生能源电分别占到加州发电量的43%和32%。加州的目标是到2030年将可再生能源电的占比提升至60%。

政策建议：我们建议海南省大幅增加发电量中可再生能源电的占比，持续提升当地电网的清洁化程度。

新车排放标准及合规监管

严格的新车排放标准可以加速包括电动化技术在内的最先进的清洁技术的应用，而全面、到位的合规监管措施则是保障新车排放标准的预期收益能够不打折扣地落地的关键。在接下来的三个小节中，我们将分别讨论轻型车排放标准、重型车排放标准、以及排放标准的合规监管。

轻型车排放标准

海南省现行的轻型车排放标准是国六排放标准。海南省于2019年7月1日开始实施轻型车国六标准，比全国统一时间表提前了一年（海南省人民政府办公厅，2019）。国六标准已经是全球范围内最先进的轻型车排放标准之一，但是与美国的Tier 3标准相比尚有差距，美国的Tier 3标准从2017年开始导入，将会在2025年全面实施。

如图 4所示，在不考虑排放测试规程差异的情况下，国六标准的尾气排放限值比欧七标准更严，但比美国Tier 3标准松。美国Tier 3标准将氮氧化物（NOx）和非甲烷有机气体（NMOG）作为一个整体进行管控，欧七和国七标准中管控的不是NMOG，而是非甲烷碳氢化合物（NMHC），NMHC所囊括的组分比NMOG要少。即使在这种情况下，美国Tier 3标准的NOx+NMOG排放限值仍然比国六标准中NOx和NMHC的限值之和要低出73%。在颗粒物（PM）管控方面，国六标准走在世界前沿。国六标准引入了6×10^{11}个/公里的颗粒数（PN）限值，且该限值对所有燃料类型（如汽油、柴油等）的轻型车都适用。在这一要求下，柴油轻型车需要安装柴油颗粒捕集器（DPF），汽油轻型车则需要安装汽油颗粒捕集器（GPF）（He, 2020）。

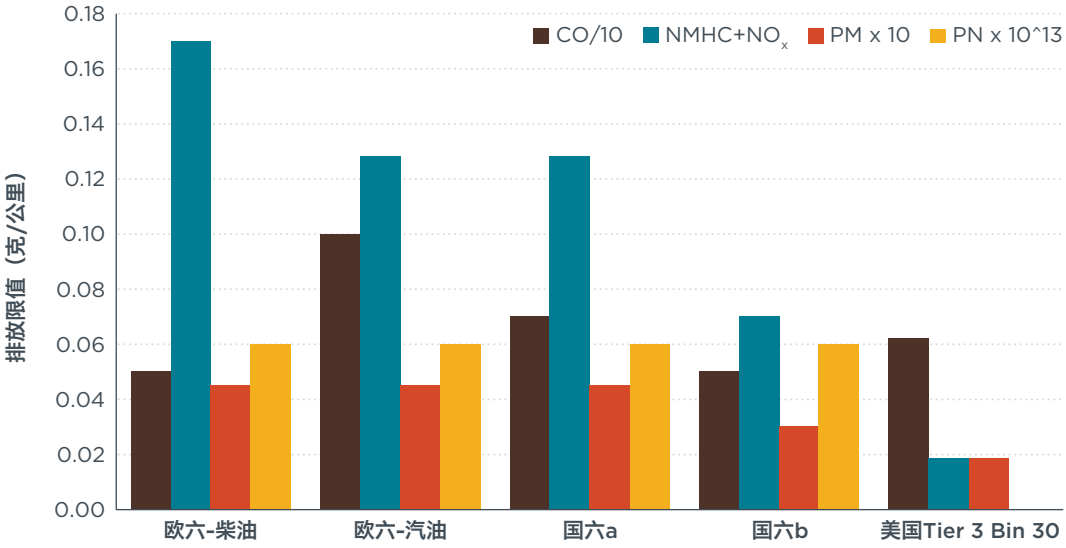


图 4 轻型车欧六、国六、美国Tier 3标准的尾气排放限值对比

注释：

[a]图中所示的排放限值是乘用车I型试验（常规温度、冷启动下的排放测试）的单车排放限值。美国Tier 3标准里采用的是车队平均的概念，车队平均的排放限值是Tier 3标准Bin 30的排放限值。

[b]对于柴油轻型车，欧六标准管控的是总碳氢（THC）+氮氧化物（NOx），THC不仅包括了非甲烷碳氢化合物（NMHC）也包括了甲烷，但是，柴油车的甲烷排放几乎可以忽略。对于汽油轻型车，欧六标准的颗粒数（PN）限值仅对采用直喷技术的汽油车有效。

[c]美国Tier 3标准管控的是非甲烷有机气体（NMOG）+NOx，NMOG所囊括的组分比NMHC更多。

[d]图中直接对比了中国、欧洲和美国的轻型车排放标准的污染物限值要求，并未将各地排放测试规程的差异考虑在内。

蒸发排放限值也是轻型车排放标准的重要组成部分，因为轻型车多为汽油车，而汽油车通过蒸发排放的挥发性有机化合物（VOCs）无论是对$PM_{2.5}$还是对臭氧来说都是关键的气态前体物。考虑到海南省全年高温，蒸发排放限值的严格程度对于海南省尤其重要。

如表 1所示，国六标准的蒸发排放限值（48小时昼间排放测试）比欧六标准更严，且测试规程所要求的浸车温度更高（38±2°C）。不仅如此，国六标准还参考美国Tier 3标准引入了加油排放限值（0.05克/升），这就促使汽油车必须安装车载油气回收系统（ORVR）。美国Tier 3标准的蒸发排放限值全球最严，其严格程度几乎是奔着零油气挥发去的（Rodríguez等，2019）。

表 1 轻型车欧六、国六、美国Tier 3标准的蒸发排放限值对比

测试规程	蒸发排放限值		
	欧六	国六	美国Tier 3
热浸+48小时昼间排放测试	2.0克/测试	0.7克/测试	0.3克/测试
热浸+72小时加油排放测试	/	/	0.3克/测试
加油排放测试	/	0.05克/升	0.053克/升

在排放测试循环、实际道路排放要求、以及车载自动诊断系统（OBD）要求等方面，国六标准几乎都位居国际最佳实践之列。在使用寿命方面，国六b标准对排放控制系统提出了20万公里的耐久性要求，严于欧七标准，但不及美国Tier 3标准中24万公里的耐久性要求。

目前，欧盟委员会正在开发下一阶段的轻型车排放标准，即欧七排放标准，标准草案预计于2021年年末发布（European Commission, 2020）。基于最新的讨论，欧七标准可能会在欧六标准的基础之上进行以下升级：加严已纳入管控的污染物的排放限值；对氨气（NH3）、一氧化二氮（N2O）、刹车颗粒物等尚未纳入管控的污染物设定排放限值；加严蒸发排放限值，并引入加油排放测试和限值；扩大实际道路排放测试的边界条件；删除实际道路在用符合性评价中的符合性因子；加严耐久性要求；引入车载检测等。与此同时，中国也正在研究制定下一阶段的轻型车排放标准，即国七排放标准。

