

中国大城市机动车排放控制

20年历程回顾与展望

A Retrospective and Prospective Study on
20 Years' Mobile Source Emissions Control in Megacities of China



清华大学
中国环境科学研究院
2022年12月



中国大城市机动车排放控制

20年历程回顾与展望

A Retrospective and Prospective Study on
20 Years' Mobile Source Emissions Control in Megacities of China



清华大学
中国环境科学研究院
2022年12月



关于作者

报告负责人：

吴焱，清华大学环境学院

丁焰，中国环境科学研究院机动车排污监控中心

顾问专家：

中方组长：郝吉明，中国工程院院士 / 美国国家工程院外籍院士

外方组长：Michael Walsh，国际清洁交通委员会（ICCT）创会主席

研究团队：

清华大学环境学院：吴焱、张少君、吴潇萌、温轶凡、何立强、王韵杰、刘敏

中国环境科学研究院机动车排污监控中心：丁焰、尹航、王军方、马冬

北京市生态环境监测中心：刘保献、杨妍妍

上海市环境科学研究院：黄成、胡馨遥、田俊杰

深圳市环境科学研究院：颜敏、曾沛

成都市环境保护科学研究院：谭钦文、宋丹林、邓也、周子航

交通运输部规划研究院：徐洪磊、吴睿、王人洁、杨道源

北京交通发展研究院：刘莹、何巍楠

国际清洁交通委员会（ICCT）：何卉、杨柳含子、牛天林、崔洪阳

顾问专家组：

中方专家：郝吉明，周伟，贺克斌，贺泓

外方专家：Michael Walsh, Anumita Roychowdhury, Leonora Rojas-bracho, Lennart Erlandsson, Jim Blubaugh, Supat Wangwongwatana.



致谢：

本研究由清华大学环境学院和中国环境科学研究院机动车排污监控中心统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

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。

目录

执行摘要	001
------	-----

01

背景	023
----	-----

02

中国 20 年机动车排放控制历程	029
------------------	-----

2.1 新车排放标准持续加严	031
2.2 车用油品质量改善	034
2.3 强化在用车监管	039
2.4 新能源汽车推广	041
2.5 交通优化措施	045
2.6 代表性大城市社会经济和机动车发展历程概览	052

03

北京：“车 - 油 - 路”一体化综合控制的先行者	057
---------------------------	-----

3.1 机动车排放污染综合控制成效显著	060
3.2 基于远程 OBD 的重型车在线监管	074

04

上海：坚持公共交通优先战略，推动能源多样化尝试	085
-------------------------	-----

4.1 坚持公共交通优先发展战略	088
4.2 车用能源多样化尝试	098

05

深圳：推广新能源汽车的先锋城市	109
-----------------	-----

5.1 深圳新能源汽车发展历程	112
5.2 新能源汽车推广的政策及配套体系建设	120
5.3 新能源汽车推广效益评估	130

06

成都：智能交通大数据系统推动精准管控	139
--------------------	-----

6.1 成都智能交通系统的建设	142
6.2 基于智能交通大数据的机动车排放控制综合决策系统	146
6.3 精细化的机动车排放管控评估案例	151

07

总结与展望	165
-------	-----

7.1 总结	166
7.2 展望	172

缩略词表

ASM	稳态加载测试工况方法	NMHC	非甲烷碳氢
BEV	纯电动汽车	NH₃	氨
CO	一氧化碳	NO₂	二氧化氮
CO₂	二氧化碳	NO_x	氮氧化物
DPF	颗粒物捕集装置	O₃	臭氧
GDP	国民生产总值	OBD	远程在线车载诊断
GPS	全球定位系统	PAHs	多环芳烃
HC	碳氢化合物	PEMS	车载排放测试系统
HCHO	甲醛	PHEV	插电式混合动力汽车
ICCT	清洁交通委员会	PM_{2.5}	细颗粒物
ITS	智能交通系统	PN	颗粒数
LEZ	低排放区	RFID	射频识别
LPG	液化石油气	SCR	选择性催化还原系统
NG	天然气	VOCs	挥发性有机物

执行摘要

执行摘要

随着社会经济的持续快速发展和城市化进程的不断深化，中国的汽车市场经历了长达 30 年的高速增长，成为了中国经济奇迹的一个缩影。2009 年，中国成为全球汽车新车销量第一的国家；2013 年，中国成为全球首个新车销量突破 2000 万辆的国家；2021 年，中国成为全球汽车保有量最大的国家。快速的机动化进程在给国家和人民带来产业发展、社会进步、出行便利等一系列好处的同时，也给空气质量、人群健康、能源安全和气候变化带来了严重的挑战。

早在上世纪 90 年代中期，中国就已经清醒地意识到今后机动车排放将带来的空气污染问题，并寻求借鉴欧美发达国家先进的控制经验。2000 年，中国实施国一轻型车新车排放标准，正式拉开了国家层面系统控制机动车排放的帷幕。20 年间，中国实施了逐步加严的新车和油品标准、加强在用车监管、推广新能源汽车和交通管控等一系列措施，构建起“车-油-路”一体化的机动车排放综合控制体系(图 1)。目前，中国已全面实施了第六阶段的新车排放标准和油品标准，初步构建了融合多种先进技术手段的实际道路在用监管体系，起步交通运输结构和交通能源结构调整，并已成为新能源汽车推广数量最多的国家。经过 20 年的努力，中国正逐步缩小与欧美等发达国家在机动车排放控制水平上的差距。



图1 | “车-油-路”一体化的机动车排放综合控制体系

大城市为推动中国的机动车排放控制进程发挥了至关重要的示范和引领作用。由于机动车在城市高速增长、高度聚集和高频使用的特点（图 2），大城市的决策者有更强的动力制定更严格的政策措施来减少机动车排放进而改善城市空气质量。同时，城市率先开展的控制实践经验也有助于国家层面的控制政策更快和更有效地实施。例如，北京 1997 年率先推广无铅汽油，1999 年实施轻型汽车国一排放标准，均在 1~2 年后被推广至全国范围实施，是“车-油-路”一体化综合控制的先行者（图 4），并成为过去 20 年车-油同步控制的典范；上海率先确立了公共交通优先发展的战略，并积极开展了车用能源多样化的探索和示范应用；深圳成为全球首个公交和出租车队全面电动化的城市，构建了健全的新能源汽车产业布局；成都开发了基于智能交通大数据的机动车排放综合决策系统，实现更精细化的交通排放监管与决策。这些城市结合自身特点开展了各有特色的机动车排放控制实践（图 3），在机动车保有量快速增长的同时，均实现了污染物排放的有效控制和削减，即“机动车增长与污染排放的脱钩”（见图 5 北京示例），有力的支撑了城市空气质量的显著改善。这些实践经验将为其他城市探索绿色低碳的交通发展路径逐步迈向交通零排放提供非常有益的借鉴。

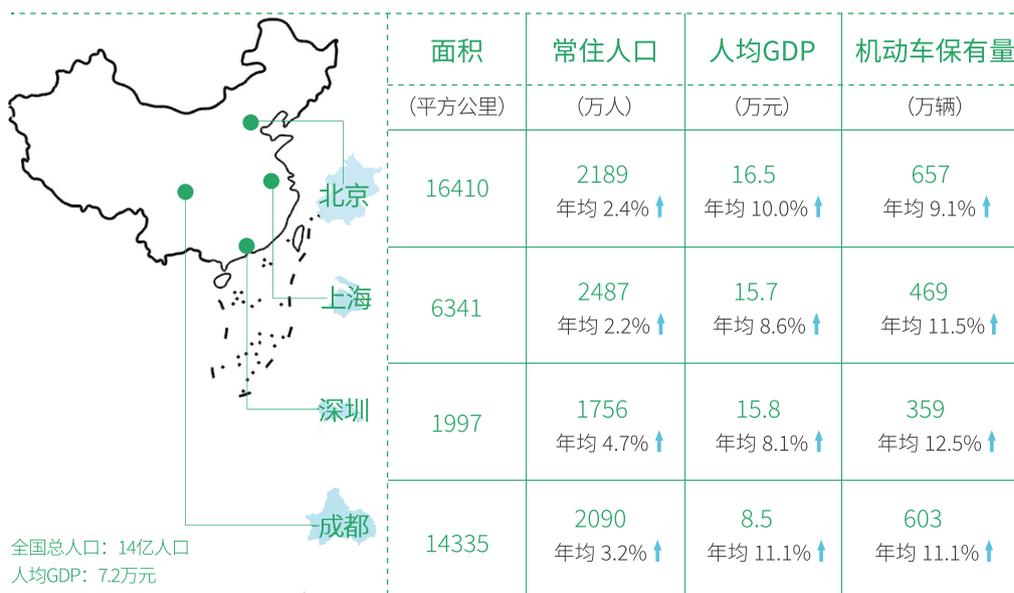
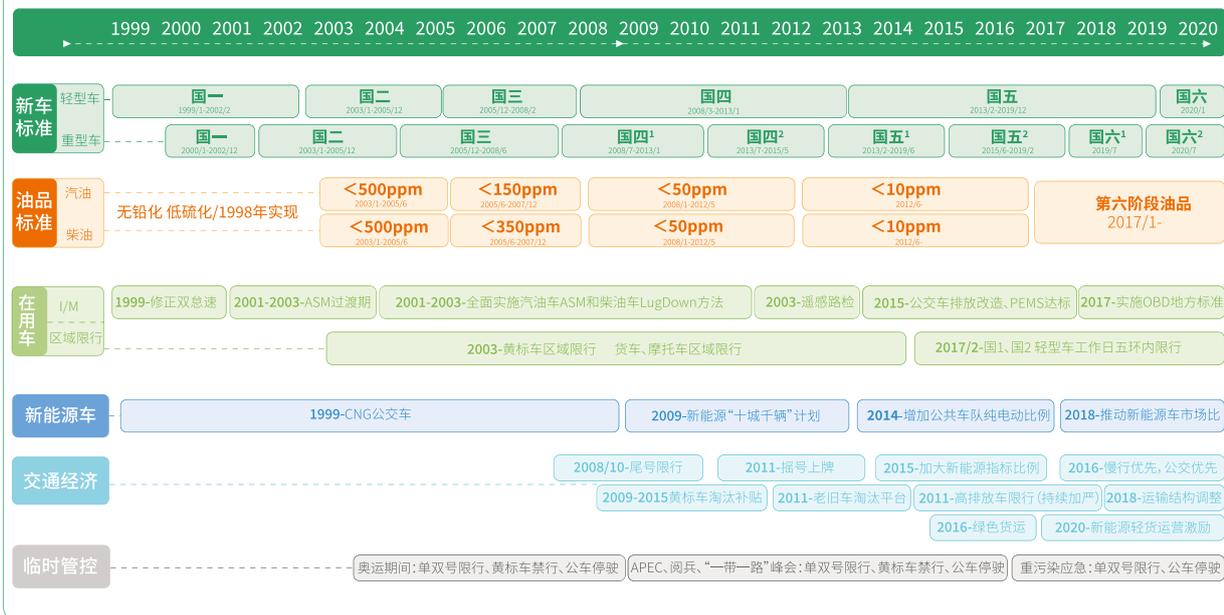


图2 | 2020年北京、上海、深圳、和成都的社会经济和机动车总量等基本指标

北京：“车-油-路”一体化的机动车排放综合控制的先行者

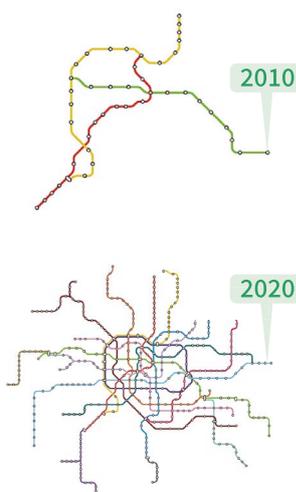
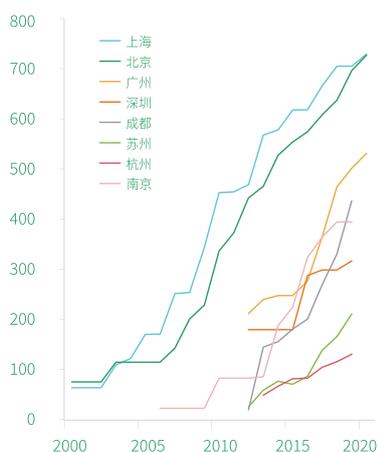


¹ 仅在公交、环卫和邮政等城市公共车队中实施；² 对于货运、旅游等长途社会车队中实施。

上海：坚持公共交通优先，推动能源多样化

轨道交通发展

轨道交通运营里程（公里）



生物柴油示范



深圳：大力推广新能源汽车和完善产业布局

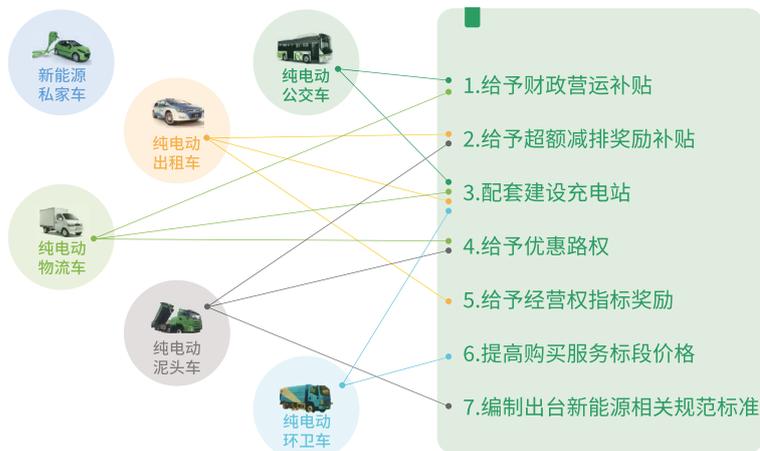
▼ 共性措施

1. 出台政策, 建立推广协调机制
2. 给予财政购置补贴(国补+地补)
3. 推动公共充电设施建设



① 公交车充电桩 ② 私家车充电桩

▼ 专项措施



成都：智能交通大数据系统推动精准管控

▼ 智能交通排放综合决策系统



时间尺度:小时 空间尺度:路段

▼ 智能交通卡口



图3 | 北京、上海、深圳和成都各有特色的机动车排放控制实践

▼ 机动车保有量 (百万辆)

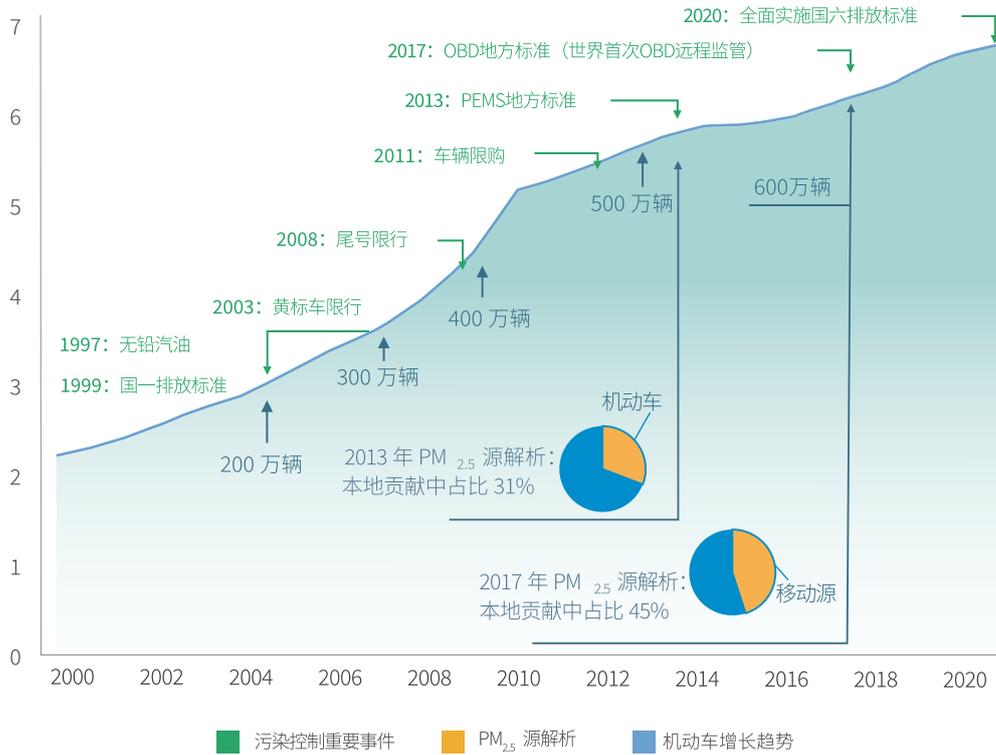


图4 | 北京机动车增长趋势和污染控制重要事件 (2000-2020)

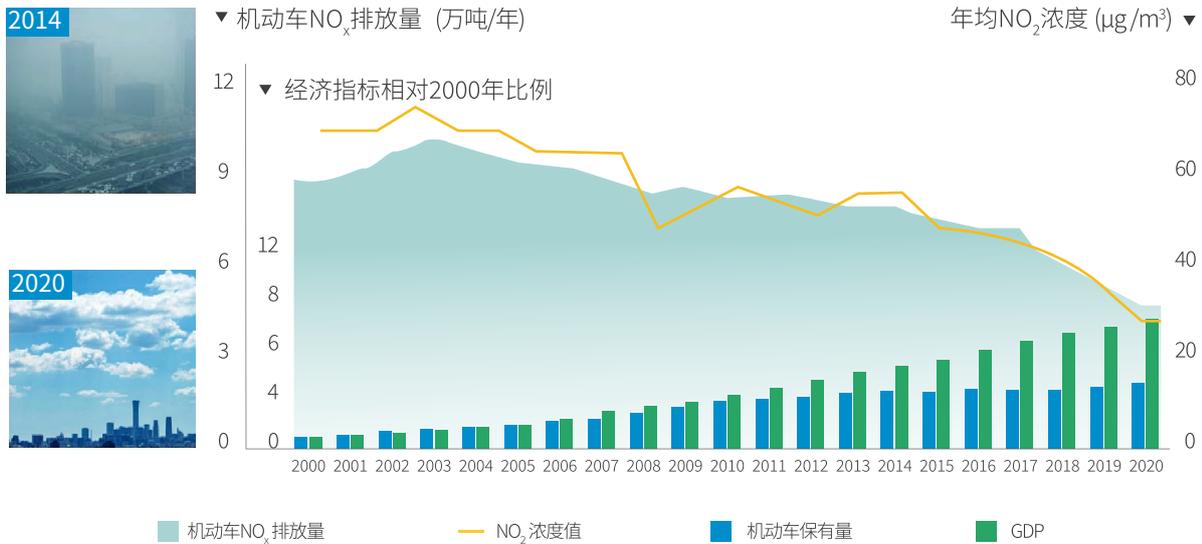


图5 | 北京机动车增长与污染排放的脱钩 (2000-2020)

总结北京、上海、深圳和成都四城市以及全国 20 年机动车污染排放控制历程的重要经验如下：

1. 车油标准同步并轨，保障新车控制持续加严

实施更严格的机动车排放标准来加强新车排放控制是机动车排放控制体系中的核心内容，也是过去 20 年中国机动车排放控制减排效益的最大贡献者。1999 年 1 月，北京成为中国第一个实施轻型汽油车国一排放标准（相当于欧 1 排放标准）的城市，此后北京引领全国实施了轻型汽油车和重型柴油车等车型的多个阶段的新车排放标准，为全国持续加严新车排放标准提供了宝贵的经验。2020 年，北京先于全国正式实施轻型车与重型车的国六标准，已与世界上最严格法规接轨。新车标准的持续加严，既推动了汽车产业持续的升级换代，也直接加快了庞大车队的整体清洁化进程。

从北京获得的更重要的经验是：只有同步实施油品和车辆标准，才能使新车排放标准的实施获得最大减排效益。北京在 1990 年代就开始提高油品质量，逐步实现了车用油品的无铅化（1998 年）和低硫化（2012 年）。在全国由于油品标准滞后而多次推迟新车标准的背景下，北京领先全国实施了第二到第五阶段油品标准，确保了油品标准和新车排放标准的同步实施，为推动全国逐步实现“车油一体化”进程（例如国五阶段的“车油同步”和国六阶段的“三油并轨”）起到了良好的示范作用。在过去 20 年的北京机动车总减排效益中，车油同步对 CO、HC、NO_x、PM_{2.5} 分别贡献高达了 74%、73%、66%、55% 的减排量（图 6），毫无疑问成为了机动车污染物减排最大的贡献者。

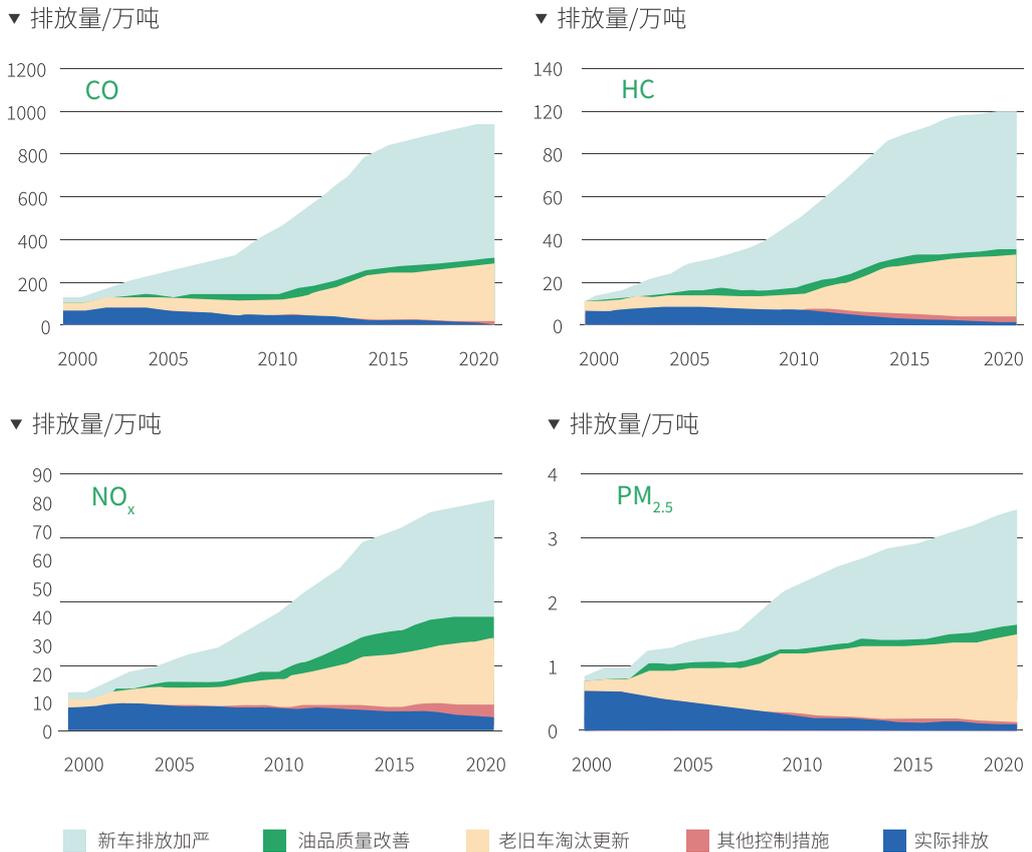


图6 | 北京机动车污染物减排量评估 (2000-2020)

2. 多种先进技术融合，强化在用车排放监管

北京等城市经过 20 年的实践，初步形成了多技术手段融合的在用车检验方法体系，并建立起常态化的环保监管机制。通过应用更先进的检测技术，以持续改进在用车尾气检测的测试方法，这是北京强化 I/M 制度的核心举措。1999 年，北京修正了双怠速测试方法，对国一新车执行不同的限值标准；2003 年开始全面实施更严格的稳态加载测试工况方法（ASM），并随着新车排放标准的加严不断更新在用车排放检测限值。对于在用柴油车，北京于 2003 年执行加载减速烟度测试法（LugDown），并加严了 LugDown 测试的烟度排放限值。上述更先进的检测技术方法的实施和检测限值的持续加严，有力的提升了对高排放车的识别能力和检测准确性。

近年来，北京逐步强化对在用车的实际道路排放监管，积极推进先进监管技术的应用和监管平台的建设。先后应用了道路遥感测试、道路车载测试、远程在线车载诊断等一系列的先进监管技术。针对重型柴油车实际道路 NO_x 排放严重超标这一当今国际在用车控制领域的最大挑战，北京制订了原厂加装远程在线车载诊断（OBD）远程排放监控的地方标准和实施条例，提

前实施满足国六标准的 OBD 加装和数据传输要求，成为全球首个实践 OBD 联网监管的城市，目前已初步形成了联网十万辆量级的重型在用车辆排放在线监管平台（图 7）。

采用强有力且高效的 OBD 远程在线监管，使得北京五重型柴油车 NO_x 排放水平比无 OBD 监控的国五车排放降低了约 50~70%，这导致近年来北京重型车队 NO_x 排放持续大幅下降，为北京 PM_{2.5} 和 NO₂ 浓度持续降低做出了重要的贡献。2020 年北京柴油货车车队的 NO_x 排放相比 2017 年削减了 43%，超过美国加州柴油车队同期的减排幅度（~37%）。这一成果也实实在在体现在空气质量的改善上，同期北京 NO₂ 浓度削减 37%，NO₂ 年均浓度已于 2019 年首次达标。



图7 | 北京重型车排放远程在线监测示范平台

在总结城市在用车辆监管经验的基础上，国家近年来陆续出台了多项标准法规，形成以排放年检、道路排放抽检、道路车载测试、道路遥感等多种技术手段并存的在用车辆检查与维护体系（图 8）。重型车国六标准提出了重型车 OBD 远程在线终端的加装（国六 a）和实时在线传输（国六 b）的要求，凸显了未来 OBD 监管的重要性。



图8 | 在用车辆定期检验与抽检

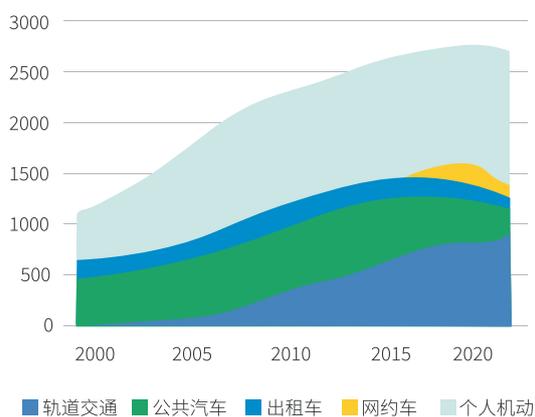
3. 坚持城市公共交通优先战略，推动货运交通结构调整优化

在城市化进程中重塑公共交通体系，鼓励绿色可持续的城市出行模式是城市发展绿色低碳交通系统的根本之策。上海、北京等城市高度重视公共交通体系和慢行交通体系的优化，通过高效、绿色、低碳的交通模式转变应对日益上升的交通出行需求压力。

上海在全国率先确立了“公共交通优先”作为城市交通的核心发展战略，依托城市规划和交通规划制定了一系列发展轨道交通、优化公交线路、鼓励公共交通和慢行交通出行等相关政策措施，结合私人小汽车上牌摇号的限购政策，使上海交通出行结构得到显著优化（图9），交通环境空气质量得到显著改善。截至2020年，上海公共交通出行占比已经提升到47%；轨道交通运营里程超过700公里，较2000年增加了10倍；公交专用道总长500公里，中心城区公交站点300米半径全覆盖；上海千人汽车保有量控制在180辆左右，为国内类似人均GDP大城市的最低水平。机动车的 NO_x 和VOCs排放总量持续下降，中心城区的 NO_2 浓度在2015~2020年间降幅达18%，高值区面积明显缩小（图10）。20年的坚守，上海成功探索出了一条将公共交通优先战略与传统机动车排放综合控制相结合的绿色低碳交通发展路径。

a. 出行量及出行方式

▼ 日均出行量 (万人/天)



b. 轨道交通发展

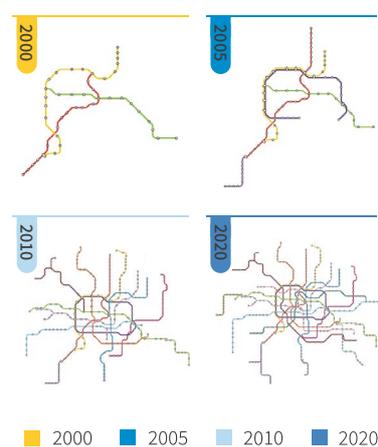
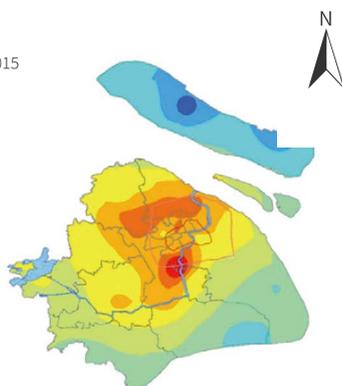
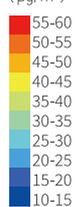


图9 | 上海居民出行方式变化及轨道交通发展情况 (2000-2020)

2015

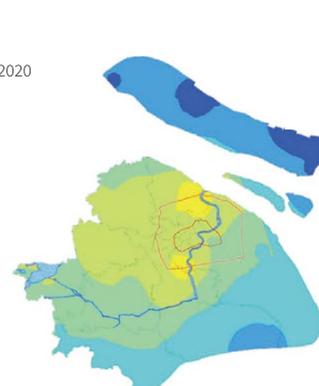
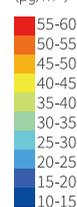
NO₂ 浓度 -2015
(μg/m³)



0 5 10 20 30 km

2020

NO₂ 浓度 -2020
(μg/m³)



0 5 10 20 30 km

图10 | 2015和2020年上海NO₂浓度空间分布变化

中国货运结构高度依赖公路运输。“打赢蓝天保卫战”和“推动运输结构调整”三年行动计划明确将调整运输结构作为治理柴油货车污染防治攻坚战的关键任务之一。推进大宗货物运输“公转铁、公转水”为主攻方向，多部门实施了配套的经济措施和基础设施建设的支持政策。三年行动计划实施以来，中国货物运输结构公路一家独大的局面开始得到缓解：铁路货运量占比开始止跌反弹，2017-2020年均增幅接近7%；公路货运量占比由2017年的78%降至2020年的74%；环渤海、长三角等地区沿海港口的大宗货物运输结构明显优化。但与1980年铁路货运占比超过30%相比，运输结构的调整优化才刚刚起步，任重道远（图11）。

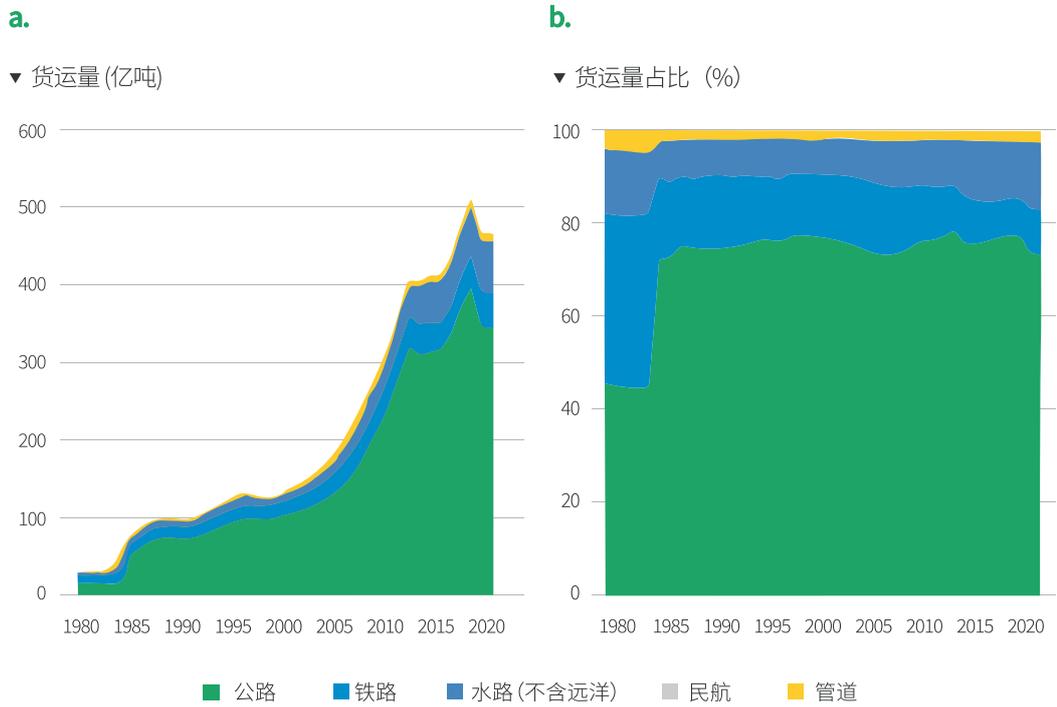


图11 | 中国货运量及运输结构变化趋势 (1980-2020)

4. 全方位激励新能源汽车发展，推动迈向道路零排放

新能源汽车推广具有显著的减污降碳协同效益，是中国构建清洁高效的现代能源体系和产业绿色低碳转型的关键抓手，也是未来实现“美丽中国”和“碳中和”发展目标的关键举措。中国自2009年启动“十城千辆”新能源汽车示范工程以来，陆续推出了购置补贴、税费减免、基础设施建设和“平均燃油消耗量积分+新能源汽车积分”的双积分政策等措施鼓励新能源汽车推广，并逐渐成长为全球电动汽车产销第一大国。截止2020年底，全国新能源汽车保有量达492万辆，占全球新能源汽车总量的40%以上，并呈持续高速增长的趋势。

深圳是中国首批开展新能源汽车示范和推广的城市之一，连续六年被评为“世界电动汽车之都”。截至2020年新能源汽车推广已接近40万辆，占深圳机动车总保有量的11%，电动化率在国内大城市中处于领先；是全球首个实现了公交和出租车队全面电动化的城市，并连续五年成为全球新能源电动货车保有量最大的城市。

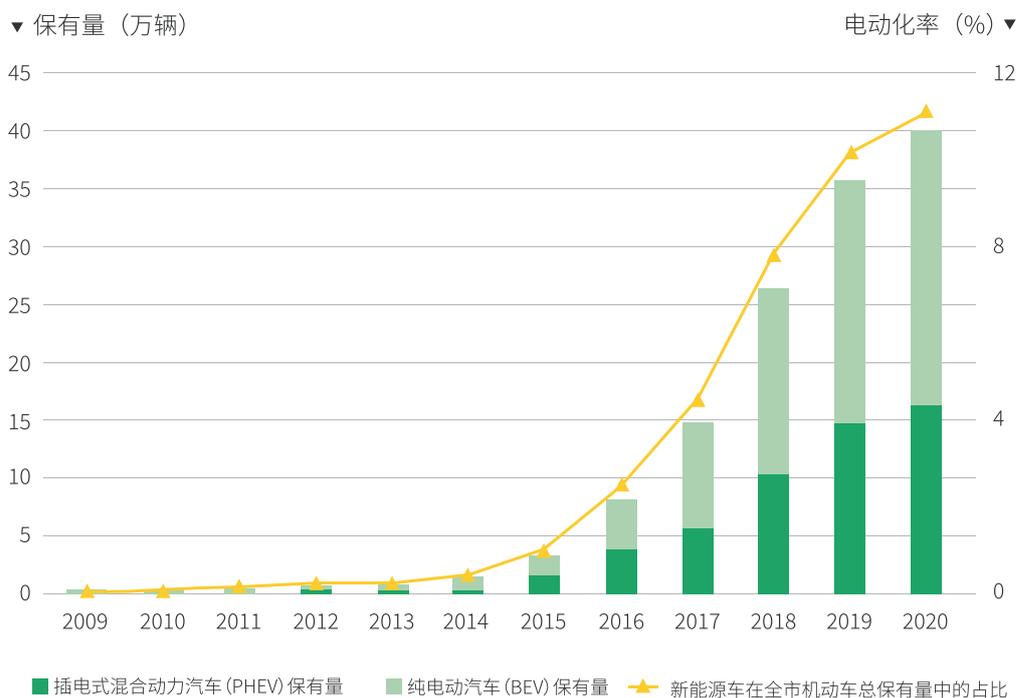
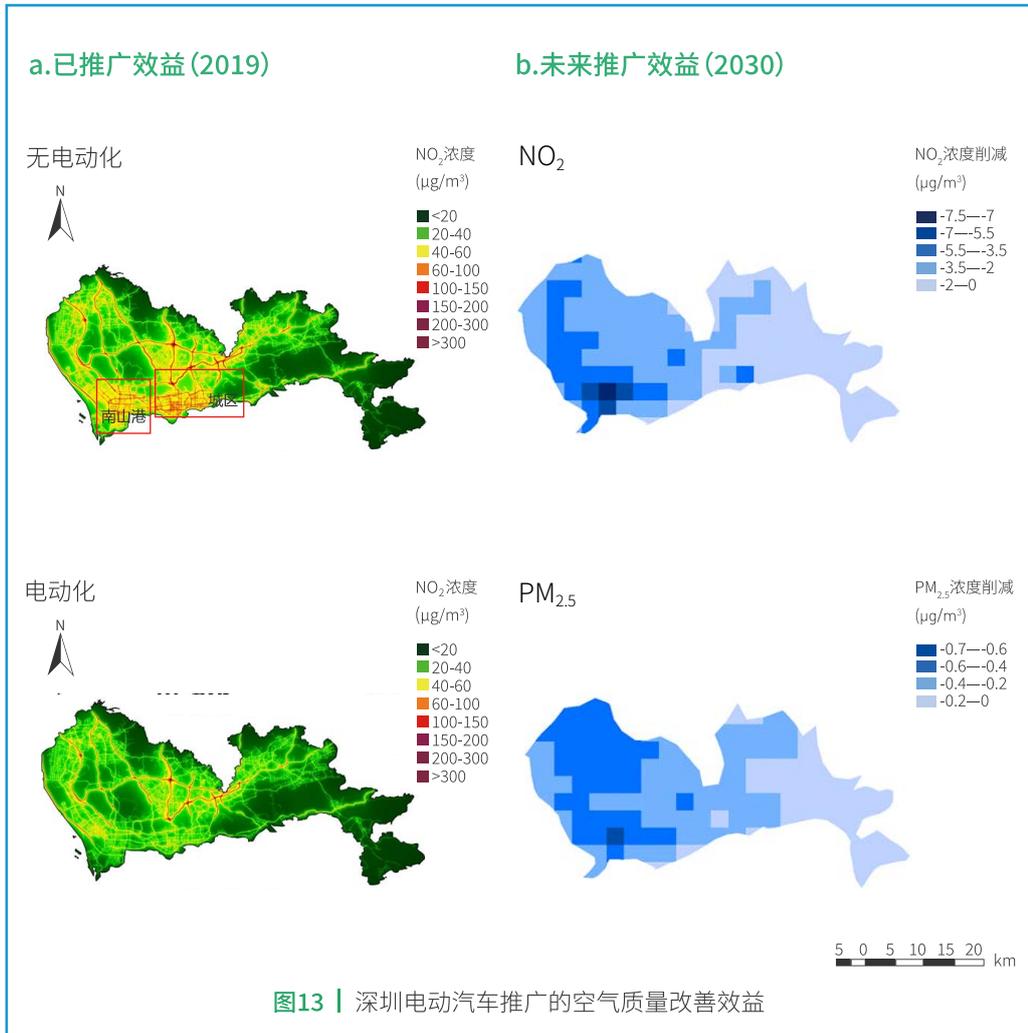


图12 | 深圳新能源汽车保有量及电动化率增长趋势 (2009-2020)

深圳新能源汽车的飞速发展得益于该城市完善的配套体系建设和健全的新能源汽车产业布局。10 余年来，深圳陆续出台了新能源汽车发展直接相关的政策文件超过 30 项，从发展规划、标准规范、补贴激励、基础设施等多个方面形成了完善的配套服务和支撑保障体系。例如，深圳制定了多样化的补贴方式与激励措施，涵盖新能源车购置、使用、基础设施和电池回收全生命周期，充分发挥了经济激励对刺激新能源车发展的巨大作用。与此同时，深圳高度重视新能源产业布局，聚集了 2000 多家新能源汽车相关企业，形成了完善的新能源汽车产业链，成为了全球范围内新能源汽车企业最集中的城市之一。

深圳新能源汽车快速发展成为保障“深圳蓝”目标实现的重要助力。2014 年以来，深圳 NO_2 浓度大幅改善，其中 35% 的效益来自于交通电动化（图 13a）。随着今后更大规模的新能源车推广，将持续为深圳协同控制 $\text{PM}_{2.5}$ 和峰值 O_3 污染带来可观的空气质量改善（图 13b）和人群健康效益，同时对降低道路交通生命周期温室气体排放贡献也日趋显著。



5. 鼓励车用能源多样化尝试，积极探索生物燃料的示范推广

生物燃料是中国交通能源多样化、清洁化和低碳化的重要技术路径之一。过去 20 年，中国积极开展了车用生物燃料的试点探索。为了调整能源结构、改善生态环境质量、降低 CO₂ 排放，更好地应对高存量陈化粮处理问题，生物燃料乙醇汽油近年来不断发展和推广。2017 年发改委等十五部委联合发文推广乙醇汽油，并确定了生物乙醇产业总体布局。目前中国已有 15 个省份全部或者部分地市封闭销售 E10 乙醇汽油（图 14），生物乙醇推广规模近 300 万吨。



图14 | 中国乙醇汽油 E10 的推广情况

为妥善解决餐厨废弃油脂（“地沟油”）回流餐桌导致的食物安全问题，上海通过建立“收、运、储、调、用”全产业链闭环治理模式（图 15），在公交和货车等重型车辆上开展了 B5 和 B10 生物柴油的规模化应用。目前，上海餐厨废弃油脂日收集量已达 200 余吨，每年 B100 生物柴油产量已超 5 万吨，可替代接近 1% 的上海交通柴油消耗，形成了一定的节能减排效益，为城市车用能源多样化提供了有益的经验。

需要指出的是，与美国、巴西等国相比，我国生物燃料推广的规模还远远落后。2020 年，美国和巴西生物乙醇的产量已经分别达到 4160 万吨和 2430 万吨，欧盟生物柴油的产量也已达 1360 万吨。随着碳达峰和碳中和目标的提出，中国在生物燃料的研发和推广亟需进一步加大力度。

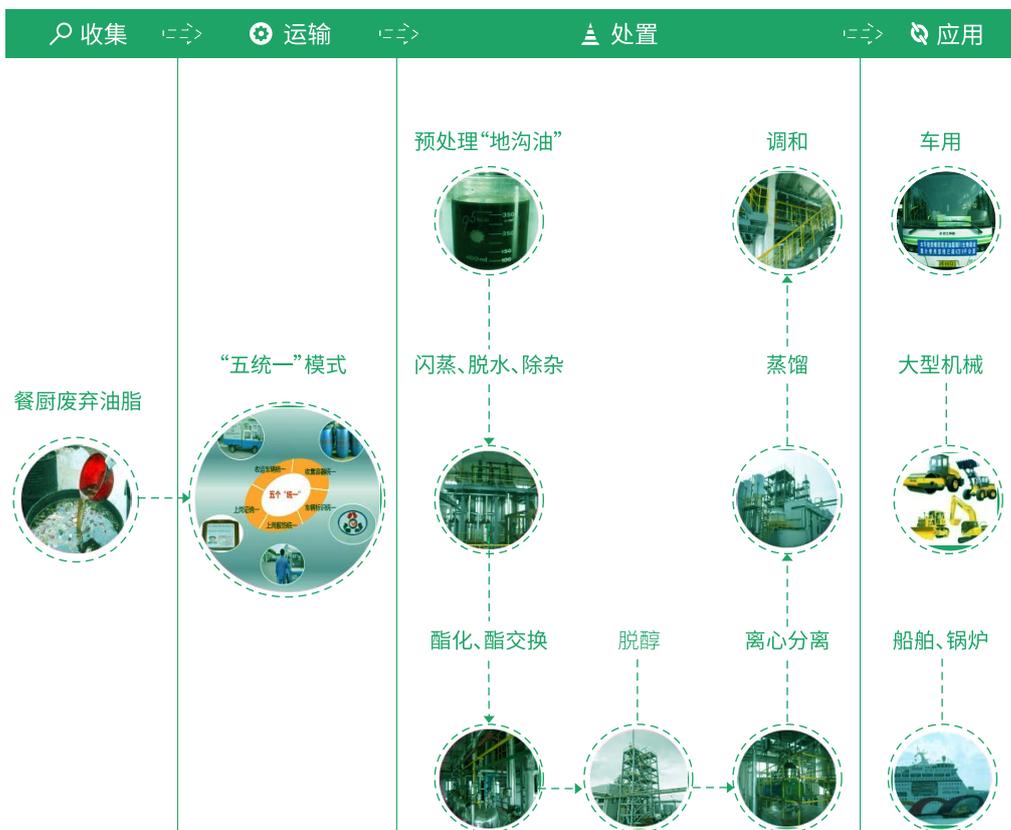


图15 | 上海“地沟油”制生物柴油的全产业链闭环治理体系

▼ 2020年产量 (百万吨)

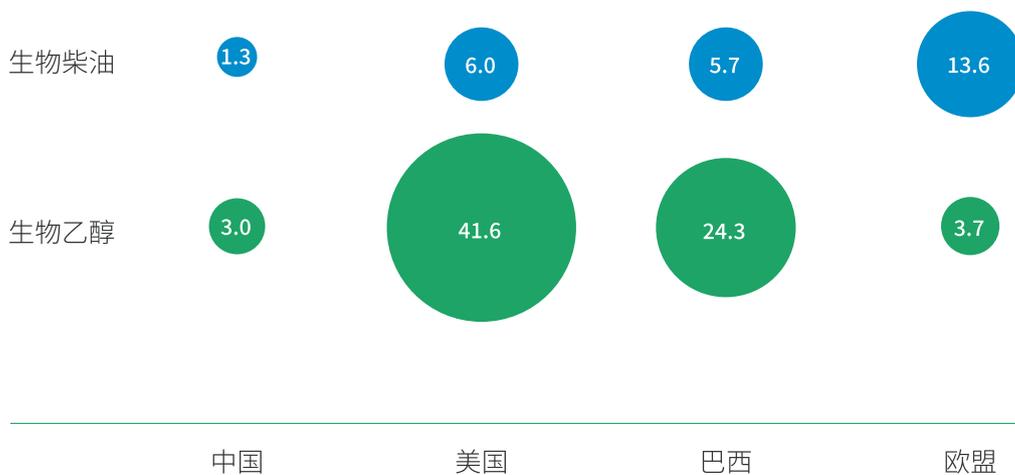


图16 | 中国、美国、巴西和欧盟生物燃料推广比较

6. 打造智能交通大数据系统，支撑机动车排放精准管控

发展智能交通技术，基于交通大数据实现城市交通排放控制决策的精细化、智慧化转型是一个重要的技术发展趋势。作为一座不实施限牌、限购政策的城市，成都致力于通过智能交通管控的方式解决交通和环境问题。成都高度重视发展智能交通技术，建设了高密度的交通监测网络，中心城区部署的 4000 余个交通监控卡口可实时监测道路车流活动水平并匹配详细的车辆信息。进一步融合全路网交通流机器学习模拟方法，开发了实时动态的机动车排放综合决策系统（图 17）。该系统平台可实现全路网/单道路车流量、排放量的连续 72 小时实时动态展示，以及短期和中长期排放控制决策效益分析，极大提高了交通排放监管的时效性、精细度和智能化。在成都世警会空气质量保障、新冠疫情期交通排放动态跟踪、低排放区政策规划等案例中得到成功的应用（图 18），为成都机动车排放控制的精准决策提供了重要技术支持。

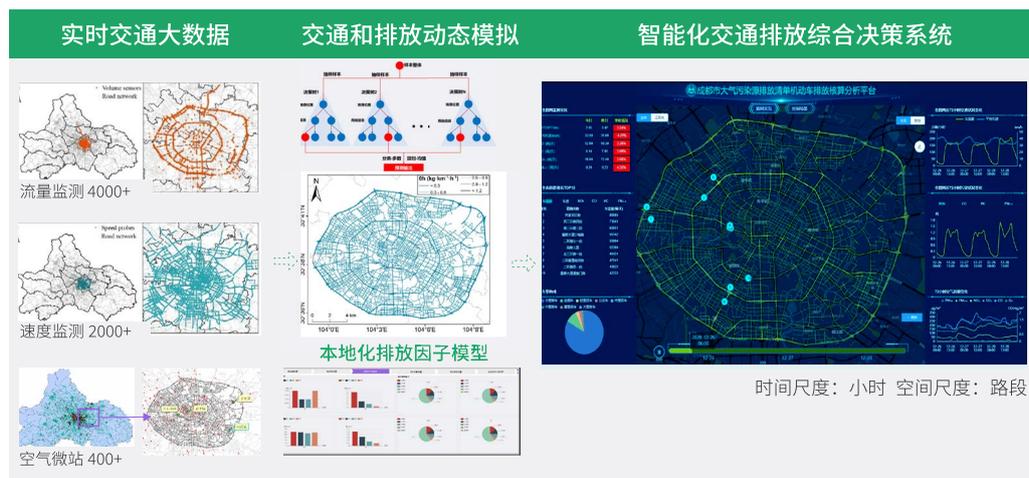
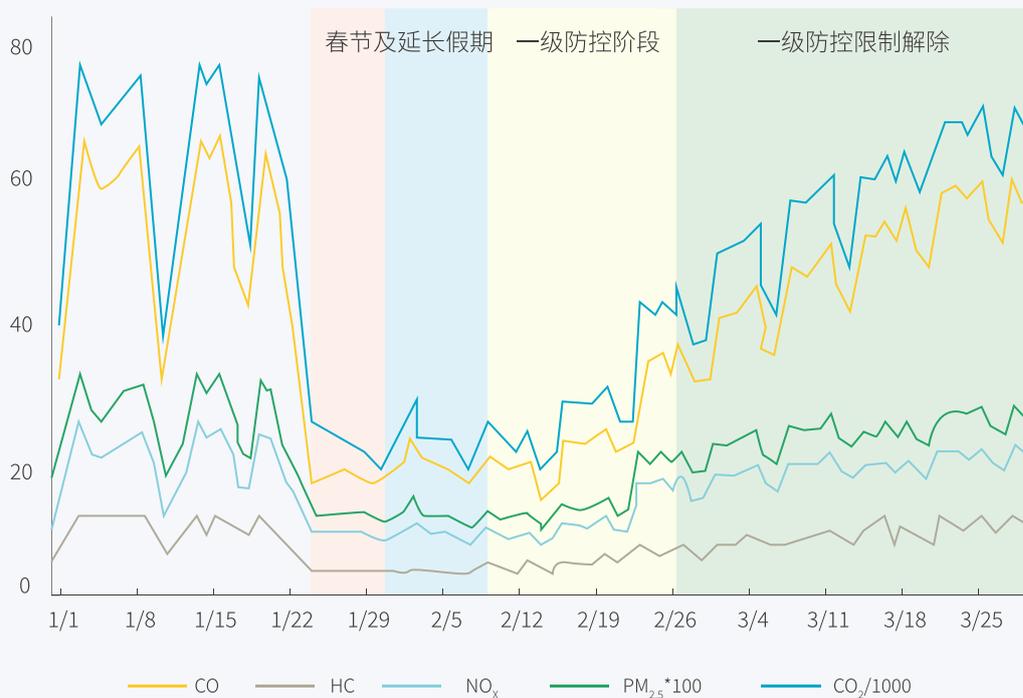


图17 | 基于智能交通大数据的成都机动车排放控制综合决策系统

通过对成都实施低排放区政策的可行性及预期效果的前期研究表明，低排放区政策的实施可以显著降低区域内的交通活动水平和机动车污染物排放（图 18b），进而改善城市空气质量。此外，将低排放区政策与新能源汽车推广、运输结构调整等综合考虑，可进一步拓展为“绿色低碳示范区”或“零排放区”，实现污染物和 CO₂ 协同深度减排，这或将成为未来大城市绿色低碳交通系统的一个重要方向。但需要注意的是，低排放区政策从研究到落地是一项系统工程，需要事前法律和配套体系保障、事中各环节精准设置、事后动态跟踪评估。这一利用智能交通大数据系统实现精细化交通排放监管与决策的经验，将为其他同样面临快速机动化趋势的城市提供新的解决思路。

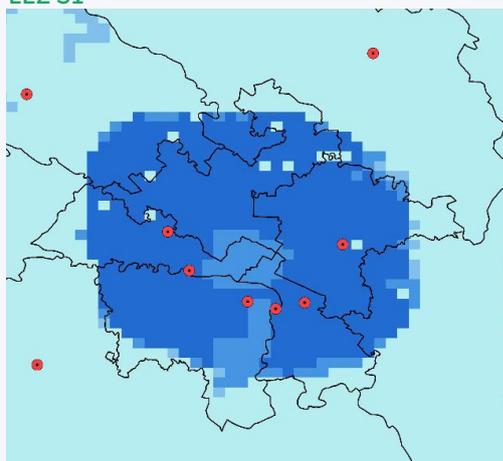
a. 新冠疫情交通排放实时动态跟踪评估

▼ 日排放量(吨/天)

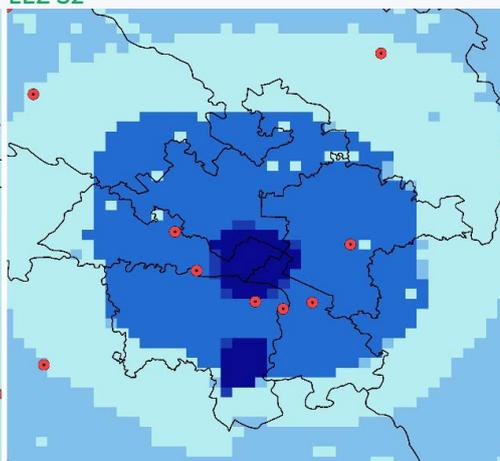


b. 低排放区政策减排效益空间分布评估

LEZ S1



LEZ S2



NO_x减排比例 ■ >40% ■ 20-40% ■ 10-20% ■ 1-10% ■ <1% ● 国省控站

图18 | 成都机动车综合决策系统应用案例



图片来源:Pixabay

挑战与展望

中国未来的机动车排放控制仍然任重道远，中国汽车市场仍将保持持续稳定的增长趋势，预计 2030 年汽车保有总量将达到 4~5 亿辆的巨大规模。在如此庞大的汽车保有体量下，构建高效的可持续的绿色低碳交通体系是未来中国道路交通发展的核心挑战。

一、深度减排是持续改善空气质量和协同应对气候变化的关键

移动源的深度减排将是未来中国大城市的 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制的主要方向之一。强化机动车排放控制的科学性和精准性，推动道路交通的持续深度减排，是实现 2035 美丽中国建设目标下空气质量改善的关键工作，也是推动中国大城市空气质量与世界一流城市尽快接轨的核心举措。同时，2060 碳中和目标还将长期引领中国机动车能效提升、结构调整优化和清洁能源转型，并将对进一步削减大气污染物排放和改善空气质量带来巨大的协同效益。

二、发挥标准和技术引领作用，持续加严燃油车排放控制

持续加严标准限值，如设定重型车 NO_x 超低排放限值强化 NO_x 深度减排，推动汽车行业研发超低排放的更高效发动机和后处理控制技术。未来的排放标准将更突显技术中立和燃料中立的特点，并重点监管车辆在实际道路的排放表现。除了继续加严主要污染物（如 NO_x、THC/NMHC）排放限值，还需进一步拓展污染物的监管种类（如 NH₃、HCHO），并协同温室气体排放控制。

三、交通能源清洁低碳转型，推动汽车全产业链绿色发展

交通能源清洁低碳转型是实现多污染物控制和 CO₂ 协同减排的治本之策。在轻型电动汽车领域，应充分发挥电动汽车生命周期减碳优势和使用过程的成本优势，实现更大推广规模。在商用车领域开展细分交通场景的环境和成本效益综合研究，对各类重型货车宜电宜氢、相应基础设施方案和发展节点做出优化判断。应通过车辆和燃料终端产品的生命周期减排带动上游相

关产业的协同绿色发展，并统筹能源链、产业链和供应链的数据融合，构建新能源汽车和低碳清洁车用燃料的全生命周期评估平台。完善能源和交通系统的深度耦合，推进新能源汽车基础设施的智慧发展，探索换电网络和智慧充电等能源系统耦合方式，优化新能源汽车使用的便利性和减排潜力。

四、提升基础建设和服务能力，促进绿色出行和货运结构调整

坚持“公交优先、慢行优先、绿色优先”理念，调整城市交通出行结构向低能耗、低排放、高效率的交通方式转变。借助大数据和车联网技术构建智慧公交系统，实现“人-车-路-站-云”协同，构建绿色智能的交通出行体系。积极推进货物运输结构调整，加快基础建设、提升服务水平和创新服务模式，提升多式联运承载能力和衔接水平，逐步形成大宗货物及集装箱中长距离运输以铁路和水路为主、短距离运输优先采用皮带廊道和新能源车船的发展格局。

五、物联网 + 大数据时代技术创新，探索排放智慧管理新路径

充分发挥 OBD 远程监控和路网交通大数据排放清单技术为代表的“精准感知 + 大数据智能监管”在机动车排放智慧化管理中的重要作用。促进 5G、人工智能、大数据、云计算等新技术与机动车监管的融合创新，形成车车互通、车路协同、车云一体的全方位监管和交通优化体系，将“感知-决策”平台向“数字化、网联化、智能化”延伸发展，为改善空气质量和实现双碳目标提供智慧路径。

01

背景

背景

21 世纪以来，伴随着中国经济的高速发展和城市化进程的不断推进，中国的机动车数量持续快速增加。2000 年，中国汽车保有量仅有 1600 万辆（图 1.1），只有同期美国或欧盟汽车总量的 7%；而在刚刚过去的 2021 年，中国汽车保有量正式突破 3 亿辆，已成为全球汽车保有总量最大的国家，其年均增长率高达 15%，远高于欧美同期增长水平。目前，我国汽车千人保有量平均水平已超过 200，一批社会经济水平发展较快的城市其汽车千人保有量已达到 350 左右。随着中国社会的持续发展，预计未来中国汽车总量仍将保持持续增长，多项研究估计 2030 年中国汽车保有量将高达 4~5 亿辆，从而给交通、环境、能源和气候等多方面带来更大挑战。

▼ 汽车保有量(百万辆)

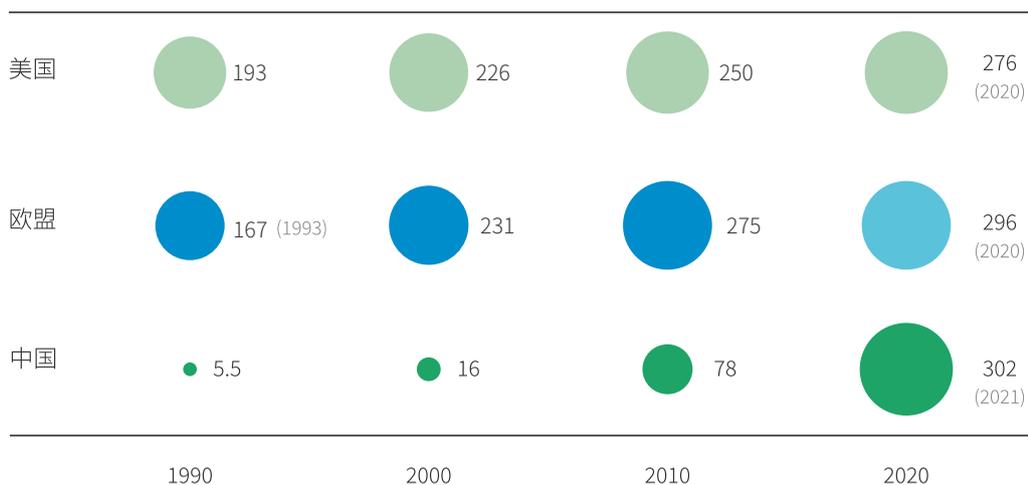
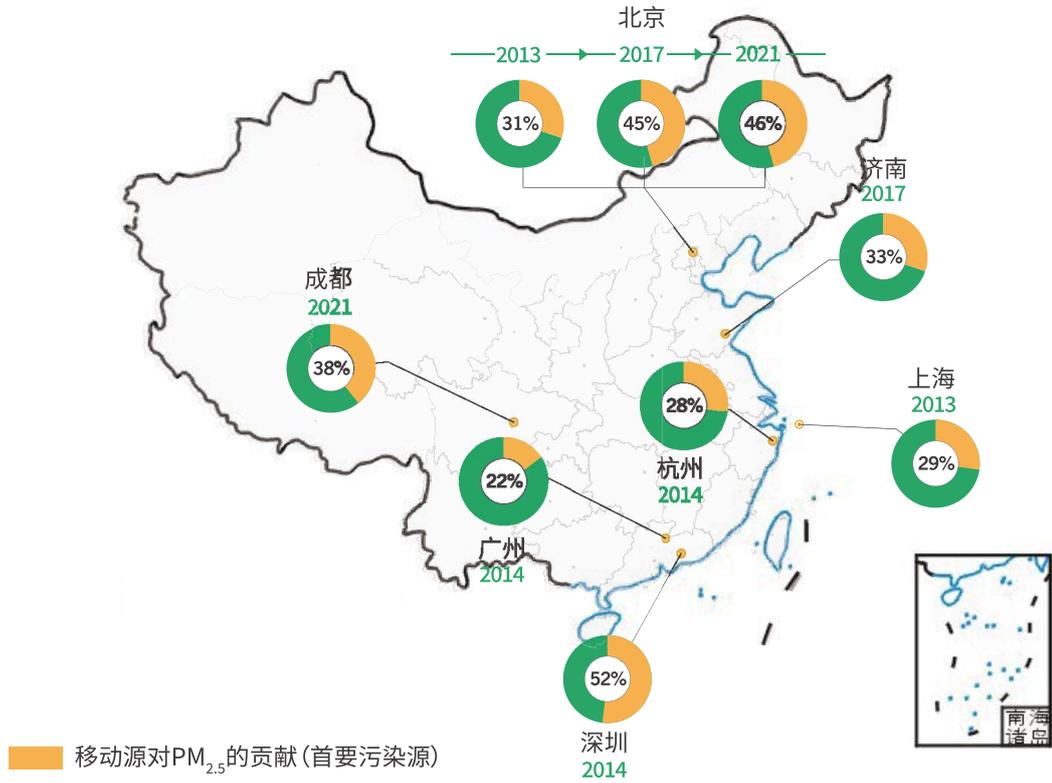


图1.1 | 中国、美国和欧盟汽车保有量比较(1990-2021)

近年来，道路交通排放对中国大城市的大气污染贡献日益突出。生态环境部陆续发布的 PM_{2.5} 污染源解析表明，以机动车为代表的移动源已成为北京、上海、深圳等大城市最重要的本地贡献源（图 1.2a）；此外，机动车排放还导致区域和城市 O₃ 污染日益突出（图 1.2b），交通密集的城市核心区 NO₂ 浓度也居高不下。机动车排放污染控制已成为我国大气污染防治的重点工作之一，对持续提升居民生活品质，降低公众健康风险意义重大。

a.



b.

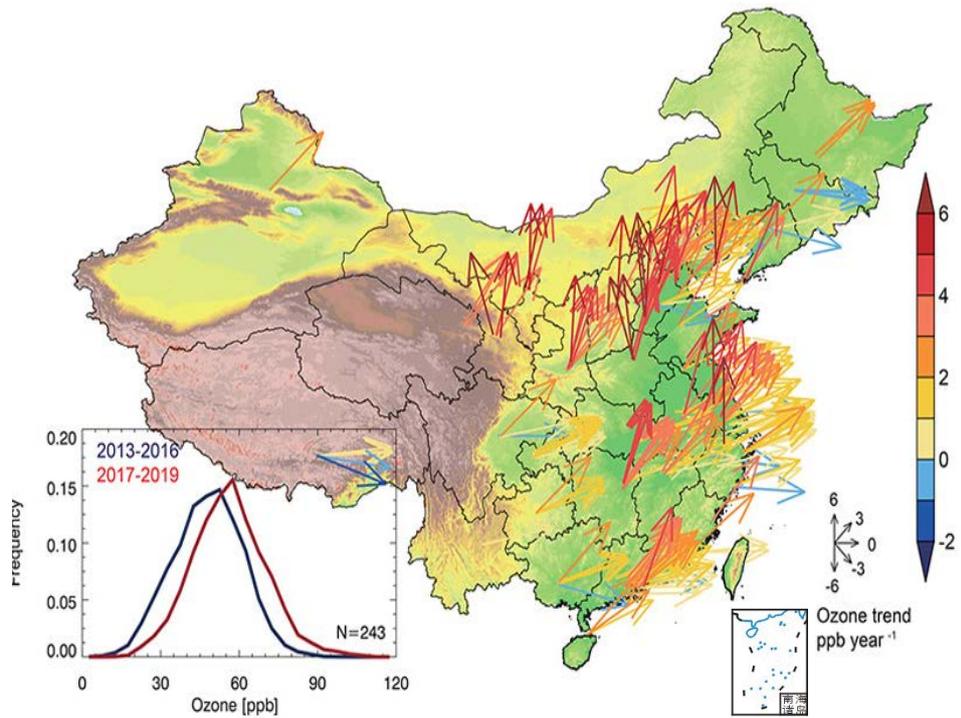


图1.2 | a. 部分中国城市PM_{2.5}源解析的移动源贡献占比；
b. 中国2013-2019年夏季O₃日最大8小时浓度变化 (Lu et al., ES&T, 2020)

1994 年，在世界银行的支持下，清华大学、北京市汽车研究所、中国环境科学研究院等科研机构开展了中国控制机动车排放污染的战略研究（China's Strategies for Controlling Motor Vehicle Emissions, 俗称 B-9-3 项目）。该项目首次在国内开展了大规模的机动车排放测试，发现中国当时的车辆排放控制技术落后于欧美发达国家 10~20 年，并提出了要针对新车、在用车、车用油品质量等方面借鉴欧美的先进控制经验，以实现中国机动车排放控制水平的快速提升。2000 年，中国正式实施国一轻型车新车排放标准（《轻型汽车污染物排放限值及测量方法》GB 18352.1-2001，相当于欧盟 1992 年实施的欧 1 标准），正式拉开了中国国家层面系统控制机动车排放的帷幕。过去 20 年间，中国实施了逐步加严的新车和油品标准、加强在用车监管、推广新能源汽车和交通管控等一系列措施，构建起“车-油-路”一体化的机动车排放综合控制体系。目前，中国已全面实施了第六阶段的新车排放标准和油品标准，初步构建了融合多种先进技术手段的实际道路在用监管体系，起步交通运输结构和交通能源结构调整，并已成为新能源汽车推广数量最多的国家。中国正逐步缩小与欧美等发达国家在机动车排放控制水平上的差距，在机动车保有量快速增长的同时实现了污染物排放的有效控制和削减。

值得注意的是，大城市为推动中国的机动车排放控制进程发挥了至关重要的示范和引领作用。由于机动车在城市高度聚集的特点，大城市的决策者有更强的动力制定更严格的政策措施来减少机动车排放进而改善城市空气质量。同时，大城市率先开展的控制实践经验也有助于国家层面的控制政策更快和更有效地实施。例如，北京 1997 年率先推广无铅汽油，1999 年实施轻型汽油车国一排放标准，均在 1~2 年后被推广至全国范围实施，并成为过去 20 年车-油同步控制的典范；上海率先确立了公共交通优先发展的战略，并积极开展了车用能源多样化的探索和示范应用；深圳成为全球首个公交和出租车队全面电动化的城市，构建了健全的新能源汽车产业布局；成都开发了基于智能交通大数据的机动车排放综合决策系统，实现更精细化的交通排放监管与决策。这些城市结合自身特点开展了各有特色的机动车排放控制实践，并在实践中获得了宝贵的第一手经验。

在能源基金会的支持下，本研究对中国过去 20 年的机动车排放控制历程进行了系统梳理，重点选取了北京、上海、深圳和成都四个具有代表性的大城市，分别介绍各城市机动车排放控制实践的特色案例。我们力求在此过程中总结出有益的经验，为中国乃至国际上其他城市的政策制定者解决机动车排放污染问题、探索城市交通的绿色低碳发展路径提供借鉴。





图片来源:Pixabay

02

2.1 新车排放标准持续加严	031
2.2 车用油品质量改善	034
2.3 强化在用车监管	039
2.4 新能源汽车推广	041
2.5 交通优化措施	045
2.6 代表性大城市社会经济和机动车发展历程概览	052

中国 20 年机动车 排放控制历程

自上世纪 90 年代中期以来，中国开始对机动车污染排放进行系统的科学研究和控制，持续加严新车标准、油品标准，并实施了一系列在用车和交通管控措施，已形成“车-油-路”一体化的机动车排放综合控制体系。近年来，随着大气污染治理工作的逐渐深入，“打赢蓝天保卫战”、“柴油货车污染攻坚战”、“运输结构调整”等国家层面行动计划的陆续推出，对中国的机动车污染排放控制提出了更高的要求。机动车管控日趋精准、科学和高效，在传统机动车污染控制政策手段的基础上，更为重视车用能源结构的转型、交通出行和货运结构的调整，并采用多种先进技术方法强化对在用车的动态监管，形成了更为全面、高效的交通排放控制体系，如图 2.1 所示。



图2.1 | “车-油-路”一体化的机动车排放综合控制体系

2.1

新车排放标准持续加严

新车排放标准是机动车排放控制体系的核心组成部分，不仅可以有效降低新车污染物的排放，且随着车队的更新换代，还可以持续改善整个车队排放控制水平。中国近 20 年一直积极推进新车排放标准的不断加严，已于 2019 年 7 月实施了重型天然气车国六标准，2020 年 7 月实施了轻型车和公交、环卫、邮政等重型城市车辆国六标准。2021 年 7 月重型柴油车国六排放标准的实施，标志着我国汽车标准全面进入国六时代，基本实现与欧美发达国家控制水平接轨。

中国于 2000 年起开始实施国一标准的《轻型汽车污染物排放限值及测量方法》，每隔 3~5 年即加严标准，全国和各重点城市 20 年来轻型车排放标准的实施历程如图 2.2 所示。目前实施的轻型车国六标准与国一标准相比，各种污染物的新车单车排放因子降幅已高达 95~98%，表 2.1 为各阶段主要污染物排放限值。目前实施的第六阶段排放标准，采用全球统一轻型车辆测试循环（Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle, WLTC），测试工况代表性更好，可缩小实验室型式认证测试结果与实际道路排放的差异，并且在测试中引入了实际行驶排放测试（Real Driving Emission, RDE），强化了对实际道路排放的监管。新标准还加强了对 VOCs 的蒸发排放控制，引入 48 小时蒸发排放试验以及加油过程 VOCs 排放试验，极大的强化了对蒸发排放的控制。

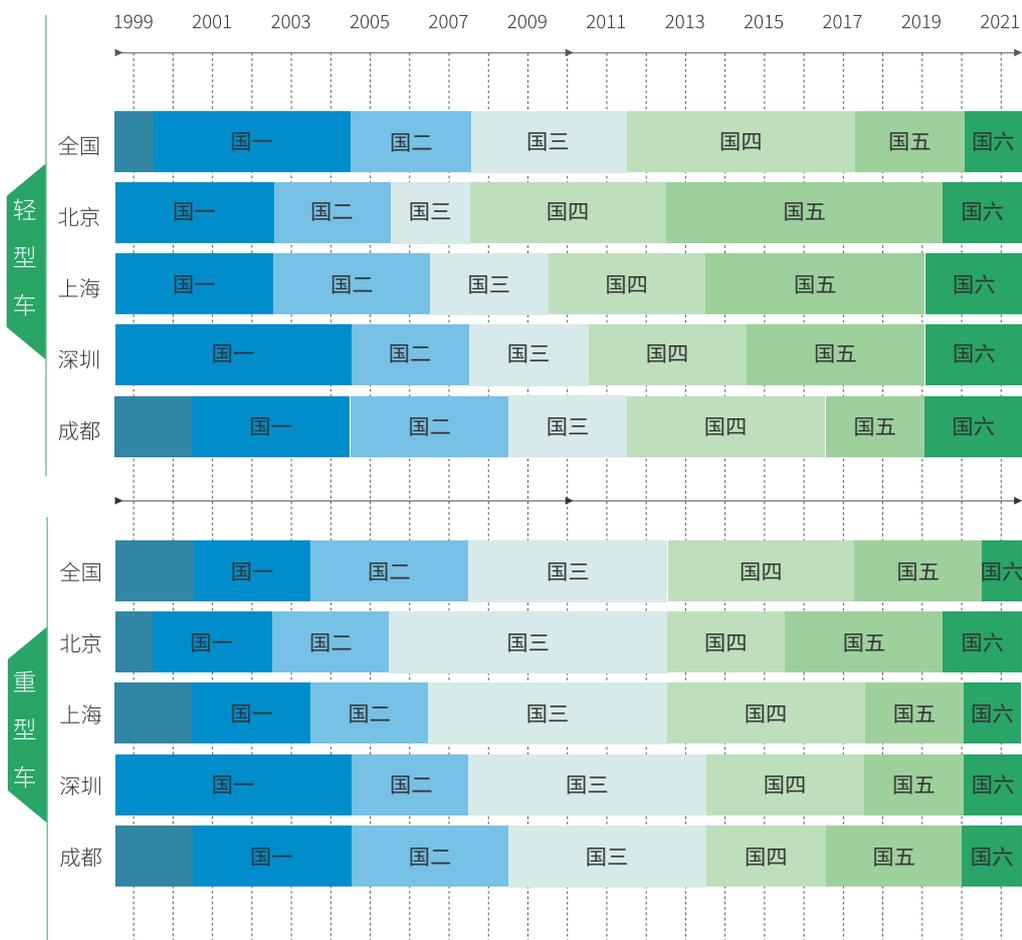


图2.2 | 中国轻型汽车和重型柴油车排放标准的发展历程

表2.1 | 轻型汽油车排放标准主要污染物限值

排放标准		CO	THC	NMHC	NO _x	N ₂ O	PM	PN
		mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	个/km
国一	GB 18352.1-2001	2720	HC+NO _x		970	-	140 ¹	-
国二	GB 18352.2-2001	2200	HC+NO _x		500	-	80 ¹	-
国三	GB 18352.3-2005	2300	200	-	150	-	50 ²	-
国四		1000	100	-	80	-	25 ²	-
国五	GB 18352.5-2013	1000	100	68	60	-	4.5	6.0x10 ¹¹
国六 a	GB 18352.6-2016	700	100	68	60	20	4.5	6.0x10 ¹¹
国六 b		500	50	35	35	20	3	6.0x10 ¹¹

¹非直喷压燃式发动机 ²压燃式发动机

与轻型车类似，经过 20 年的发展，重型柴油车也从国一标准逐步加严至当前的国六标准（图 2.2）。表 2.2 为各阶段标准重型柴油车污染物排放限值。目前实施的重型车国六标准不仅持续加严污染物排放限值，同时更加关注不同行驶工况下的污染物排放水平。发动机测试循环由欧洲稳态循环（European Steady-state Cycle, ESC）和瞬态循环（European Transient Cycle, ETC）调整为全球统一的重型发动机稳态循环（World Harmonized Steady-state Cycle, WHSC）和瞬态循环（World Harmonized Transient Cycle, WHTC），补充了低速低负荷工况点，并增加冷启动测试要求。在型式检验中增加了循环外排放测试的要求，包括发动机台架的非标准循环（World Harmonized Not-to-exceed, WNTE）和利用车载排放测试系统（Portable Emission Measurement System, PEMS）进行的实际道路排放测试，并增加了实际行驶工况有效数据点的 NO_x 排放浓度要求，其中 PEMS 不仅应用于型式检验，还应用于新生产车和在用车符合性的监督检查。对车诊诊断（On-board Diagnostic, OBD）的监测项目、阈值及监测条件等技术要求进行了修订，成为全球首个提出远程 OBD 监管要求的国家标准。这也标志着中国机动车排放控制标准的制订已不再是早期的借鉴欧洲标准为主的技术路线，在今后的标准制订过程中，中国自身对机动车排放控制的思考和切身经验将会更多的体现在新的标准中。

表 2.2 | 重型柴油车排放标准主要污染物限值

排放标准		CO	HC	NO_x	PM	烟度	NH_3	PN
		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	m^{-1}	ppm	个/km
国一	GB 17691-2001	4.5	1.1	8.0	0.16	-	-	-
国二		4.0	1.1	7.0	0.15 ¹	-	-	-
国三	GB 17691-2005	2.1	0.66	5.0	0.10	0.8	-	-
国四		1.5	0.46	3.5	0.02	0.5	-	-
国五		1.5	0.46	2.0	0.02	0.5	-	-
国六	GB 17691-2018	1.5	0.13	0.4	0.01	-	10	8.0×10^{11}

¹<85 kW

2.2

车用油品质量改善

1 油品质量升级

油品质量直接影响机动车的污染物排放水平，同时也是实施更严格新车排放标准的主要制约因素之一。如表 2.3 和表 2.4 所示，近 20 年来《车用柴油》和《车用汽油》国家系列标准对车用油品中的硫含量等各项指标的要求逐渐加严。2017 年，中国全面实施了第五阶段的汽柴油标准，油品硫含量要求低于 10 ppm，这一要求与欧盟、日本目前对柴油中硫含量的要求一致，相较于美国油品质量（柴油最大硫含量 15 ppm）更为严格。除硫含量外，油品标准中的苯含量、芳烃、烯烃含量等也不断降低，例如 2019 年实施的国六汽油标准对烯烃和芳烃含量要求已分别降至 18% 和 35% 以下，国六柴油标准对多环芳烃含量要求已降至 7% 以下，上述举措可以有效降低尾气中毒性有机污染物的排放，对人体健康产生积极的正向效益。

表2.3 | 车用柴油标准实施进程

阶段	标准	最大硫含量 ppm	多环芳烃含量 %	脂肪酸甲酯 %	实施日期
国一	GB 252-2000	2000	-	-	2002/01/01
国二	GB/T 19147-2003	500	-	-	2003/01/01
国三	GB 19147-2009	350	11	0.5	2010/01/01
国四	GB 19147-2013	50	11	1.0	2015/01/01
国五	GB 19147-2013	10	11	1.0	2017/01/01
国六	GB 19147-2016	10	7	1.0	2019/01/01

表2.4 | 车用汽油标准实施进程

阶段	标准	最大硫含量 ppm	苯含量 %	芳烃含量 %	烯烃含量 %	实施日期
国一	GB 17930-1999	1000	2.5	40	35	2000/01/01
国二	GB 17930-2006	500	2.5	40	35	2006/12/01
国三	GB 17930-2011	150	1.0	40	30	2011/05/12
国四	GB 17930-2013	50	1.0	40	28	2014/01/01
国五	GB 17930-2013	10	1.0	40	24	2017/01/01
国六 a	GB 17930-2016	10	0.8	35	18	2019/01/01
国六 b	GB 17930-2016	10	0.8	35	15	2023/01/01

车用油品的改善可以直接降低污染物排放，同时更为重要的是，先进的后处理技术（如 SCR, DPF 等）需要在低硫油品条件下才能正常运行，否则将使后处理技术失效甚至使发动机出现故障，因此油品质量是新车标准能够顺利实施的关键前提，只有“车油同步”才能使新车标准的加严起到应有的减排效果。例如，中国在推动国四重型柴油车标准实施的过程中，由于油品生产行业无法按期实现满足国四标准的油品（硫含量低于 50 ppm）在全国的供应，原定于 2010 年 1 月实施的国四重型车新车排放标准推迟至 2013 年 7 月才得以实施。但直到 2014 年底，全国范围才实现全部供应国四柴油，低硫油的供给滞后在当时严重影响了中国柴油车污染防治的进程。

在充分吸取油品质量提升滞后带来的经验教训后，中国加强了对车用油品质量的管控力度，实施了多项措施保障清洁油品的生产。在国五阶段实现了“车油同步”，并在国六阶段实现了“油品先行”和车用柴油、普通柴油、部分船舶油品的“三油并轨”（图 2.3），为 2019 年启动的柴油货车污染治理攻坚战行动计划奠定了良好的基础。

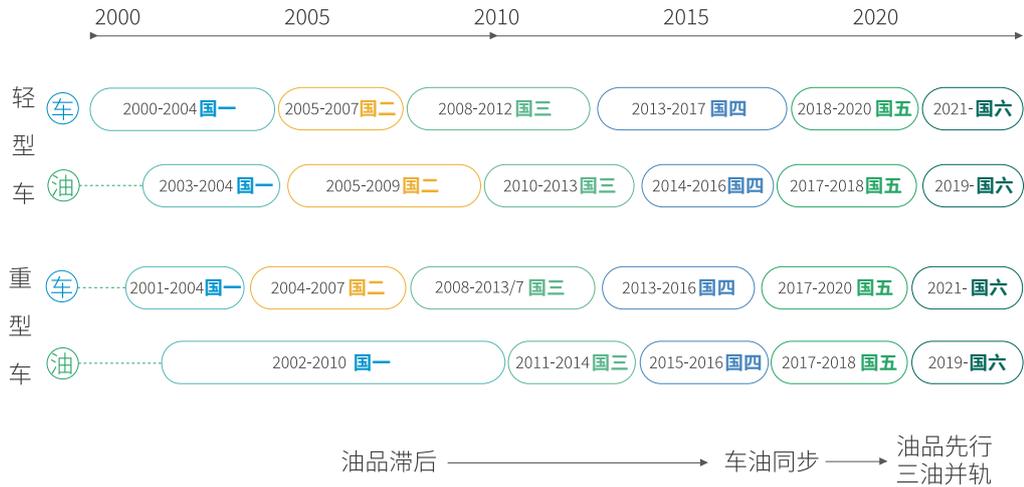


图2.3 | 中国20年新车和油品标准实施进程

2 生物燃料试点

生物燃料是中国交通能源清洁化的重要技术路径之一。除了持续推进传统汽柴油品质的提升，中国同时开展了车用生物燃料的试点探索，主要以基于玉米 / 陈化粮的乙醇汽油推广和基于餐厨废弃油脂的生物柴油试点为典型代表。

为了改善生态环境质量、调整能源结构，更好地应对高存量陈化粮处理问题，生物燃料乙醇汽油近年来不断发展和推广。2017 年发改委等十五部委联合发文推广乙醇汽油，并确定了生物燃料乙醇产业总体布局，预期 2020 年先进生物液体燃料创新体系初步构建，生物燃料乙醇产业发展整体达到国际先进水平；到 2025 年，力争纤维素乙醇实现规模化生产，先进生物液体燃料技术、装备和产业整体达到国际领先水平，形成更加完善的市场化运行机制。如图 2.4 所示，目前中国已有 15 个省份全部或者部分地市封闭销售 E10 乙醇汽油（10% 生物乙醇和 90% 汽油混合配方），生物乙醇推广规模近 300 万吨。



图2.4 | 中国乙醇汽油 E10 的推广情况

生物柴油指利用生物质转化而形成的脂肪酸甲酯或乙酯，具有发动机启动性好、原料来源广泛、可再生等特性。《B5 柴油》(GB 25199-2017) 为现行生物柴油标准，该标准规定了适用于国五、国六阶段的生物柴油，标准要求脂肪酸甲酯体积含量在 1~5% 之间，不应含有任何可导致发动机无法正常工作的添加物或污染物，不得人为加入甲醇。发改委等八部门发布了《关于全国全面供应符合第五阶段国家强制性标准车用油品的公告》，宣布 2017 年起将在全国范围内全面供应符合国五标准的车用柴油（含 B5 生物柴油）。其中，上海在公交和货车等重型车辆上开展了车用餐厨废弃油脂制生物柴油的规模化应用，取得了良好的环境和社会效益（详见本报告 4.2 节）。