政策建议：我们建议海南省有效地实施轻型车国六排放标准、密切关注国七和欧七排放标准的制定、并通过提前实施国七排放标准推动其轻型车全面电动化转型目标的如期实现。

重型车排放标准

海南省现行的重型车排放标准是国六排放标准。海南省按照全国统一的时间表于2021年7月1日全面实施重型车国六排放标准。国六标准是全球范围内已经实施的最先进的重型车排放标准之一，但是和加州最新通过的超低氮氧化物（NOx）排放标准相比尚有差距，加州超低NOx标准将于2024年实施，并在2027年进一步加严（CARB, 2020）。

如图 5所示，在不考虑排放测试规程差异的情况下，国六标准的NOx排放限值与欧六标准和美国2010标准相当，但是显著高于加州超低NOx标准。加州超低NOx标准在美国2010标准的基础上加严了NOx排放限值，其针对2024年和2027年NOx排放限值比美国2010标准分别低75%和90%。不仅如此，加州超低NOx标准还针对低负载工况和怠速工况引入了新的排放要求。研究显示，重型车在低负载工况和怠速工况下的NOx排放极高，但是现有的重型车排放标准对于这两类工况的NOx排放未能实现有效管控（Badshah等，2019）。

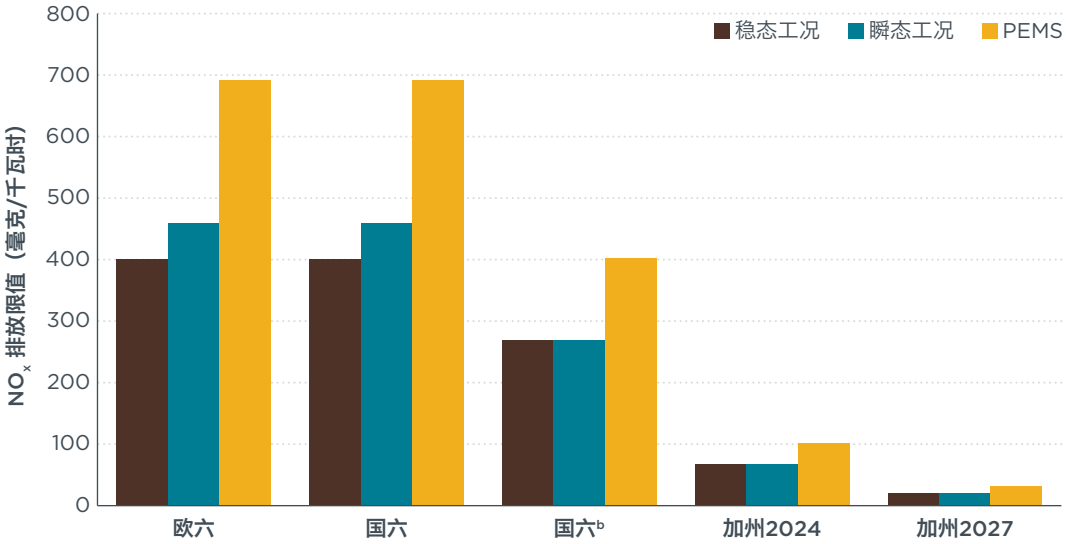


图 5 重型车欧六、国六、美国2010、加州超低NOx标准的NOx排放限值对比

注释：

[a]图中直接对比了中国、欧洲、美国和加州的重型车排放标准的污染物限值要求，并未将各地排放测试规程的差异考虑在内。

在实际道路排放要求、车载自动诊断系统（OBD）要求等方面，国六标准几乎都位居国际最佳实践之列。值得强调的是，国六b标准要求车辆加装远程OBD，这在全球尚属首次。在使用寿命方面，国六和欧六标准均对排放控制系统提出了7年/70万公里的耐久性要求，美国2010标准的要求略严，为10年/70万公里。2027年起，加州超低NOx标准的耐久性要求为11年/60万英里（约96.5万公里），2031年起，该要求将进一步加严至12年/80万英里（约130万公里）。

目前，欧盟委员会正在开发下一阶段的重型车排放标准，即欧七排放标准，标准草案预计于2021年年末发布（European Commission, 2020）。基于最新的讨论，欧七标准可能会加严NOx排放限值和耐久性要求，并针对低负载工况和怠速工况引入新的排放要求，其严格程度可能会与加州超低NOx标准相当（Rodríguez和Badshah, 2021）。与此同时，中国也正在研究制定下一阶段的重型车排放标准，即国七排放标准。

政策建议：我们建议海南省有效地实施重型车国六排放标准、密切关注国七和欧七排放标准的制定、并通过提前实施国七排放标准推动重型车向超低NOx和零排放转型。

排放标准的合规监管

海南省所实施的轻型车和重型车排放标准都是国家统一制定的标准，对于这两套标准的合规监管，海南省也是直接采用国家层面的监管体系。海南现行的这套监管体系 - 即国六监管体系 - 在设计上很大程度上参考了全球领先的美国监管体系（包括美国联邦层面的监管体系和加州的监管体系），但是，受限于人员和技术能力，这套监管体系尚未在海南省得到全面有效地落实。

海南省的监管体系和美国的监管体系有三点关键共性。一是都覆盖了车辆的全生命周期；二是都要求车企与监管部门共同分担责任；三是都通过清晰的法律条款赋予监管部门强有力的监管和处罚权限。但是，受限于人员和技术能力，海南省无法像加州那样开展大量的政府主导的在用符合性测试，因此在合规监管的有效性方面，海南省与美国/加州尚存在较大差距。

政府主导的在用符合性耗时、耗钱、耗力。监管部门需要首先从私人车主或者车队运营商那里获得测试车辆，并支付一定的费用；然后技术人员需要对车辆的状态和维保记录进行详细的检查，并进行必要的校准，然后才能开展在用符合性测试。完成测试就需要花费至少两周，可能还需要更多的时间对测试结果进行校验。在大约1500名员工和先进的机动车排放测试实验室的支持下，加州开展了大量的政府主导的在用符合性测试，仅在2018年，加州就通过针对重型车的在用符合性测试项目HDIUC发现了50万辆不合规车辆并要求车企实施召回（CARB，2018）。海南省目前的人员和技术能力与加州差距巨大，无法通过开展政府主导的在用符合性测试来落实排放标准的合规监管。

在这种客观条件下，海南省可以考虑通过新型技术手段来落实排放标准的合规监管，这是一条可行且务实的路径。加州已经开始采用包括遥感监测在内的多种新型技术手段来帮助识别不合规车辆和高排放车辆。遥感监测技术的优势是能够以较低的成本实现对大量车辆的快速筛查。海南省从2019年开始建设遥感监测网络，目标是建成50套遥感监测设备并覆盖所有19个市县。截至2020年底，海南省已经建成37套遥感监测设备，但是尚未将遥感数据应用于排放标准的合规监管。