需要指出的是，与美国、巴西等国相比，我国生物燃料推广的规模还远远落后。2020 年，美国和巴西生物乙醇的产量已经分别达到 4160 万吨和 2430 万吨，欧盟生物柴油的产量也已达到 1360 万吨。随着碳达峰和碳中和目标的提出，中国在生物燃料的研发和推广亟需进一步加大力度。

▼ 2020年产量（百万吨）

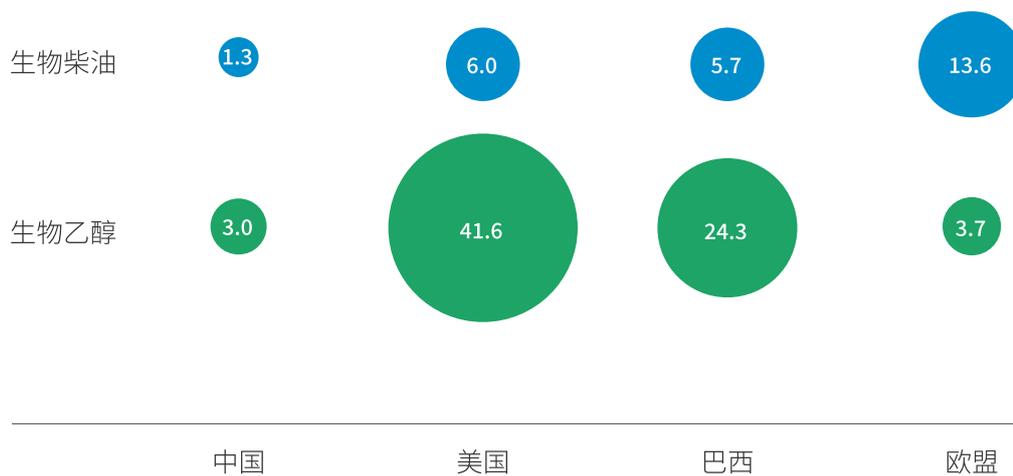


图2.5 | 中国、美国、巴西和欧盟生物燃料推广比较

2.3

强化在用车监管

对庞大的在用车队进行有效监管，一直是机动车排放控制的重点和难点。近年来，大量研究表明重型车实际道路排放严重超标，对传统的监管手段提出了更高的挑战。为了强化对在用车队的实际道路排放监管，中国连续出台了多项标准法规，初步形成了多技术手段融合的在用车检验方法体系，并建立起常态化的环保监管机制。

中国在用车辆的检查与维护主要通过排放年检、简易 PEMS、道路遥感等方式开展（见图 2.6）。2017 年起，中国发布了《在用柴油车排气污染物测量方法及技术要求（遥感检测法）》（HJ 845-2017），以遥感检测的方式开展实际道路的在用车监督抽测；同时，持续完善环保定期检验的测量方法、加严排放限值，例如《柴油车污染物排放限值及测量方法（自由加速法及加载减速法）》（GB 3847-2018）中新增了 NO_x 检测和 OBD 检查。此外，为规范在用车排放达标监管工作，建立了常态化环保监管机制，加强对排放检验机构的监督管理、加大路检路查力度、强化入户监督抽测，对违规检验机构严格查处、督促超标车辆限期维修治理和复检、将未在规定期限内维修并复检合格的超标车辆列入监管黑名单并进行信息公开，并依法予以处理或处罚。在这些强力措施的推动下，近年来在用柴油车环保监督抽测的超标率实现了显著下降，从 2018 年的 15% 已下降至 2020 年的 7%。



图2.6 | 在用车辆定期检验与抽检

面对《打赢蓝天保卫战三年行动计划》、《柴油货车污染治理攻坚战行动计划》提出的重要任务和更高要求，我国近年来通过鼓励老旧车辆淘汰、区域限行、更新监管技术等方式，努力实现更有效、更精准、更全面的在用车辆排放控制。对于车队中排放较高的老旧车辆，各省市积极鼓励老旧车辆淘汰报废，促进车队更新换代以有效降低在用车辆队的排放水平。《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中要求大力推进国三及以下排放标准营运柴油货车提前淘汰更新，加快淘汰采用稀薄燃烧技术和“油改气”的老旧燃气车辆。2018-2020年，全国已累计完成淘汰国三及以下排放标准营运柴油货车和柴油客车约350万辆。

与加速淘汰相配合，部分重点城市进一步采取了交通调控和经济激励等措施强化对在用车辆的监管，降低高排放车的活动水平，鼓励老旧车的加快淘汰。例如，北京对高排放车辆开展了逐步加严的限行政策，并制定了鼓励老旧车淘汰的补贴机制（详见3.1节）；上海与车企联合设置“以旧换新”平台，对置换国三及以下老旧车购买国六新车和新能源汽车的车主给予奖励补贴。

车载诊断OBD技术是近年来国际上聚焦的新一代排放监管技术。例如，通过SCR传感器获取尾气 NO_x 浓度，整合能耗、速度等数据后，以离线存储或远程传输的方式提供用于 NO_x 排放监管的关键数据。中国在OBD排放监管的施行时间和技术模式上已处于国际领先水平，目前正在实施的重型车国六标准中明确提出要求所有重型车辆完成OBD远程在线终端的加装（国六a阶段），并要求2023年7月（国六b阶段）所有重型车辆向监管平台实时传输远程在线监控数据。北京、上海等城市已率先开展了在线OBD的远程监管，并已取得了良好的示范效果，详见本报告的3.2节。

2.4

新能源汽车推广

新能源汽车是未来绿色城市可持续交通系统的关键组成部分，在车辆行驶阶段可以实现“超低”排放甚至“零”排放，从而极大地缓解城市拥堵环境中燃油车在低速情况下导致大量污染物排放的状况。随着可再生能源在能源结构中的占比提升，新能源汽车推广有利于实现可再生能源的消纳、削减温室气体排放和改善区域和城市的空气质量，实现交通领域能源利用的低碳化、多元化、清洁化。

中国新能源汽车推广历经公共领域示范的萌芽期（2009-2013）、补贴驱动鼓励购买的发展期（2014-2018）、财政补贴退坡的调整期（2018-2020）和新一轮市场驱动的爆发期（2020-）。在此期间，中国陆续推出了购置补贴、税费减免、基础设施建设和“平均燃油消耗量积分+新能源汽车积分”的双积分政策等措施鼓励新能源汽车推广，使中国逐渐成长为全球新能源汽车产销第一大国。截止 2020 年底，全国新能源汽车保有量达 492 万辆，占全球新能源汽车总量的 40% 以上，并呈持续高速增长的趋势。

2009 年，为了鼓励新能源汽车的推广，科技部、财政部、发改委、工业和信息化部四部委联合启动了“十城千辆节能与新能源汽车示范推广应用工程”（简称“十城千辆”），由国家提供财政补贴，在 3 年左右时间每年发展 10 个城市，每个城市推出 1000 辆新能源汽车开展示范运行，涉及公交、出租、公务、市政、邮政等领域。经过 3 年多的试点，“十城千辆”在全国范围内起到了非常积极的示范作用（图 2.7），共推广试点城市 25 个，其中北京、上海、深圳等城市取得了突出的新能源汽车推广成绩，为后续我国新能源汽车产业的大发展奠定了基础。



图 2.7 | 新能源汽车示范: 电动公交、电动出租、电动轻货和充电桩

在总结“十城千辆”示范经验的基础上，中国持续推进对新能源汽车发展的政策激励。例如，实施新能源汽车购置税减免和购车补贴的经济措施，缩小了新能源车与传统燃油车之间的购车成本差距，激发了消费市场的关注及购车积极性，有力拉动了新能源车消费。在新能源汽车技术逐步成熟，新能源车市场实现快速发展后，新能源补贴力度逐年退坡：2017 年起限制地方补贴不高于国家补贴的 50%，并提出了能量密度、车辆能耗调整系数等技术指标要求，鼓励长续航、低能耗的车型；2018 年起补贴退坡幅度进一步提高，但高续航车辆补贴略增；2019 年补贴全面大幅度退坡，并取消地方补贴；2020 年延长补贴期至 2022 年，预计补贴在上一年基础上退坡 10%、20%、30%，实现有序退出补贴（详见表 2.5）。

表2.5 | 2016-2021年新能源车财政补贴标准(万元)

纯电动续航里程 R(工况法、公里)						
年份	100 - 150	150 - 200	200 - 250	250 - 300	300 - 400	400 以上
2016	2.5	4.5	4.5	5.5	5.5	5.5
2017	2	3.6	3.6	4.4	4.4	4.4
2018 过渡	1.4	2.52	2.52	3.08	3.08	3.08
2018	-	1.5	2.4	3.4	4.5	5
2019 过渡	-	0.15	0.24	2.04	2.7	3
2019	-	-	-	1.8	1.8	2.5
2020	-	-	-	-	1.62	2.25
2021	-	-	-	-	1.3	1.8

动力电池系统能量密度调整系数(Wh/kg)						
年份	<90	90 - 105	105 - 125	125 - 140	140 - 160	160 及以上
2016	0	1	1.1	-	-	-
2017	0	1	1	1.1	1.1	1.1
2018	0	0	0.6	1	1.1	1.2
2019	0	0	0	0.8	0.9	1
2020	0	0	0	0.8	0.9	1

注：纯电动乘用车单车补贴金额 = Min{ 里程补贴标准， 车辆带电量 × 400 元 } × 电池系统能量密度调整系数 × 车辆能耗调整系数

中国一直非常重视公共车队推广新能源汽车的示范效应，大力推动出租、公交、环卫、城市货运等车辆的电动化，全国公交车电动化比例已从 2015 年的 20% 提升至 2020 年的 60%。北京、深圳等多个城市明确了公共领域新能源汽车的推广比例要求和全面电动化时间，例如，深圳早在 2018 年即实现了全部出租和公交车队的电动化；北京除明确对新能源公交车和出租车的要求外，对新增的环卫车、机动车铁路作业车辆也提出了不低于 50% 的电动化比例要求；上海和天津提出到 2020 年城区公交全部更新为新能源车。在这些城市先行示范的基础上，2020 年国家发布的《新能源汽车产业发展规划》明确提出，从 2021 年起，重点区域新增或更新公交、出租、物流配送等公共领域车辆，新能源汽车比例不低于 80%。

便捷完备的充电基础设施可有效缓解电动汽车车主的里程焦虑，提高电动汽车的使用便利。为此，中国出台了多项政策加快并规范配套基础设施建设，例如：明确建筑物配建停车场、城市公共停车场预留安装充电设施的车位比例；加快形成以使用者居住地、驻地停车位配建充电设施为主体，以城市公共停车位、路内临时停车位配建充电设施为辅助，以城市充电站、换电站为补充的，数量适度超前、布局合理的充电设施服务体系；要求地方政府把充电设施及配套电网建设与改造纳入城市建设规划，在用地等方面给予政策支持，对建设运营给予必要补贴等。

为了促进汽车产业节能减排，推动新能源汽车产业的持续发展，中国制定了平均燃油消耗量积分 + 新能源汽车积分的“双积分”制度，从供给侧倒逼车企加速新能源化转型。双积分政策于 2018 年 4 月开始正式实施，并于 2019 年 7 月进一步修订，对新能源汽车的积分比例要求逐年增加，预计 2023 年积分比例达 18%。基于双积分政策的规则，车企生产新能源汽车将带来多重优惠，新能源汽车产量增加将提高企业的新能源汽车积分，同时还能有效拉低企业平均燃料消耗量 (CAFC)。在这一政策下，传统汽车厂商面临巨大的压力，迫切寻求向低能耗和新能源化转型，这也为国内的新能源汽车产业带来了空前的发展机会，加速了我国新能源汽车产业的发展布局。

中国正在步入构建现代能源体系的新阶段，能源低碳转型进入重要窗口期，新能源汽车将在未来的减污降碳和能源结构转型中发挥举足轻重的作用，未来中国的新能源汽车还将持续快速发展。国家发改委和国家能源局发布的《“十四五”现代能源体系规划》中提出，十四五期间将积极推动新能源汽车在城市公交等领域应用，到 2025 年新能源汽车新车销量占比达到 20% 左右。

2.5

交通优化措施

随着机动车排放控制工作的逐渐深入，构建居民绿色出行体系、调整货物运输结构等交通结构优化措施可以从根本上降低机动车的活动强度，已逐渐成为道路交通领域实现深度节能减排的关键路径。

1 构建绿色出行体系

近年来，我国高度重视城市公共交通的发展，倡导群众绿色出行。十二五期间，国家发布了《国务院关于城市优先发展公共交通的指导意见》（国发〔2012〕64号），明确指出应当形成城市公共交通优先发展的新格局，在国家层面确立了城市公共交通优先发展战略。

在该战略的指导下，各地实施了加快公共交通优先发展的一系列政策。措施主要包括：强化规划调控，各城市科学规划线网布局、落实各种公共交通方式的功能分工；加快基础设施建设，提升公共交通设施和装备水平，推进换乘枢纽、自行车道、步行道等配套设施建设；加强公共交通用地综合开发，优先保障公共交通设施用地；政府投入和市场机制并举：一方面加大政府投入，各城市将公共交通发展资金纳入公共财政体系，另一方面拓宽投资渠道，利用市场机制的作用推进公共交通投融资体制改革；保障公共交通路权优先，大力发展智能交通系统，完善移动支付体系建设，改善公共交通的通达性和便捷性。

公共交通优先战略取得了显著成效：2015 年末，全国共有城市公共汽电车辆超过 63 万辆，运营线路总长度约 90 万公里，与 2010 年相比分别增加 38% 和 41%；全国快速公交系统运营线路总长度超过 3000 公里(图 2.8)，公交专用车道约 8500 公里，城市公交年客运量超过 900 亿人次，比 2010 年增长了 25%，城市建成区公交站点 500 米覆盖率已达到 85%。全国有 25 个城市开通了轨道交通线路，运营线路总长度已超过 3200 公里，较 2010 年增长超过一倍。



图2.8 | 大运力快速公交系统(Bus Rapid Transit, BRT) (左:北京,右:济南)

2016 年，交通运输部印发了《城市公共交通“十三五”发展纲要》，提出了 2020 年初步建成现代化城市公共交通体系的目标。根据人口规模对城市进行分类，制定了不同的公共交通发展指标。指标涵盖城市的公共交通机动化出行分担率、绿色出行分担率、公共交通乘客满意度等。实施的措施包括推进“公交都市”建设、加快城市公交智能化应用系统建设、改善慢行交通环境等。截至 2020 年底，全国城市轨道交通运营里程已达到 7000 公里，是 2010 年的 5 倍，公共汽电运营车辆比 2010 年增加了 57% (如图 2.9)；百万以上人口的城市建成区公交站点 500 米覆盖率接近 100%，北京、上海等特大城市中心城区的绿色出行比例已超过 70%。对于人口和交通高度聚集的大城市，公共交通建设的进展非常突出，上海和北京的地铁里程已超 700 公里（上海的公共交通优先战略发展案例详见 4.1 节），广州、深圳、重庆、成都、武汉等大都市的地铁运营里程也均超过了 300 公里。

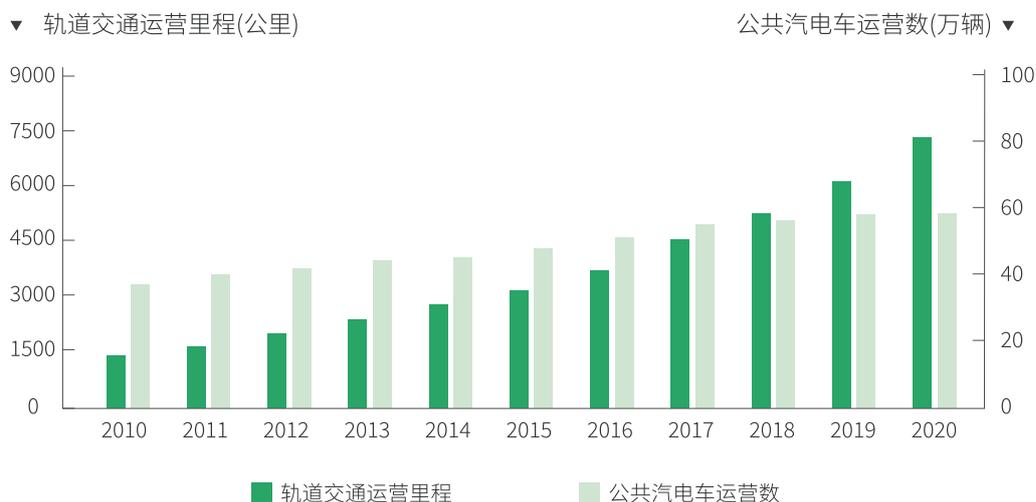


图2.9 | 全国城市公共交通发展状况(2010-2020)

2 交通运输结构调整

过去 20 年来，中国货物运输量和货运周转量迅速增长、稳居世界前列，尤其是公路运输飞速发展。从货运量来看，公路运输分担率长期保持在 70% 以上，占据绝对主导地位，铁路运输分担率 2008-2016 年期间不断下降至 7.7%。从货运周转量来看，公路运输和水路运输持续强劲增长，铁路运输 2011 年达到峰值后不断回落。水路和铁路货运的单位货物周转量能耗和污染物排放远低于公路货运，引导货运由公路转向铁路等其他模式对减污降碳具有非常重要的意义。运输结构调整是有效降低机动车尤其是重型货车排放的重要手段，也是实现交通运输领域供给侧结构性改革的重要内容。

2017 年，中央经济工作会议上提出“要调整运输结构，减少公路货运量，增加铁路货运量”，环境保护部联合相关部委和省市人民政府印发的《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》规定“天津、河北及环渤海所有集疏港煤炭主要由铁路运输，禁止环渤海港口接收柴油货车运输的集疏港煤炭”。2018 年，国务院先后印发“打赢蓝天保卫战”和“推动运输结构调整”的三年行动计划，把调整运输结构作为治理柴油货车污染攻坚战、构建绿色交通体系的关键任务之一。行动计划中提出，以京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原为主战场，以推进大宗货物运输“公转铁、公转水”为主攻方向，在全国实施铁路运能提升、水运系统升级、公路货运治理、多式联运提速、城市绿色配送、信息资源整合等“六大行动”。为了配合运输结构调整进程的顺利推进，多部门实施了配套的经济措施和基础设施建设的支持政策，其中最关键的就是提高铁路价格优势和加快铁路专用线建设。



加快推进“公转铁”最直接有效的措施就是提高铁路运输相对应公路运输的价格优势。通过清理规范铁路货运相关收费、铁路给予货主企业运价优惠等措施，降低物流成本，提高企业“公转铁”的积极性。国铁集团采取了降低电气化附加费、取消或降低多达 22 项货运杂费收费项目、降低专用线代运营代维护费用和自备车检修费用等措施，累计向企业和货主让利约 600 亿元。2019 年，部分铁路线路进一步下调矿石和煤炭运价，最高下调幅度达 30%。江苏、云南等地方政府还制定实施了大宗货物“公转铁”运输、集装箱班列等财政资金补助政策。

加快铁路专用线建设是实现铁路“门到门”运输、降低短驳成本（即解决铁路运输“最后一公里”）的重要措施。交通运输部等九部门梳理提出了涵盖疏港铁路以及煤炭、钢铁、电解铝、电力、焦化、汽车制造等大型工矿企业和大型物流园区铁路专用线在内的 270 个重点建设项目。自然资源部明确提出将上述铁路专用线建设项目如涉及占用永久基本农田，纳入用地预审受理范围，解决了用地审批难题。国家发改委等进一步从同步规划建设、简化接轨条件、压缩办理时限、创新运维模式等方面，提出加快铁路专用线建设相关政策措施。虽然推进过程中，由于用地、用海审批和资金不足等原因，部分项目进展滞后于工作计划，但随着运输结构调整工作不断推进，铁路专用线逐步建成运营，十四五期间铁路专用线运输能力将逐步释放，铁路货运量将进一步提升。

三年行动计划实施以来，我国货物运输结构逐步优化。铁路货运量自 2017 年的 36.9 亿吨增长至 2020 年的 44.6 亿吨，近三年年均增幅接近 7%；铁路货运量占比开始止跌反弹，由 2017 年的不足 8% 逐步升至 2020 年的近 10%；公路货运量占比由 2017 年的 78% 降至 2020 年的 74%（如图 2.10）。沿海港口的大宗货物运输结构明显优化，环渤海、山东省、长三角地区的沿海主要港



口和唐山港、黄骅港等 17 个港口，煤炭集港全部改为铁路和水路运输，港口周边道路运煤货车排长队的现象不复存在，矿石疏港采用铁路、水路和皮带以上的比例比 2017 年增长了 20%。铁水联运稳步增长，2020 年全国规模以上港口完成集装箱铁水联运量同比增长 33%。但与 1980 年铁路货运占比超过 30% 相比，运输结构的调整优化才刚刚起步，任重道远。

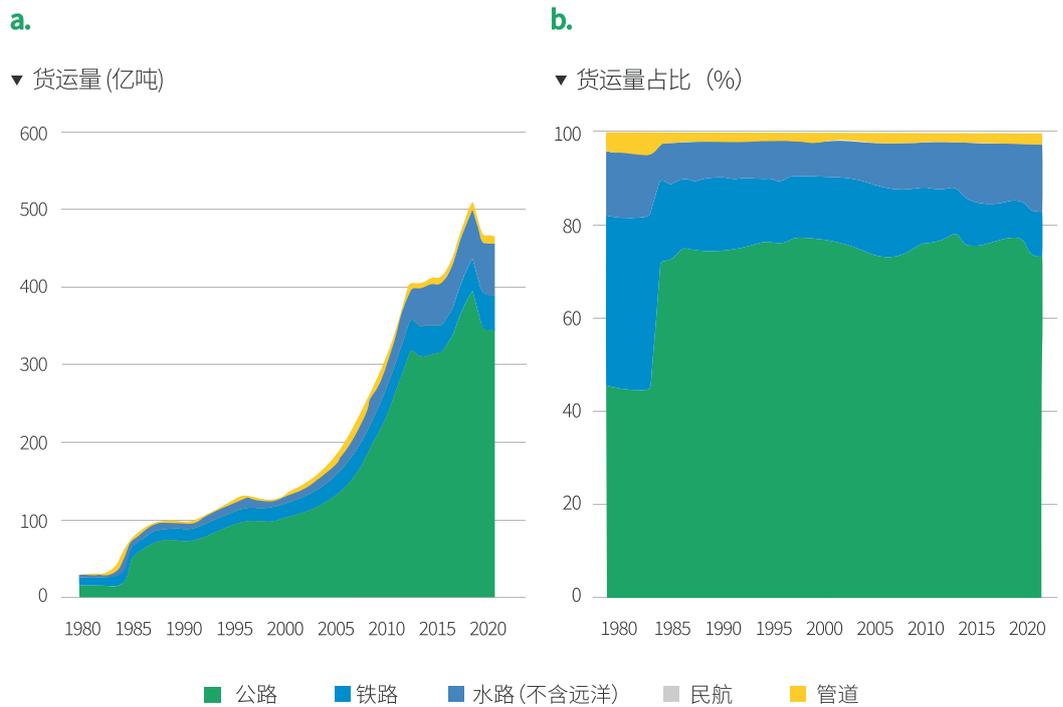


图2.10 | 中国货运量及运输结构变化趋势 (1980-2020)

专栏 2-1

京津冀及周边地区运输结构调整

京津冀及周边地区地处西煤东运、北煤南运、北方煤炭下水港和进口矿石接卸港的重要通道，冶金、建材、石化等重化工行业高度集聚，区域货物运输强度高、大宗货物运输需求旺盛、公路“一家独大”。2017 年以来，作为全国运输结构调整示范区，京津冀及周边地区实施了铁路专用线建设、铁路货运服务提升、港口大宗货物“公转铁”、工矿企业大宗货物“公转铁”、集装箱铁水联运拓展、多式联运信息互联互通、货运车辆超限超载治理、城市配送新能源车辆推广、城市生产生活物资公铁联运试点等“九大工程”，并大力推进了港口集疏运铁路以及物流园区、大型工矿企业铁路专用线项目建设。

以煤炭集港、矿石疏港为突破口，各地打出了一系列组合拳。如唐山市建立了“公转铁”专项基金，市财政安排 6 亿元作为引导资金，吸纳相关钢铁企业出资入股，为铁路专用线建设提供资金保障；对采用铁路运输疏港矿石和原料的钢铁企业，在非采暖季错峰生产限产比例基础上给予 2% 的减免。国铁北京局实施砂石骨料进京“公转铁”项目，下浮运费 40%。河北全面摸底全省工矿企业、港口、物流园区铁路专用线需求，确定铁路专用线建设项目 94 个，唐山港、黄骅港等集疏港铁路线已启动或建成，全面实现集疏港煤炭铁路运输。



专栏图 2-1 | 重点专线水曹铁路通车：北起首钢迁安矿区，南接曹妃甸港

经交通运输部规划研究院和清华大学评估，与 2017 年相比，2020 年京津冀及周边地区（京 - 津 - 冀 - 鲁 - 豫 - 蒙）的铁路货运量增加 2.9 亿吨，涨幅达 24%，公路货运量下降近 8%，主要港口及工矿企业运输通道货车流量明显下降，减排了 3.8 万吨 NO_x 和 700 多吨 $\text{PM}_{2.5}$ ，获得了可观的环境效益。

2.6

代表性大城市社会经济和机动车发展历程概览

北京、上海、深圳、成都等大城市近 20 年来经济社会飞速发展，人均 GDP 年均增速超过 8%，城市的快速发展同时吸引了更多的人口涌入（年增速超 2%，深圳高达 4.7%，见图 2.11），城市规模的不断扩大对出行也提出了更强的需求，机动车保有量迅速增加。

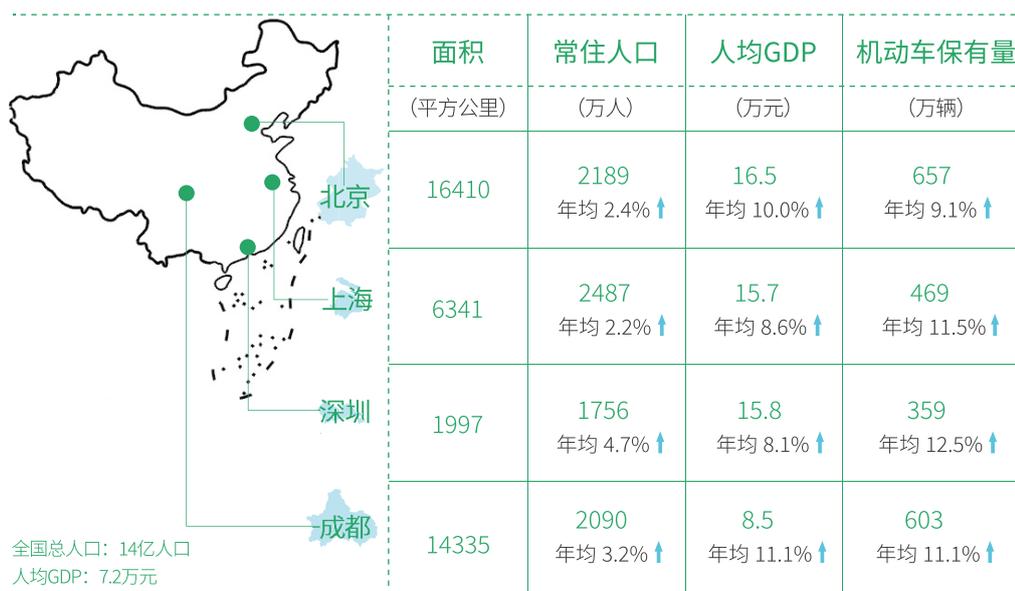


图2.11 | 2020年北京、上海、深圳、和成都的社会经济和机动车总量等基本指标

过去 20 年, 机动车在中国的各大城市均呈现高速增长、高度聚集和高频使用的“三高”特征。即使是较早实施机动车总量调控的北京和上海, 机动车保有量也已分别突破 600 万和 400 万辆; 而未实施限购的成都, 已快速发展成为全国机动车保有量第二大的城市, 比 2000 年增长了近 10 倍 (图 2.12)。

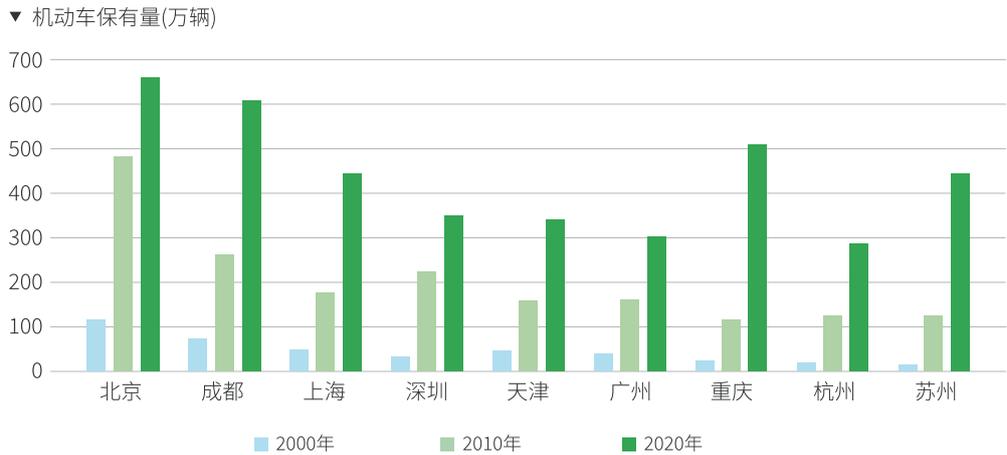


图2.12 | 中国部分代表性城市机动车保有量发展趋势(2000-2020)

与此同时, 机动车已日益成为中国诸多城市 $PM_{2.5}$ 污染的最主要本地贡献源。此外, 近年来逐渐凸显的夏季 O_3 超标问题、城市 NO_2 浓度下降不尽如人意, 也充分说明城市的大气污染与道路交通排放关系愈加密切 (图 2.13)。

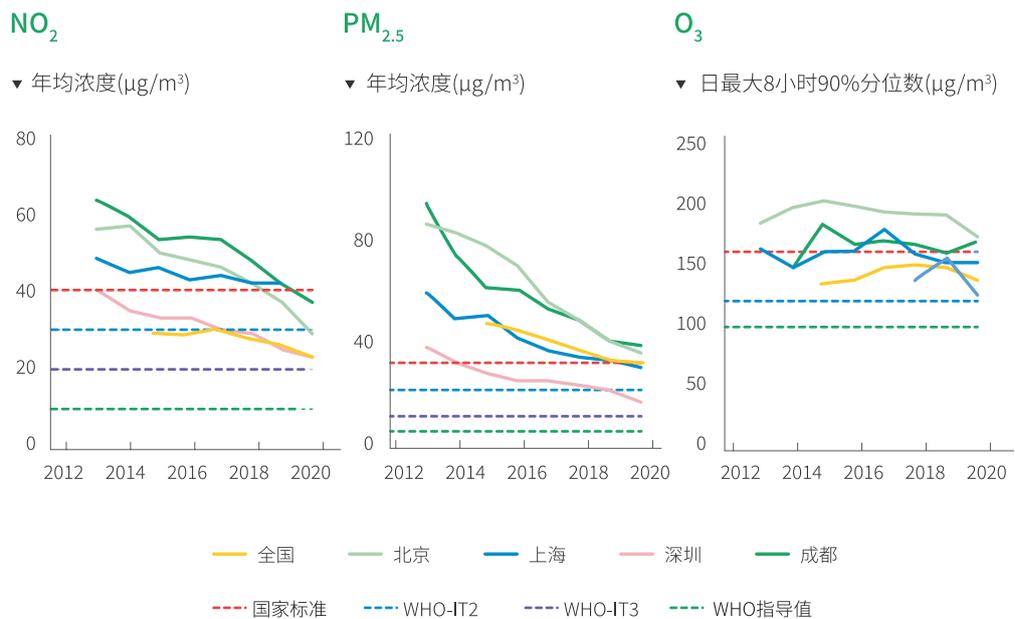


图2.13 | 全国及四座代表性城市的主要大气污染物浓度变化

为了持续改善城市大气环境质量，保护人群健康，大城市的决策者们有更强的动力制定更严格的措施来减少机动车排放，这也为推动中国的机动车排放控制进程发挥了至关重要的示范和引领作用。本研究将以北京、上海、深圳和成都四个代表性城市为案例，在后续章节中对各城市在近 20 年中机动车排放控制的探索和特色经验进行梳理和探讨。





照片来源: Pixabay

03

3.1 机动车排放污染综合控制成效显著	060
3.2 基于远程 OBD 的重型车在线监管	074

北京

“车 - 油 - 路”一体化综合控制的先行者



北京是中国的首都，也是中国机动车保有量最大的城市。2020年北京机动车保有量超过650万辆，是2000年的4.2倍（见图3.1），千人汽车拥有量已经达到281辆。作为中国机动车排放综合控制的引领者，北京近20年在新车标准、油品标准、交通管控和结构调整、在用监管和新能源车推广等方面率先实施了多项开创性和探索性的举措，逐步构建起“车-油-路”一体化的机动车综合控制体系。在经济社会快速发展和机动车保有量持续增长的同时，北京实现了机动车污染物排放的大幅削减和空气质量的显著改善，2021年北京空气质量首次实现PM_{2.5}年均浓度（33 μg/m³）低于国家空气质量标准限值（35 μg/m³），大气污染治理取得里程碑式突破（见图3.2“北京蓝”）。

北京的机动车排放控制经验进一步引领和带动了全国的机动车排放控制体系的不断进步和完善，并推动了中国的机动车排放控制与世界水平快速接轨，促成中国成为继美国和欧盟之后第三个全面转向实际道路监管的国家，提高了中国机动车管控的科学化和精细化水平。北京在机动车排放控制方面的经验为中国乃至世界其它城市提供了重要典范。



▼ 机动车保有量 (百万辆)



图3.1 | 北京机动车增长趋势和污染控制重要事件 (2000-2020)

3.1

机动车排放污染综合控制成效显著

1 北京 20 年控制历程回顾

快速增长的机动车保有量给北京空气质量带来了严峻挑战，以道路机动车为代表的移动源成为北京 $PM_{2.5}$ 最大的本地污染源。2014 年北京首次发布 $PM_{2.5}$ 源解析结果，机动车在本地污染贡献中占比高达 31%（见图 3.1），此后 2018 年和 2021 年发布的两次 $PM_{2.5}$ 源解析结果中移动源（道路机动车加非道路移动源）的贡献则分别高达 45% 和 46%。机动车污染防治始终是北京市大气污染防治的关键领域之一，对持续提升城市生活品质，降低公众健康风险意义重大。

自 1990 年代末期以来，北京制定和修订了 30 余项地方标准，涉及新车、在用车、车用燃料、交通结构和经济激励等多个方面，并持续出台了大量的控制政策和措施，逐步丰富和完善了“车 - 油 - 路”一体化的排放控制体系（见图 3.3），成为中国城市机动车排放污染综合治理的先锋城市。近年来，北京更加重视强化在用车监管、交通运输结构调控和清洁能源转型等措施的作用，助力机动车污染的深度减排和城市空气质量的持续改善。

1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008

新车标准

轻型汽油车

1999/1-2002/2 (国一)

2003/1-2005/12 (国二)

2005/12-2008/2 (国三)

重型柴油车

2000/1-2002/12 (国一)

2003/1-2005/12 (国二)

2005/12-2008/6 (国三)

2008/7-

油品标准

汽油

无铅化 低硫化/1998年实现

2003/1-2005/6 <500ppm

2005/6-2007/12 <150ppm

柴油

2003/1-2005/6 <500ppm

2005/6-2007/12 <350ppm

在用车

排放监管

1999-修正双怠速

2001-2003 ASM过渡期

2003-全面实施汽油车ASM和柴油车

区域限行

2003-黄标车区域限行(目前六环内限行)

清洁燃料
与新能源车

1999-CNG公交车

交通与经济
措施

2008/3-

临时管控措施

奥运期间:单双号限行、黄标车禁行、公车停驶

¹ 仅在公交、环卫和邮政等城市公共车队中实施; ² 对于货运、旅游等长途社会车队中实施。

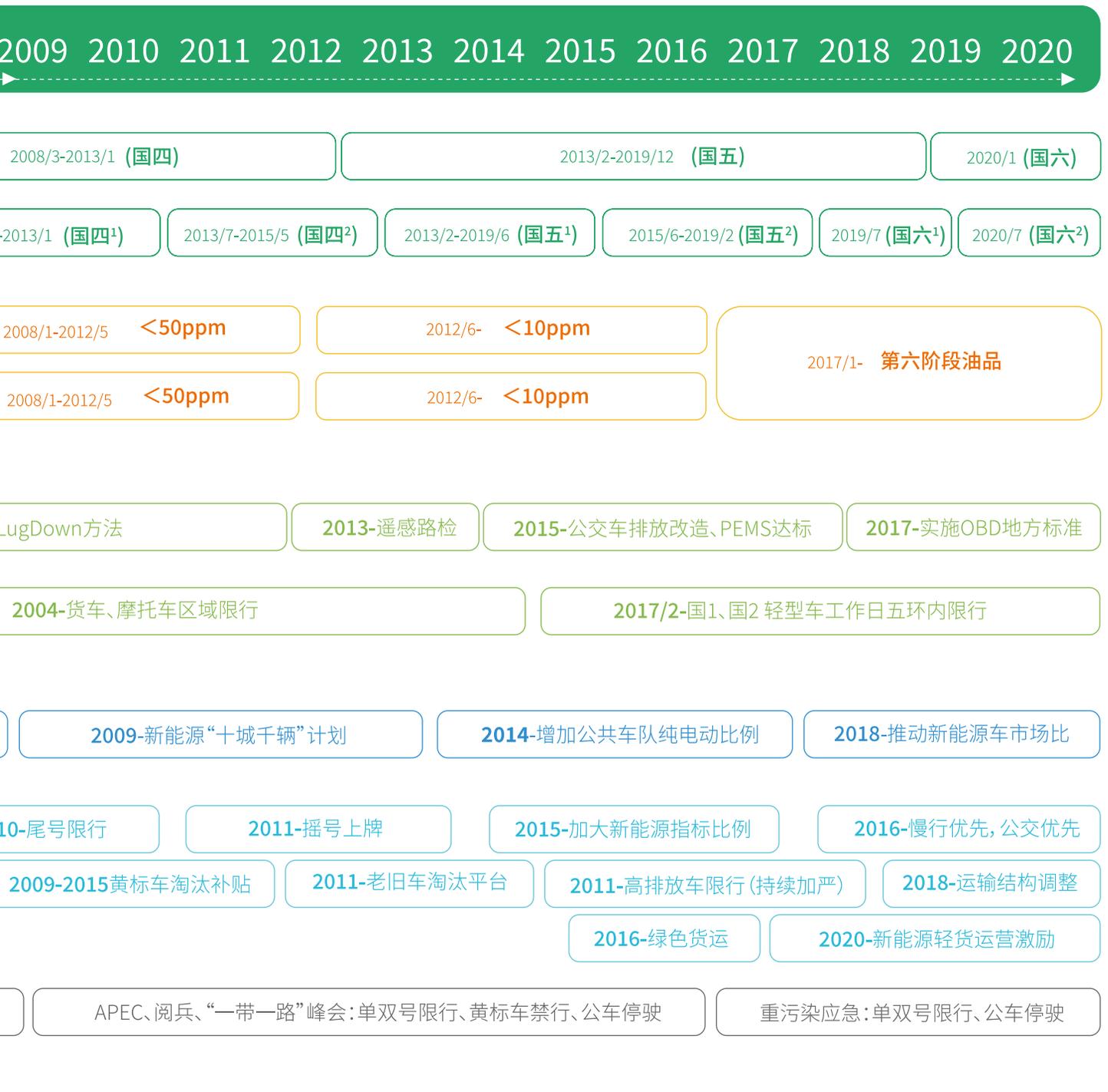


图3.3 | 北京机动车污染排放控制主要措施的实施历程(1998-2020)

1. 新车排放控制

实施更严格的机动车排放标准来加强新车污染排放控制是机动车排放控制体系中的核心内容，也是过去 20 年北京及中国其它城市机动车排放控制减排效益的最大贡献者（详见小节 3.1.2 和图 3.7）。1999 年 1 月，北京成为中国第一个实施轻型汽油车国一排放标准（相当于欧 1 排放标准）的城市。此后，北京在新车排放控制方面一直处于国内领先地位，比全国提前实施了轻型汽油车和重型柴油车等车型的多个阶段的新车排放标准，为全国持续加严新车排放标准提供了宝贵的经验。2013 年，北京率先发布地方标准，规定可以利用 PEMS 进行重型车新车型式认证测试，是我国第一部引入 PEMS 开展实际道路测试的地方法规，加快了 PEMS 被纳入国家标准的进程，使中国成为继美国和欧盟后第三个全面进入实际道路监管的国家。2020 年，北京先于全国正式实施轻型车与重型车的国六标准，已与世界上最严格法规接轨。

2. 在用车排放控制

北京非常重视对庞大的在用车队的排放监管，在过去 20 年间实施了包括在用车检测和维护制度（I/M 制度）、老旧车淘汰更新和强化实际道路监管等一系列的在用车控制措施。通过应用更先进的检测技术，以持续改进在用车尾气检测的测试方法，这是北京强化 I/M 制度的核心举措。1999 年，北京修正了双怠速测试方法，对国一新车执行不同的限值标准；2001 年过渡为更严格的稳态加载测试工况（ASM）方法，2003 年进一步修正完善并开始全面实施，此后随着新车排放标准的加严不断更新在用车排放检测限值。对于在用柴油车，北京于 2003 年执行加载减速烟度测试法（LugDown），并于 2010 年加严了 LugDown 测试的烟度排放限值。

高频使用的公共车队在城市机动车保有量中占比虽小，但是由于其很高的年均活动水平（例如公交车 >5 万公里 / 年，出租车 >8 万公里 / 年），并导致排放快速劣化，因此其在北京机动车排放总量的占比不容忽视。为此，北京积极进行出租车和公交车等高频使用车的更新和治理，并推动了对环卫、邮政、旅游、省际客运、城市保障货运和建筑工程运输等重点车队的淘汰与排放治理改造。例如，北京 2016 年启动了对两年以上出租车更换三元催化器的工作，此后一年内为约 5 万辆出租车更换了三元催化器；同时建立了定期更换机制，三元催化器使用时间达到两年的出租车将自动纳入更新计划。

此外，北京首先对在用车实行了环保标志管理，根据车辆注册登记的车型号和尾气排放环保检验合格情况核发对应的环保标志：对尾气排放环保检验符合国一标准及以上的汽油车、符合国三标准及以上的柴油车，核发绿色环保标志（即“绿标车”），对其余排放控制技术落后、尾气排放不达标的车辆核发黄色环保标志（即“黄标车”）。为了促进黄标车等高排放车辆的淘汰，北京设置了逐渐严格的高排放车区域限行措施，并通过提供补贴等方式加速老旧车淘汰置换，于 2015 年顺利完成了全部黄标车的淘汰工作，成为全国首个解决黄标车问题的城市。2017 年北京

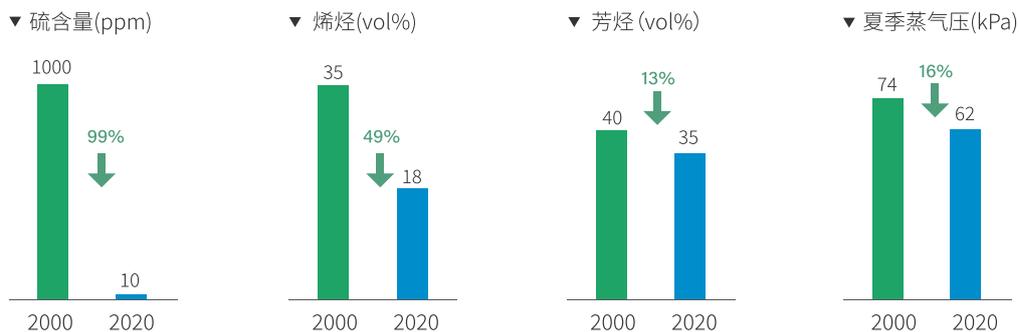
进一步出台了工作日五环内道路限行国一及国二轻型汽油车和六环内限制国三柴油货车通行的管理政策，并于 2019 年 11 月起将国三柴油货车的禁限行范围扩大到全市域。

近年来，北京逐步强化对在用车的实际道路排放监管，积极推进先进监管技术的应用和监管平台的建设。北京早在 2005 年即制定了遥测法的地方标准（DB11/318-2005），通过道路边固定和移动的遥感设备对车辆进行尾气排放监测，并基于遥感测试结果对排放超标的车辆进行处罚。随着在用车监管的重要性不断提升和先进监管技术的发展，北京率先实施了一系列重型车远程监管法规和标准，成为全世界首个开始实践 OBD 联网监管的城市。2018 年以来北京相继试点了国四、国五在用重型车的 OBD 改造，并对改造效果进行了深入评估，基于此制订了原厂加装 OBD 远程排放监控的地方标准和实施条例，提前实施满足国六标准的 OBD 加装和数据传输要求，目前已初步形成了联网十万辆量级的重型在用车排放在线监管平台（详见 3.2 节）。

3. 车用油品质量改善

油品质量直接影响机动车排放水平，同时更清洁的油品也是保证先进的后处理装置有效发挥作用的关键，只有同步实施油品和车辆标准，才能使新车排放标准的实施获得最大减排效益。北京早在 1990 年代就开始提高车用油品质量，逐步实现了车用油品的无铅化（1998 年）和低硫化（2012 年）。值得一提的是，在全国由于油品标准滞后而多次推迟新车标准的背景下，北京领先全国实施了第二到第五阶段油品标准，确保了油品标准和新车排放标准的同步实施，为推动全国逐步实现“车油一体化”进程起到了良好的示范作用。为进一步保障国六排放标准的实施效果，北京早在 2017 年即开始全面实施国六汽柴油标准，率先实现了油品先行。在过去的 20 年内，车用油品质量实现了全面提升（见图 3.4），汽柴油的硫含量均低至 10 ppm 以下，车用汽油逐步降低烯烃含量、芳烃含量以及夏季蒸气压值；车用柴油则持续提升十六烷值，并降低多环芳烃含量。

汽油主要成分



柴油主要成分



图3.4 | 北京20年车用油品主要成分指标的改善

4. 推广清洁燃料车与新能源车

北京在公交、出租、环卫和邮政等公共车队优先发展清洁能源和先进动力车辆，并通过政策鼓励引导、完善充电桩等配套设施建设等手段大力发展新能源汽车。1999年起，北京率先在公交车队中引入并逐步推广天然气公交车，到2008年北京奥运期间，北京已形成了超过4000辆的天然气公交车队，为大幅降低公交车的颗粒物排放和黑碳排放做出了重要贡献。2009年，北京作为首批“十城千辆”的新能源汽车示范城市，开始逐步在公交车等公共车队推广电动车，目前新增公交车中电驱动公交车占比达到九成，2020年北京公交车中新能源与清洁能源比例已超过90%，柴油公交车占比已不足10%。当然，在清洁能源转型的道路上并非总是一帆风顺。北京曾于1999年开始在出租车上推行LPG车的示范工作，曾一度达到4.5万辆的规模，但是由于加气设施不完善、使用成本和减排效益均不明显等诸多原因，在评估其综合效益不佳之后及时总结经验，北京于2003年之后逐渐停止了LPG出租车的推广，到2009年完全退出了运营。之后北京还曾在2013年投入少量的汽油-天然气双燃料出租车进行示范运营，但是由于类似的原因后续也没有大范围推广。

北京还研究制订吸引企业替换既有存量柴油货车的相关政策，积极推进货车新能源化。2019年7月，北京发布新能源物流配送车辆优先通行政策，并逐步提高货车通行证发放车辆中新能源货车的比例。2020年8月，北京进一步强化对新能源轻型货车的运营激励，对符合条件的企业给予资金奖励，并对一次性置换更新20辆（含）以上新能源货车的企业追加城区货运通行证奖励。到2020年，北京已推广新能源货车2.3万辆，其中4.5吨以下持有货运通行证的车辆（除危冷车辆）新能源比例已达到100%。

为了促进私人购买纯电动小客车，北京在小客车限购政策中配置了单独摇号的新能源小客车指标，在普通汽油车指标持续缩减的情况下维持新能源车指标保持不变（每年约6万辆），同时规定新能源车辆不受尾号限行政策限制，在保有、通行、使用等一系列环节给予新能源小客车便利。截至2020年底，北京新能源汽车总量已经达到41.2万辆。在已出台的十四五规划中，北京提出力争在2025年全市新能源汽车保有量达到200万辆。为达到这一目标，十四五期间北京新能源汽车的年均增长率将要达到37%。

5. 交通规划与运输结构调整

北京采取了优化城市规划布局、大力发展公共交通、鼓励慢行交通和实施交通管控等措施持续改善居民出行结构。通过加快推进公交、轨道等公共交通及慢行系统建设、总量控制和交通优化等措施，可有效控制机动车保有总量的过快增长，并促使单车活动水平出现显著下降。在轨道交通方面，北京由2000年前仅有的2条地铁线路发展到2020年的24条路网运营线路，总里程727公里，车站428座（见图3.5）。在地面公交系统方面，保障公共交通路权优先，加快公交专用道建设，实施公交线网优化调整，改善公共交通的通达性和便捷性；鼓励智能交通的发展，形成了公交快线、市区普线、微循环线、市郊连接线、郊区线、定制公交线等6大类地面公交线路，到2020年北京中心城区绿色出行比例超过75%。

为了进一步调控小客车高速发展、高频使用和高度聚集的特征，北京在2008年奥运临时交通管控措施经验的基础上，于2008年10月起实施小客车尾号限行措施并延续至今。2011年起，北京采用摇号方式无偿分配社会和个人小客车的配置指标，进行小客车总量控制，有效缓解了城市交通运行压力。随着保有量不断增长，指标进一步缩减，从2015年的15万个减少到2021年10万个，其中新能源汽车指标占比逐年增加，2021年指标中新能源汽车占比已达到60%。同时，北京还实施了推进停车位建设、智能交通管理、差别化停车收费和外埠车辆限行等一系列交通管理措施，有效调控了城市出行结构，降低了小客车的出行比例和出行强度。根据本课题组的相关调研发现，北京轻型客车的年均行驶里程从2000年的1.9万公里/年逐步下降至目前的1.1万公里/年，这一活动水平的显著下降与北京持续推动公共交通优先战略的努力是密不可分的。

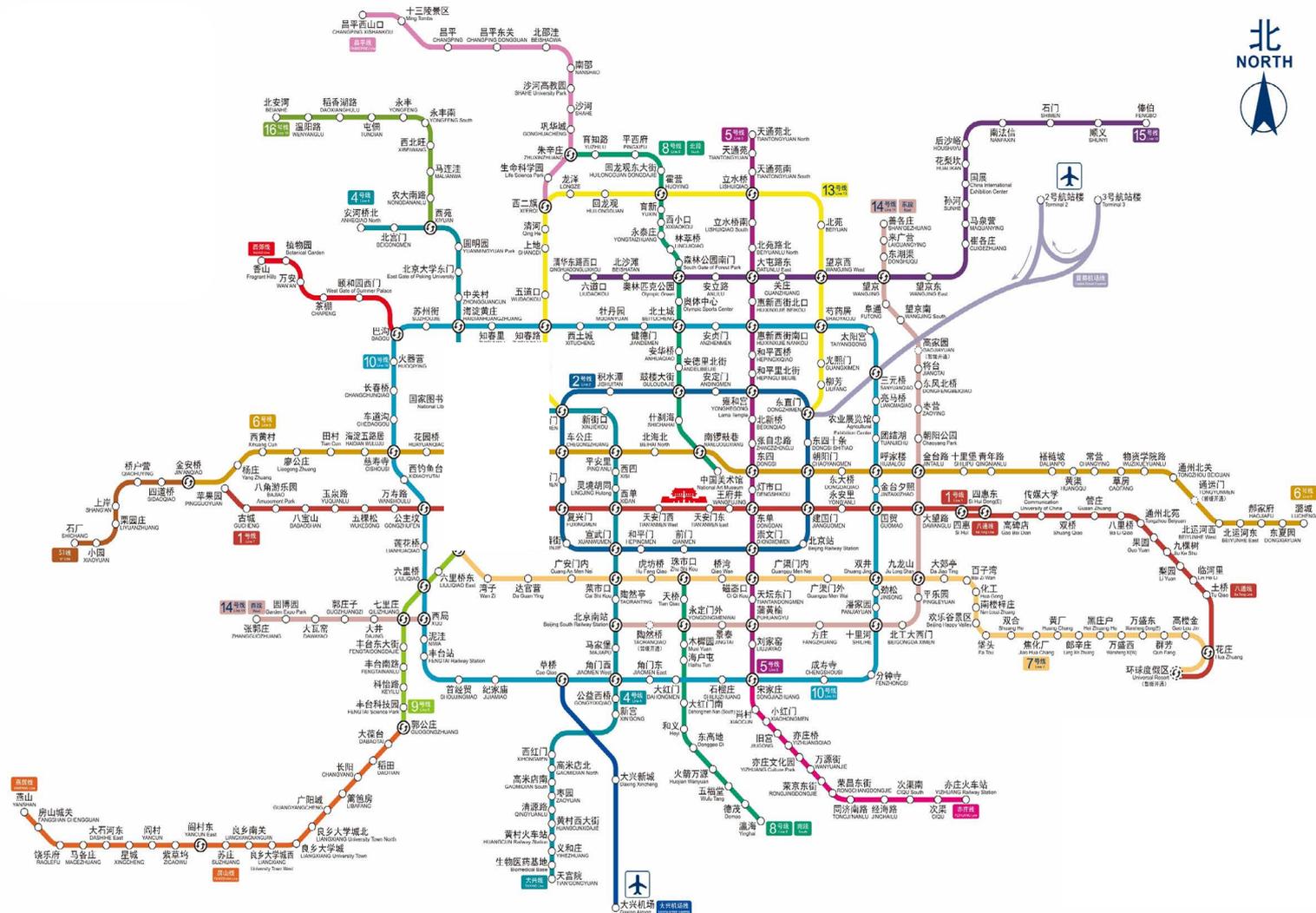
近年来，北京积极推进货运的运输结构调整。2018年，北京印发了《北京市推进运输结构调整三年行动计划（2018-2020年）》，以大宗生产生活物资（商品车、钢材、煤炭、砂石骨料、生活必需品）“公转铁”为主攻方向，以具备铁路接入条件的物流设施、工矿企业和铁路货场为主要区域，以重点企业为突破口下达明确的铁路运量指标。强化对承担运输结构调整任务的市属国有企业的督导，开展全市物资供需、重点货类及重点企业铁路运输量的监测分析和风险预警，确保将目标和任务落到实处。其中，砂石骨料全程绿色运输新模式取得重要突破。在全市2.5亿吨的到发货运量中，矿建材料（含水泥）运输量最大，年需求量达到1亿吨。北京通过在环京地区建立绿色建材供应基地，将铁路运输作为绿色建材基地评选标准，促进砂石骨料通过铁路进京。2020年3月，密云区威客矿山开往大兴区搅拌站的砂石骨料铁路运输完成首发，建立了“铁路市内远距离运输+新能源车两端短驳”的全程零排放绿色运输新模式，将铁路运输距离下探到150公里以内。经过三年实践，全市货物到发铁路运输比重由2017年的6.4%逐步提高至2020年的9.7%。

6. 经济激励措施

经济措施是配合上述措施实施的有力激励手段。北京在2009年起就通过提供补贴来加速黄标车和高排放老旧机动车的淘汰。此后，为了配合限制国一/国二汽油车、国三柴油货车通行的管理政策，北京完善了老旧车淘汰方案，综合车型、购置时间等因素对报废和转出的车辆给予补助。近年来，为鼓励国三汽油车淘汰更新，北京又出台了《北京市进一步促进高排放老旧机动车淘汰更新方案》，2020年底前淘汰的国三载客汽车可获单车补助4,000~22,000元，并且为了促进早淘汰、早见效，建立了补助资金退坡机制。

为了鼓励新能源汽车的推广使用，北京除了按照中央与地方补贴标准进行购车补贴外，还进一步实施了新能源轻型货车的运营激励政策，对认定的“绿色货运企业”给予污染物减排资金奖励和车辆通行便利，促进绿色货运体系的建设。在车辆使用环节，北京制订了差异化停车费、公用充电设施建设和运营补助、电动物流车优先配置货车通行证等多项政策，综合提升了新能源汽车的使用优势。

2020



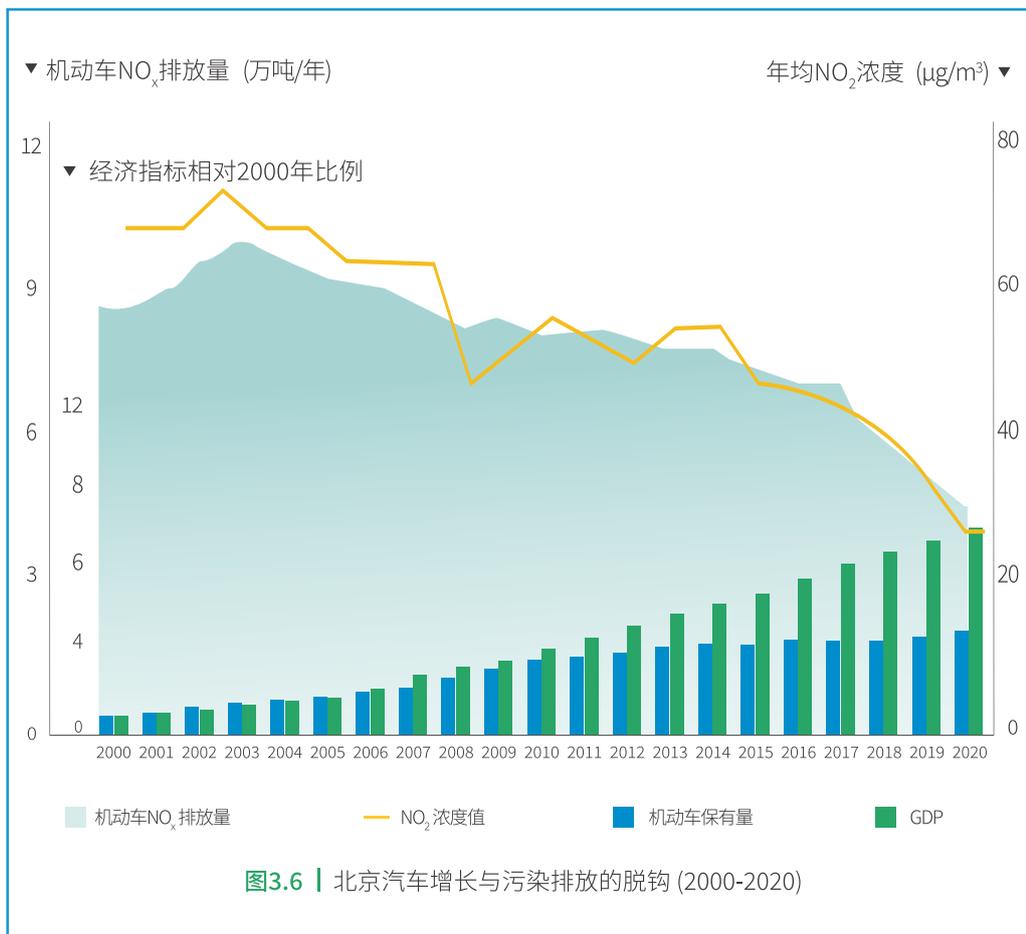
北京地铁图例

- 地铁一号线 地铁八通线
- 地铁二号线
- 地铁十三号线
- 首都机场线
- 地铁四号线 地铁大兴线
- 地铁十四号线
- 地铁十五号线
- 大兴机场线
- 地铁五号线
- 地铁十六号线
- 地铁房山线
- 地铁昌平线
- 地铁六号线
- 地铁燕山线
- 地铁七号线
- 地铁亦庄线
- 地铁八号线
- 地铁九号线
- 地铁十号线
- 西郊线
- S1线

图3.5 | 北京地铁线路发展历程

2 北京机动车减排效益评估

清华大学等机构对北京机动车排放控制的减排效益进行了持续的科学评估。过去 20 年间，北京的经济社会快速发展，GDP 增长了 10 倍，人口增加了 60%，机动车保有量净增加了 320%，但机动车的污染物排放量实现了大幅度的下降（图 3.6）。与 2000 年相比，2020 年北京机动车排放的 CO、HC、NO_x、PM_{2.5} 总量分别削减了 86%、70%、43% 和 86%（见图 3.7）。于此相对应，北京空气质量也取得了显著改善，其中，与交通排放密切相关的 NO₂ 年均浓度由 2000 年的 71 μg/m³ 下降至 2020 年的 29 μg/m³，与机动车的 NO_x 排放下降趋势高度吻合（见图 3.6）。



可以想象，如果过去 20 年间北京不采取任何控制，机动车排放将迅速增加：2020 年将高达 2000 年排放量的 5~15 倍，对生态环境和人群健康带来严重损害。由图 3.7 可知，北京 20 年来“车 - 油 - 路”一体化综合控制带来的各种大气污染物的减排效益高达 94~99%（基于 2020 年实际排放与 2020 年无控状况下的比值）。

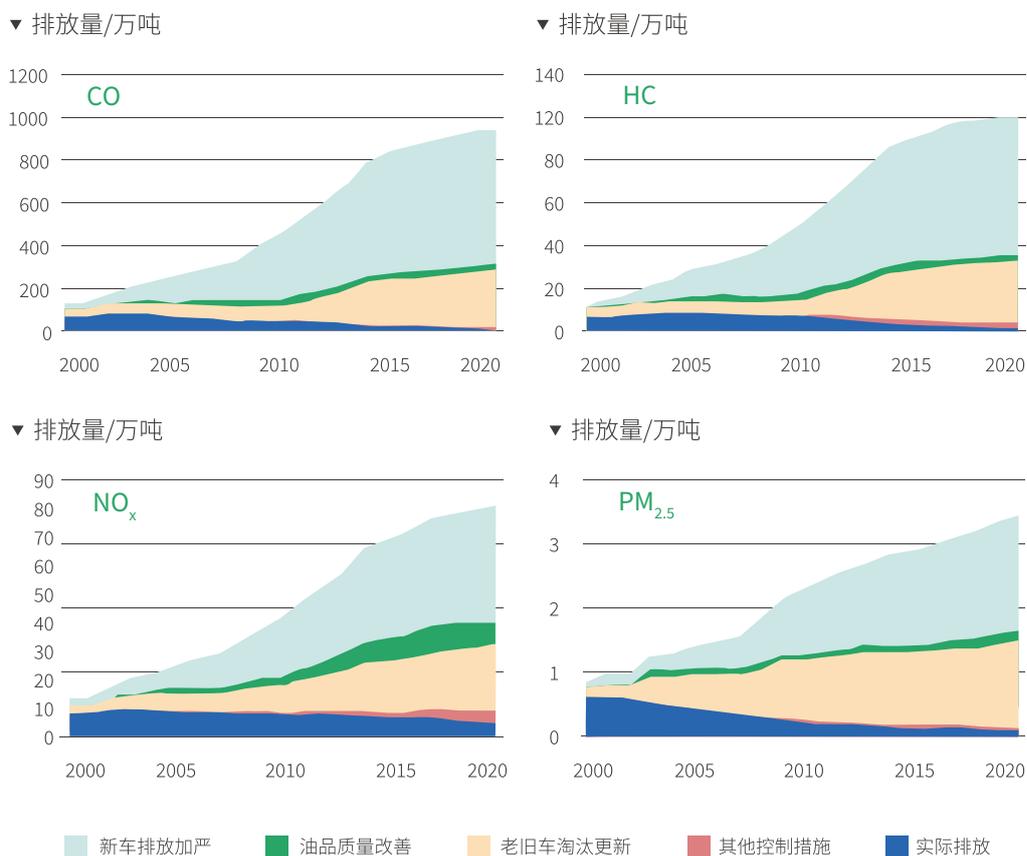


图3.7 | 北京机动车污染物减排量评估 (2000-2020)

在各项减排措施中，新车排放标准加严、油品质量的改善和老旧车淘汰更新在过去20年内对北京的机动车污染物减排发挥了最主要的贡献。新车排放标准的持续加严对CO、HC、NO_x、PM_{2.5}分别贡献了70%、68%、55%、50%的减排量（图3.7，浅蓝色部分）。油品质量的持续改善也是降低污染物排放的重要因素之一，从车油同步到油品先行，北京的油品质量改善对北京在用车队CO、THC、NO_x、PM_{2.5}的直接减排贡献就达到了4%、5%、11%、5%（图3.7，绿色部分）。需要指出的是，由于油品标准的同步实施进而保障了各阶段新车标准的顺利推进带来的间接效益则更为可观，而这部分间接效益被归入到了新车减排效益中。老旧车淘汰与更新可进一步实现车队整体排放水平的持续降低。2000-2020年间，车辆淘汰更新对CO、HC、NO_x、PM_{2.5}的减排贡献分别达到了26%、26%、31%、43%（图3.7，黄色部分）。

应该看到，近年来新车和油品标准进一步加严带来的边际减排效益正在逐步减弱。因此，为了进一步实现机动车污染的深度减排，2010年以来，北京重点推动实施了机动车总量控制、交通优化调控、新能源汽车推广（电动化）、运输结构调整（“公转铁”）和强化在用车监管等一系列综合控制措施。对上述措施控制效益的评估如图3.8所示。很明显，这些新增措施的污染物减排效益在近年来显著增加，并且将在未来的机动车排放控制工作中发挥越来越重要的作用。

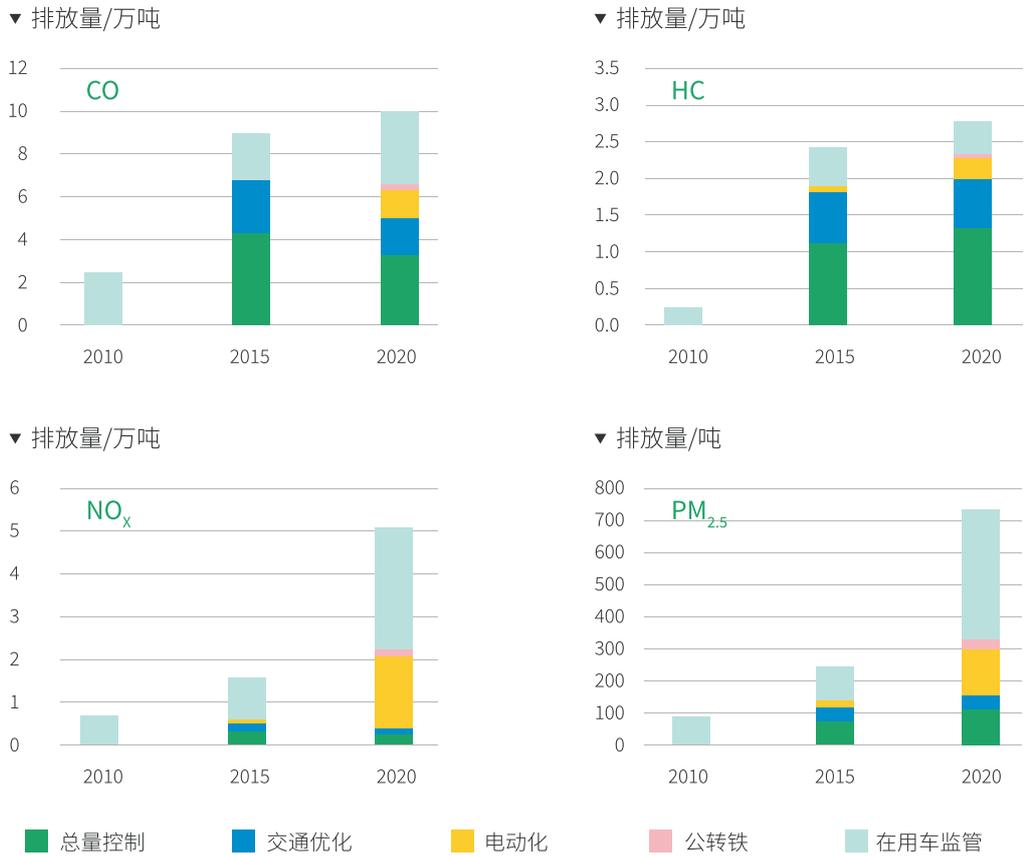


图3.8 | 除车油标准加严和老旧车淘汰之外的措施分项减排效益

机动车总量控制和交通优化措施可以有效降低车辆使用强度，尤其是显著降低了小型客车的活动水平，因而对于 CO 和 HC 的减排起到了重要的贡献。2020 年，总量控制和交通调控措施共减排了 4.8 万吨 CO 和 2.1 万吨 HC，约占除车油标准和老旧车淘汰之外各项措施（后简称“其他措施”）减排总量的 69% 和 51%。

新能源汽车的推广效益也在近年来逐渐凸显。截至 2020 年底，北京已累计推广新能源车共 41.2 万辆，覆盖小型客车、出租公交和城市物流配送多个领域。由于新能源汽车推广涉及了轻型车和重型车等众多的车型类别，因此其对四种大气污染物均有较为显著的减排效益。该措施 2020 年减排了 1.1 万吨 CO、0.3 万吨 HC、1.7 万吨 NO_x 和 137 吨的 PM_{2.5}，占其他措施总减排量的 10~35%。未来随着新能源汽车技术持续创新发展，新能源车基础设施、服务保障、安全监管配套保障体系的不断完善，推广新能源汽车将在未来的减污降碳工作中发挥至关重要的作用。

运输结构调整是机动车（特别是重型货车）排放实现大幅下降的关键举措之一。北京及京津冀区域实施的“公转铁”系列措施推动货物运输从公路转向铁路，减少了不合理的公路运输，进而降低了柴油货车使用强度。由于“公转铁”的实施还在初期阶段，目前的减排效益尚不显著，

约占其他措施总减排量的 3%~4%。未来随着铁路运能提升、大型工矿企业和物流园区铁路专用线建设等的进一步完善，货物运输结构将得到进一步优化，铁路承担的大宗货物运输量将显著提高，从而持续助力交通部门的节能减排和大气环境的改善。

由于北京在用车保有量日趋庞大，因此，加强在用车监管的重要性愈发突出。近 10 年来强化的 I/M 制度和日趋高效的在用监管手段已开始发挥重要作用。2015 年，在用车监管已实现 2.6 万吨 CO、0.4 万吨 HC、1.0 万吨 NO_x 和 97 吨 PM_{2.5} 的减排效益；随着近期北京实施 OBD 在线联网的新京五标准以来，安装了在线 OBD 监控的新京五和国六柴油车的实际道路排放进一步大幅度的下降，2020 年在用车监管对 NO_x 和 PM_{2.5} 的减排贡献占比已超过 50%（见图 3.8）。因此，后续的 1.2 节以远程 OBD 在线监管为例，介绍北京在强化机动车实际道路排放监管方面的先进经验。

3.2

基于远程 OBD 的重型车在线监管

1 北京重型车 OBD 监管发展历程

为了减少污染物排放，机动车排放标准逐步加严、控制技术不断升级。但因实际道路监管不到位或缺失，大量研究发现柴油车实际道路 NO_x 排放显著高于限值要求。2017 年 Nature 发表的全球柴油车环境影响研究显示，欧洲、美国、中国、日本等多个国家或地区的柴油车实际道路 NO_x 排放均数倍于标准限值。究其原因包括：1) 以“大众柴油排放门”为典型案例的厂商造假时有发生；2) SCR 使用尿素溶液作还原剂，车主为了节省成本往往添加劣质尿素（甚至加水）或屏蔽 SCR 组件；3) 企业往往仅针对法规测试进行产品设计和优化，实际复杂工况和环境条件可能导致排放显著增加。例如，SCR 理想的催化温度区间在 200~450 °C，冷启动、低温、低负荷等因素都会导致 NO_x 排放显著增加。因此，柴油车实际道路 NO_x 排放监管已成为机动车污染防治工作的重点和难点之一。

在传统在用车排放监管方法（如基于发动机机架的在用符合性检查、定期环保检验）的基础上，北京开展了道路尾气遥感检测执法，并将 PEMS 方法纳入地方标准，以加强对车辆实际道路排放的监管。基于上述实际道路排放监管手段，柴油车污染排放控制取得了一定成效，但传统的监管技术仍存在时效性差、准确度低或覆盖率不佳等问题。融合实际道路智能监管和大数据技术的远程 OBD 排放监控技术为在用柴油车准确高效监管提供了一种全新的技术思路。

近年来，重型车 OBD 以及与排放相关的车载传感器得到了快速发展。目前，国际上对重型车 OBD 协议也基本达成一致，OBD 所需的 NO_x 等监控排放的车载传感器技术已比较成熟，这使得基于 OBD 监控柴油车污染排放切实可行。OBD 远程排放监控通过车载 OBD 终端采集车辆行驶工况数据（如车速、转速等）和 SCR 上、下游的 NO_x 浓度数据，并以远程传输的方式将逐级高分辨率数据向生产企业或监管部门的数据平台实时传送，实现对重型车全车队的远程实时排放监控。

北京针对 OBD 排放监管采取的技术方案较为超前，2017 年针对旅游、客运、公交和货运等行业开展重型车排放与能耗在线监控试点项目，北京市环境保护局联合第三方机构和车辆生产企业选取了 500 辆在用重型柴油车进行改造（后装），开展远程排放在线监控应用示范。在总结应用示范经验的基础上，北京发布了《重型汽车排气污染排放限值及测量方法（OBD 法 第 IV、V 阶段）》，成为全球范围内首个基于 OBD 远程监控技术对重型车全生命周期排放和能耗进行远程在线管控的城市。该标准要求自 2018 年 9 月 1 日起，全市所有新销售和注册的重型车应具备排放与能耗自动监控功能（前装），并将实时收集的数据发送至北京数据管理平台。需要指出的是，示范平台的 OBD 数据质量分析结果表明，前装和后装车辆的数据质量存在较大差异：前装 OBD 车辆的数据质控相对较好，绝大部分车辆的可用数据比例超过 80%；后装 OBD 车辆中存在部分数据异常、缺失等问题，将影响对车辆实际道路排放的准确评估。因此北京实施的 OBD 法规强制要求全市新京五阶段重型车前装原厂 OBD，这对保证重型车更准确有效的远程监管至关重要。

2020 年 1 月北京出台的《北京市机动车和非道路机械排放污染防治条例》中规定在北京市销售的重型柴油车、重型燃气车按照相关标准安装 OBD 远程排放管理车载终端；同年 5 月，《北京市移动源远程排放管理车载终端安装管理办法（试行）》实施，要求北京市注册登记的重型柴油车和重型燃气车（国五及以上）、在用非道路移动机械（国四及以上）以及长期在北京市行政区域内行驶的外埠重型柴油车和重型燃气车（国五及以上）在 2021 年 12 月 31 日前完成 OBD 远程排放管理车载终端安装。截至 2021 年底，北京重型车排放远程在线监测示范平台（图 3.9）上已实现超过 10 万辆重型柴油车的远程监控数据接入，该平台有效支撑了《北京市机动车和非道路移动机械污染防治条例》等重要法规条例的发布实施和北京市多次重大活动空气质量的保障工作。



图 3.9 | 北京重型车排放远程在线监测示范平台

北京 OBD 远程监管的实施经验进一步助力了国家标准的制定。国家标准《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（以下简称“重型车国六标准”）正式提出采用远程传输 OBD 大数据监控重型柴油车 NO_x 排放的技术模式，并对 OBD 远程排放管理车载终端的安装、传输字段和传输频率作出了明确的规定，国六重型车远程在线终端将数据经由车企传输给国家监管平台。重型车国六标准中要求国六 a 阶段（2021 年 7 月 1 日起）强制安装重型车远程在线监控硬件，国六 b 阶段（2023 年 7 月 1 日起）安装 OBD 远程在线监控终端并强制上传数据。北京及全国 OBD 远程排放监控技术法规主要发展历程如图 3.10 所示。



图3.10 | 北京及全国OBD远程在线监控法规发展历程

专栏 3-1

国际 OBD 监控发展现状

美国加州：2018 年 REAL 项目中提出，自 2022 年起拟利用 OBD 远程排放监控系统对重型车 CO₂ 和 NO_x 排放进行评估；在 2024 年将基于 OBD 监控开展排放控制系统检查和排放符合性检查。加州空气资源委员会评估结果表明新型的 OBD 监测技术可以直接且高效地监控车辆排放特征，同时也证实柴油车的实际道路 NO_x 排放形势不容乐观。72 辆 2010 年后生产的重型柴油车平均排放高达实际道路限值的 1.8 倍，机场巴士、城市专用车等车型超标倍数甚至达 5~10 倍。

欧州：欧盟重型车第六阶段排放标准中提出将基于 OBD 开展车辆故障检测和防篡改检测。欧盟汽车排放法规咨询顾问组同国际以及欧盟其他的汽车技术法规制修订组织建议欧 7/VII 引入新型 OBD 技术对车辆整个使用寿命的实际运行排放监测，用于支持在用车实际道路排放监管（定期检查和路检路查）。

加州重型车 OBD 排放监控发展计划

I. OBD 数据采集与评估 (REAL 项目)

2018 年：要求 OBD 系统收集重型车 CO₂ 和 NO_x 排放数据

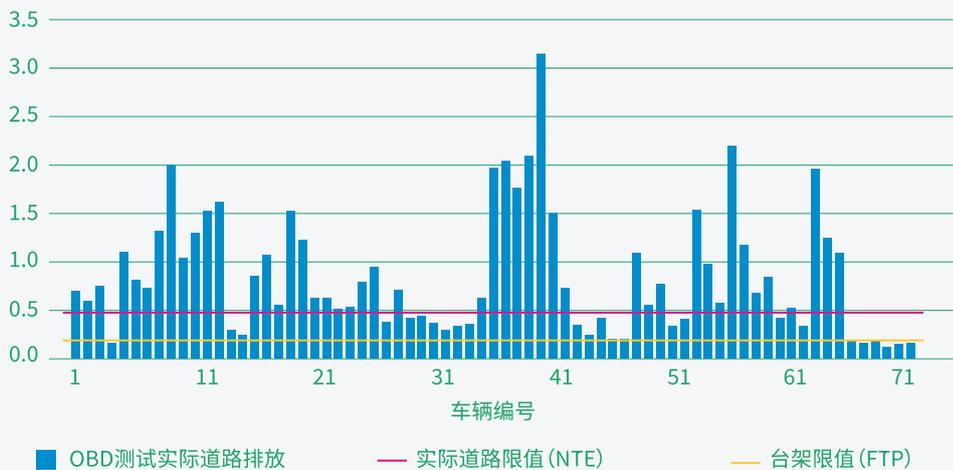
2022 年：基于 OBD 考核新生产重型车实际道路 CO₂ 和 NO_x 排放

II. 基于 OBD 监控的在用法规建立

2024 年：基于 OBD 检测重型车排放控制系统故障及在用排放符合性

加州重型车 NO_x 排放 OBD 测试评估结果

▼ NO_x (g/bhp-hr)



专栏图3-1 | 美国加州重型车OBD排放监控发展计划与实际道路NO_x排放评估

2 北京重型车 OBD 监管发展历程

为了检验 OBD 数据的可靠性，清华大学建立了基于远程 OBD 和 PEMS 同步测试数据一致性的校验方法，发现 OBD 远程在线监控数据与 PEMS 测试结果具有较高一致性。车速、发动机转速两字段的同步测试结果相关系数 R^2 均在 0.95 以上，大部分车辆的平均相对偏差在 $\pm 3\%$ 以内；燃料流量和 NO_x 浓度的逐秒测试数据相关性可达 0.9 左右，相对偏差在 $\pm 25\%$ 以内（见图 3.11）。

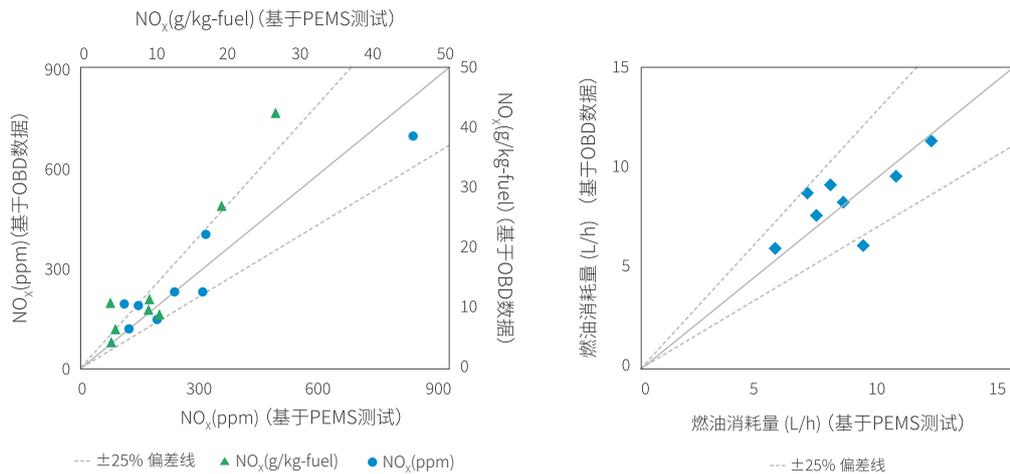
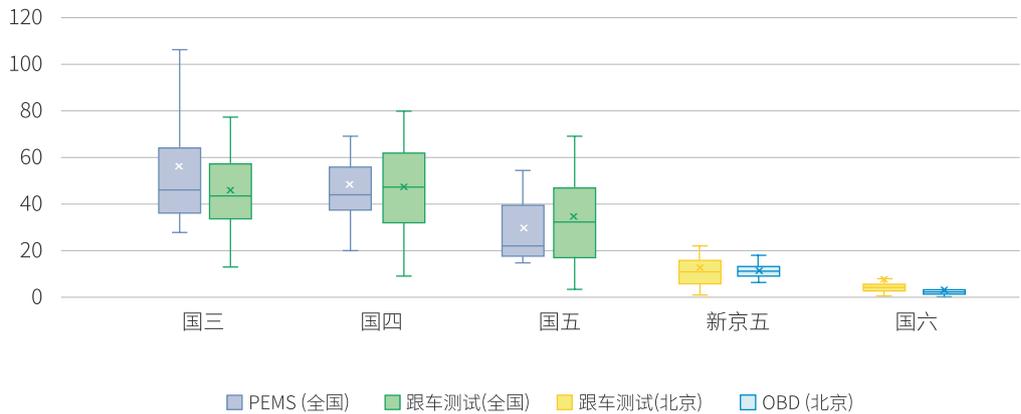
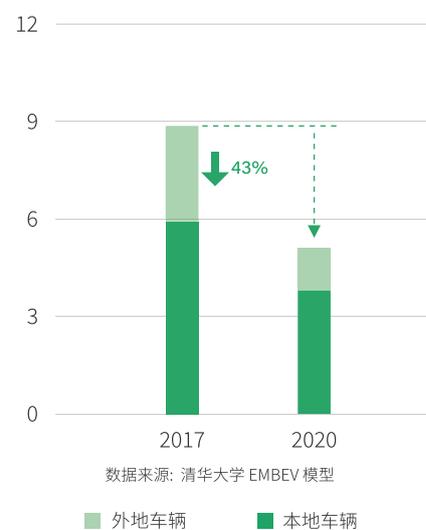
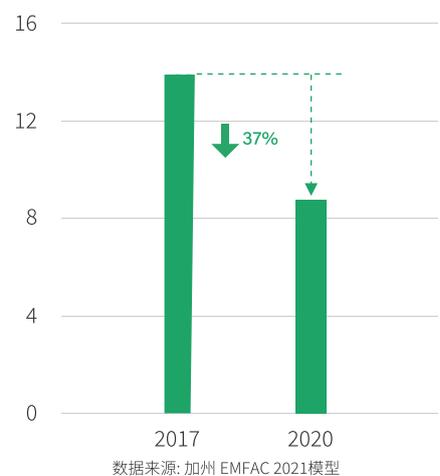