另外一种海南省可以用于助力合规监管的新型技术手段是远程OBD。重型车国六b标准要求所有新车均安装远程OBD系统，从而保证监管部门可以远程获取与车辆排放相关的实时数据，例如氮氧传感器的输出信号。生态环境部正在制定远程OBD系统的技术规范，有望在2021年发布。与此同时，北京、南京等地方政府已经开始针对重型公交车开展远程OBD试点项目（Yang等，2021）。海南省尚未开始探索远程OBD数据的应用。

政策建议：我们建议海南省充分利用包括遥感监测在内的多种新型技术手段来提高排放标准合规监管的有效性。

在用车减排

要降低机动车的大气污染物排放，不仅要通过新车排放标准来促使新生产的车辆采用最先进的减排技术，还要大幅减少在用车的排放，后者与前者同等重要，甚至可能更加重要。减少在用车排放的政策手段多种多样，在接下来的三个小节中，我们将分别讨论在用车排放检测、在用车队法规、以及怠速法规。

在用车排放检测

在用车排放检测旨在解决由排放控制系统劣化和维修保养不当所导致的超标排放问题。与上一小节介绍的合规监管体系一样，在在用车排放检测方面，海南省也是直接采用国家层面的检测体系。这套检测体系与全球领先的加州体系在设计上非常相似，但在部分细节上尚有欠缺。

海南的检测体系和加州的检测体系都是主要通过检测和维修（I/M）制度来识别存在超标排放问题的在用车辆。但是，海南的I/M检测主要倚赖尾气排放测试，而加州的I/M检测已经越来越多地采用OBD检测的方式，在大多数情况下，加州在I/M检测时都不再进行尾气排放测试。在这一点上，中国已经开始借鉴加州的经验，积极推动OBD检测的应用。中国新出台的I/M制度已经增加了故障指示灯（MIL）检查、故障码读取等项目。但是，由于中国是在国六阶段才参考加州的OBD II法规在新车排放标准中引入了全面的OBD条款，国五及之前阶段的车辆无法像国六车辆一样读取全部的OBD代码，因此在一定程度上影响了基于OBD进行I/M检测的有效性。

此外，在用车排放检测体系不止包括I/M制度，还需要有其他补充性的检测手段。海南省目前所采用的补充性的检测手段主要是路检路查。虽然海南省截至2020年底

已经建成了37套遥感监测设备,但是遥感数据尚未被用于在用车排放检测。相较而言，加州所采用的补充性的检测手段更加丰富，多年来加州一直基于遥感监测、路检路查等多种检测方式获取的大量数据来助力识别高排放车辆和不合规车辆。

政策建议：我们建议海南省在I/M检测中加强对OBD数据的使用，并采用包括遥感监测数据在内的多种排放检测数据来补充和交叉验证I/M检测数据，以优化在用车排放检测体系。

在用车队法规

在用车队法规旨在将新车采用的最新的排放控制技术推广至在用车队，具体来说就是要求在用车队通过改造、更换发动机、淘汰更新等方式达到新车排放标准中的排放限值要求。

海南省利用经济激励和限行等方式鼓励高排放车辆的提前淘汰，但是并未出台过要求在用车队采用先进的排放控制技术的法规。在这一政策领域，加州有很多领先经验，加州从2000年以来制定了一系列旨在减少在用柴油车排放的在用车队法规。

加州的在用车队法规针对的柴油车队类型多种多样，包括校车、环卫车、公交车、货车等。以货车和公交车队法规为例，如表 2所示，加州要求重型柴油货车和公交车按照既定的时间表完成柴油颗粒物捕集器（DPF）的加装并达到美国2010重型车排放标准的排放限值要求。未如期达到要求的在用车辆将无法完成注册，车主也会被处以罚款。

表 2 加州卡车和公交车队法规中的要求

发动机机型年	加装DPF	达到美国2010标准的排放限值
1994年之前	无要求	2015年1月1日
1994-1995	无要求	2016年1月1日
1996-1999	2012年1月1日	2020年1月1日
2000-2004	2013年1月1日	2021年1月1日
2005-2006	2014年1月1日	2022年1月1日
2007-2009	已加装	2023年1月1日

政策建议：我们建议海南省出台在用车队法规，并与经济激励相结合，推动在用车队在能够替换成零排放汽车的情况下替换成零排放汽车，在不能替换成零排放汽车的情况下通过改造、更换发动机、淘汰更新等方式达到新车排放标准。

怠速法规

怠速法规旨在减少在用车在怠速工况下的排放。怠速排放在新车排放测试中通常未能得到充分的体现，因此针对在用车制定怠速法规非常必要。海南尚未出台过怠速法规，加州代表了这一政策领域的国际最佳实践。

加州的怠速法规于2003年通过，一开始只针对校车，后在2004年拓展至车辆总重在10000磅以上的所有柴油重型车。基于这一怠速法规的要求，车辆在加州边境以内使用时，怠速时间不能超过5分钟；2008年及以后年份生产的车辆必须加装防篡改的发动机自动熄火系统，当怠速时间达到5分钟时，该系统会自动关闭发动机。

带有卧铺的重型卡车经常使用柴油辅机动力系统（APS）和燃油暖风装置来进行取暖和制冷，这样司机在卧铺休息时就可以在发动机熄火（即不怠速运行）的情况下仍然保证车内温度适宜。基于加州怠速法规的要求，这些用于保证车内舒适度的设

备也必须达到特定的排放标准或者加装特定的排放控制设备。例如，燃油暖风装置必须要达到加州超低排放汽车（ULEV）的认证限值，而柴油APS必须加装得到验证的三级颗粒物捕集器或者将其排放的废气通过管路引入车辆的颗粒物排放控制系统中。

政策建议：我们建议海南省出台怠速法规以减少在用车的怠速排放。

油品质量标准及合规监管

严格的油品质量标准对于机动车排放控制至关重要。更优的油品质量不仅可以直接减少燃油燃烧产生的大气污染物排放，还是先进的尾气后处理技术（如DPF）能够正常发挥作用的前提。在接下来的三个小节中，我们将分别讨论车用汽油标准、车用柴油标准、以及油品质量标准的合规监管。

车用汽油标准

海南省现行的车用汽油标准是国六标准，但是与全国统一的版本不同，海南省又单独加严了雷德蒸汽压（RVP）的要求。海南版本的国六标准已经是全球范围内最先进的车用汽油标准之一，但是在部分指标上仍然与国际最严的标准有所差距。

对于汽油来说，对机动车排放影响最大的油品指标包括硫含量、烯烃含量、苯含量、芳香烃含量、以及RVP。表 3 对比了国六、京六、欧五、以及加州新配方汽油三阶段（CaRFG3）标准对以上五项油品指标的要求。可以看到，国六标准的严格程度与京六和欧五标准相当，但是在烯烃含量、芳香烃含量、以及RVP三个指标上没有加州的CaRFG3标准严格。

更高的RVP会导致更高的油气生成量，从而导致更多的VOCs蒸发排放（U.S.EPA，2012）。尽管海南省在国六标准的基础上又单独加严了RVP的限值，但与加州的要求相比仍然有较大差距。基于韦德-雷迪油气生成公式，如果海南将汽油RVP限值从现行的60千帕降低至和加州要求相当的50千帕左右，单升汽油的油气生成量将降低大约10倍，这将帮助海南大幅降低来自汽油车的VOCs蒸发排放。