图3.11 | 远程OBD-PEMS同步测试计算结果对比

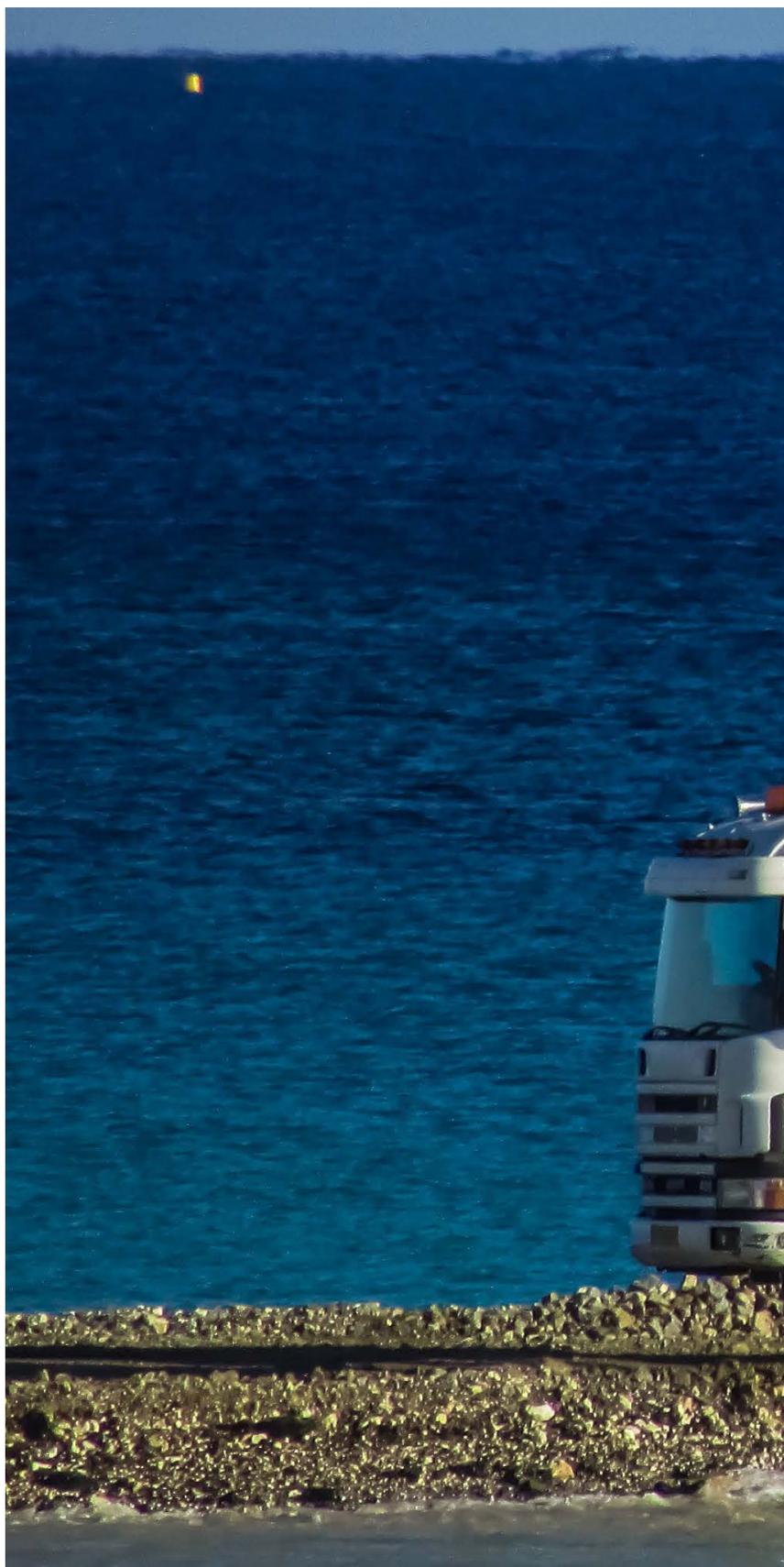
利用 OBD 远程在线监控的逐秒数据，结合 PEMS、跟车测试等多种测试方法，对不同排放阶段的重型车队 NO_x 排放水平进行评估。其中，国三～国五阶段的重型车 PEMS 和跟车测试在全国开展；北京新京五、国六阶段车队的实际道路 NO_x 排放则主要通过跟车、OBD 两种方法分别评估，结果如图 3.12 所示。对于国三～国五阶段的重型车，PEMS 测试和跟车测试得到的车队 NO_x 实际道路排放水平相近；对于新京五和国六重型车，跟车和 OBD 获取的排放水平一致性也很高。新京五阶段的重型车实际道路 NO_x 排放水平与通过 PEMS、跟车两种方法测试的国五阶段车辆排放相比，分别降低了 51% 和 67%。跟车和 OBD 两种测试手段均显示，国六重型车实际道路平均 NO_x 排放与新京五阶段相比进一步显著降低（均值下降约 32%）。

▼ NO_x (g/kg-fuel)图3.12 | 基于车载、跟车和远程OBD的重型车队NO_x排放比较

采用强有力且高效的 OBD 远程在线监管，使得近年来北京重型车队 NO_x 排放持续大幅下降，为北京 PM_{2.5} 和 NO₂ 浓度持续降低（特别是后者）做出了重要的贡献。经测算，2020 年北京柴油货车车队的 NO_x 排放相比 2017 年削减了 43%，超过美国加州同期的减排幅度（~37%）（见图 3.13）。柴油货车 NO_x 控制的成果也实实在在体现在空气质量的改善上，同期北京 NO₂ 浓度削减 37%，NO₂ 年均浓度已于 2019 年首次达标。

北京市柴油车NO_x排放量▼ NO_x 排放量(万吨)美国加州柴油车NO_x排放量▼ NO_x 排放量(万吨)图3.13 | 北京和加州柴油车NO_x排放控制效果比较

OBD 远程排放在线监控具有车队覆盖率高、传感数据准确度高、经济便捷的优势，是今后实现重型车全车队实际道路排放监控的重要途径。未来，OBD 远程排放监控技术还将在重型车违规诊断、高排放车动态追踪、重型车实际道路油耗和 CO₂ 监管、高分辨率动态排放清单方面提供更为丰富的数据支持，也为交通部门控制污染物排放、改善空气质量和降低 CO₂ 排放提供重要技术支持。北京、上海等率先开展 OBD 示范实践的城市，目前在重型车远程排放监控应用中处于世界领先地位，其示范经验将为国内外其它城市开展重型车实际道路排放监管提供有益经验。





图片来源:Pixabay

04

4.1 坚持公共交通优先发展战略	088
4.2 车用能源多样化尝试	098

上海

坚持公共交通优先战略 推动能源多样化尝试



上海是中国的经济和金融中心，是中国城市化发展起步最早、速度最快的城市之一（图 4.1）。2020 年，上海市常住人口达 2487 万人，近 20 年年均增长 2.1%；人均 GDP 为 15.7 万元，年均增幅达 8.6%；建成区面积较 2000 年增加约 1.5 倍。社会经济和城市化的飞速发展使上海机动化出行需求快速提升，由此导致的交通环境、能耗和拥堵问题成为制约上海迈向卓越全球城市的关键瓶颈，也促使上海在全国率先确立了公共交通优先发展的战略导向，成为我国公交都市建设的典范。同时，在交通能源多元发展上积极探索，包括大力推进新能源汽车、试点餐厨废弃油脂制生物柴油示范应用，等等。卓有成效的机动车排放综合控制，有力地助推了城市空气质量持续改善。

图4.1 | 上海市城市发展图景



SHANGHAI

4.1

坚持公共交通优先发展战略

与北京类似，上海机动车污染治理起步于上世纪 90 年代，先后通过实施车用汽油无铅化、新车排放标准和在用车排放管理等一系列举措，形成了“车 - 油 - 路”一体化的管理体系。但汽车保有量的持续快速增加使上海交通环境依然面临巨大压力。上世纪 90 年代以来，全市汽车总量以年均 12% 的增幅快速增长。为从源头上根本解决城市交通环境问题，上海于 1994 年开始首度实行新增私车牌照拍卖制度，率先对机动车总量进行控制，同时确立了“公交优先”作为城市交通的核心发展战略。2000 年起依托交通发展规划，先后通过大力发展轨道交通、优化公交线路、鼓励公共交通出行等相关政策措施，使城市交通出行结构得到显著优化，交通环境得到显著改善。

▼ 机动车保有量（百万辆）

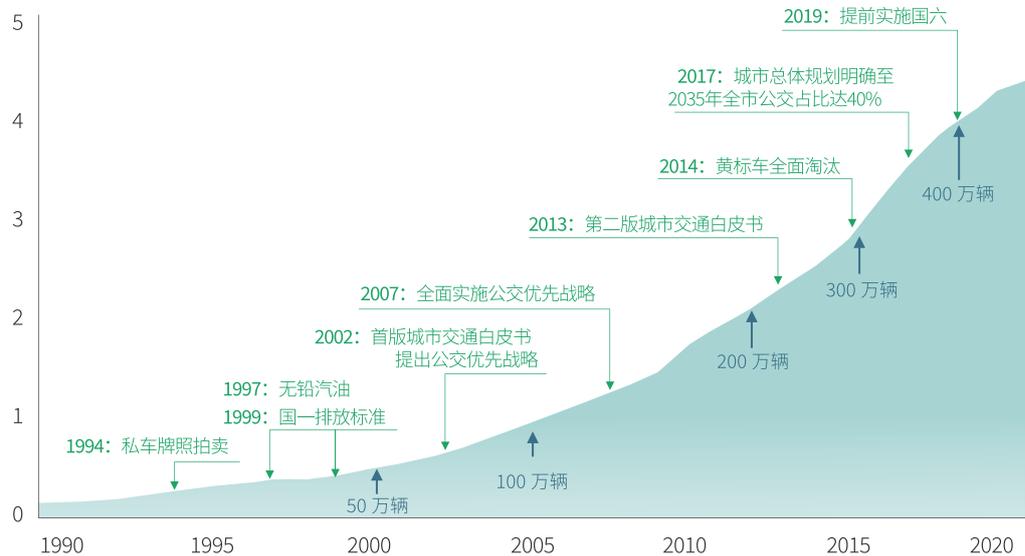


图4.2 | 上海市机动车发展及交通环境政策关键节点

1 上海市公共交通发展历程

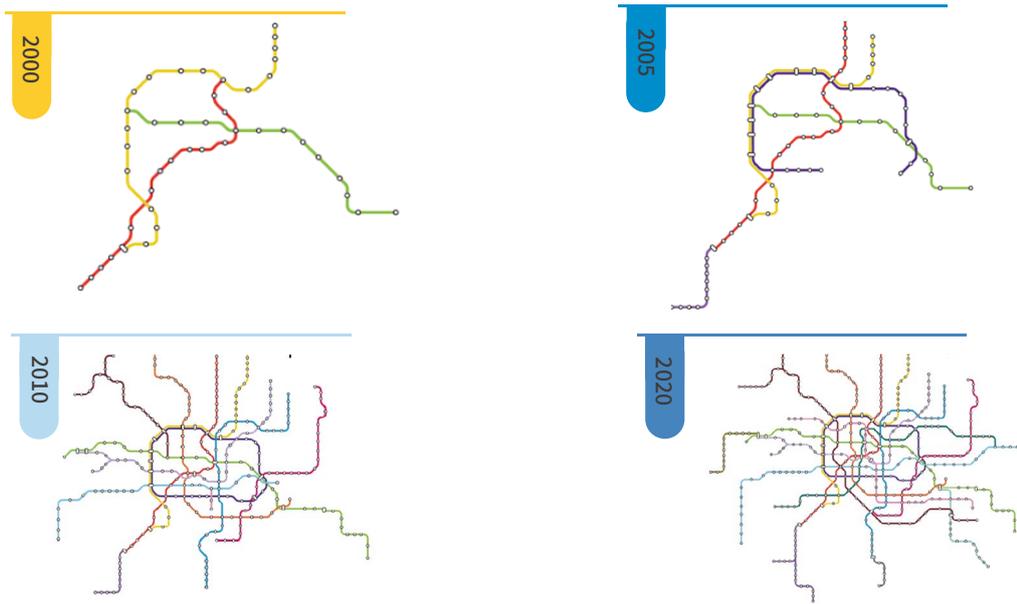
1. 公共交通优先发展战略政策历程

自上世纪90年代中期实施机动车总量控制政策以来，为了有效消纳日益增长的出行需求，上海确立了优先发展公共交通的总体战略。2002年6月，上海在全国率先颁布了《上海市城市交通白皮书》，明确提出“公共交通为主、个体交通为辅”的发展方向，并通过优先保证公共交通资金投入、用地、运营等政策措施，持续建设“以轨道交通为骨干、公共汽（电）车为基础、慢行交通为延伸”的公共交通综合体系。2007年，上海正式提出全面实施公共交通优先发展战略，并启动了公共交通优先三年行动计划，继续加快推进轨道交通、公交专用道等基础设施建设，同时优化公交线路、实施优惠换乘，使市民出行条件明显改善，特别是轨道交通运营里程快速增加，公共交通出行比重逐年提高。2013年，上海发布了新一轮《上海市交通发展白皮书》，进一步在规划、投资、建设、运行、服务等各环节充分体现公交优先。在不断强化轨道交通骨干作用的同时，加快提升公共汽（电）车服务水平，并加强与各类交通方式的衔接，持续完善和提升公共交通的出行体验。同时，在继续严格控制机动车总量的前提下，通过差异化停车收费等手段对车辆使用进行调控和引导，引导个人机动出行向公共交通转移。2017年，上海在《城市总体规划（2017-2035年）》中明确：至2035年，形成城际线、市区线、局域线“三个1000公里”的轨道交通网络，完善“最后一公里”公交线网，全市公共交通出行比重计划达到40%左右。

2. 轨道交通建设发展历程

上海是中国轨道交通建设起步最早的城市之一。1993 年，全市第一条地铁线路正式建成通车，实现了从无到有的飞跃。在公共交通优先政策引领下，持续加大轨道交通建设投入。据统计，每年有近六成的新增汽车额度拍卖收入用于轨道交通建设。2003 年，全市轨道交通运营里程达 109 公里，超越北京成为全国第一。此后在全面实施公交优先发展战略的推动下，上海轨道交通运营里程以每年 15% 的速度飞速增长，实现了从点到线、从线到面的发展。2010 年，上海轨道交通运营里程达到 453 公里，超过伦敦（408 公里）跃居全球第一。至 2020 年末，上海轨道交通运营里程增至 729 公里，较 2000 年增加了 10 倍（见图 4.3）。

▼ 轨道交通发展



▼ 轨道交通运营里程（公里）

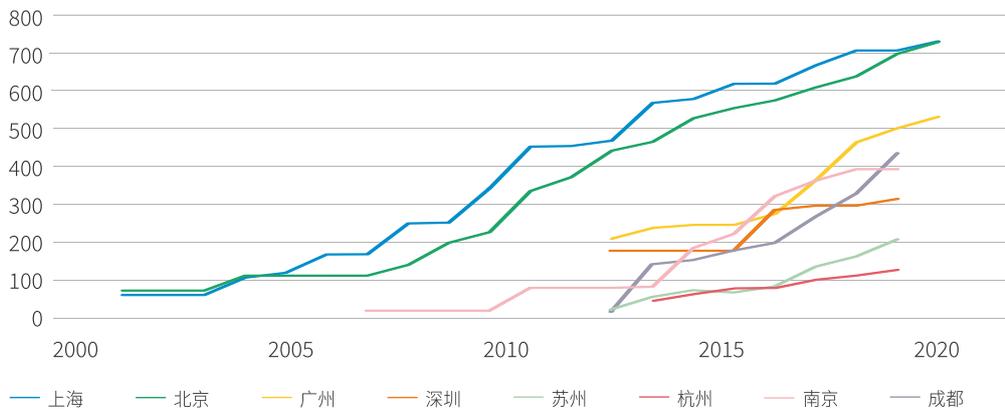


图4.3 | 上海与中国主要城市轨道交通运营里程比较

3. 公共汽（电）车发展历程

仅依靠发达的轨道交通，并不足以支撑城市交通高效、稳定运行，必须打通轨交和公交“两张网”，这也是上海创建“公交都市”的特色之一。2000年初以来，上海重点结合轨道交通发展、商品房基地开发、城乡一体化建设等，对公交线网进行了大规划优化调整。一方面结合轨道交通网络规划，依托公共汽（电）车客流走廊，形成公共汽（电）车骨干线网。另一方面，以居住区为重点，合理布设连接轨道交通站点、公交枢纽等公共交通设施的驳运线网。同时，大力推进公交优先专用道建设，提高公交优先专用道运行效率，确保拥挤路段高峰运行车速高于相邻车道社会车辆。2005~2020年间，上海公共汽（电）车线网长度快速增加，至2020年末，全市公共汽（电）车运营线网长度已达9116公里，较2005年上升90%（见表4.1）。公交专用道总长达到500公里，中心城区线网密度达到3.3公里/平方公里，中心城区公交站点300米半径全覆盖，城郊及新城500米半径全覆盖，很好地起到了公共汽（电）车对轨道交通网络的基础支撑作用。

表4.1 | 上海市公共汽（电）车发展情况（2005-2020）

	单位	2005	2010	2015	2020
车辆数	辆	17985	17455	16531	17667
运营线路长度	km	21795	23130	24027	24945
线网长度	km	4778	7053	8243	9116
其中：公交专用道	km	20	162	312	508
线网密度	km/km ²	0.8	1.1	1.3	1.4
其中：中心城区	km/km ²	3.1	3.1	3.2	3.3

2 公共交通优先战略实施效果评估

2000年以来，上海通过实施公共交通优先战略，在全市交通出行量快速上升的情况下，公共交通出行比例仍能保持显著提升，城市交通出行结构得到了明显优化。2020年，上海日均机动出行量达到2516万人次，分别较2000年和2010年上升133%和15%（见图4.4）。机动出行中，公共交通出行占比从2000年的43%提升至47%，其中，轨道交通出行占比增幅最为明显，由2000年的2%增加至2020年的34%，取代公共汽（电）车，成为公共交通出行的主力。

▼ 日均出行量(万人/天)

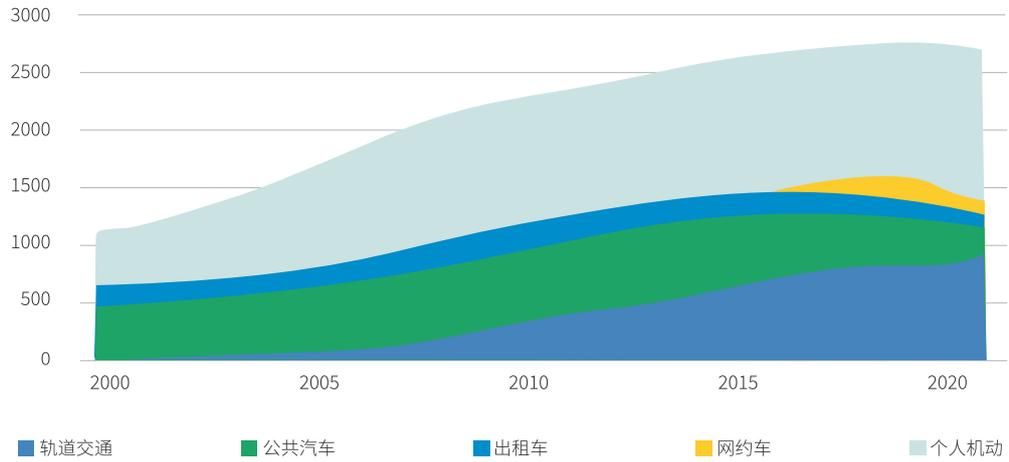


图 4.4 | 上海历年出行量及出行方式构成变化

在公共交通出行得到有效保障的前提下，上海私人汽车出行的快速增长势头得到了有效遏制。2020 年，上海千人汽车保有量控制在 180 辆左右，与新加坡接近，为国内类似人均 GDP 大城市的最低水平（见图 4.5）。除保有量外，公共交通的快速发展有效保障了居民的出行需求，使单车使用频率和行驶里程也得到了有效控制。2000~2020 年间，上海轨道交通客流量增长近 26.5 倍，同期个人机动车出行增幅仅为 2.6 倍。如图 4.6 所示，2000~2020 年间，上海机动车周转量实际增长约 2.5 倍，而在轨交和公交密度最高的中心城区（即内环内），机动车周转量自 2010 年起已基本保持稳定。

▼ 千人汽车保有量(辆/千人)

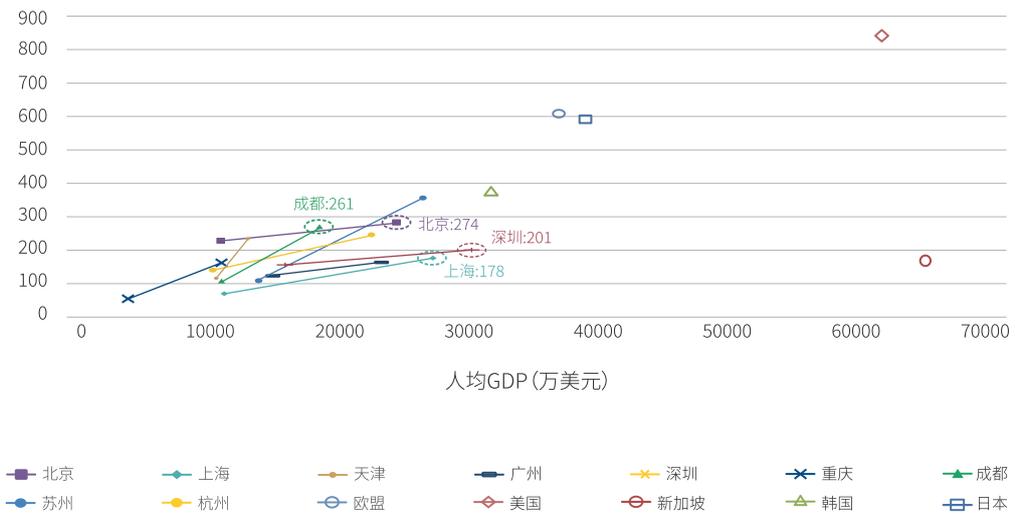
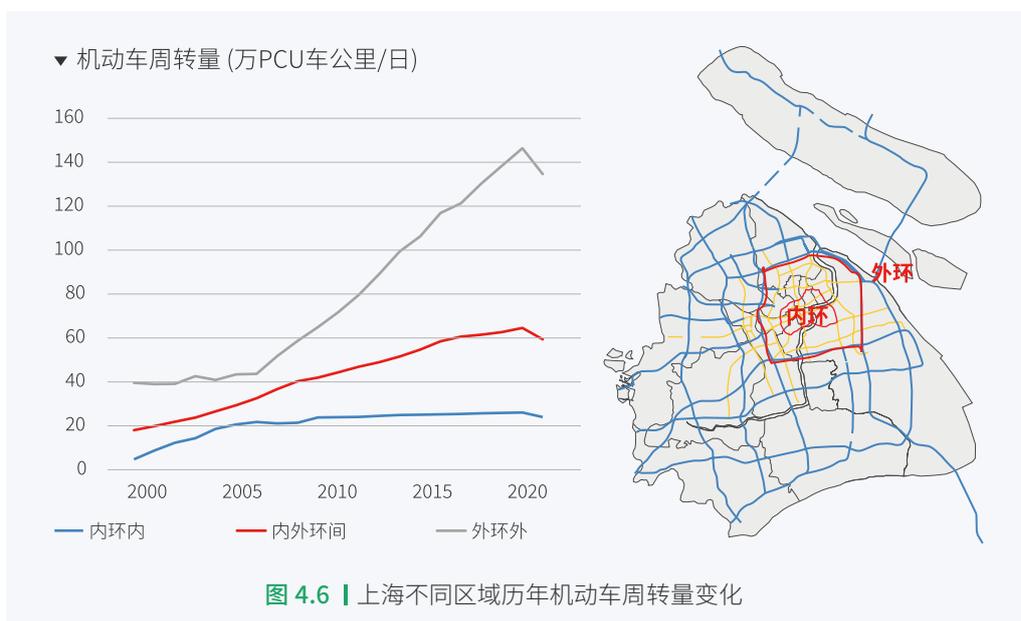


图4.5 | 各地人均GDP与千人汽车保有量比较



通过实施公共交通优先战略，上海机动车保有量增速得到了明显遏制，从源头上缓解了城市交通能源和环境压力。上海环境科学研究院为评估交通结构调整产生的节能和减排效果，分别选取中国大城市机动车平均增速（如成都等城市）和较快增速（如苏州等城市）设置为增长情景 1 和增长情景 2，与上海的公共交通优先模式（上海模式）进行了比较（见图 4.7）。相比于其他两种增长模式，上海模式的轨道交通发展速度明显较高。如图 4.7 (a) 所示，2020 年上海轨道交通客流量分别是“平均增速”和“较快增速”两种模式的 3 倍和 12 倍。若按上述两种增长模式发展，2020 年上海机动车保有量预计将分别达到 880 万辆和 1157 万辆，分别是目前水平的 2.0 倍和 2.6 倍（见图 4.7 (b)）。

由于个体机动交通的快速增长，上述两种增长模式下，上海城市交通能耗和 CO₂ 排放也将大幅增加。2020 年，上海城市交通能耗总量和 CO₂ 排放分别为 771 万吨标煤和 2316 万吨，可明显看出个体机动交通是能耗和 CO₂ 排放增长的主体。如图 4.7 (c) 和 (d) 所示，增长模式 1 和增长模式 2 情景下，交通能耗和 CO₂ 排放将在现有上海模式基础上进一步大幅增加。例如，2020 年两种模式的 CO₂ 排放分别比上海当前水平增加 32% 和 39%。

与之相应地，个体机动交通总量的有效控制使上海机动车主要污染物排放也得到大幅削减。如图 4.7 (e) 和 (f) 所示，通过实施“公共交通优先战略”及“车-油-路”一体化的综合控制，上海机动车 NO_x 和 VOCs 排放自 2008 年前后开始呈现明显的下降趋势。若未采取“公共交通优先战略”，即在增长模式 1 和增长模式 2 情景下，上海机动车排放将在现有基础上大幅增加。2020 年，两种模式下全市机动车 NO_x 排放将分别增加 21% 和 26%，VOCs 排放将分别增加 30% 和 38%。

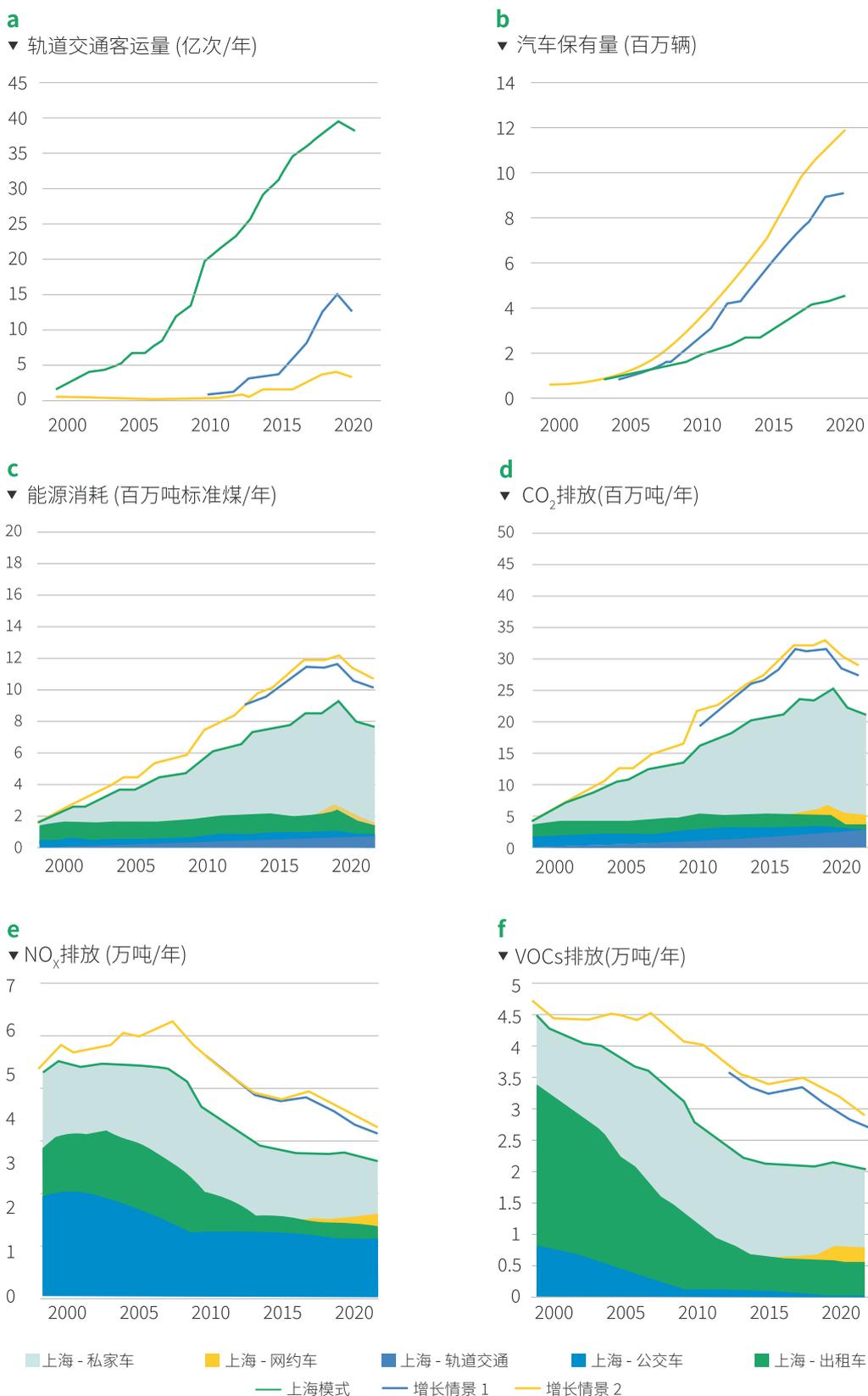
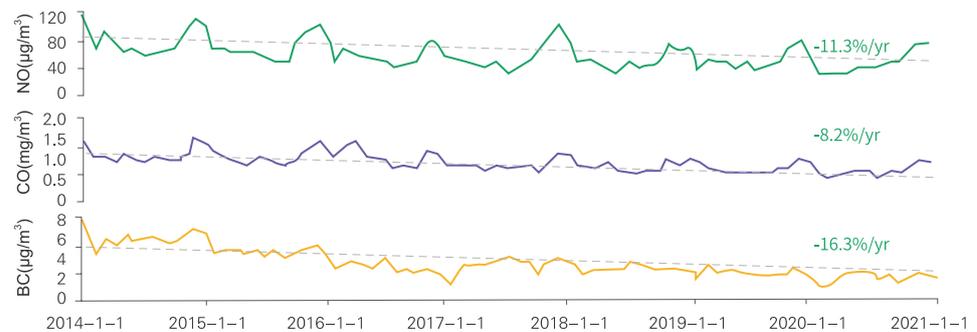
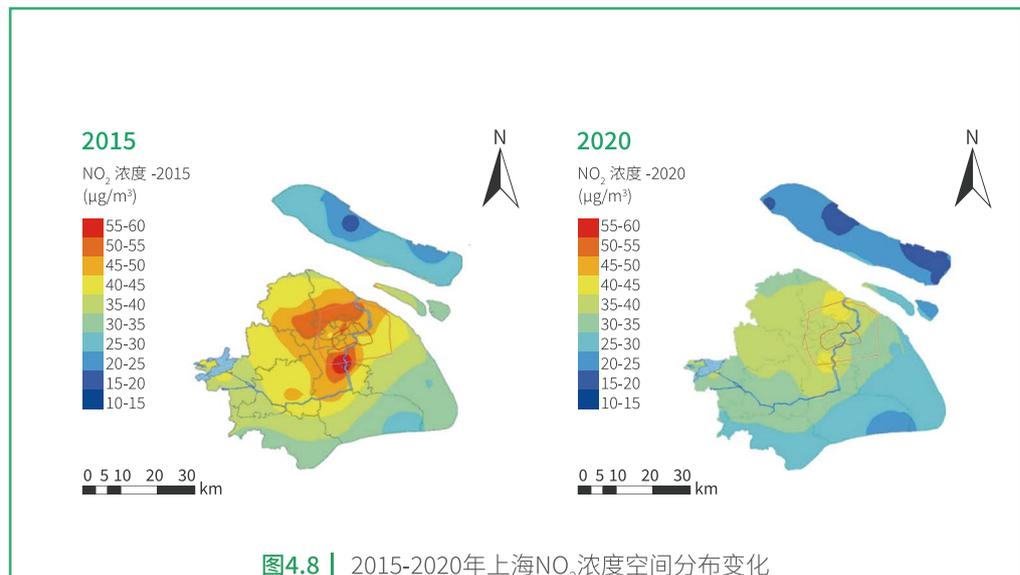


图4.7 | 不同发展模式下上海机动车保有量、能耗和排放变化

在“公共交通优先战略”及“车-油-路”一体化综合控制的共同推动下，上海 NO_2 浓度呈显著下降趋势，其中中心城区改善尤为显著（图 4.8）。2015~2020 年间，中心城区 NO_2 浓度降幅达到 18%，且高值区面积明显缩小。城市交通站观测结果也表明，上海中心城区与机动车排放密切相关的 NO 、 CO 和 BC 等污染物浓度大幅降低，分别由 2014 年的 $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.1 \text{mg}/\text{m}^3$ 和 $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 2020 年的 $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.7 \text{mg}/\text{m}^3$ 和 $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，降幅分别达到 52%、36% 和 66%（图 4.9），充分体现了上海城市交通环境改善的成效。



20 余年的坚守，上海成功探索出了一条将公共交通优先战略与传统机动车排放综合控制相结合的绿色低碳交通发展路径。在机动车污染物排放得到有效控制的同时，城市交通能源消耗和 CO₂ 排放增长趋势也得到了明显遏制，居民出行服务水平和交通拥堵也同步得到改善，这些经验可以为其他城市的交通污染治理提供重要的启示。





图片来源:Pixabay

4.2

车用能源多样化尝试

交通领域庞大的能源消费体量促使上海较早开始探索车用能源多样化路径。2000 年以来，先后在出租和公交等领域推广使用液化石油气（Liquefied Petroleum Gas, LPG）和天然气（Natural Gas, NG）等替代燃料。上海也是中国新能源汽车推广力度最大的城市之一。2013 年以来，上海新能源汽车保有量以每年 70% 的速度快速增长，2020 年全市新能源汽车总量已达 42.4 万辆，居全球首位。与此同时，为妥善解决餐厨废弃油脂（俗称“地沟油”）回流餐桌导致的食品安全问题，上海通过建立“收、运、储、调、用”全产业链闭环治理模式，在公交和货车等重型车辆上进行了车用餐厨废弃油脂制生物柴油的规模化应用，为城市车用能源多样化提供了有益的经验借鉴。

1 生物柴油基本情况介绍

生物柴油 (Bio-Diesel, BD) 通常指脂肪酸甲酯 (Fat Acid Methyl Esters, FAME)，是由各种动植物油脂和甲醇通过酯交换反应制得。一般将生物柴油体积比为 X% 的生物柴油调和油简称为 BX，例如 5% 的生物柴油和 95% 的普通车用柴油的掺混调和油称为 B5。

生物柴油及其混合燃料可以广泛应用于各种柴油机驱动的车辆和机械。生物柴油制备的原料来源一般包括植物油脂 (菜籽油、大豆油、棕榈油)、动物油脂和各类废弃油脂。目前，生物柴油在欧洲、美国和日本等国家和地区已得到不同程度的应用。



图4.10 | 生物柴油

2 上海生物柴油推广应用历程

“地沟油”是重要的环境污染源之一，其不当处置及重复利用既是重大环境和食品安全问题，也是重大民生问题。据统计，上海每年产生的“地沟油”约3万多吨，缺乏有效监管极易导致“地沟油”流入非正规渠道，增加回流餐桌的风险。

2012年，上海制定颁布了国内第一部专门针对餐厨废弃油脂管理的地方政府规章《上海市餐厨废弃油脂处理管理办法》，逐步规范餐厨废弃油脂的专业收运、中转及初加工队伍，积极推行餐厨废弃油脂收运特许经营制度，鼓励收、运、处一体化经营。2018年，上海再度出台《支持餐厨废弃油脂制生物柴油推广应用暂行办法》，规定餐厨废弃油脂从收运、处置以及在加油站推广应用等各个环节，按照“闭环管理、市场化运作、支持应用”的原则，形成餐厨废弃油脂资源化全产业链闭环管理、价格联动、托底保障、产品顺畅应用的体系 (图4.12)。此外，还明确规定产生餐厨废弃油脂的企业应当设置专门的餐厨废弃油脂收集容器，将收集



图4.11 | “地沟油”的来源和流通

的餐厨废弃油脂交收运企业。收运企业将其加工成含油率不低于 95% 的原料油后，交处置企业，以此形成收集、运输、处置环节的闭环。目前，上海约有 3.9 万家餐饮、食品加工等企业产出废弃油脂，有 18 家收运企业，约 300 辆收运车辆，每天对全市餐饮企业的废弃油脂进行定点定时回收。同时，为了加强餐厨废弃油脂收运过程监管，上海还开发了餐厨废弃油脂在线管理系统，并在每家收运单位处置现场安装了终端视频监控，实现全过程信息化监管。据统计，上海每天餐厨废弃油脂收集量已由 2011 年的 20 余吨，攀升至目前的 200 余吨，每年可制成 B100 生物柴油 5 万余吨，实现了本地地沟油应收尽收的目标。

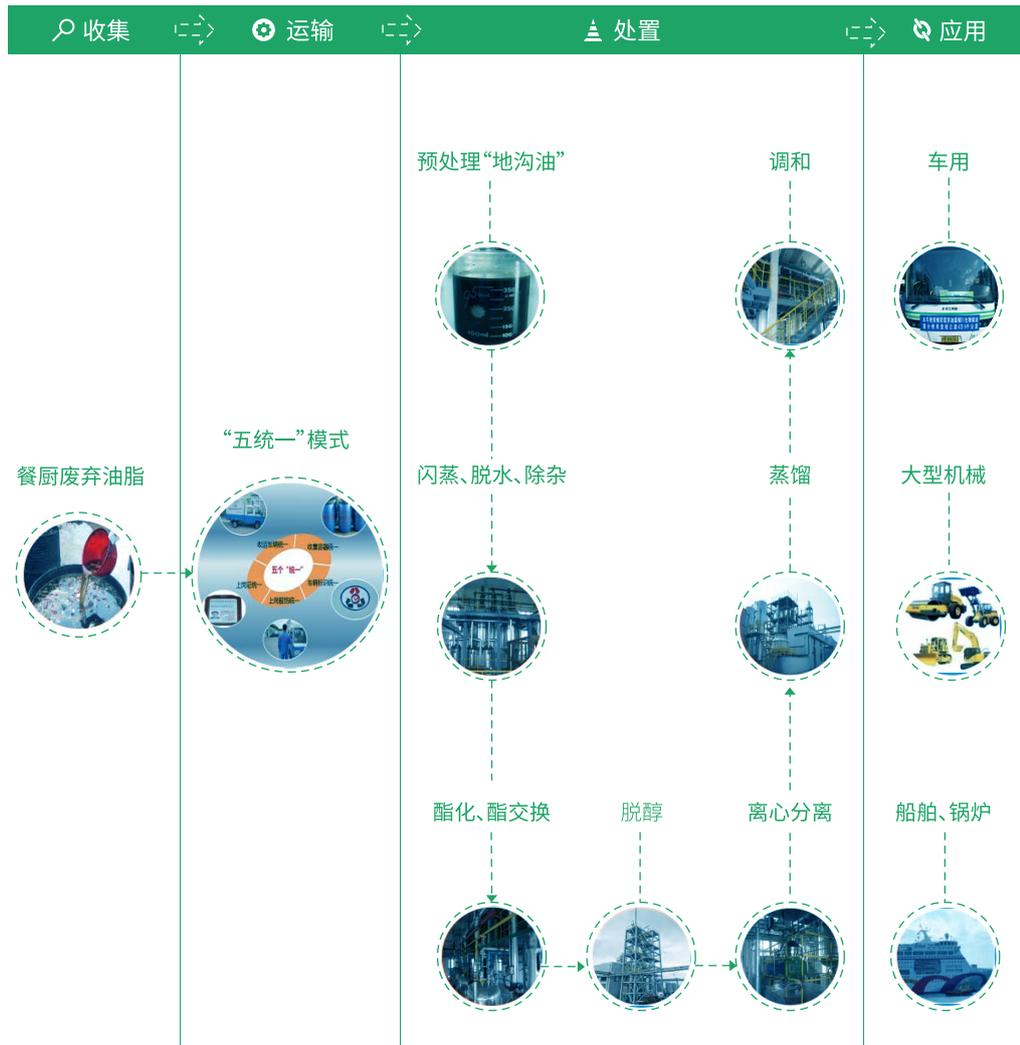


图4.12 | 上海“地沟油”全产业链闭环治理体系

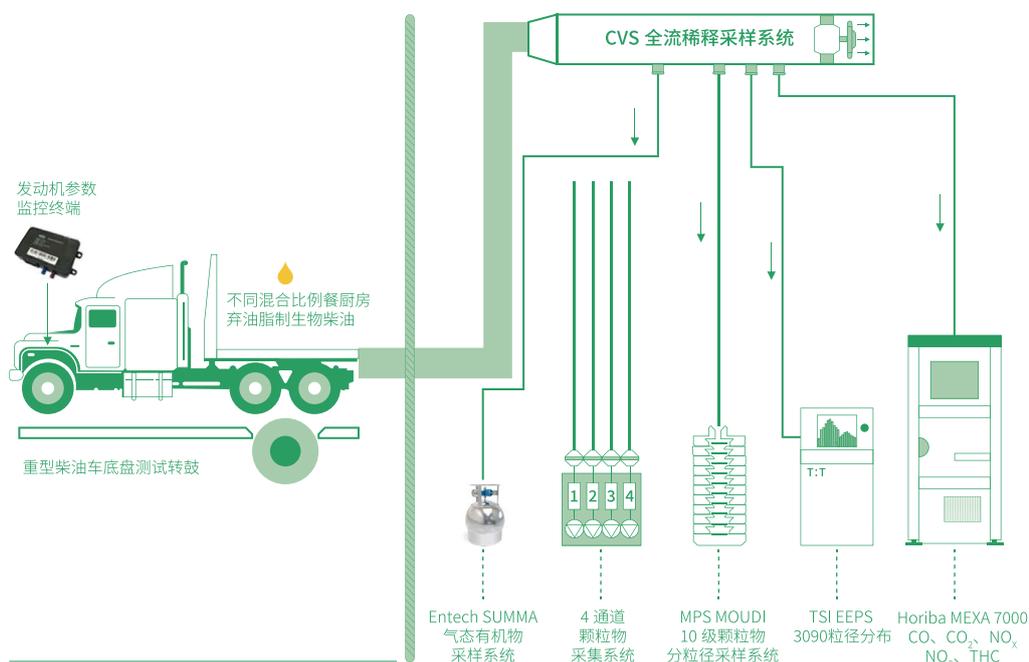
为了加快推进餐厨废弃油脂制生物柴油的应用，上海于 2012 年首先启动了车用餐厨废弃油脂制生物柴油示范应用的科技攻关，在 20 辆公交车上开展使用生物柴油稳定性和可靠性的长期跟踪试验，燃料混合比例包括 B5 和 B10。结果表明，使用两种比例的生物柴油，试验车辆发动机关键零部件表面均未发现积碳，也未出现与油路相关的故障，同时对一次颗粒物、CO 和 THC 也具有较好的改善效果，这些研究成果为生物柴油的规模化推广应用提供了有力的依据。鉴于 B5 柴油的稳定性和可靠性更高，且国家已修订了《B5 柴油》(GB 25199-2017) 标准，2018 年起，上海开始在社会加油站推广使用 B5 生物柴油。截至目前，中石油和中石化已将 B5 柴油全面纳入其社会加油站供油体系，在全市约 300 座加油站常态化供应（图 4.13）。在此期间，为了解决由于收运和处置成本较高导致的生物柴油调制销售企业长期成本倒挂的窘境，上海参照发达国家经验，制定了应急托底保障机制，鼓励 B5 柴油调制销售企业优惠促销，对优惠部分由财政适当予以补贴，有效保障了 B5 柴油的市场化供应。2020 年 6 月以来，上海每日为 2 万多辆柴油车加注 B5 柴油约 172 万升，日均消纳餐厨废弃油脂制生物柴油约 70 吨。另一方面，上海继续在公交车、货运车、船舶和工业锅炉等领域开展长期使用 B10 柴油可靠性及减排效果的研究，以期在未来进一步扩大餐厨废弃油脂制生物柴油的应用范围。