表 3 中国、欧洲、加州的车用汽油标准对比

油品指标	国六		京六	欧五	加州CaRFG3[d]		
	海南版本	全国版本			单一限值	平均限值	入门限值
硫含量（ppm，最大值）	10	10	10	10	20	15	30
烯烃含量（体积百分数，最大值）	18/15[a]	18/15[a]	15	18	6	4	10
苯含量（体积百分数，最大值）	0.8	0.8	0.8	1.0	0.8	0.7	1.1
芳香烃含量（体积百分数，最大值）	35	35	35	35	25	22	35
RVP（千帕）	不超过60	夏季：40-65	春季：45-70	夏季：不超过60/70[b]	暖季：不超过48.2/47.6[c]	–	暖季：44.1-49.6
			夏季：42-62				
		冬季：45-85	秋季：45-70				
			冬季：47-80				

注释：
[a] 国六标准分为a、b两个阶段，国六a的烯烃含量限值是18%（2019年1月1日起实施），国六b的烯烃含量限值是15%（2023年1月1日起实施）。
[b] 夏季环境温度较低的部分欧洲国家实施的是70千帕的RVP限值。
[c] 加州对混有乙醇和未混有乙醇的汽油的RVP限值不同，对于混有乙醇的汽油RVP限值为48.2千帕，对于未混有乙醇的汽油RVP限值是47.6千帕。
[d] 加州的CaRFG3标准有两种合规方式。第一种是每一批次的汽油都符合单一限值的要求；另一种则是每一批次的汽油都符合比单一限值更松的入门限值的要求，同时所有批次的汽油的平均结果符合平均限值的要求。

政策建议：我们建议海南省有效地实施车用汽油国六标准并进一步加严汽油RVP限值。

车用柴油标准

海南省现行的车用柴油标准是国六标准。国六标准已经是全球最严的车用柴油标准之一。

对于柴油来说，对机动车排放影响最大的油品指标是硫含量。除此之外，多环芳烃含量、十六烷值、密度、灰分含量、以及黏度等指标也对机动车排放有影响。表 4对比了国六、京六、欧五、以及美国和加州标准对以上六项油品指标的要求。可以看到，国六标准的严格程度与全球范围内其他领先的车用柴油标准整体相当。尤其是在最重要的硫含量方面，国六标准10ppm的硫含量限值已经是全球最严。

表 4 中国、欧洲、美国的车用柴油标准对比

油品指标	国六	京六	欧五	美国标准	加州标准
硫含量（ppm，最大值）	10	10	10	15	15
多环芳烃含量（体积百分数，最大值）	7	7	8	–	–
十六烷值（最小值）	51	51	51	十六烷指数不低于40或者芳烃含量不超过35%	十六烷指数不低于40或者芳烃含量不超过35%
密度（千克/立方米）	820-845 (20℃)	820-845 (20℃)	≤ 845 (20℃)	–	–
灰分含量（质量百分数，最大值）	0.01	0.01	0.01	–	–
黏度（平方毫米/秒）	3.0-3.8	2.5-7.5	2.0-4.5	–	–

政策建议：我们建议海南省有效地实施车用柴油国六标准。

油品质量标准的合规监管

与国际最佳实践相比，海南省现行的油品质量合规监管体系还不够系统全面。这一政策领域的国际最佳实践来自加州。

海南省的监管体系与加州的监管体系相比主要有四点不足。首先，海南省的监管体系偏重末端，与加州的体系相比，海南省对燃油供应链的覆盖还不够全面。具体来说，海南省进行油品质量监管的主要方式包括针对炼油厂和加油站的集中式油品质量抽检，以及针对成品油走私和非法销售的专项打击行动，而加州则是建立了一套完备的覆盖整个燃油供应链的认证、数据报告、抽查、和责任追踪制度。

如图 6所示，根据加州空气资源局（CARB）的要求，燃油供应链上各个环节（包括精炼、增氧、运输、销售等）的企业都需要在加州空气资源局完成认证，并按要求向加州空气资源局提交相关数据。加州空气资源局的工作人员会基于销售记录、发票等查验企业所提交的数据，并从炼油厂、油车/油轮、油库、加油站、以及商业用户等各个环节收集油样进行检测。当一个环节发现油品质量不达标时，加州空气资源局会根据发票追溯该批次燃油的上游供应链，并对该环节及其上游的所有环节进行处罚。在这一责任追踪制度下，位于上游的油品供应商甚至有时会主动从下游采集油样并进行油品质量检测。

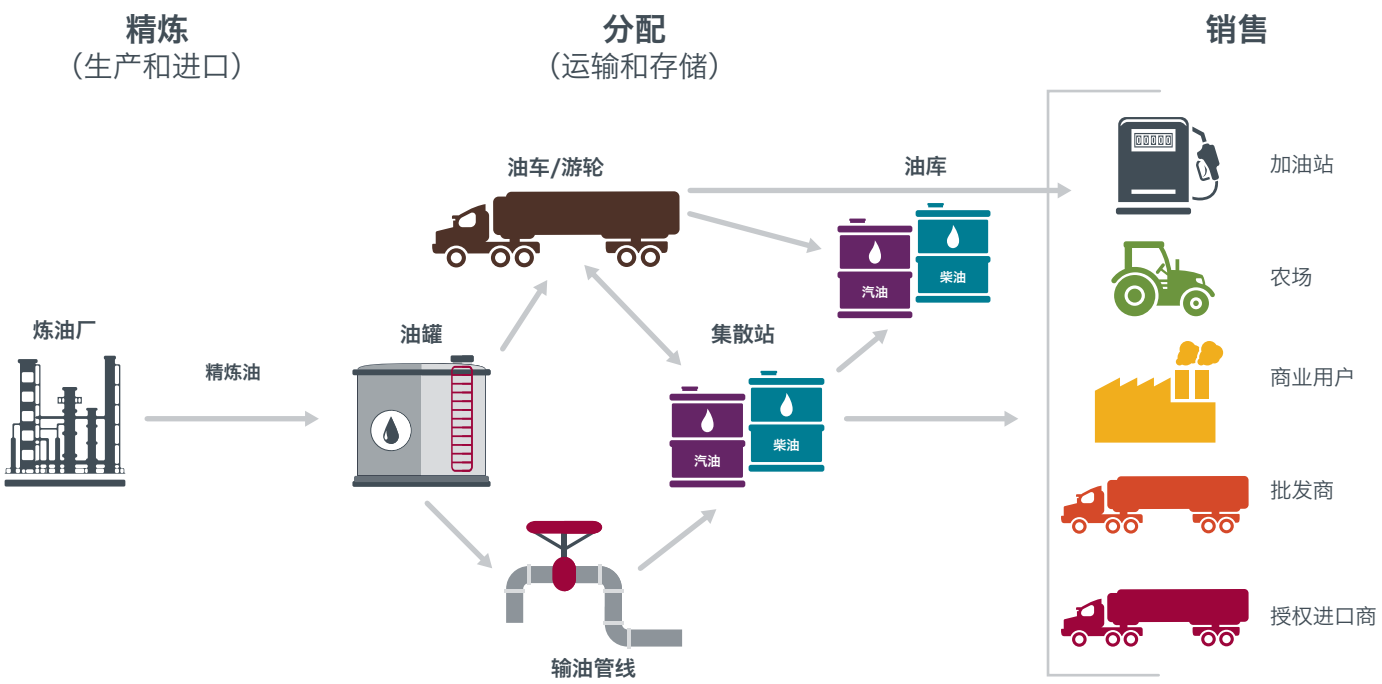


图 6 加州油品质量标准的合规监管体系（来源：加州空气资源局）

其次，海南省油品质量抽查的采样频次和规模与加州相比还不够大。2017-2019年间，海南省市场监督管理局进行了四轮集中式的油品质量抽查，这四轮抽查从5个炼油厂和22个加油站共采集了49份油样。而加州空气资源局仅在2017年一年就进行了481次抽查，采集的油样数高达1650份。值得注意的是，加州空气资源局进行油品质量检测的方式有两种，一种是传统方式，即工作人员在现场采集油样后将其带回实验室进行检测，第二种则是直接利用移动油品分析实验室（即流动检测车）在现场即采即测，这可以有效提高检测的效率。2020年以来，中国生态环境部也先后在多个重污染地区使用移动油品分析实验室进行油品质量抽查（中化石油，2021），但海南省还尚未开始使用这种新型技术手段。

第三，海南省对不合规企业的处罚力度与加州相比还不够大。对于油品质量未达标的情况，海南省主要的处罚措施是行政处罚，如要求相关企业暂停经营一段时间并进行整改。而加州则是对不合规企业处于高额罚款，例如，加州空气资源局曾经因油品质量不达标问题对英国石油公司处以250万美元的罚款（CARB，2018b）。

最后，也是尤其重要的一点，就是海南省的环境部门未能在油品质量的合规监管中充分发挥作用。在中国，油品质量的合规监管由国家市场监管总局及各省市的市场监管部门牵头负责，环境部门的参与度较低。而在加州，环境部门（即加州空气资源局）与市场监管部门平行地进行油品质量抽查并合作完成对油品质量的合规监管。二者分工明确、权责清晰、互不冲突，环境部门负责与排放相关的油品质量参数，而市场监管部门则负责与使用性能相关的油品质量参数。

政策建议：我们建议海南省通过以下四种方式提升油品质量合规监管的有效性。一是建立一套完备的覆盖整个燃油供应链的认证、数据报告、抽查、和责任追踪制度；二是增加油品质量抽查的频次和样本数；三是对不合规企业进行有震慑力的处罚；四是强化部门间的分工协作，环境部门也直接参与到油品质量的合规监管，并负责针对与排放相关的参数进行油品质量抽查。

低/零排放区

低排放区是一类针对机动车的排放控制区，只有驾驶排放水平达到特定要求的车辆、骑自行车、或者步行才能够不受限制的进入该区域，如果驾驶排放水平未达到要求的车辆，则完全不能进入该区域或者必须支付一定的费用才能够进入。零排放区是低排放区的终极版本，其对车辆提出的排放要求是零排放。低/零排放区是一类强有力的地方性政策工具，它一方面可以加速在用高排放车辆的淘汰，另一方面也可以加速低排放和零排放汽车的推广。

海南省尚未划定任何低排放区或零排放区。在这一政策领域，欧洲城市是先行者，截至目前欧洲城市已经划定了数百个低排放区，其中的一些领先城市已经开始朝着零排放区迈进（崔洪阳等，2021b），荷兰的阿姆斯特丹是其中的典型代表。

阿姆斯特丹目前有一个低排放区，计划在其基础上逐步升级，最终在2030年将整个城市建成区变成零排放区。阿姆斯特丹低排放区所覆盖的地域范围，对于踏板车和轻便摩托车是整个城市建成区，对于其他车辆类型（如乘用车、公交车、货车可以）则是A10环路以内的区域，面积约70平方公里。该低排放区每周7天、每天24小时运行，只有排放水平达到特定要求的车辆才被允许进入。不合规车辆如果被发现进入到该低排放区需要缴纳罚款，不同车辆类型的罚款额度不同，踏板车和轻便摩托车为70欧元，乘用车、出租车、轻型商用车以及公交车/长途客车为100欧元，而货车则为250欧元。

按照计划，阿姆斯特丹会在2022年先将市中心（面积约6.5平方公里）划定为零排放区，然后在2025年拓展至A10环路以内的区域（面积约70万平方公里，与现有的低排放区的地域范围重合），最后在2030年拓展至整个城市建成区。2022年的零排放区只针对公交车和客车，2025年的零排放区针对除乘用车外的所有车辆类型，而2030年的零排放区将针对所有交通类型。表 5展示了阿姆斯特丹在不同的地域范围内针对不同的车辆类型逐步加严排放要求的详细计划。

表 5 阿姆斯特丹从低排放区向零排放区升级过程中排放要求的逐步加严

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="3">车辆类型</th><th colspan="11">允许进入的车辆</th></tr>
<tr><th colspan="4">市中心</th><th colspan="4">市中心以外A10环路以内</th><th colspan="3">A10环路以外的城市建成区</th></tr>
<tr><th>2021</th><th>2022</th><th>2025</th><th>2030</th><th>2021</th><th>2022</th><th>2025</th><th>2030</th><th>2021</th><th>2025</th><th>2030</th></tr>
<tr><td rowspan="2">乘用车</td><td>柴油</td><td colspan="3">欧4/5/6和零排放汽车</td><td>零排放汽车</td><td colspan="3">欧4/5/6和零排放汽车</td><td>零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td>零排放汽车</td></tr>
<tr><td>非柴油</td><td colspan="3">全部</td><td>零排放汽车</td><td colspan="3">全部</td><td>零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td>零排放汽车</td></tr>
<tr><td rowspan="2">出租车</td><td>柴油</td><td colspan="2">欧5/6和零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">欧5/6和零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td>零排放汽车</td></tr>
<tr><td>非柴油</td><td colspan="2">全部</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td>零排放汽车</td></tr>
<tr><td rowspan="2">轻型货车</td><td>柴油</td><td colspan="2">欧4/5/6和零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">欧4/5/6和零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td>零排放汽车</td></tr>
<tr><td>非柴油</td><td colspan="2">全部</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td>零排放汽车</td></tr>
<tr><td rowspan="2">中重型货车</td><td>柴油</td><td>欧4/5/6和零排放汽车</td><td>欧6和零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td>欧4/5/6和零排放汽车</td><td>欧6和零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td>零排放汽车</td></tr>
<tr><td>非柴油</td><td colspan="2">全部</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td>零排放汽车</td></tr>
<tr><td colspan="2">公交车和客车</td><td>欧4/5/6和零排放汽车</td><td colspan="3">零排放汽车</td><td colspan="3">欧4/5/6和零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">全部</td><td>零排放汽车</td></tr>
<tr><td colspan="2">脚踏车和轻便摩托车</td><td colspan="2">首次注册时间在2011年1月1日及以后的汽车、零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td colspan="2">首次注册时间在2011年1月1日及以后的汽车、零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td><td>首次注册时间在2011年1月1日及以后的汽车、零排放汽车</td><td colspan="2">零排放汽车</td></tr>
</table>