图4.13 | 上海餐厨废弃油脂制生物柴油的推广应用

3 生物柴油示范应用的减排效果分析

为了评估生物柴油在移动源上应用的环境效益，上海对公交车、环卫车和货车等主要重型柴油车燃用不同混合比例餐厨废弃油脂制生物柴油的排放特性进行了系统测试。图 4.14 展示了货运车燃用生物柴油的排放测试示意图。共选取不同类型柴油车 10 辆，其中国三车 1 辆、国四车 3 辆、国五车 6 辆，燃用的纯柴油为达到国 6 标准的市售柴油。为评估不同混合比例生物柴油对排放影响的差异，分别选取了 B0 纯柴油以及 B10、B20 和 B50 三种混合比例柴油开展排放测试。



序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
车型	公交车	公交车	公交车	环卫车	环卫车	货运车	货运车	货运车	货运车	货运车
排放等级	国三	国四	国五	国五	国五	国四	国五	国五	国四	国五
B0	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
B10	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
B20			√	√	√	√	√	√	√	√
B50						√	√	√	√	√

图4.14 | 重型车燃用不同比例的生物柴油混合燃料排放测试示意图

图 4.15 所示为货车燃用不同混合比例生物柴油的常规污染物、CO₂ 排放和油耗测试结果。与 B0 相比，燃用 B10、B20 和 B50 柴油可使 CO 排放分别下降 8%、20% 和 26%，使 THC 排放分别下降 32%、50% 和 60%，使 PM 排放分别下降 17%、34% 和 52%。NO_x 排放则有所上升，燃用 B10、B20 和 B50 柴油的 NO_x 排放因子分别较 B0 增加 3%、6% 和 9%，这主要是由于生物柴油含氧，较石化柴油燃烧温度、压力较高，有利于 NO_x 生成。相对而言，燃用餐厨废弃油脂制生物柴油对油耗以及直接燃烧排放的 CO₂ 无明显影响。

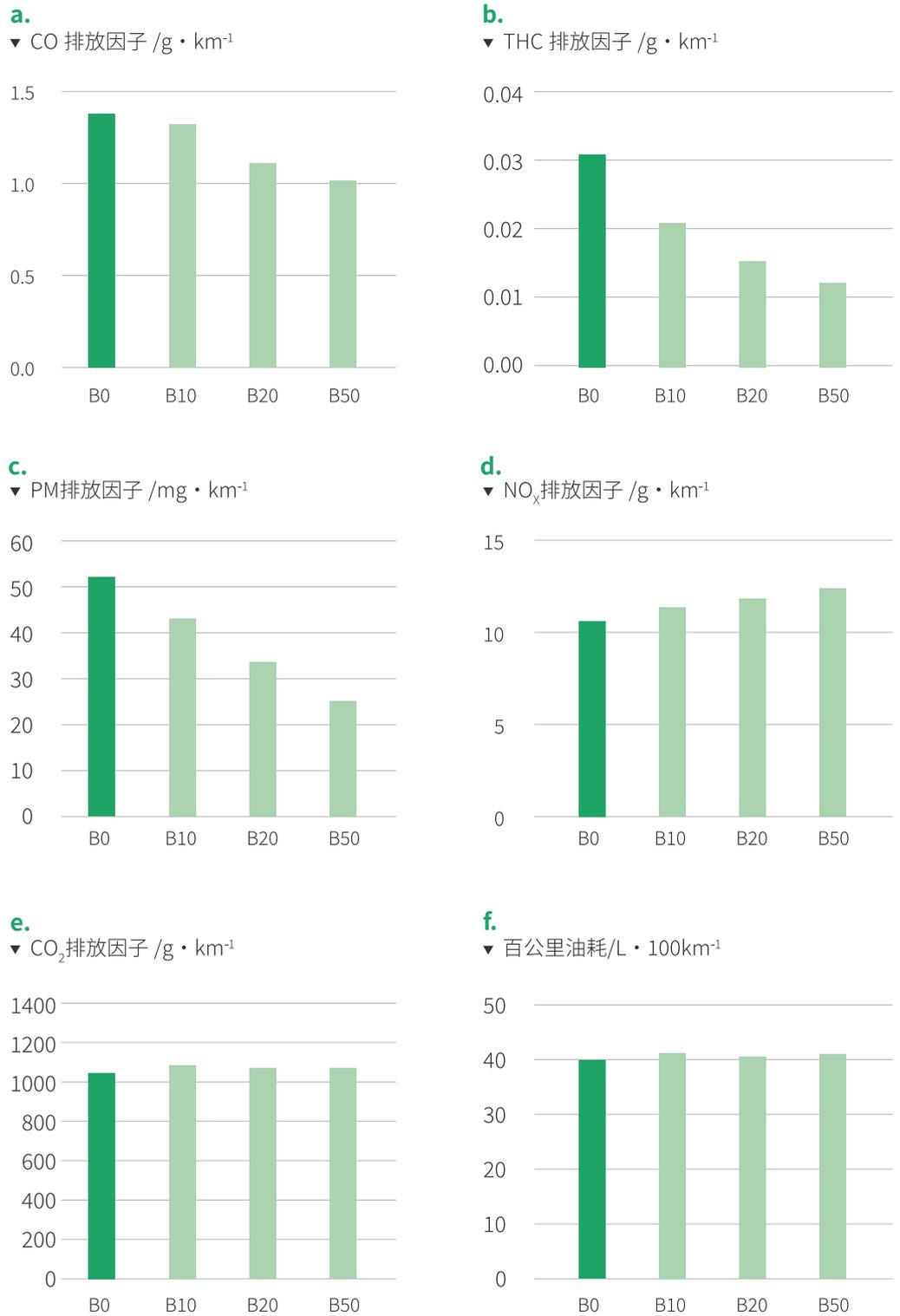


图4.15 | 货车燃用不同混合比例生物柴油的减排效果

上述结果与国外已有研究成果接近，即燃用生物柴油可降低 CO、HC 和 PM 等不完全或未完全燃烧产物排放，且随混合比例增加，下降幅度越大，但是 NO_x 排放也会随混合比例增加而上升（见图 4.16）。应当指出的是，燃用生物柴油对 NO_x 排放的影响，不同的研究结果之间还存在一定的争议。例如，有台架、车载排放研究指出当发动机、整车负荷较低时 NO_x 会有轻微降低；随着排放标准升级柴油机、SCR 系统控制精度不断提升，生物柴油导致的 NO_x 升高可以通过动态调整柴油机喷油提前角和 SCR 尿素喷射量解决。

生物柴油由于含有大量不同类型的脂肪酸甲酯等含氧组分，其燃烧可能导致含氧有机物等非常规组分增加，因此其非常规污染物排放也备受关注，这些污染物会对二次污染和人体健康产生不利影响。图 4.17 所示为货车燃用不同混合比例生物柴油的非常规污染物排放特征。结果表明，燃用生物柴油后 VOCs 排放变化没有显著规律，但组分构成发生较大变化，烷烃、烯烃、炔烃等柴油主要物种随混合比例提升逐渐下降，芳香烃以及醛、酮、酯等含氧有机物略有上升。这可能是含氧有机物由带有羟基、羧基的生物柴油分子断裂后形成的。燃用生物柴油后苯并芘当量毒性（BaP_{eq}）随着生物柴油混合比例的上升总体有所下降，但是萘烯、萘、芴、菲、蒽等二环、三环等低环 PAHs 组分有所上升，类似结论国内外也有相关报道。

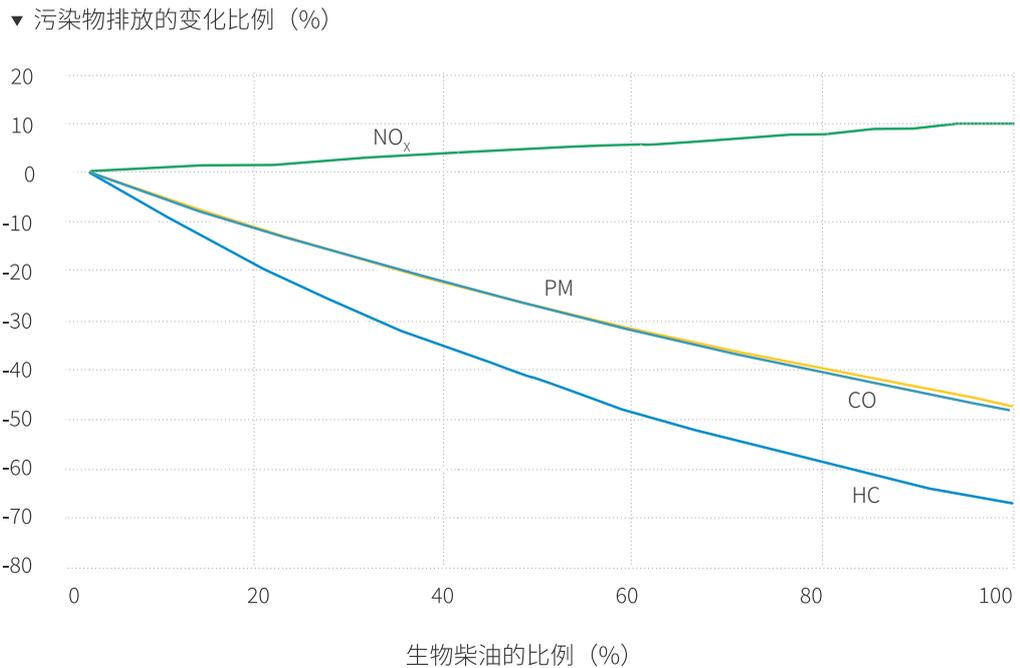
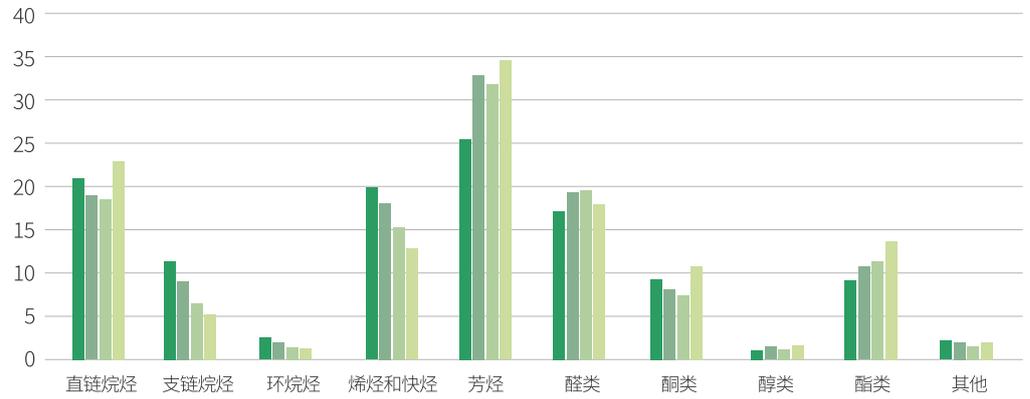


图4.16 | 美国环保署实测的不同混合比例生物柴油减排效果
(U.S. EPA, A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions, 2002)

▼ VOCs组分排放因子 / $\mu\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$



▼ BaP eq/ $\mu\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$

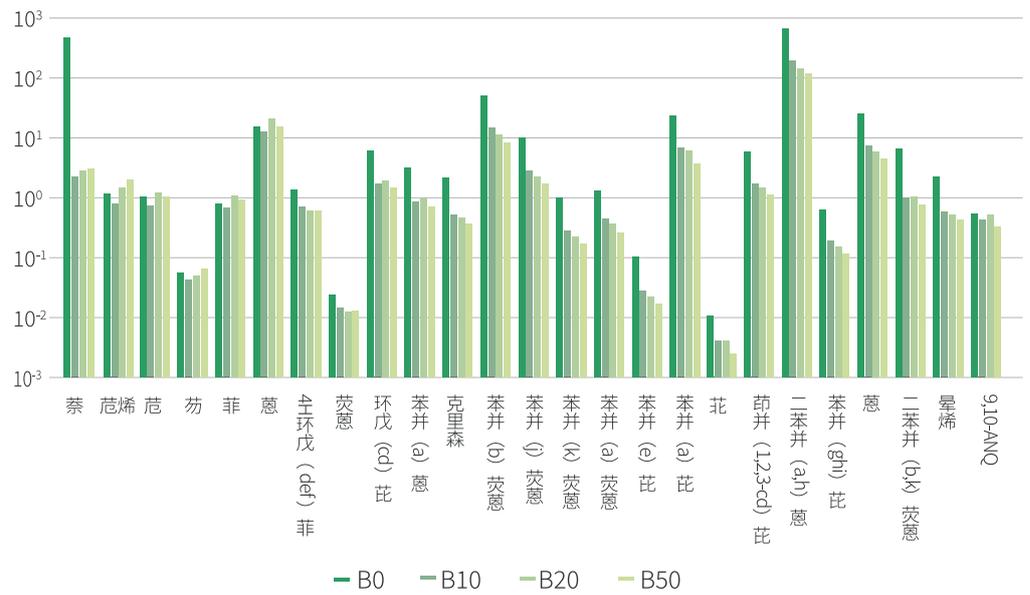


图4.17 | 货车燃用不同混合比例生物柴油的非常规污染物排放比较

本研究涉及的生物柴油其原料来自废弃的地沟油，因此具有较高的全生命周期 CO_2 减排效益。表 4.2 列举了餐厨废弃油脂制生物柴油各环节 CO_2 排放水平与植物油制生物柴油和纯柴油的比较。从原料生产过程来看，植物制生物柴油原料生产过程中占用耕地、化肥使用会产生 CO_2 。从燃料生产过程看，石化柴油生产需要将原油蒸馏、重整裂化，会产生 CO_2 。各类生物柴油生产需要甲醇、硫酸、氢氧化钾等原料，均会产生 CO_2 。综合来看，与石化柴油和植物制生物柴油相比，餐厨废弃油脂制生物柴油全生命周期 CO_2 排放更低，具有明显的减排优势。

表4.2 | 不同类型生物柴油与纯柴油全生命周期CO₂排放比较

项目		植物油制生物柴油	餐厨废弃油脂制生物柴油	纯柴油
		单位质量燃料 CO ₂ 排放因子 (kgCO ₂ /kg 燃料)		
原料生产	石油运输、炼制	-	-	0.63
	土地占用 / 化肥 / 植物 N ₂ O 排放	2.5	-	-
	光合作用 CO ₂ 吸收	-3.2	-3.2	-
生物柴油生产	油水分离(电)	0.010	0.010	-
	运输(产地~生产厂,柴油)	0.023	0.023	-
	酯化(电、煤、CH ₃ O、H ₂ SO ₄ 、KOH)	0.41	0.41	-
	运输(生产厂~加油站)	0.01	0.01	0.01
消费		3.3	3.3	3.2
合计		2.3	0.3	3.7

经过 10 余年发展，上海已在餐厨废弃油脂制生物柴油推广应用方面形成了科研引领、政府推动、企业运作、社会共治共享格局，在根本解决“地沟油”回流餐桌等食品安全问题的同时，取得了良好的环境效益。按照上海每年可制备约 5 万吨 B100 生物柴油计算，可替代约 0.8% 的交通领域柴油消费，并减少 CO、HC 和 PM 排放 250~300 吨、300~500 吨和 50~60 吨，此外，每年还可产生约 7.3 万吨的全生命周期 CO₂ 减排效益。





图片来源:Pixabay

05

5.1 深圳新能源汽车发展历程	112
5.2 新能源汽车推广的政策及配套体系建设	119
5.3 新能源汽车推广效益评估	130

深圳

推进新能源汽车的先锋城市



大力推进新能源汽车战略，降低车用化石能源消耗、减少来自交通领域的温室气体和大气污染物排放，是应对能源危机、气候变化和环境问题的关键举措。作为首批“十城千辆”示范城市之一，深圳一直积极推动车队的电动化，制定和实施了极具本地特色的新能源汽车推广政策，出台新能源汽车直接相关的政策文件 30 余项，建立了较为完备的配套服务和支撑保障体系，多举措扶持新能源汽车产业发展，取得了令人瞩目的推广成果。

深圳截至 2020 年，已累积推广新能源汽车近 40 万辆（图 5.1），连续六年被国际清洁交通委员会（International Council on Clean Transportation, ICCT）评为“世界电动汽车之都”。新能源汽车保有量占机动车总保有量的 11%，电动化率在国内大城市中处于领先；新能源汽车推广工作在公交、出租、物流等领域取得突破进展，是全球首个实现了公交和出租车队全面电动化的城市，并连续五年成为全球新能源电动货车保有量最大的城市。与此同时，深圳还构建了完善的配套体系和健全的新能源汽车产业布局，聚集了 2000 多家新能源汽车相关企业，是全球范围内新能源汽车企业最集中的城市之一，形成了龙头企业带动、关键零部件与配套企业互动的良好发展态势。推广新能源汽车不仅成为深圳打造“深圳蓝”（图 5.2）、践行“绿色低碳”理念的主要举措，也是深圳构建清洁高效的现代能源体系和产业绿色低碳转型的关键抓手，有力支撑了深圳成为新能源汽车推广的全球先锋城市。

图 5.2 | “深圳蓝”

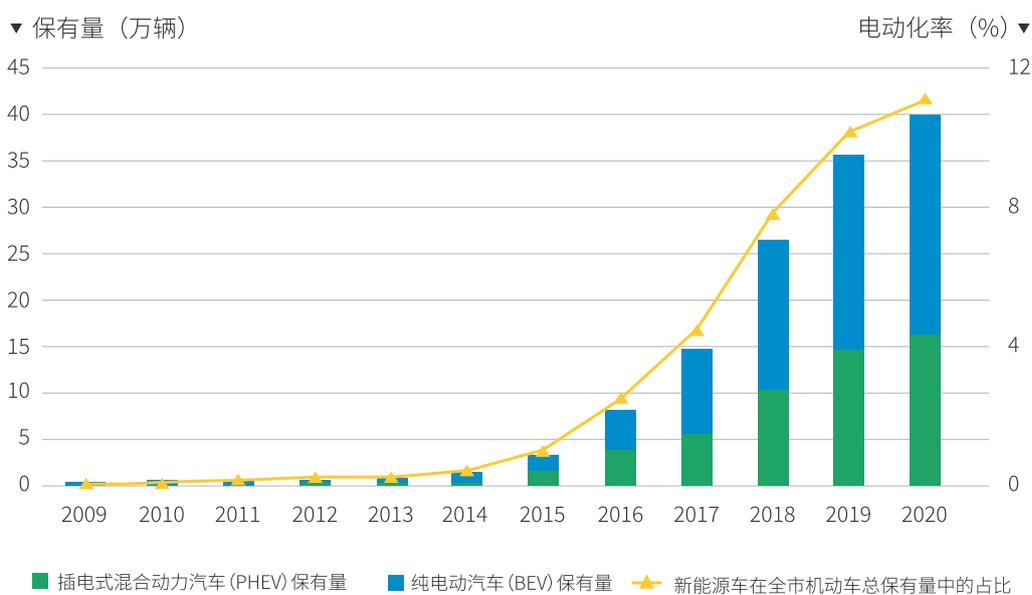


图 5.1 | 深圳新能源汽车保有量及电动化率增长趋势 (2009-2020)

5.1

深圳新能源汽车发展历程

从 2009 年入选首批“十城千辆”示范城市开始，深圳市政府积极制订了各项政策推广新能源汽车，共出台新能源汽车直接相关政策文件 30 余项，覆盖发展规划、财政补贴、基础设施、市场监管、产业准入、技术创新、电池管理、指标调控等多个方面。在多种政策的激励和支持下，深圳的新能源汽车推广工作取得了令人瞩目的成绩，截至 2020 年底，深圳共推广新能源汽车近 40 万辆，已成为全国汽车电动化率最高的城市（图 5.1），公交和出租车队率先实现全面电动化，充电设施的建设水平也处于全国乃至世界前列，展现出令人惊叹的深圳速度。

深圳的新能源汽车推广历程主要可分为三个阶段（见图 5.3）：第一阶段为 2009 至 2012 年，为试点示范阶段；第二阶段为 2013 至 2015 年，为推广应用阶段；第三阶段为 2016 至 2020 年，为规模发展阶段。



图 5.3 | 深圳市新能源汽车主要发展阶段 (2009-2020)

2009 至 2012 年，深圳成为全国首批“十城千辆节能与新能源汽车示范推广应用工程”（简称“十城千辆”）的试点城市之一。为了配合国家科技部、财政部、发改委、工信部等四部委提出的开展节能与新能源汽车示范推广试点工作要求，深圳结合本地实际情况，颁布实施了《深圳市节能与新能源汽车示范推广实施方案（2009-2012）》，计划从公交出租、公务、私家车等三个重点领域开展新能源汽车的示范，并提出了相应的配套设施建设和新能源汽车推广补贴措施。在初期的示范阶段，深圳就非常重视公共运输服务领域的传统汽车新能源化带来的示范推广效应，2011 年借助深圳大运会的契机，与本地企业（五洲龙、比亚迪）紧密合作，顺利的推广示范了数千辆新能源公交和出租车。

2013 至 2015 年，深圳总结前期示范的经验，通过制订相关经济补贴措施，加大政策扶持力度，使该时期示范推广数量位居全国前列。实施多元化运营模式，在私家车领域探索纯电动汽车分时租赁、汽车共享、整车租赁等服务创新；在公共服务领域，探索纯电动公交车、出租车、物流车的融资租赁运营模式创新，推动公共车队的新能源比例快速提升。

以公交车为例，公交企业可结合自身运营特点选择不同商业模式：深圳巴士集团与车企签订整车购买合同，并附带车辆运营期内的维保服务协议，与充电运营商签订充电基础设施服务协议，由充电服务商进行充电桩建设并提供充电服务；深圳东部公交公司和深圳西部公交公司对裸车进行融资租赁购置，对电动车主要部件（电池、驱动机、电控系统和充电设施部分）进行经营租赁，在减少企业一次性投资额的同时，确保电动车后期运营维护质量。

为加快新能源出租车推广，深圳 2015 年印发《深圳市新能源出租车推广应用政策实施细则》，基于燃油出租车企业的考评成绩配比 10~15% 的纯电动出租车指标，并根据燃油车更新为电动车的置换情况额外给予置换数 5~30% 的纯电动出租车指标奖励。配比、奖励的纯电动出租车指标经营年限为 5 年且免收有偿使用费，此外每辆车还能获得 8~13 万元的购置及使用补贴。在资金和指标奖励政策的双重激励下，深圳 2015 年全年推广纯电动出租车超 1500 辆。

与此同时，这一阶段深圳标准先行，逐渐形成了新能源汽车发展的综合标准体系，发布实施了 24 项地方标准及规范文件，建立了电动汽车维护、充电设施建设、运营和电池管理等方面的标准，为新能源汽车示范推广营造了良好的政策标准环境。

2016 年至今，深圳进一步探索推广应用新技术、新模式，相继出台了一系列新的扶持政策，推动了多种车队类别的规模化发展。例如，实现了出租车和公交车车队全面的纯电动化（图 5.5），同时在物流、通勤、环卫等领域也实现了规模化发展，推广规模均位居全国前列。

在配套设施建设方面，严格要求新建建筑按照 30% 比例配建充电桩，既有住宅区和社会公共停车场按照 10% 比例配建充电桩，引导更多社会资本参与充电设施建设，完善了充电设施的网络化建设，这为深圳电动车的快速发展打下了坚实的基础。通过进一步优化新能源汽车的商业运营模式，形成了“政府扶持监管、企业融资运营、技术创新规范”的特色，一方面既发挥政府的方向引导作用，另一方面又引入金融机构实行租赁制，激发市场活力。此外，还鼓励引入电力部门和社会各方的参与，基本实现经济效益的突破。

在此时期，深圳持续完善新能源汽车产业的标准体系建设，建立了运营车辆及动力电池使用阶段的检测认证体系、动力电池的信息管理体系、动力电池梯级利用和再生利用产业体系，为新能源汽车的良性发展提供持续而坚实的保障。



图5.4 | 全球最大的纯电动公交运营企业—深圳巴士集团

经过十余年的积累，深圳新能源汽车推广工作取得了丰硕成果。全市新能源汽车保有量从 2009 年的 530 辆，迅速增加至 2020 年的 39.7 万辆，年均增长率高达 82%，新能源汽车保有量占全市机动车总保有量的 11%，电动化率在国内大城市中处于领先（见表 5.1）。其中，新能源汽车推广工作在公交、出租、物流等多个领域均取得瞩目进展（图 5.5）：2017 年在全球率先实现

公交车 100% 纯电动化；2018 年底实现出租车全面纯电动化，成为全球推广应用纯电动出租车规模最大的城市；连续 5 年成为全球新能源电动货车保有量最大的城市；截至 2020 年底，推广纯电动泥头车 4275 辆，规模位居全球第一。

表 5.1 | 2020 年国内一线特大城市新能源汽车保有量情况

城市	新能源汽车保有量 (万辆)	机动车保有量 (万辆)	电动化率 (%)
北京	41.2	657	6.3
上海	42.4	469	9.0
广州	26.9	308	8.7
深圳	39.7	359	11.1

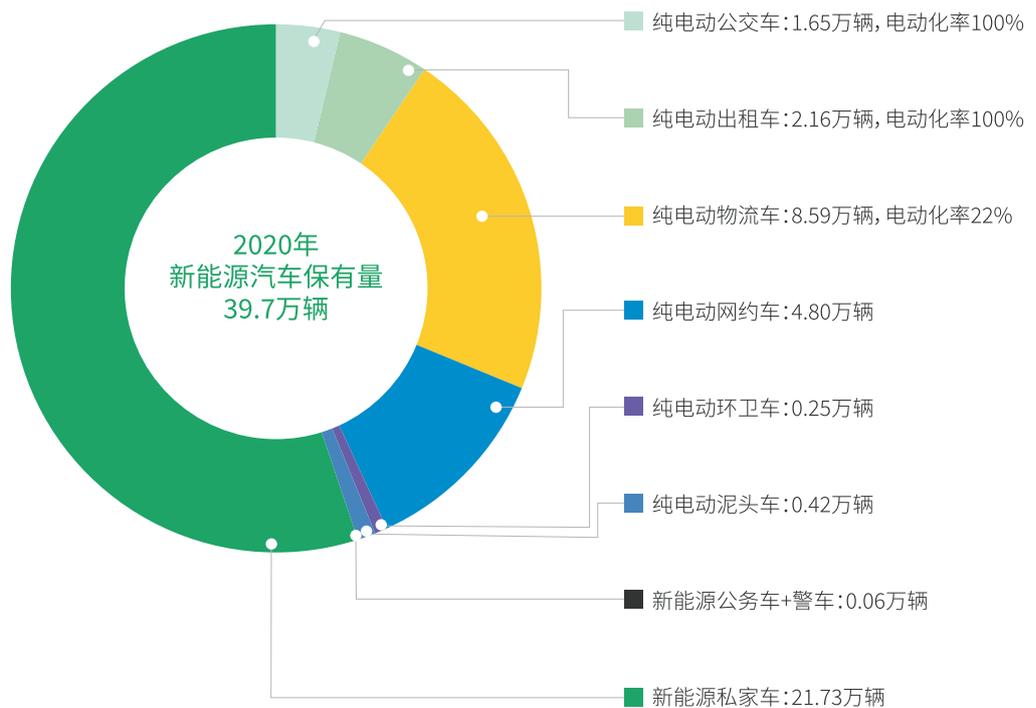


图5.5 | 2020年深圳市新能源汽车构成

专栏 5-1

世界电动汽车之都

城市在加速汽车电动化变革的过程中发挥着关键的引领作用。ICCT 自 2017 年起评选 25 个推广乘用车领先的的城市为“世界电动汽车之都”。2020 年共有来自 9 个国家的城市上榜，其中包括中国 13 个城市、欧洲 8 个城市、美国 3 个城市和韩国首尔（专栏图 5-1）。这 25 个城市仅有世界 4% 的人口，但电动乘用车销量高达全球的 32%。



专栏图5-1 | 2020年世界电动汽车之都榜单

在国家级市场层面，2020年，中国的电动乘用车年销量130万辆，较2019年增长8.7%，占全球总量的41%，连续6年电动乘用车年销量引领全球。排名第2、3、4位的德国、美国、法国的年销量分别为中国的1/3、1/4和1/7。欧洲市场进步突出，2020年电动乘用车年销量合计140万辆，较2019年增长了143%。

▼ 电动乘用车销量（辆）



专栏图5-2 | 2010-2020年全球分市场的电动乘用车年销量

专栏 5-2

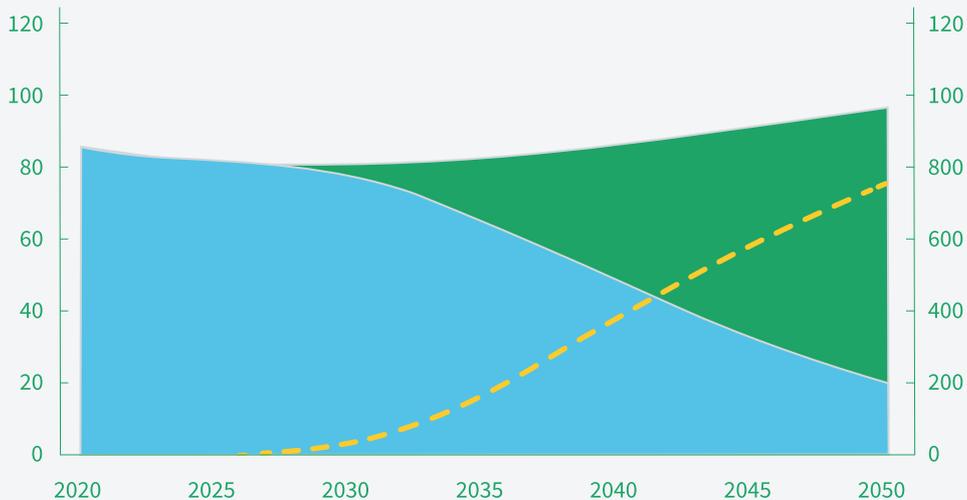
加州零排放货车法规

美国加州空气资源委员会（CARB）自 2016 年起着手研究制定适用于货车领域的零排放汽车（ZEV）法规，经过近四年的调查和研究，于 2020 年 6 月正式通过了《先进清洁卡车法规》。这是全球首个强制性的零排放货车法规。法规要求在加州销售的 Class 2b-8 组别（4.5 吨以上）柴油货车从 2024 年起需满足一定比例的零排放车辆销售比例，至 2045 年所有货车新车全部转型为零排放车，预计到 2050 年，加州重型货车车队将有 80% 为零排放车（专栏图 5-3）。这一法规的出台将显著加速全球货车市场向新能源化、零排放方向转型，具有深远历史意义。

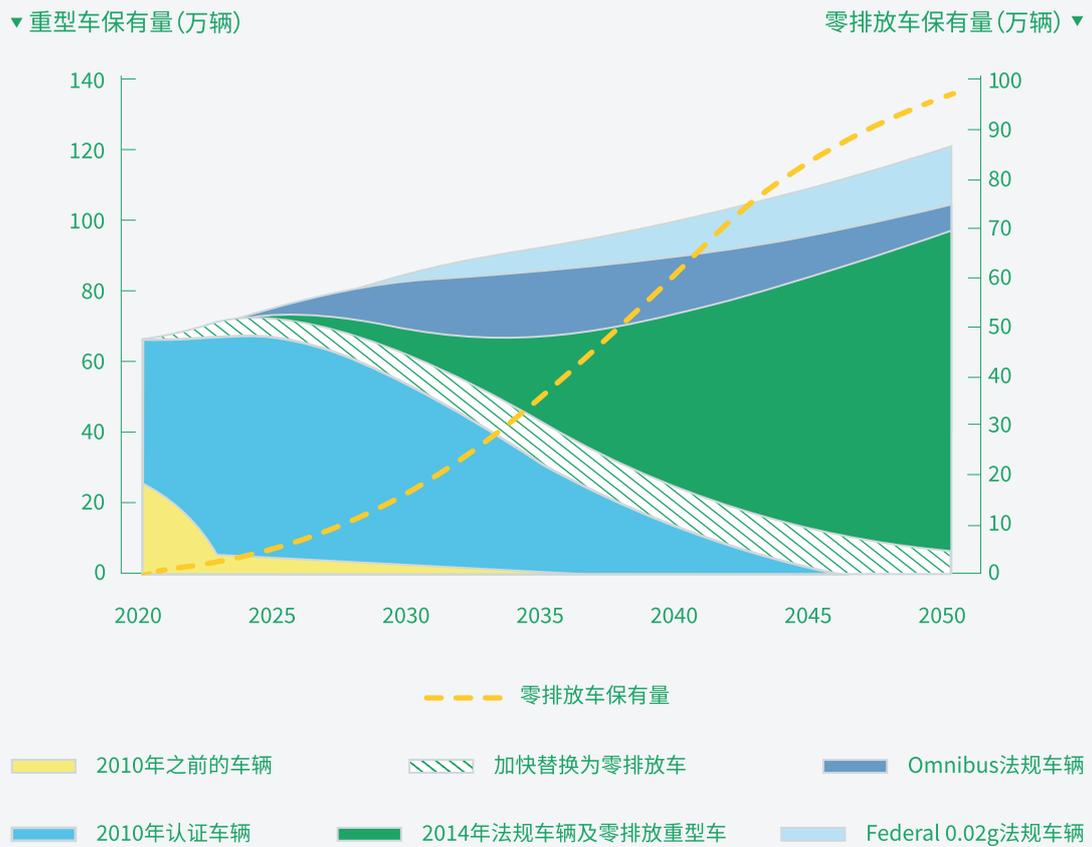
2020-2050年加州中型货车保有量预测

▼ 车队总保有量(万辆)

零排放车保有量(万辆) ▼



2020-2050年加州重型货车保有量预测



专栏图5-3 | 2020-2050年加州中重型货车保有量及零排放车占比预测

5.2

新能源汽车推广的政策及配套体系建设

深圳统筹规划、全面布局，多举措扶持新能源汽车产业发展，充分发挥政府和市场的合力，建立了完备的配套服务和支撑保障体系，积累了宝贵的推广经验。2009 年至 2021 年以来出台的新能源汽车直接相关政策文件超 30 项（见图 5.6），覆盖发展规划、财政补贴、基础设施、市场监管、产业准入、技术创新、电池管理、指标调控等方面。此外，修订和发布的新能源汽车相关技术规范涉及充电系统、电动汽车维护与保养、充电设施建设、电动汽车维修站等各个方面，完善了新能源汽车产业的标准体系建设。本研究选取经济补贴、产业支持、配套基建和绿色物流区四项亮点工作进行重点介绍。

1. 《深圳市新能源汽车推广应用若干政策措施》
2. 《深圳市新能源汽车发展工作方案》
3. 《深圳市新能源出租车推广应用政策实施细则》
4. 《深圳市新能源汽车推广应用扶持资金管理暂行办法》
5. 《深圳市新能源汽车充电设施运营商备案管理办法》

1. 《深圳市节能与新能源汽车示范推广实施方案(2009-2012年)》
2. 《深圳新能源产业振兴发展规划(2009-2015年)》
3. 《深圳新能源产业振兴发展政策》



2009

2010

2011

2012

2013

2014

2015

《深圳市私人购买新能源汽车补贴试点实施方案》

1. 《深圳市新能源公交车示范推广期运营贴办法》
2. 《关于对新能源纯电动物流车实施通行优惠政策的通告》
3. 《深圳市新能源汽车充电设施核查机构遴选管理办法》
4. 《深圳市2016年新能源汽车推广应用财政支持政策》
5. 《深圳市2016-2020年新能源汽车推广应用工作方案》

1. 《深圳市新能源公交车示范推广期运营补贴办法》
2. 《深圳市2017年新能源汽车推广应用财政支持政策》
3. 《深圳市2015年-2019年城市公交车成品油价格补助及新能源运营补助办法(试行)》
4. 《关于2017-2020年度纯电动巡游出租汽车推广应用工作有关事项的通知》
5. 《深圳市纯电动巡游出租车超额减排奖励试点实施方案(2017-2018年度)》

■ 试点示范阶段 ■ 推广应用阶段 ■ 规模发展阶段

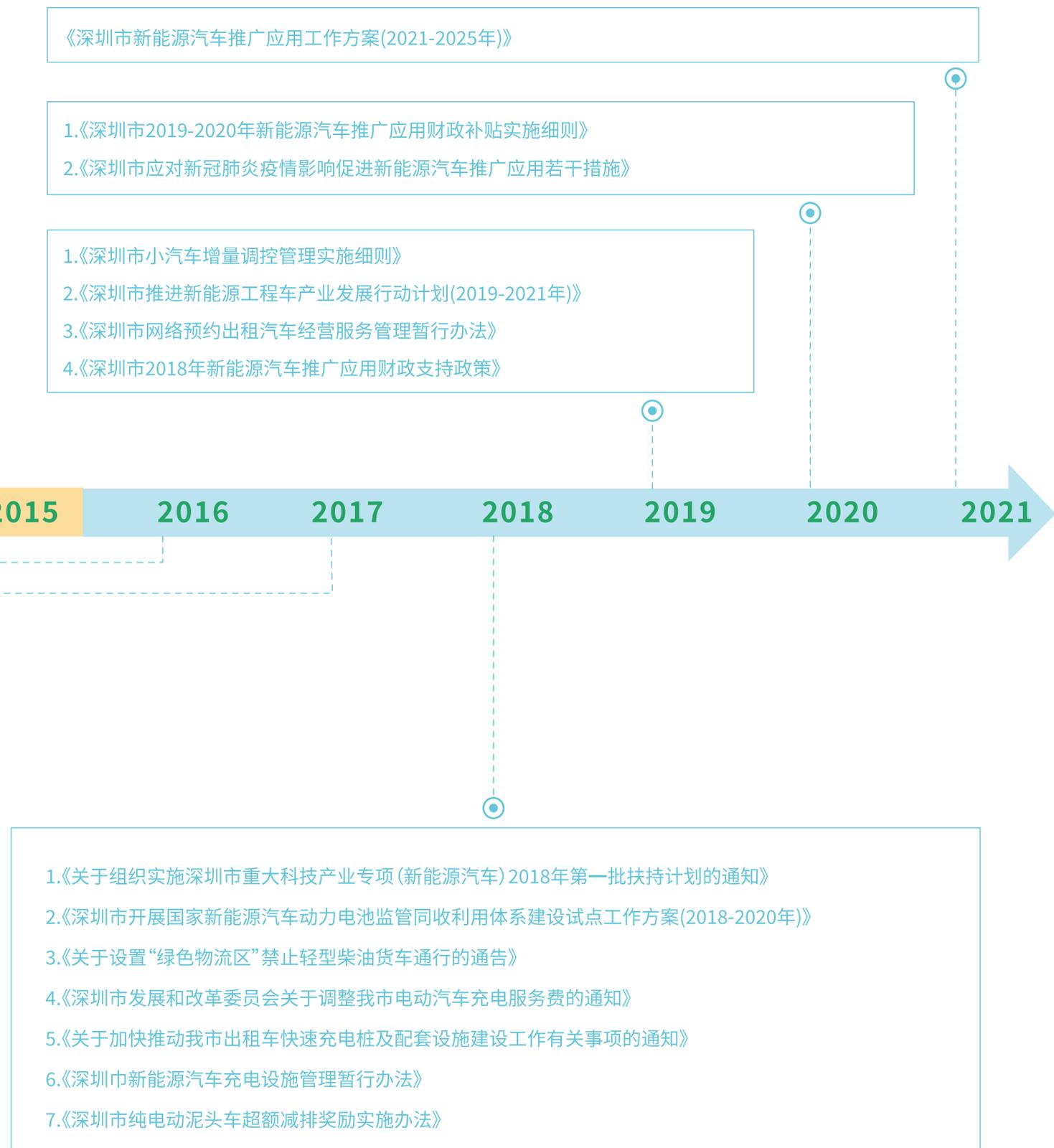


图5.6 | 2009-2021年深圳新能源汽车主要推广政策

1 制定全生命周期的经济补贴政策

多样化的补贴方式与激励措施是深圳新能源汽车快速发展的基本保障。深圳市政府制定了全生命周期的经济激励措施，涵盖购置（车辆购买财政补贴）、使用（电价优惠）、配套设施建设（充电桩建设补贴）、电池回收（动力电池回收补贴）等重要环节，为新能源汽车的使用者提供了完备的保障体系。