在划定低/零排放区时，领先城市的一个普遍做法是分阶段实施，即先在一个较小的地域范围内或者只针对现阶段较为容易电动化的车辆类型进行低/零排放区试点，然后再逐步拓展低/零排放区所覆盖的地域范围及所针对的车辆类型。试点项目能够为政策制定者提供宝贵的政策实施经验，为划定升级版的低/零排放区打下基础。在政策制定时，每个城市需要根据自己的目标和当地的实际情况，因地制宜地选择最佳方案，宜低则低，宜零则零。需要说明的是，在同一城市中，低排放区和零排放区可以同时存在，但二者针对的车辆类型和覆盖的地域范围不同。

海南省要划定低/零排放区，首先需要基于当地的实际情况（包括地理特征、低/零排放汽车的推广水平、人口分布特征、交通流特征、以及机动车排放分布特征等）进行全面的可行性研究，从而设计出最符合当地诉求的低/零排放区政策方案。可行性研究完成后，海南省还需要尽快制定清晰的低/零排放区分阶段实施路线图并对公众发布，这样可以帮助企业和市民提前做好相应的准备。

政策建议：我们建议海南省基于全面的可行性研究制定低/零排放区的划定方案并以先试点后拓展的方式分阶段实施低/零排放区。

政策建议小节

在本章中，我们采用国际对标的方式对海南省现有的机动车大气污染物排放控制政策进行了评估，找到了海南省的政策实践与国际最佳实践之间的差距，并提出了对应的政策建议。表 6是我们所提出的所有政策建议的总览。

表 6 政策建议一览表

政策类型		对现有政策的评估	政策建议
电动汽车推广	轻型车		· 利用更全面、更有力、更具创新性的政策手段助力实现全面电动化目标
	重型车		· 为重型货车制定明确的电动化路线图 · 采用兼顾供给和需求两侧的全面的政策手段加速电动重型货车的推广
	电网清洁化		· 大幅增加发电量中可再生能源电的占比，持续提升电网的清洁化程度
新车排放标准及合规监管	轻型车		· 有效地实施轻型车国六排放标准 · 密切关注国七和欧七排放标准的制定 · 提前实施国七排放标准，助力推动轻型车全面电动化目标的如期实现
	重型车		· 有效地实施重型车国六排放标准 · 密切关注国七和国七排放标准的制定 · 提前实施国七排放标准，推动重型车向超低NOx和零排放转型
	合规监管		· 充分利用包括遥感监测在内的多种新型技术手段来提高排放标准合规监管的有效性
在用车减排	在用车排放检测		· 在I/M检测中加强对OBD数据的应用 · 采用包括遥感监测数据在内的多种排放检测数据来补充和交叉验证I/M检测数据
	在用车队法规		· 出台在用车队法规，与经济激励相结合，推动在用车队在能够替换成零排放汽车的情况下替换为零排放汽车，在不能替换成零排放汽车的情况下通过改造、发动机更换、淘汰更新等方式达到新车排放标准
	怠速法规		· 出台怠速法规以减少在用车的怠速排放
油品质量标准及合规监管	车用汽油		· 有效地实施车用汽油国六标准 · 进一步加严汽油RVP限值
	车用柴油		· 有效地实施车用柴油国六标准
	合规监管		· 建立一套完备的覆盖整个燃油供应链的认证、数据报告、抽查、和责任追踪制度 · 增加油品质量抽查的频次和样本数 · 对不合规企业进行有震慑力的处罚 · 强化部门间的分工协作，环境部门直接参与到油品质量的合规监管，并负责针对与排放相关的参数进行油品质量抽查
低/零排放区			· 基于全面的可行性研究制定低/零排放区的划定方案 · 以先试点后拓展的方式分阶段实施低/零排放区

蓝色：与国际最佳实践水平相当
黄色：与国际最佳实践相比在严格程度或者全面性上有待提升
棕色：缺失此类政策

减排潜力评估

在这一章中，我们基于排放建模对上述一揽子政策建议能够为海南省带来的大气污染物减排收益进行的模拟评估。基于数据可获得性，我们选择2018年为基准年；基于海南省所提出的2035年生态环境质量达到世界领先水平的目标，我们选择2035年为目标年。受数据可获得性和政策设计的不确定性的影响，表 6中的部分政策建议并未在排放模拟中体现，因此本章所呈现的大气污染物减排收益模拟结果是保守的，实际的减排收益会更大。未能在排放模拟中体现的政策建议主要包括提高排放标准和油品质量标准合规监管的有效性、优化在用车排放检测体系、出台怠速法规、进一步加严汽油RVP限值、以及划定低/零排放区。

政策情景设计

我们分析了三个政策情景，包括基准情景、现有政策情景、和国际最佳情景。基准情景下，海南省在基准年（2018年）后不再实施新的政策措施；现有政策情景反映的是海南省截至2020年底已经采纳并将在2035年之前实施的政策措施；而国际最佳情景反映的则是本研究建议海南省在2035年之前实施的更加严格的政策措施。表 7给出了三个政策情景的核心假设。

表 7 三个政策情景的核心假设

政策类型	基准情景	现有政策情景	国际最佳情景
轻型车排放标准	• 国五后无新标准	• 2019年7月1日实施国六	• 与现有政策情景一致
重型车排放标准	• 国五后无新标准	• 2021年7月1日实施国六	• 2021年7月1日实施国六 • 2027年1月1日实施下一阶段标准，NOx和PM限值分别在国六基础上降低90%和40%
在用车排放控制	• 无新的在用车排放控制要求	• 与基准情景一致	• 2025年淘汰更新所有国四前的重型车 • 2030年淘汰更新所有国四重型车 • 2035年淘汰更新所有国五重型车
车用汽油标准	• 国五后无新标准	• 2019年1月1日实施国六并加严RVP限值	• 与现有政策情景一致
车用柴油标准	• 国五后无新标准	• 2019年1月1日实施国六	• 与现有政策情景一致
出租车电动化	• 2018年后电动化率保持不变	• 2021: 80%电动化率	• 2021: 100%电动化率
私家车电动化	• 2018年后电动化率保持不变	• 2020: 13%电动化率 • 2025: 80%电动化率 • 2030: 100%电动化率	• 与现有政策情景一致
公交车电动化	• 2018年后电动化率保持不变	• 2021: 100%电动化率	• 与现有政策情景一致
轻型货车电动化	• 2018年后电动化率保持不变	• 2020: 4%电动化率 • 2021: 100%电动化率	• 与现有政策情景一致
中型货车电动化	• 2018年后电动化率保持不变	• 与基准情景一致	• 2025: 11%电动化率 • 2030: 50%电动化率 • 2035: 75%电动化率
重型货车电动化	• 2018年后电动化率保持不变	• 与基准情景一致	• 2025: 5%电动化率 • 2030: 30%电动化率 • 2035: 40%电动化率
电网结构	• 2018年后电网结构保持不变	• 2035: 15%煤电、15%气电、50%核电、20%可再生能源电	• 2035: 14%气电、26%核电、60%可再生能源电