在专用车辆购置及运营方面，深圳先后出台多项文件，对公交车、出租车、物流车、泥头车的购置和运营环节进行补贴。在新能源私人汽车购置方面，通过实行减免购置税、发放购置补贴、取消购置配额等措施，鼓励民众购置新能源汽车。除严格执行国家免征新能源汽车车辆购置税、车船税等税收优惠政策，深圳自 2015 至 2020 年连续出台逐步退坡的财政支持政策，分阶段对购置于 2013 年 1 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日的新能源汽车进行购置补贴。以纯电动乘用车为例，2013 至 2015 年期间新购置的纯电动乘用车，根据其标准工况续航里程，可获得 3~6 万元/辆的深圳市车辆购置补贴，而到 2020 年，购置补贴已下降至 2 万元/辆。

2019 年出台的《深圳市小汽车增量调控管理实施细则》，取消了原本每年 2 万辆的购置配额限制，规定混合动力小汽车增量指标和纯电动小汽车增量指标经申请并通过资格审核后直接配置。

在电价和停车优惠方面，深圳实施购置后一次性充电补贴、下调充电电价和减免停车费等多种优惠政策。对于在深圳市辖区范围内的购车方，在车辆依法登记注册取得牌照（营运车辆还需取得营运许可）后，充电补贴将以充电优惠卡的形式发放给购车方，对实际使用的电量给予优惠补贴。为了降低电动汽车的充电成本，2018 年 7 月起，深圳电动汽车充电服务费最高限价由 1.0 元/千瓦时下调至 0.8 元/千瓦时。在停车费用方面，新能源汽车当日在全市道路停车位免首次（首 1 小时）临时停车费，在实行政府定价管理的停车设施内充电（每天首 2 小时内）的新能源汽车免收停车费。

在配套设施建设方面，鼓励和支持社会资本参与建设运营充电设施，对于符合标准的充电设施按照充电设施（站、桩、装置）装机功率给予补贴。在动力电池回收方面，规定由整车制造企业负责新能源汽车动力电池强制回收，并按照 20 元/千瓦时的标准专项计提动力电池回收处理资金，地方财政按照经审计的计提金额给予不超过 50% 比例的补贴。

2 逐步形成完整的新能源汽车产业链

深圳从新能源汽车试点推广初期就高度重视新能源产业的长远发展，以新能源汽车作为深圳的能源结构和产业布局转型发展的切入点，制定了《深圳新能源产业振兴发展规划（2009-2015

年)》，对新能源汽车产业进行了高瞻远瞩的战略布局。此后，深圳又发布了《深圳市新能源汽车产业基地综合发展规划》等重要文件，为深圳构建完整的新能源汽车产业体系奠定了坚实的基础。

经过多年发展，深圳聚集了 2000 多家新能源汽车相关企业，已成为全球范围内新能源汽车企业最集中的城市之一，构建了以新能源汽车整车生产(例如比亚迪)为主导，动力电池及原材料(例如欣旺达、贝特瑞)、驱动电机(例如大地和)、电控系统(例如汇川技术)、充电基础设施(例如奥特迅、科士达)为配套的完善产业链，形成龙头企业带动、关键零部件与配套企业互动的良好发展态势。

3 大力推进充电基础设施建设

在推进充电基础设施建设过程中，深圳运用多元化推广模式，在政府充分协调用地、大力给予财政支持的同时，积极引导创新充电服务商业模式，吸引社会资金参与充电基础设施建设，加快了全市充电设施网络建设社会化步伐。此外，深圳发布了关于充电系统技术、充电站及充电桩、充电设施运营商等方面的一系列规范文件，对充电设施的投资、建设、运营做出了规范化约束。

在不同使用场景充电桩的推广上，深圳采取了针对性的专项措施。例如，为解决纯电动出租车“充电难”问题，创新试点推广“三大模式”，在提高公共资源利用效率的同时改善出租车充电难问题：一是“智慧停车+充电桩”模式，利用路边停车资源，建设路边充电桩，化整为零解决充电设施资源不足问题；二是“变电站+充电站”模式，在变电站周边建设充电站，充分挖掘变电站土地及供电潜力，开创了充电站建设的新模式；三是“停车场+充电桩”模式，在停车场原有车位上进行充电站建设，提高公共资源的利用效率。针对新能源环卫车充电基本依赖社会公用充电设施，环卫专用充电设施非常少的问题，出台专门文件，推进新能源环卫车充电桩配套工作，鼓励各区采用“共用和新建”、“集中与分散”相结合方式推进环卫车充电桩配套工作。为保障私家车配套设施，深圳规定新建住宅、大型公共建筑物和社会公共停车场应按停车位数量的 30% 配建慢速充电桩，并 100% 预留建设安装条件。

随着基础充电设施建设的快速推进，近年来，深圳充电桩保有量呈快速上升趋势(图 5.7)。截至 2020 年底，全市累计建成各类公共充电桩约 9.3 万个，车桩比达 4.3:1，显著优于全国平均水平(6.1:1)，也略强于上海(5.0:1)和北京(5.1:1)。

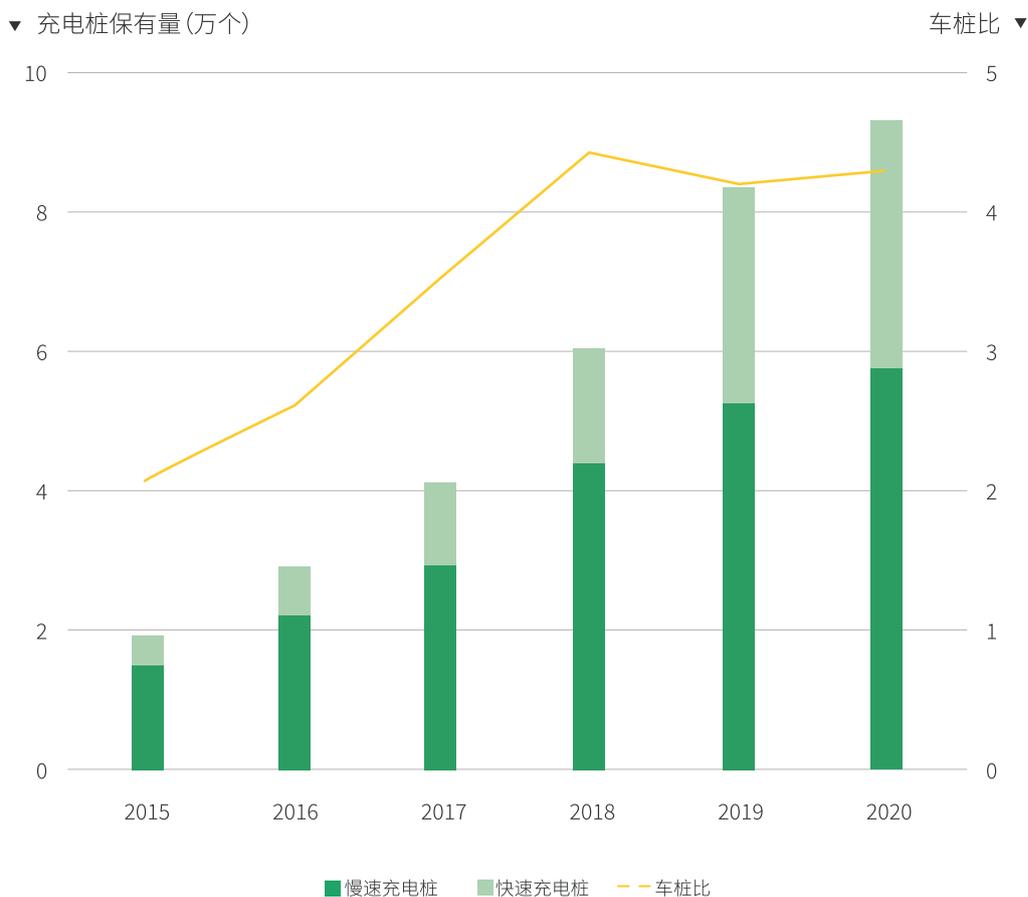


图5.7 | 2015-2020年深圳市充电桩保有量

“十四五”期间，深圳还将持续大力建设新能源汽车充电基础设施，全面提升新能源汽车充电保障能力。2021年发布的《深圳市新能源汽车推广应用工作方案（2021-2025年）》提出，到2025年，全市将建成公共网络和专用快速充电桩4.3万个，基础网络慢速充电桩72.4万个。在公共服务领域，加快完善公交、物流等运营、停放、充电一体化保障体系，实现市域充电平均服务半径小于0.9公里，城际高速公路充电基础设施互联互通。

4 创新设立“绿色物流区”

轻型货车广泛应用于城市物流，以城区内短途运输居多。2017年深圳轻型柴油货车占机动车总保有量的5.5%，但其排放的PM_{2.5}和NO_x约占全市机动车总排放量近20%，对大气污染的贡献不可忽视。

轻型货车广泛应用于城市物流，以城区内短途运输居多。2017 年深圳轻型柴油货车占机动车总保有量的 5.5%，但其排放的 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 约占全市机动车总排放量近 20%，对大气污染的贡献不可忽视。

为进一步改善道路通行环境，解决轻型柴油货车污染问题，深圳于 2018 年在全国率先创新试点，在全市范围内设立“绿色物流区”，示范使用新能源物流车。选取的原则是参考了深圳道路交通排放监测平台数据，考虑污染物排放量较大的片区，在全市十个行政辖区内各设置一个“绿色物流区”。

自 2018 年 7 月起，“绿色物流区”全天禁止轻型柴油货车驶入，仅允许电动货车通行，对违反通告规定驶入的轻型柴油货车车主予以 300 元罚款并记 3 分的处罚。“绿色物流区”的设置给新能源物流车提供了路权优惠，解决了早期新能源物流车没有通行优势、运营积极性不高的问题，对深圳市新能源物流车的推广和使用起到了积极推动作用。截至 2020 年底，深圳市轻型新能源货车已积累推广 8.6 万辆，相比 2017 年保有量增加了 91%，轻货车队的新能源比例达到 22%。





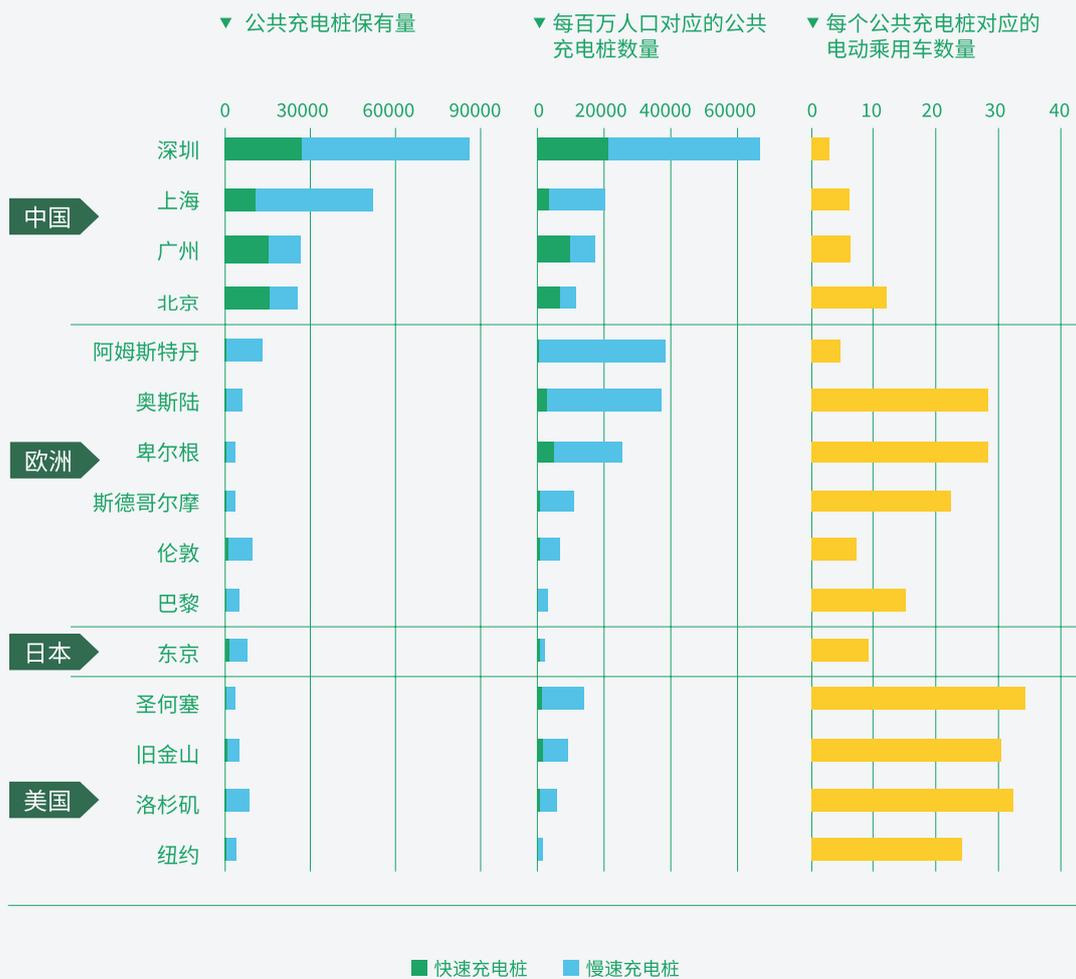
照片来源:Pixabay

专栏 5-3

世界主要城市充电基础设施建设情况

ICCT 比较了部分世界电动汽车之都的公共充电基础设施建设水平，包括公共充电桩的保有量、每百万人口对应的公共充电桩数量以及每个公共充电桩所对应的电动乘用车数量（专栏图 5-4）。

中国城市的公共充电桩保有量遥遥领先，图中四个中国城市的公共充电桩保有量是欧、美、日各入选城市的两倍以上。从公共充电桩的人均保有量来看，深圳优势明显，其每百万人口所对应的公共充电桩数量超过 6,700 个，阿姆斯特丹和奥斯陆每百万人口的公共充电桩接近 4,000 个，图中其他城市每百万人口公共充电桩数量均低于 2500 个。从车桩比角度看，深圳、上海、广州、阿姆斯特丹、伦敦、东京的车桩比为 10:1 甚至更低，而奥斯陆、卑尔根和加州城市的车桩比却达到 25:1 甚至更高。需要说明的是，该研究未统计私人充电桩，这是导致欧美城市车桩比偏低的主要原因，城市最优的车桩比也取决于这个城市私人家用充电桩的配备情况以及车辆的使用模式等综合因素。



专栏图5-4 | 2019年全球典型城市的公共充电基础设施建设水平

5.3

新能源汽车推广效益评估

为评估深圳推广新能源汽车的综合效益，清华大学团队基于本地化的数据库和评估模型，基于生命周期的视角系统分析了深圳新能源汽车推广带来的车队减排、空气质量改善及健康效益。生命周期评价模型采用 GREET2018 模型框架，并基于深圳的数据进行了参数本地化；空气质量模拟耦合了区域尺度空气质量模型系统 CMAQ/2D-VBS 与高分辨率污染扩散模型 RapidAir，从城市和道路尺度综合评估了电动化给深圳带来的空气质量改善效益。评估包括两个部分：1) 以 2019 年为基准年，评估深圳现有电动车推广带来的环境效益；2) 以 2030 年为目标年，设计电动车发展情景，评估未来深圳更大规模电动化的环境和健康效益。

1 已推广新能源汽车的效益评估

截至 2019 年底，深圳已基本实现了出租车和公交车的全面电动化；电动货车推广总量接近 8 万辆，中型货车和轻型货车中电动车占比达 40% 和 20%，纯电动和插电式混动小客车共推广超过 21 万辆，大型客车推广超过 4,000 辆。

新能源汽车推广为深圳的道路交通部门带来 1.1 万吨 NO_x 、2,400 吨 HC 和 300 吨 $\text{PM}_{2.5}$ 的减排。电动车的推广导致深圳电力需求增加，但由于近年来电厂进行超低排放改造且深圳 75% 的电力需求来自外地来电，电动化对上游电厂的排放增量影响较小（见图 5.8）。

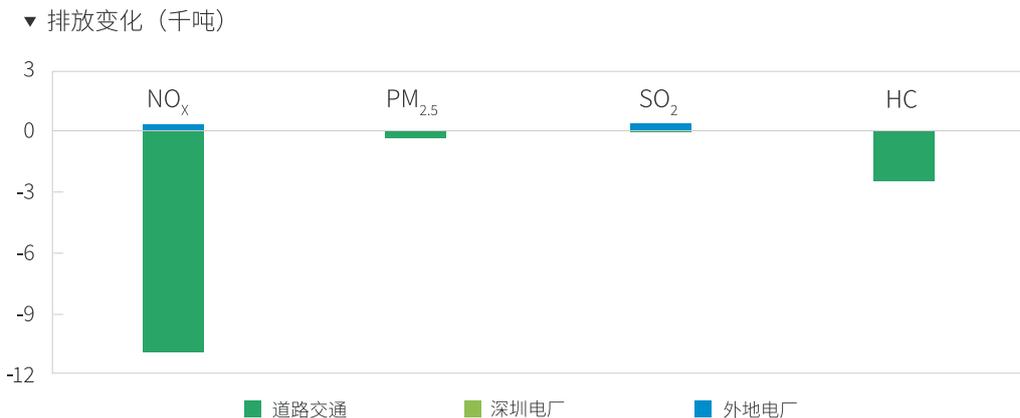


图5.8 | 深圳电动车推广对道路交通和电厂污染物排放的影响

如图 5.9 所示，出租车、小型客车和轻型货车是 HC 排放削减贡献最高的三类车型，贡献比例分别为 51%、29% 和 9%。公交车为 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 削减贡献最高的车型，贡献了 57% 的 NO_x 和 61% 的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放削减；大型客车、中型货车和轻型货车是紧随公交车之后的重要贡献车型，分别贡献了 14%、12% 和 8% 的 NO_x 减排量，以及 12%、8% 和 9% 的 $\text{PM}_{2.5}$ 减排量。

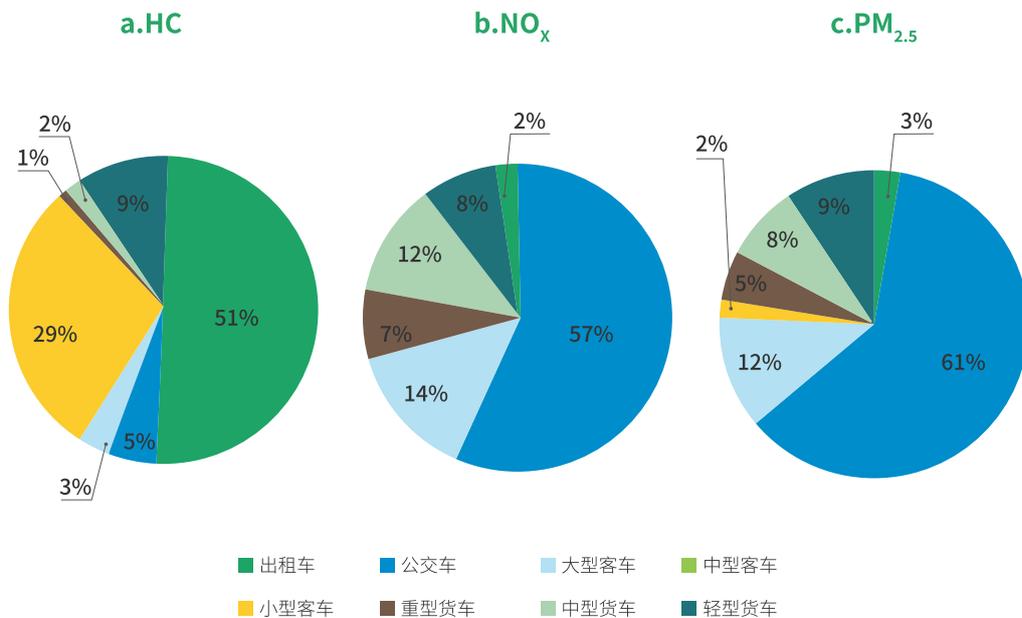


图5.9 | 2019年深圳各车队电动化对污染物排放削减的贡献

图 5.10 展示了深圳车队电动化的燃料生命周期温室气体减排效益。2019 年深圳的新能源汽车推广获得了 216 万吨的温室气体总量减排效益，效益几乎全部来自 CO₂ 减排。其中，出租车和公交车的贡献最高，分别贡献了 68 万吨和 54 万吨的温室气体减排量。

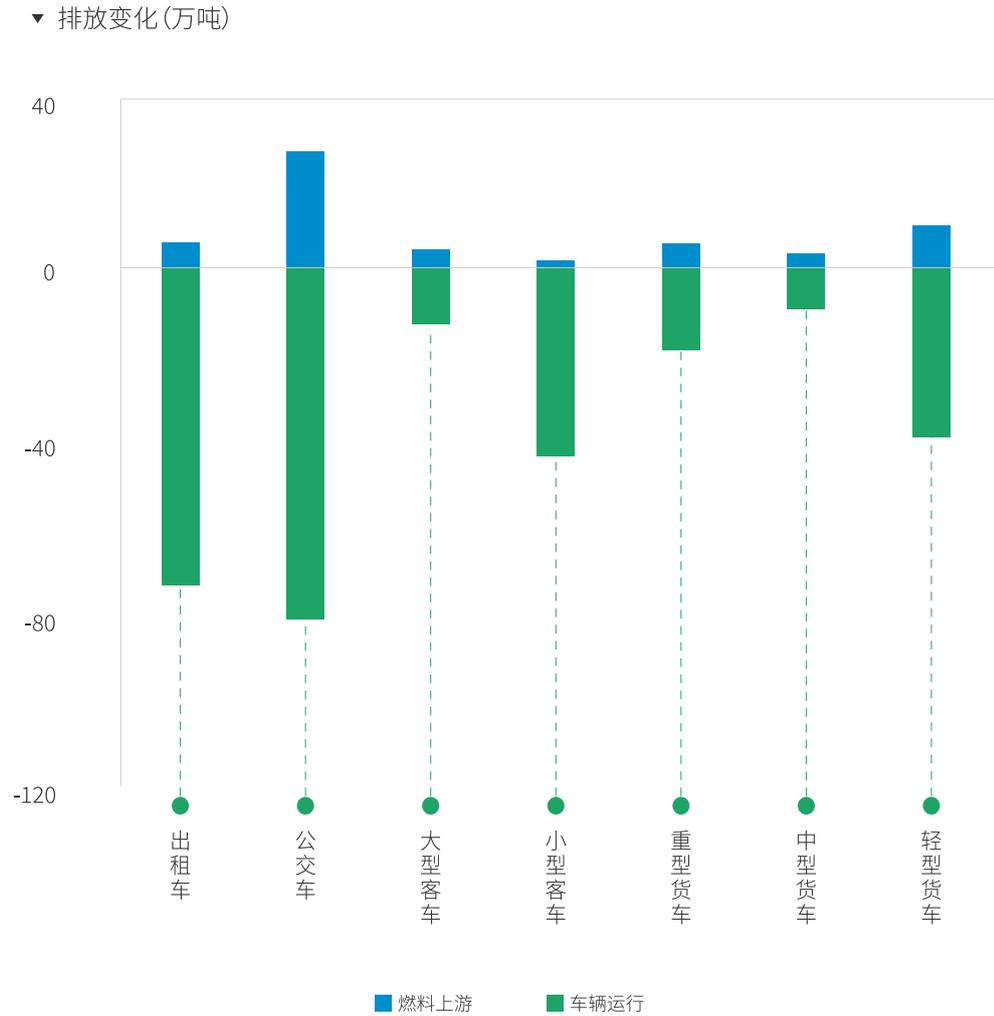


图5.10 | 2019年深圳电动汽车推广的燃料周期温室气体排放影响

在电动化减排效益基础上，应用耦合区域尺度和城市尺度的多层空气质量模型系统，进一步评估了电动化推广为深圳带来的空气质量改善效益（见图 5.11）。电动车推广使 2019 年深圳 1 月和 8 月 NO₂ 月均浓度分别削减 2.8 和 2.6 μg/m³。浓度削减效益在城区（福田区、南山区和罗湖区）更加显著，城区浓度削减高达 4.1 和 3.5 μg/m³。结合国控站点监测数据，2019 年相比 2014 年，深圳国控点平均 NO₂ 浓度削减约 8 μg/m³，推算深圳近年 NO₂ 浓度削减的 35% 可归功于电动化。

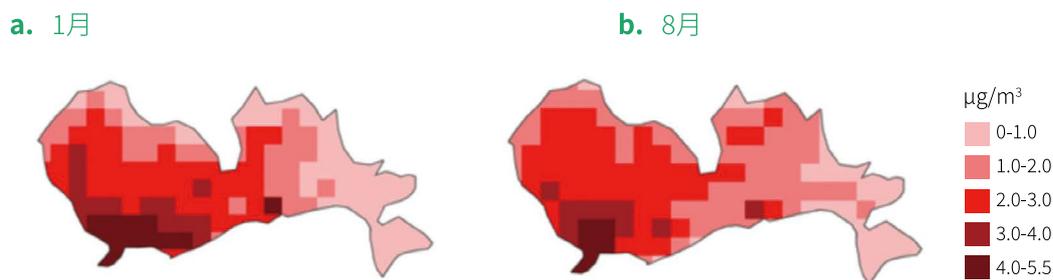


图5.11 | 深圳电动化的NO₂浓度削减效益的时空分布

为进一步探究在更微观的道路交通热点区域的浓度变化，应用 RapidAir 模型对道路边 NO_x 污染物浓度进行模拟。2019 年，电动车推广可以削减 NO_x 日均浓度近 4.5 µg/m³。对路网更密集、交通活动水平更高的城区和港口区域，空气质量改善效益更显著，道路交通日均 NO_x 浓度在城区可削减 22 µg/m³，在南山港可削减 15 µg/m³（如图 5.12）。

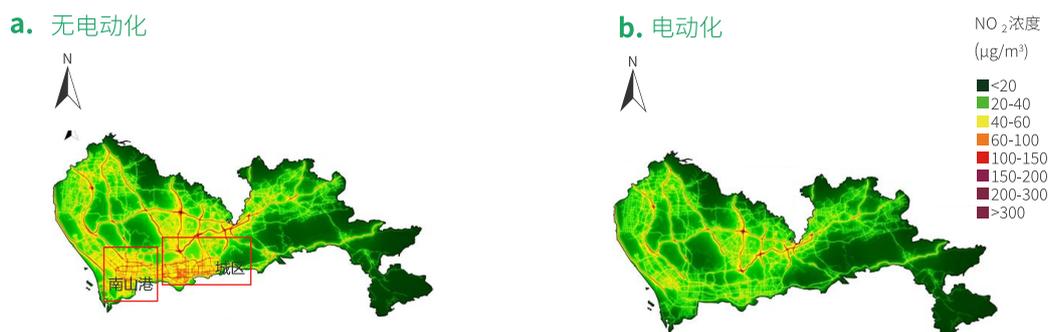


图5.12 | 深圳有无电动化情景下的道路交通NO_x浓度对比

2 2030年深圳电动车大规模推广的效益评估

在建设美丽中国和双碳目标的背景下，持续推动新能源汽车的进程将是未来深圳和更多城市的重要发展方向。本研究对深圳未来更大规模电动化带来的环境、气候和健康效益开展了综合评估。

未来电动化情景的设置综合考虑了深圳现行的政策导向和未来车辆技术发展特点、电动化假设的可实现性等多种因素。预计 2030 年，深圳小客车的电动化率可达到 30%，中大型客车电动化率为 25%~35%；货车领域，由于轻型物流车辆的快速电动化，预计轻型货车电动化率达到 70%，中型货车电动化比例也将达到 60%，重货的新能源比例达 15%。

在这一电动化推广情景下，道路交通部门将削减 0.5 万吨的 HC、0.6 万吨的 NO_x 和 140 吨 PM_{2.5}，削减比例分别达到 37%、43% 和 42%。其中，如图 5.13 所示，小型客车、轻型货车和出租车是 HC 排放削减贡献最主要的车型，分别贡献了 42%、29% 和 16% 的减排。对于 NO_x，公交车、中大型客车、中重型货车和轻型货车均是削减贡献的重要车型，分别贡献了 40%、20%、18% 和 16% 的减排。PM_{2.5} 减排贡献最高的三类车型为轻型货车、公交车和中重型货车，分别贡献了 32%、26% 和 21% 的减排量。

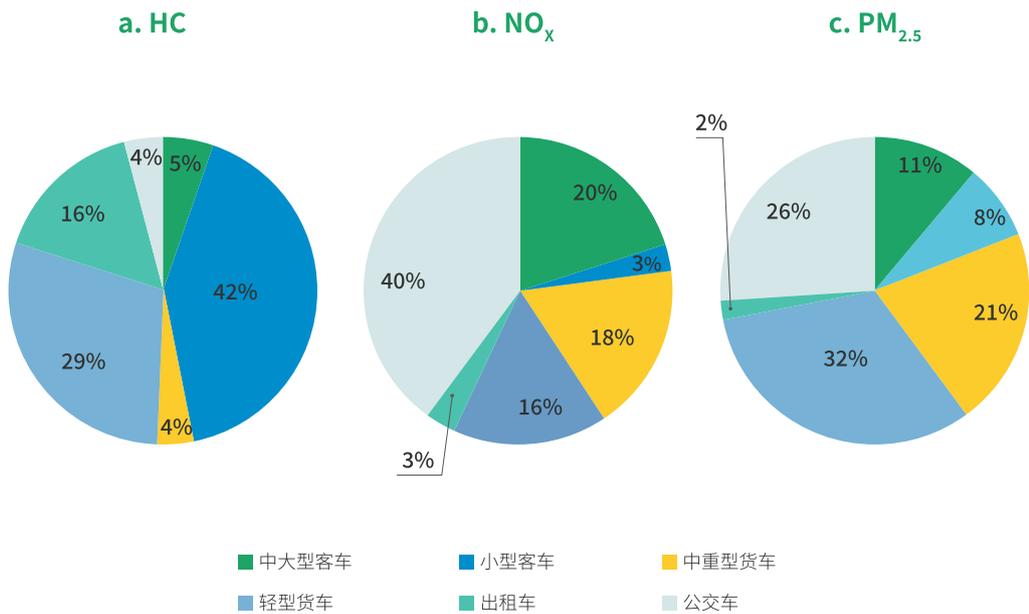
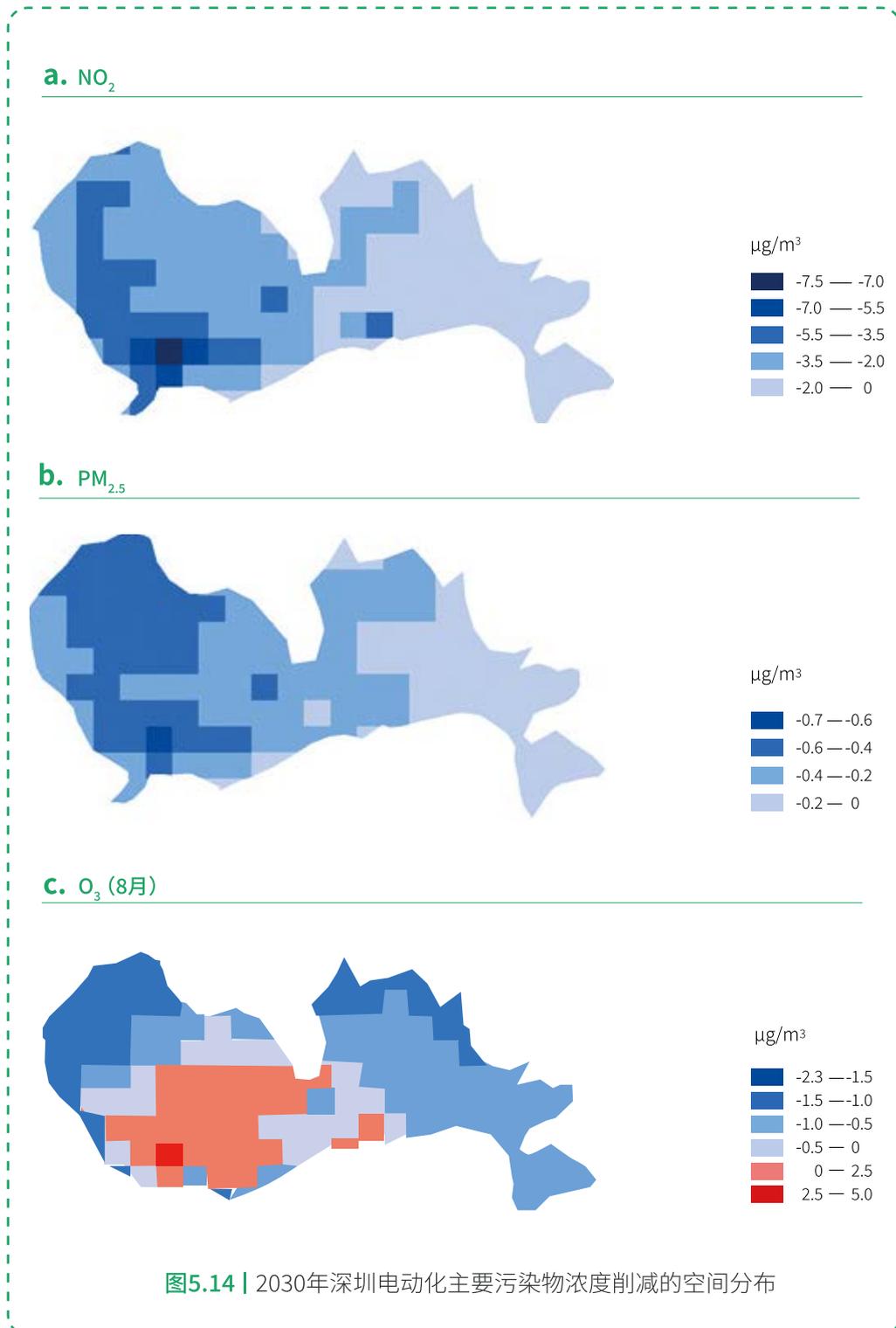


图5.13 | 2030年深圳电动化对道路交通部门污染物排放削减贡献

电动汽车推广也带来温室气体排放的持续大幅削减，2030 年预计深圳可削减生命周期温室气体排放量约 500 万吨，其中客车、货车及公共车队的贡献比例分别为 48%、31% 和 21%。

应用 CMAQ/2D-VBS 模型进一步模拟了深圳 2030 年大规模电动化后的污染物浓度削减效益 (如图 5.14)。NO₂ 在电动化情景下可实现显著削减，交通密集区域年均浓度下降约 4.1 μg/m³；对于交通密集区域内的近 180 平方公里超标区域，电动化可帮助 55% 的超标区域达标。交通密集区域年均 PM_{2.5} 浓度下降约 0.4 μg/m³。O₃ 浓度高值区（主要集中在深圳西北部）的 8 月月均日最大 8 小时 O₃ 浓度由于电动化可下降 0.5~2.3 μg/m³；城区少部分浓度低值区域由于仍处于 VOC 控制区，月均日最大 8 小时平均 O₃ 浓度在电动化后会有一定的增加。



大规模电动化推广带来的空气质量改善可以实现可观的健康效益。在电动化推广情景下，2030 年深圳可避免早死约 160 例，改善人群健康的货币化效益约 17 亿元。由于城区人口密集，交通活动水平高，浓度削减效益更高，因此健康效益主要集中在交通密集的城区，城区的电动化效益可占到城市总健康效益的 90% 左右。





照片来源: Pixabay

06

6.1 成都智能交通系统的建设	142
6.2 基于智能交通大数据的机动车排放控制综合决策系统	146
6.3 精细化的机动车排放管控评估案例	151

成都

智能交通大数据系统推动精准管控



成都是中国西南地区的科技、商贸、金融中心，也是重要的国家高新技术产业基地、商贸物流中心和综合交通枢纽。过去 20 年，随着西部大开发的不断深入和推进，西南地区经济发展正驶入快车道，汽车消费的潜能得到释放。成都的机动车保有量快速增长，20 年间增长了近 10 倍(图 6.1)。截至 2021 年底，成都机动车保有量突破 620 万辆，成为仅次于北京的保有量第二大的城市，机动车拥有率已接近 300 辆 / 千人。欣欣向荣的汽车市场代表着成都社会的发展、经济的腾飞，但同时也承载着巨大的交通和环境压力。

作为一座不实施限牌、限购政策的城市，成都致力于通过智能交通管控的方式解决交通和环境问题。近年来，成都高度重视发展智能交通技术，建设了高密度的交通监测网络，并开发了基于智能交通大数据的机动车排放控制综合决策系统，实现了机动车排放的精准感知和智能监管。这一利用智能交通大数据系统实现精细化交通排放监管与决策的经验，将为其他同样面临快速机动化趋势的城市提供新的解决思路。

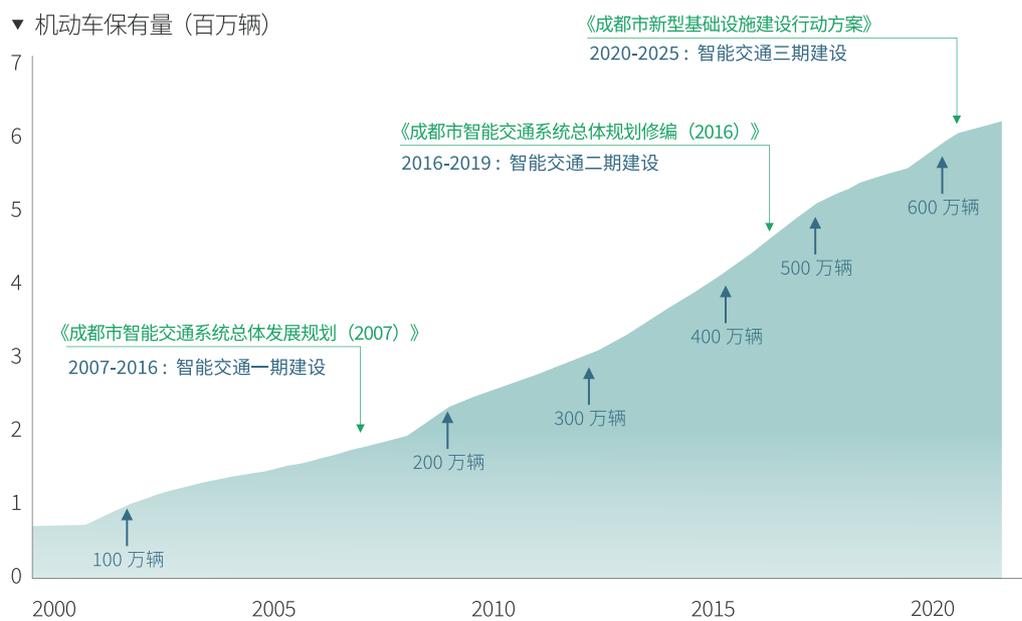


图6.1 | 成都机动车保有量变化趋势 (2000-2021)

6.1

成都智能交通系统的建设

智能交通系统 (Intelligent Traffic System, ITS) 是将先进的科学技术 (信息技术、计算机技术、数据通信技术、传感器技术、电子控制技术、自动控制理论、运筹学、人工智能等) 有效地综合运用于交通运输、服务控制和车辆制造, 加强车辆、道路、使用者三者之间的联系, 从而形成一种保障安全、提高效率、改善环境、节约能源的综合运输系统。近年来, 随着手机网络、全球定位系统、车载导航、车车通信 (V2V) 和车路协同 (V2I) 等先进技术的发展, 交通信息的获取摆脱了人工计数的低效, 能够实现自动实时采集及远程监控。于此同时, 数据量和空间覆盖范围也呈数量级式增长, 数据的时效性、动态性及精细度均有了本质性的提升, 交通领域已经进入“大数据”时代。交通监测系统逐渐从稀疏、分散式分布向集约的交通传感器布局发展, 数据来源从单一源逐步向动态多源数据融合方向拓展。交通数据采集方式逐渐从传统的感应线圈、视频采集等固定监测方式, 转向自动化、电子化程度更高的基于视频识别、浮动车 GPS 移动监测、