评估方法学

我们利用VECC开发的机动车排放清单模型模拟了三个政策情景下海南省2018-2035年间的机动车大气污染物排放量。本报告所呈现的排放模拟结果是燃料全生命周期的排放量，包括尾气排放、蒸发排放、以及上游排放（即燃料的生产、存储、和分配所导致的排放）。

海南省2019-2035年间的机动车销量和保有量是基于海南省2018年的机动车保有量数据、关键社会经济指标（如GDP增长率）、以及不同车辆类型的存活曲线进行预测的。尾气排放因子和蒸发排放因子是基于VECC所开展的实际道路排放测试得到的。汽油、柴油、天然气、以及电力的上游排放因子是基于最佳的公开可得的数据以及海南省电网结构特点进行预测的。根据海南省所提出的电网清洁化目标，我们假设在现有政策情景下，海南省2035年的发电量将有15%为火电，15%为气电，50%为核电，20%为可再生能源电；根据加州所提出的电网清洁化目标，我们假设在国际最佳情景下，海南省2035年的发电量将有14%为气电，26%为核电，60%为可再生能源电。

我们采用34%的调整系数将工业和信息化部所发布的实验室工况下的百公里油耗和百公里电耗数据转换为实际道路能耗数据（Yang等，2018）。我们假设轻型车和重型车的百公里油耗每年分别下降3%和1%（Yang等，2020），假设轻型车和重型车的百公里电耗均是每年下降1%（Lutsey等，2021）。插电式混合动力汽车用电的里程占比是基于国家新能源汽车大数据联盟的实际道路数据得到的。

评估结果

图 7给出了三个政策情景下海南省2035年机动车大气污染物排放模拟结果。图中的棕色、红色、和蓝色柱子分别代表尾气排放量、蒸发排放量、以及上游排放量，黄色实线则代表基准年（2018年）的排放水平。

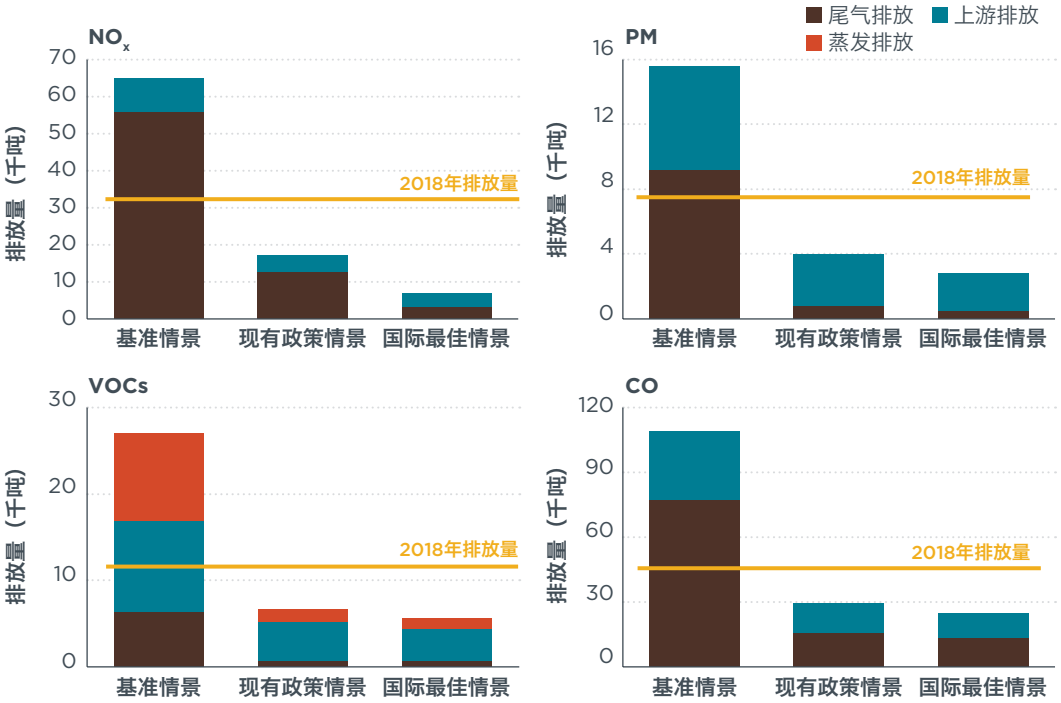


图 7 三个政策情景下海南省2035年的机动车大气污染物排放模拟结果

在基准情景下，海南省机动车的氮氧化物（NOx）、颗粒物（PM）、挥发性有机化合物（VOCs）和一氧化碳（CO）排放量将在未来十五年内持续增长，并在2035年达到2018年的两倍。这主要是因为海南省在建设自由贸易港的过程中，客运和货运交通量都将显著增长。

截至2020年底，海南省已经实施了一系列有效的政策措施，包括轻重型车国六排放标准、车用汽柴油油品质量标准等，同时，海南省还制定了雄心勃勃的轻型车全

面电动化时间表。如果海南省能够将这些现有的政策措施全部落实到位，尤其是按计划完成其所提出的电动汽车推广目标和电网清洁化目标，那么海南省2035年的NOx、PM、VOCs和CO排放量将分别较基准情景下降74%、74%、75%和73%。

如果在此基础上，海南省还能够将本研究基于国际最佳实践所提出的一揽子政策建议付诸实践，那么就能够将以上四类污染物的排放量进一步降低57%、29%、14%和14%。可以看到，国际最佳情景下NOx和PM的排放量下降幅度尤其大，这主要归功于下一阶段的重型车排放标准、提前淘汰更新在用车队、重型货车加速电动化转型、以及电网结构中可再生能源电占比的进一步提升。与NOx和PM相比，国际最佳情景下VOCs和CO的排放量下降幅度相对较小，这主要是因为VOCs和CO排放主要来自于轻型车，而在现有政策情景下，我们就已经假设轻型车将按照海南省所制定的雄心勃勃的时间表实现全面电动化，因此留给国际最佳情景的进一步减排VOCs和CO的空间就非常有限了。

结语

海南省正在坚定地朝着空气质量达到世界领先水平的目标前进，而机动车作为海南省$PM_{2.5}$的首要污染源和臭氧的重要污染源，是海南省实现其空气质量目标需要破除的最大障碍。当前，海南省正在中央的大力支持下建设面向国际的自由贸易港，这为海南省提供了一个在机动车排放控制政策方面与国际最佳实践接轨的绝佳机会。在这一背景下，ICCT与VECC联合撰写了这份研究报告，通过国际对标的方式为海南省的机动车排放控制政策提出代表国际先进水平的政策建议，并通过排放建模的方式评估了这一揽子政策建议能够为海南省带来的大气污染物减排收益。

这仅仅是第一步。海南省要稳步地实现其雄心勃勃的空气质量目标，很重要的一点就是要定期评估其机动车排放控制政策所取得的成效、持续追踪这一政策领域最新涌现的国际最佳实践、并及时调整和改进自己的政策措施。这是一个动态前进的过程，ICCT和VECC将积极地参与到这一过程中，并持续为海南省的机动车大气污染物排放控制工作提供必要的技术支撑。受数据可获得性的限制，本研究未能在大气污染物减排收益的基础之上再进一步，模拟评估这一揽子政策建议能够为海南省带来的空气质量提升收益，这是下一步的研究中可以考虑深入探究的内容。

最后，特别值得强调的一点是，技术能力的提升和法律框架的完善对于海南省的机动车大气污染物排放控制工作将发挥决定性的作用。海南省一方面要大幅增加从事机动车大气污染物排放控制工作的人员数量和技术能力；另一方面，还要为各类创新性政策手段（如零排放区）的实施搭建好相应的法律基础。只有这样，本报告所提出的这一揽子代表国际先进水平的政策建议才能够顺利落地、成功实施、并为海南省带来预期的大气污染物减排收益。

参考文献

崔洪阳, Dale Hall, 李晋, Nic Lutsey. (2021a). 全球汽车电动化转型: 2020简报. 待发布

崔洪阳, Pramoda Gode, Sandra Wappelhorst. (2021b). 全球机动车零排放区政策进展综述. https://theicct.org/publications/global-cities-zez-dev-CH-aug21

樊欢迪. (2021年1月19日). 海南: 2035年清洁能源发电装机比重达到89% 基本建成清洁能源岛. https://newenergy.in-en.com/html/newenergy-2399698.shtml

海南省人民政府. (2019). 海南省清洁能源汽车发展规划 (2019-2030) . http://www.hainan.gov.cn//hainan/szfwj/201903/51856f7e3b3d4fa6b4efc4a0ffdf98e8.shtml

海南省人民政府办公厅. (2019). 关于轻型汽车执行国家第六阶段机动车排放标准的通告. https://www.hainan.gov.cn/hainan/szfbgtwj/201812/bc4422153a2d4f6ebb66a9249c2bac8f.shtml

海南省生态环境厅. (2020). 2019海南省生态环境状况公报. http://hnsthb.hainan.gov.cn/xxgk/0200/0202/hjzl/hjzkgb/202006/t20200604_2799067.html

康景林. (2019年3月5日). 全国人大代表邓小刚: 海南将制定最严地方标准控制机动车污染. http://www.hinews.cn/news/system/2019/03/05/032045209.shtml

林芳羽. (2021年4月12日). 海南省委书记沈晓明: 争取到2030年海南清洁能源装机比重达85%左右. http://www.hinews.cn/news/system/2021/04/12/032537724.shtml

孙维锋, 朱玉. (2021年4月19日). 海南电网: "十四五"推动海南清洁能源装机占比超过80%. https://hainan.sina.cn/news/zh/2021-04-19/detail-ikmxzfmk7715565.d.html?wm=3049_0032

孙秀英, 徐文帅, 吴晓晨. (2020年8月11日). 海南大气复合污染综合来源解析: 机动车尾气排放占比三成. http://www.chinanews.com/sh/2020/08-11/9261870.shtml

中共中央 国务院. (2018). 关于支持海南全面深化改革开放的指导意见. http://www.gov.cn/zhengce/2018-04/14/content_5282456.htm

中共中央 国务院. (2020). 海南自由贸易港建设总体方案. http://www.gov.cn/zhengce/2020-06/01/content_5516608.htm

中化石油. (2021年6月11日). 环科易能流动检测车 您身边的移动油品实验室. https://mp.weixin.qq.com/s/8i5U_RsKZMFxEKZanCDjPw

周頔,杨漾. (2021年4月12日). 沈晓明: 到2035年, 海南岛的生态环境要做到世界领先. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_12156412

Badshah, H., Posada, F., & Muncrief, R. (2019). Current state of NOx emissions from in-use heavy-duty diesel vehicles in the United States. International Council on Clean Transportation, https://theicct.org/publications/nox-emissions-us-hdv-diesel-vehicles

Buysse, C. & Sharpe, B. (2020). California's Advanced Clean Trucks regulation: Sales requirements for zero-emission heavy-duty trucks. International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/publications/california-hdv-ev-update-jul2020

California Air Resources Board (CARB). (2018a, November 28). CARB's Heavy-Duty In-Use Compliance Testing Program (Presentation for Chinese Ministry of Ecology and Environment). https://theicct.org/sites/default/files/12.%20CARB%E2%80%99S%20HEAVY-DUTY%20IN-USE%20COMPLIANCE%20TESTING%20PROGRAM.pdf

California Air Resources Board (CARB). (2018b). 2017 Annual Compliance Report. https://ww3.arb.ca.gov/enf/reports/2017_enf_annual_report.pdf

California Air Resources Board (CARB). (2020). Heavy-Duty Omnibus Regulation. https://ww2.arb.ca.gov/rulemaking/2020/hdomnibuslownox

European Commission. (2020). European vehicle emissions standards – Euro 7 for cars, vans, lorries and buses. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12313-European-vehicle-emissions-standards-Euro-7-for-cars-vans-lorries-and-buses_en

He, H. (2020). Why China should not postpone implementation of the China 6 emission standard for new cars. International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/publications/China6-position-brief-202004

Lutsey, N., Cui, H., & Yu, R. (2021). Evaluating electric vehicle costs and benefits in China in the 2020-2035 time frame. International Council on Clean Transporation, https://theicct.org/publications/ev-costs-benefits-china-EN-apr2021

Rodríguez, F., Bernard, Y., Dornoff, J. & Mock, P. (2019). Recommendations for post-Euro 6 standards for light-duty vehicles in the European Union. International Council on Clean Transportation, https://theicct.org/publications/recommendations-post-euro-6-eu

Rodríguez, F. (2020). LNG trucks: A bridge to nowhere. International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/blog/staff/lng-trucks-bridge-nowhere

Rodríguez, F and Badshah, H. (2021). Real world NOx performace of Euro VI-D trucks and recommendations for Euro VII. International Council on Clean Transportation, https://theicct.org/publications/performance-EuroVII-recommendations-jul2021

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2012). Development of Evaporative Emissions Calculations for the Motor Vehicle Emission Simulator MOVES2010. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100F3ZY.PDF?Dockey=P100F3ZY.PDF

World Health Organization (WHO). (September 22, 2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

Yang, L., He, H., Shao, Z., Cui, H., and Mao, X. (2021). A retrospective review of China's Clean Diesel Program. International Council on Clean Transportation, https://theicct.org/publications/review-china-diesel-jun2021

Yang, Z., & Yang, L. (2018). Evaluation of real-world fuel consumption of light-duty vehicles in China. International Council on Clean Transportation, https://theicct.org/publications/real_world_fuel_consumption_ldv_China

Yang, Z., & Cui, H. (2020). Technology roadmap and costs for fuel efficiency increase and CO2 reduction from Chinese new passenger cars in 2030. International Council on Clean Transportation, https://theicct.org/publications/china-costcurves-oct2020

www.theicct.org

communications@theicct.org

twitter @theicct

icct
国际清洁交通委员会