图6.2 | 成都市道路车流监测卡口

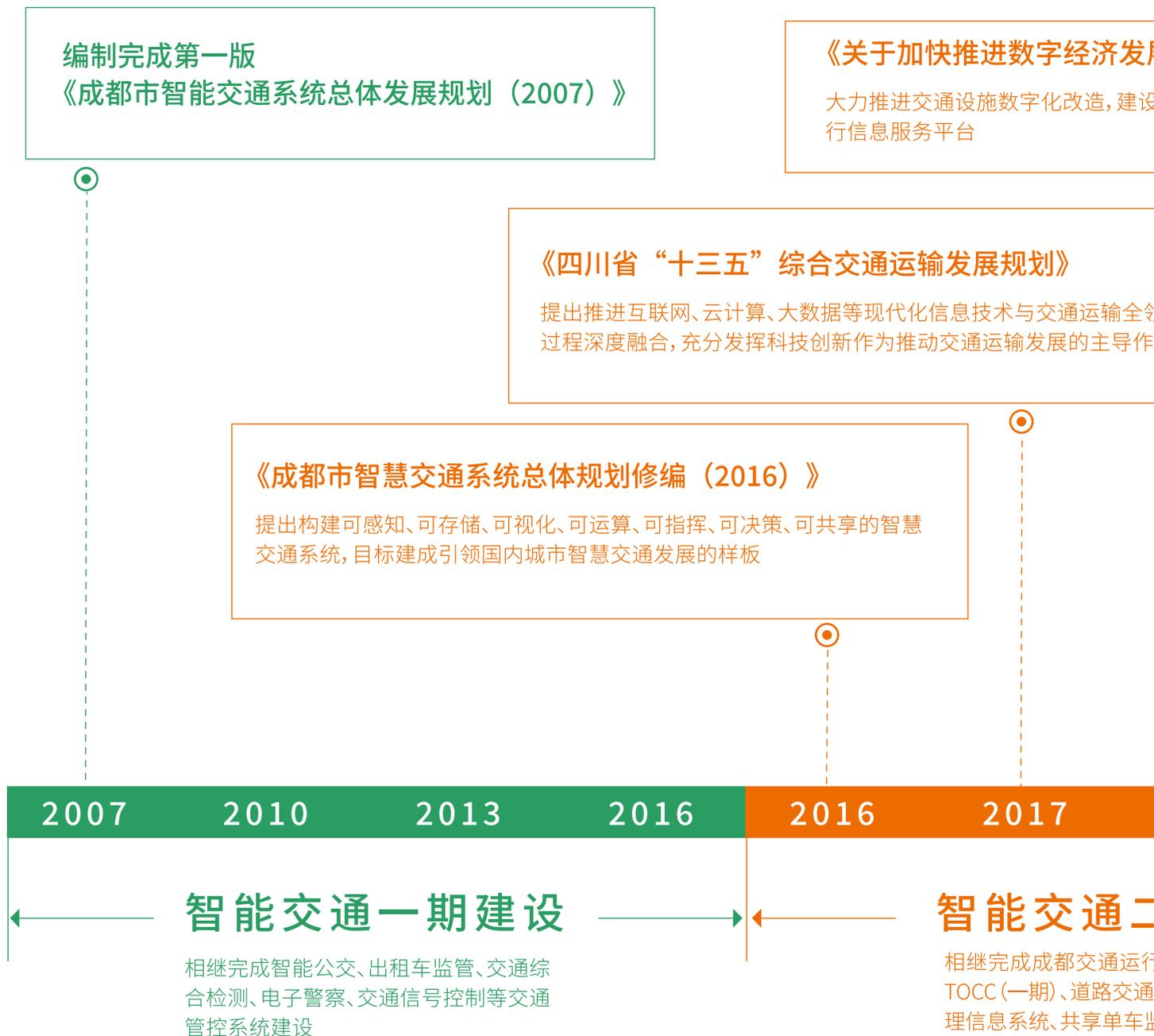
RFID 及智能手机等新型监测手段。如图 6.3 所示，不同的监测手段可获取的交通数据种类不同，为精细化交通排放监管与决策提供了丰富的用途各异的数据基础。



成都早在 2007 年就开始启动智能交通大数据系统的建设工作（如图 6.4），目前已历经两个建设阶段，三期建设正稳步推进。2007 年，成都编制完成第一版《成都市智能交通系统总体规划（2007）》，并在该规划的指导下启动了智能交通一期工程。该阶段是成都智能交通系统的奠基阶段，相继完成了智能公交、出租车监管、交通综合检测、电子警察、交通信号控制等交通管控系统的建设。

基于第一阶段的建设经验，成都于 2016 年对智慧交通系统的规划进行了修编，发布了《成都市智慧交通系统总体规划修编（2016）》，进入了历时 5 年的智能交通二期工程建设。该阶段是成都智能交通系统的扩展完善阶段，相继完成了成都交通运行协调指挥中心（一期）、道路交通管控系统、交通地理信息系统、共享单车监管平台等建设。

随着数字化发展和 5G 应用时代的到来，成都现已进入智能交通建设的第三阶段。本阶段的重点是加快推进数字化、网络化、智能化的新型基础设施建设，如推动 5G 技术在智慧交通、智慧物流等领域的创新应用，推动传统交通基础设施转型升级，大力推进新能源汽车充电桩的建设布局，推进人工智能、大数据在智慧交通中的创新应用场景建设等。



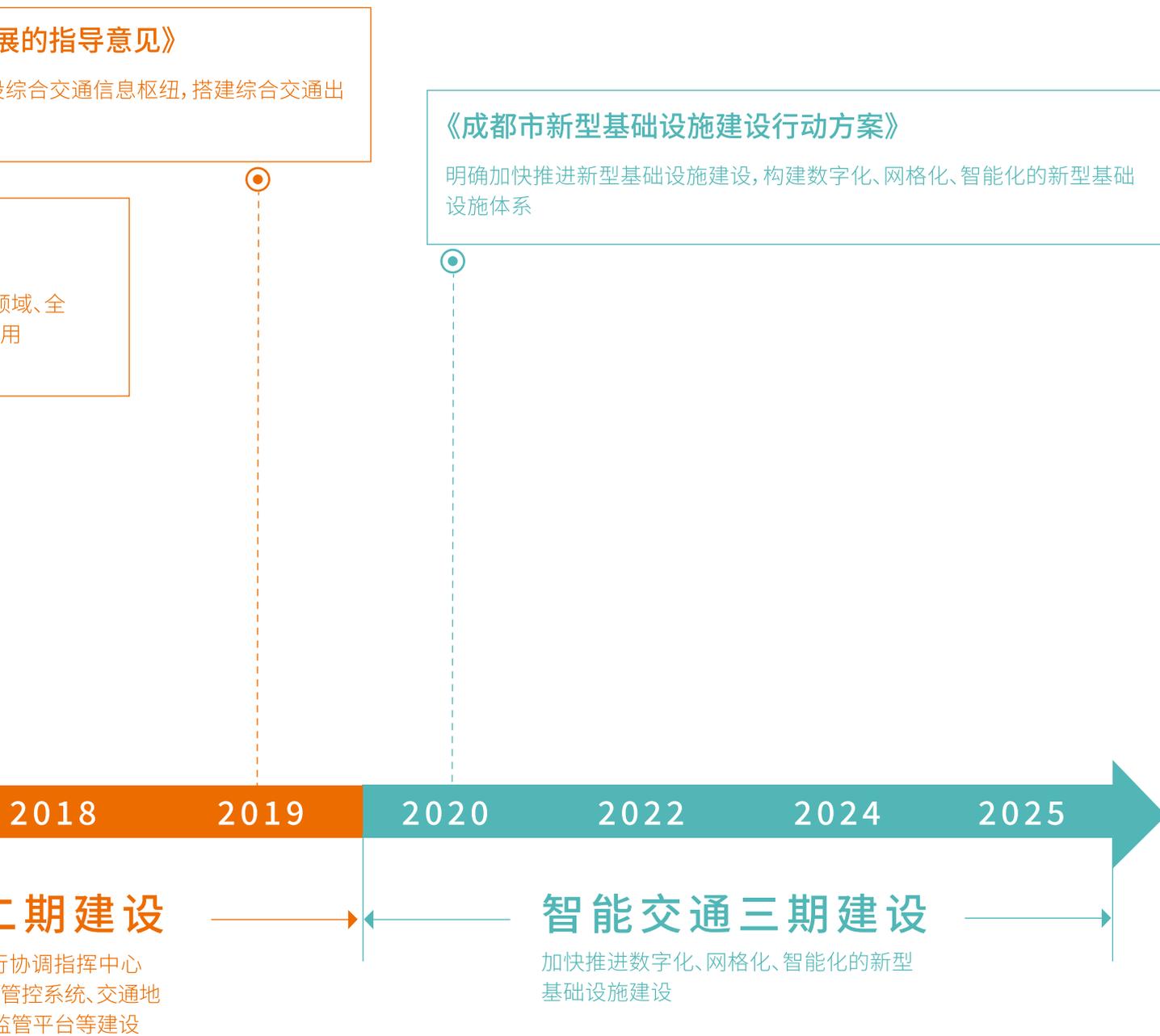


图6.4 | 成都智慧交通大数据系统的建设历程

6.2

基于智能交通大数据的成都机动车排放控制综合决策系统构建

成都在大力发展智能交通的过程中，形成了高密度的交通监测网络，为精细化交通排放监管提供了良好基础。如图 6.5 所示，目前成都的中心城区部署了 4000 余个卡口点位，可以实时采集通过监测点位的车流量，并通过与车辆信息数据库的在线匹配获得车队的车型、燃料类型及排放标准构成。此外，34 个分布在成都市外围地区的国省道监测站点可提供外围车流及车队构成信息；高德地图等开源地图软件可以提供道路级别的实时车速数据。

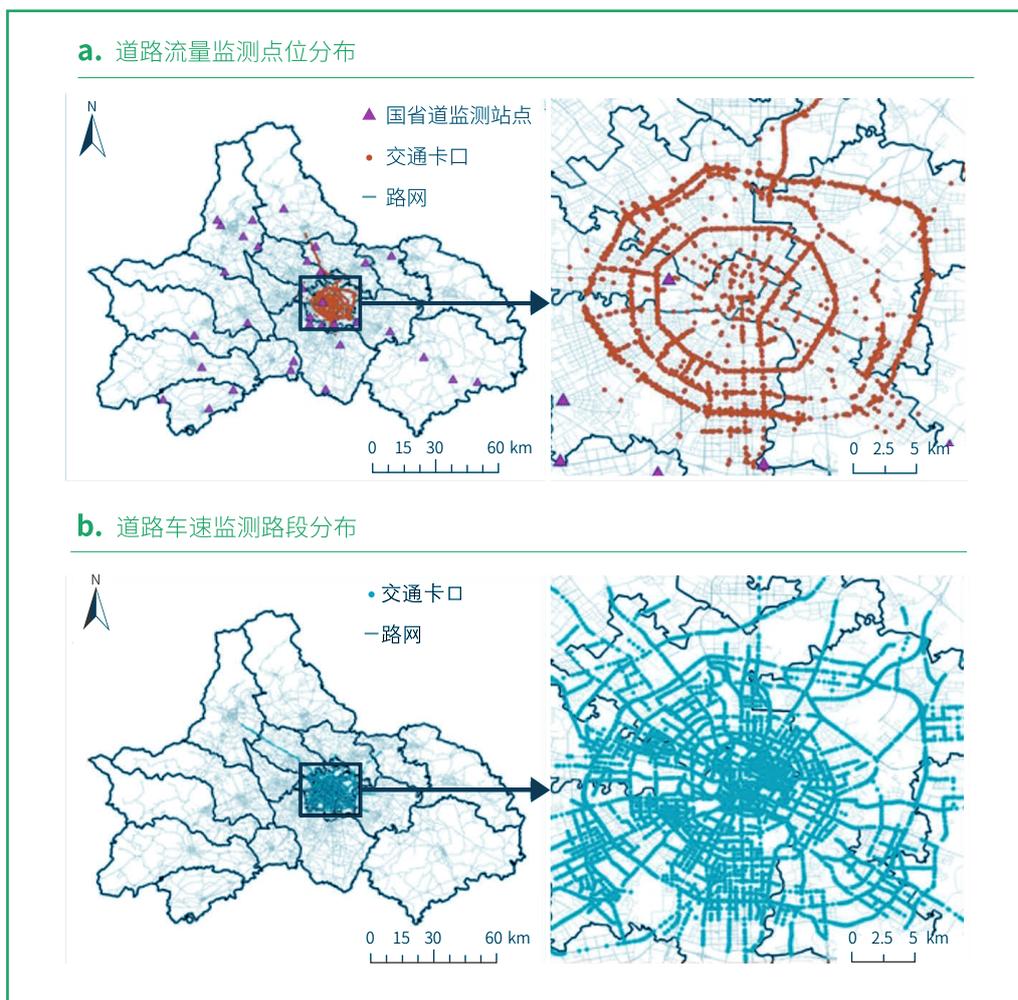


图6.5 | 成都高密度的交通流监测网络分布图

然而，高密度交通流监测网络仍难以实现全网覆盖，需要对交通流数据缺口进行合理的抽样模拟，以满足高分辨率全路网道路排放清单的数据需求。传统的交通流空间分配方法存在不确定性大、效率低等缺点，难以适应高分辨率清单技术对多源数据融合、全路网交通模拟准确率及效率的要求。与传统的方法相比，机器学习具有对大数据集适应性好、计算速度快等优点，可以更好的满足多源交通数据融合和实时处理的实际需求。

在融合成都高密度交通流监测网络、全路网交通流模拟方法及本地化机动车排放因子模型的基础上，清华大学开发了响应速度快、可视化功能强大的成都市机动车排放控制综合决策系统（图 6.6）。决策者可以直观地看到高分辨率的城市机动车排放时空分布及车型分担特征，从而有针对性地进行机动车排放精细化管控。根据决策部门的实际使用需求，平台持续优化和完善系统算法和性能，提升界面用户友好性。经过多次升级，2021 最新版综合决策系统已可以实现高时空分辨率的全路网机动车排放快速准确测算，可实现全路网 / 单道路车流量、排放量的连续 72

小时实时动态展示，以及短期和中长期排放控制决策效益分析，极大提高了交通排放监管的时效性、精细度和智能化，为成都的机动车排放控制精准决策提供了重要技术支持。

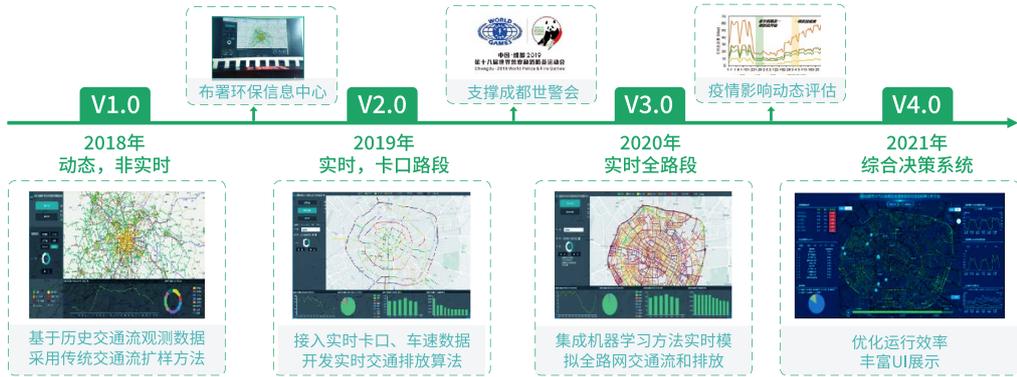


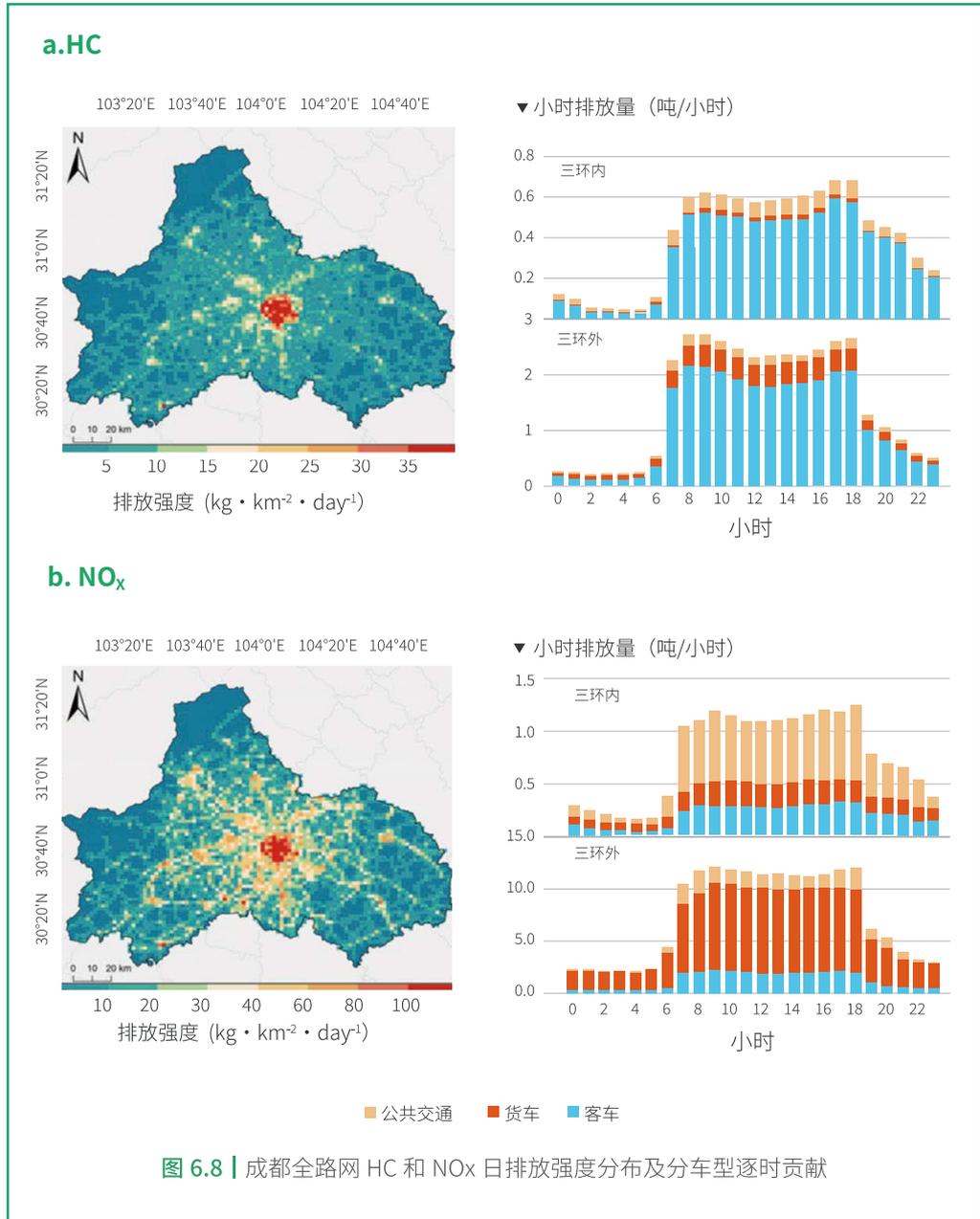
图6.6 | 成都机动车排放控制综合决策系统的优化升级

如图 6.7 所示，成都机动车排放综合决策系统首先可提供全网网 / 单道路流量及排放的实时查询功能。该功能可以动态呈现连续 72 小时的全路网分车型流量及污染物实时排放信息，还可点击道路来查看指定道路的流量和排放情况，实现了精确到道路层面的精细化排放监管。



图6.7 | 成都机动车排放控制综合决策系统的流量及排放实时查询功能

图 6.8 展示了 2019 年成都全网机动车排放的时空分布及分车型排放贡献特征。总体而言，排放呈现显著的城市中心聚集效应，城市中心、副中心及相连干路的排放强度显著高于其余区域，从城中心向外呈辐射状削减。



HC 排放强度在三环内明显较高，三环内外的主体贡献车型都是客车（分别占据三环内外 HC 总排放的 85% 和 78%）；NO_x 则在三环内和外围货运通道都有明显的排放聚集，三环内 NO_x 主要贡献车型为公共车队（公交车 + 出租车，51%）和客车（28%），三环外货车则占据压倒性的贡献比例（70%）。这表明，不同的污染物在不同的区域其控制的重点车型是有显著差别的。例如，

对于 HC，可以重点从中心城区及客车车队入手，考虑对老旧客车进行加速淘汰或限行，以改善车队结构构成并降低高排放老旧车的活动水平；对于 NO_x，则可以重点从货运密集的物流区及货运通道入手，加强对重型货车的排放监管和更新置换，同时，在市区重点推进公共车队电动化。

机动车排放综合决策系统的一个重要功能是可定量评估不同控制措施或设定情景下的交通变化和排放削减效益，从而支持机动车排放控制精准决策（图 6.9）。例如，新冠疫情期间交通及排放变化的连续动态跟踪、重大活动保障（如成都世警会）的交通管控减排效益评估，等等。本报告下一节针对典型案例进一步展开阐述。

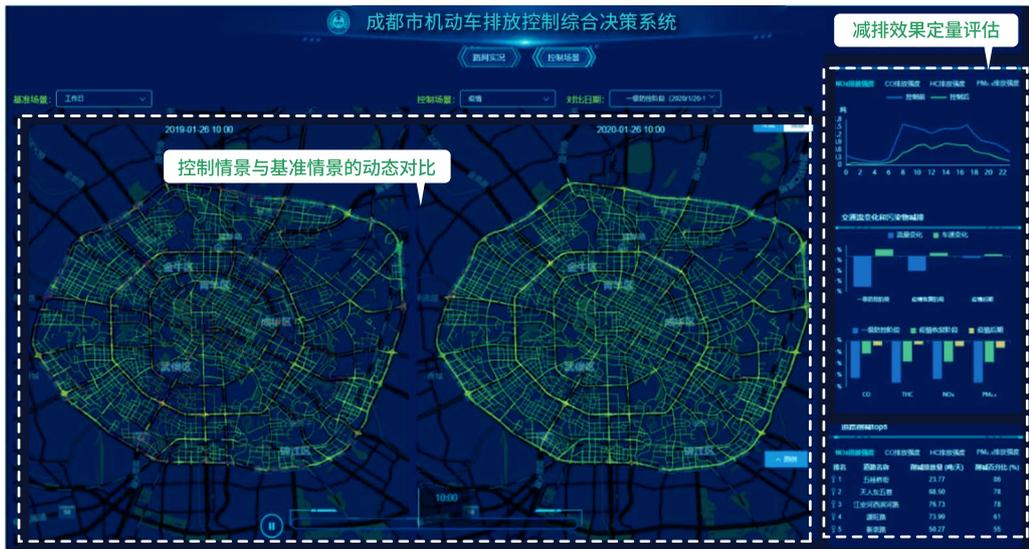


图6.9 | 成都机动车排放控制综合决策系统的控制决策效益分析功能

6.3

精细化的机动车排放管控评估案例

1 案例 1——新冠疫情期间成都交通变化的减排效益评估

2020年初突如其来的新冠疫情对居民生活及社会经济都造成巨大的影响，疫情导致交通活动的锐减，为评估交通活动减少带来的污染物减排效益提供了一场大型自然实验。清华大学与成都市环境科学研究院合作，应用机动车排放控制综合决策系统对成都的交通及排放变化进行了持续的跟踪评估。

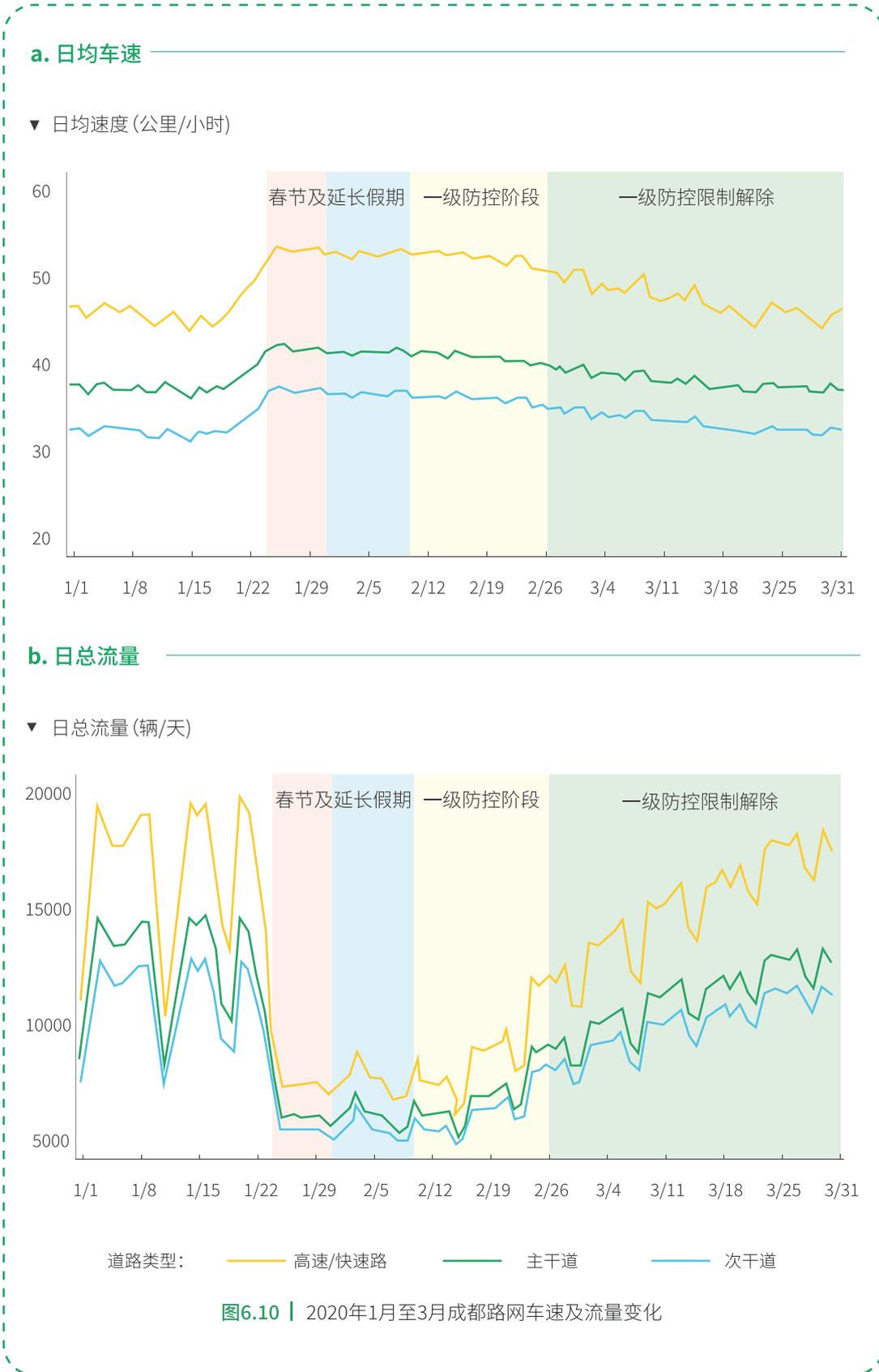


图6.10 | 2020年1月至3月成都路网车速及流量变化

图 6.10 展示了 2020 年 1 月至 3 月，成都疫情防控期间不同道路类型（高速路、主干路和次干道）的路网车速及流量的实时动态变化。成都的一级防控从 1 月 24 日开始持续到 2 月 26 日（图中粉色、蓝色和黄色）。从一级防控开始，成都的交通流量即明显下降，而平均车速则显著上升。在一级防控阶段，成都的平均交通流量减少了 59%，平均车速则升高了 16%。随着防控水平的不断降低及居民居家隔离的解除，成都市交通活动水平逐渐恢复，到 3 月中下旬已基本恢复至疫情前的水平，是中国最早恢复至正常水平的大城市之一。

如图 6.11 所示，疫情防控时期的交通活动萎缩导致机动车污染物排放大幅削减，一级防控结束后污染物排放逐步开始回升，到 3 月底基本恢复至疫情前的水平。疫情的不同阶段反映了机动车排放在不同交通削减比例下的变化情况。例如，一级防控阶段成都三环内的机动车 CO、HC、NO_x、PM_{2.5} 和 CO₂ 的平均减排比例高达 64%、64%、54%、55% 和 62%；一级防控限制解除后，交通活动水平逐渐回升，3 月上旬机动车 CO、HC、NO_x、PM_{2.5} 和 CO₂ 的减排比例分别为 23%、23%、12%、14% 和 22%；至 3 月底机动车排放已基本恢复至疫情前平均水平。总体而言，NO_x 和 PM_{2.5} 减排比例略低于 CO、HC 和 CO₂，这是由于 NO_x 和 PM_{2.5} 在成都三环内的主要贡献车型为公共交通和货车，其流量削减率明显低于小客车车队。

▼ 日排放量(吨/天)

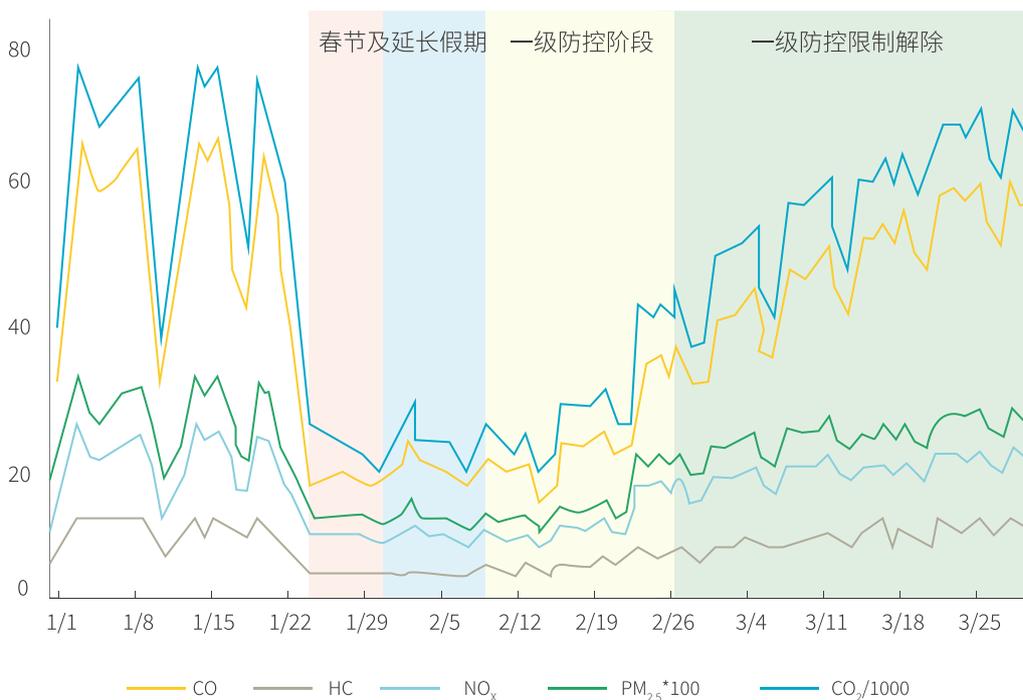


图6.11 | 2020年1月至3月成都三环内污染物排放量变化

专栏 6-1

疫情期间美国洛杉矶地区交通减排效益评估

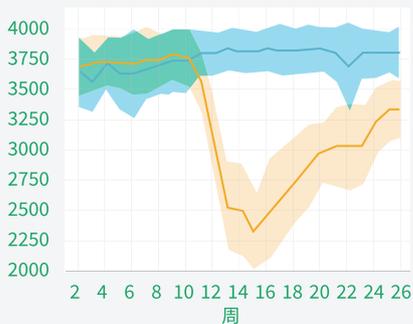
清华大学将上述的综合控制决策方法应用至加州，与加州理工团队合作开发了加州全路网交通排放动态模拟系统，并耦合机器学习模型构建了空气质量动态模拟方法，可实现气象、交通等要素与污染物浓度的快速响应，准确高效的评估了疫情期间洛杉矶地区交通减排及其空气质量改善效益，该成果发表于美国科学院院刊（PNAS, 2021）。

在疫情防控最严格的时期，洛杉矶地区客、货车流量分别下降了 37% 和 28%；交通 CO、HC、NO_x 和 PM_{2.5} 日总排放量分别削减了 38%、37%、35% 和 35%；交通活动水平的削减导致 NO₂ 和 PM_{2.5} 浓度分别下降了 2.9 ppb (-30%) 和 1.1 μg/m³ (-18%)，但最大 8 小时 O₃ 浓度上升了 2.1 ppb (5.7%)；其中货车贡献了 NO₂、PM_{2.5}、MDA8 O₃ 浓度变化的 61%、70% 和 82%。与成都相比，洛杉矶地区交通排放削减及空气质量变化比例均相对较低，疫情封锁措施对洛杉矶地区交通排放的影响程度相对较小，但影响持续时间更长，这与我国疫情防控力度更强直接相关。

基于交通大数据的机动车排放控制综合决策系统可实时动态追踪特殊情景或典型控制措施下的交通变化、排放削减效益，支持空气质量管理决策，可为世界各大城市移动源排放监管及空气质量管理决策提供科学支撑。

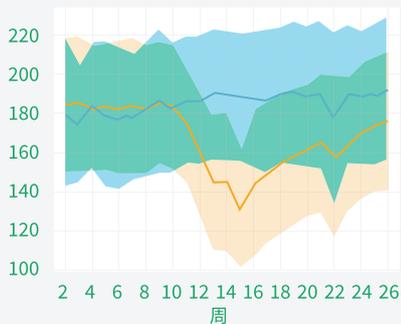
a. 总车流量

▼ 总车流 (辆/小时)



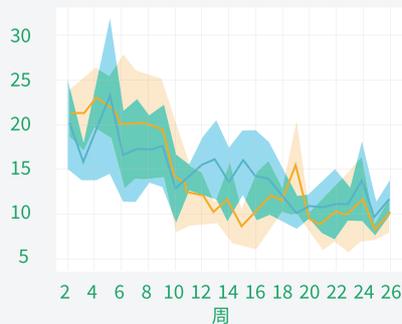
b. 货车流量

▼ 货车流量 (辆/小时)



c. NO₂观测浓度

▼ NO₂浓度 (ppb)



— 2019 — 2020

专栏图6-1 | 洛杉矶疫情期间和2019年同期交通流量及NO₂浓度对比

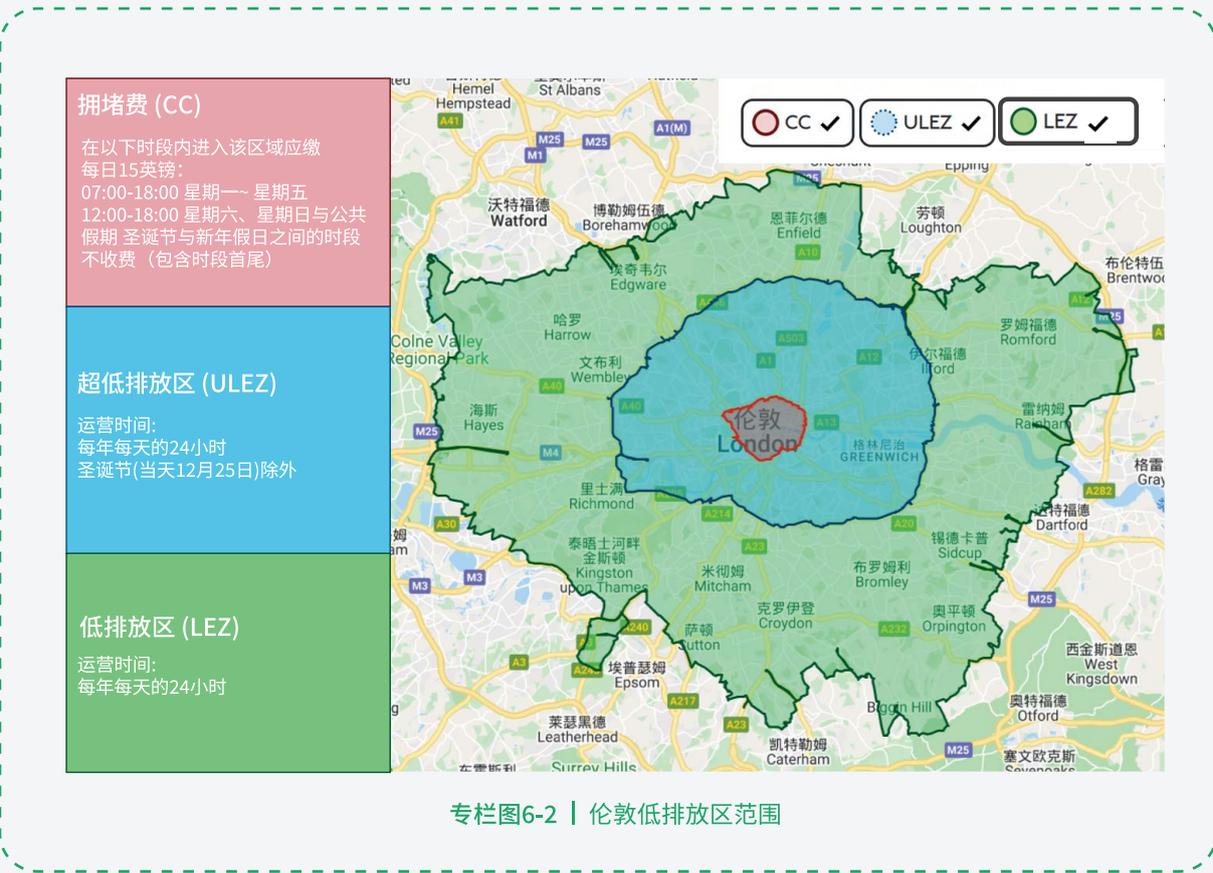
专栏 6-2

伦敦低排放区政策介绍

伦敦是世界上最早实施低排放区政策的城市，自 2003 年开始实施拥堵收费，2008 年开始实施低排放区政策，2019 年增设超低排放区（Ultra Low Emission Zone, ULEZ），对准入车辆设置更为严格的要求，并于 2021 年 10 月进一步扩大超低排放区范围（专栏图 6-2），凡是尾气不达标老旧机动车在相关区域内行驶，每车每天将缴纳 12.5 英镑（约合 110 元人民币）。

伦敦低排放区政策的实施依靠车牌自动识别系统实现对进入车辆的监察。卡口点位的相机捕捉到车辆的牌照信息后，与已注册车辆的数据库进行比对，来核验车辆是否满足准入条件，或者是否满足缴费要求。车主可在指定网站上完成缴费或绑定固定支付方式实现自动扣费，如果没有及时缴纳费用，罚金将翻倍。

拥堵收费和低排放区政策实施以来，伦敦的机动车保有量基本稳定，2010 年到 2020 年十年间年均增长率不到 0.3%；而当地居民绿色出行比例则越来越高，2019 年伦敦的居民步行、自行车、公共交通出行占比已经达到 63%。2020 年内伦敦地区（inner London）的道路边平均 NO₂ 浓度相对 2010 年下降了 40%，市中心的道路边 NO₂ 浓度下降 50%。低排放区的划定为减少伦敦交通源排放以及改善城市空气质量做出了重要贡献。



2 案例 2——低排放区政策的污染物协同减排效益评估

“低排放区”（Low Emission Zone, LEZ）是为促进区域空气质量改善，针对机动车等交通工具专门设定的污染物排放限制区。低排放区内特定的管制时间和范围内只允许符合规定内排放标准的车辆进入，对不符合规定的车辆予以禁行或者收取排污费。城市低排放区政策已成为不少国家和地区用于解决交通空气污染问题的重要措施，典型代表城市有伦敦、巴黎、斯德哥尔摩等。

国际经验表明，低排放区政策的实施对降低机动车使用强度、促进车队更新、缓解交通拥堵、降低大气污染有明显的改善效果，能够以较低的经济代价带来良好的环境提升。同时，低排放区的实施还需要辅助相应的智能交通技术手段，以确保对进入区域内车辆的高效识别和缴费支付等。

成都具有良好的智能交通系统建设基础，且正面临道路资源紧约束、交通需求快速增长、移动源污染排放居高不下的挑战，以“低排放区”为核心的交通管控措施可以科学引导更优的交通出行结构、提升运行效率进而全面降低交通源排放，有望成为未来成都缓解交通拥堵、改善空气质量的一味良药。

为此，成都市环境科学研究院联合清华大学、深圳市城市交通规划设计研究中心对成都实施低排放区政策的可行性及方案实施的预期效果开展了前期研究，并利用成都机动车排放控制综合决策系统对低排放区政策实施后的交通、环境影响进行预评估。研究在充分调研国内外典型城市低排区的政策经验基础上，结合成都实际情况，设计了成都的低排放区实施方案，设置了低排放区和超低排放区两种不同力度的管控区域（如图 6.12）。

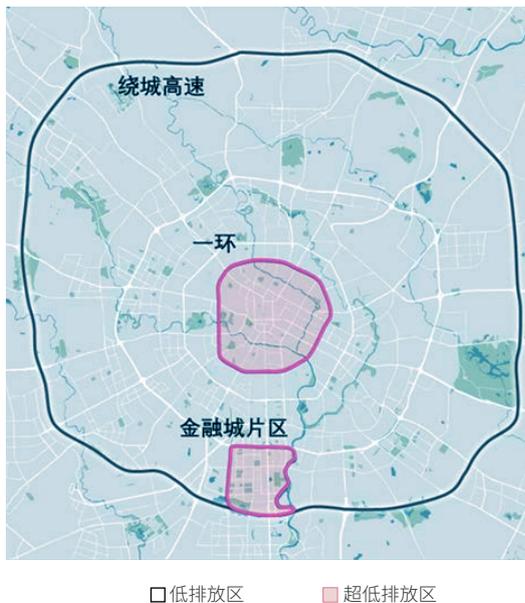


图6.12 | 成都市低排放区和超低排放区的情景设置

成都的城市公路网呈“环状+放射”形（图 6.13a），绕城高速内人口和交通均很密集。绕城高速内面积仅为成都全市面积的 3.5%，但人口占全市的 37%，机动化出行总量占全市的 48%，限制绕城通行预计将影响全市约四分之一的出行（图 6.13b），与伦敦低排区影响程度相当。在交通监测基础设施方面，目前绕城内的智能交通监测及执法设施布署超过 2,800 处（图 6.13c），监控设备具有事件监测、车速监测、车流监测等功能，已具备低排放区监管的技术能力。以绕城高速设置管控区，可达到 70% 以上的监测执行率，高于伦敦、巴黎等各大城市，基本满足低排放区的管控要

求。因此，综合出行强度、交通状况和设施基础等指标，设定绕城高速作为低排放区的边界（见图 6.12）。在限制车辆方面，成都国三及以上的机动车排放占比约为 20~30%，参考国际经验影响车辆在 10~20% 的原则，设定限制车辆为国三及以下柴油货车和国二及以下汽油小客车。

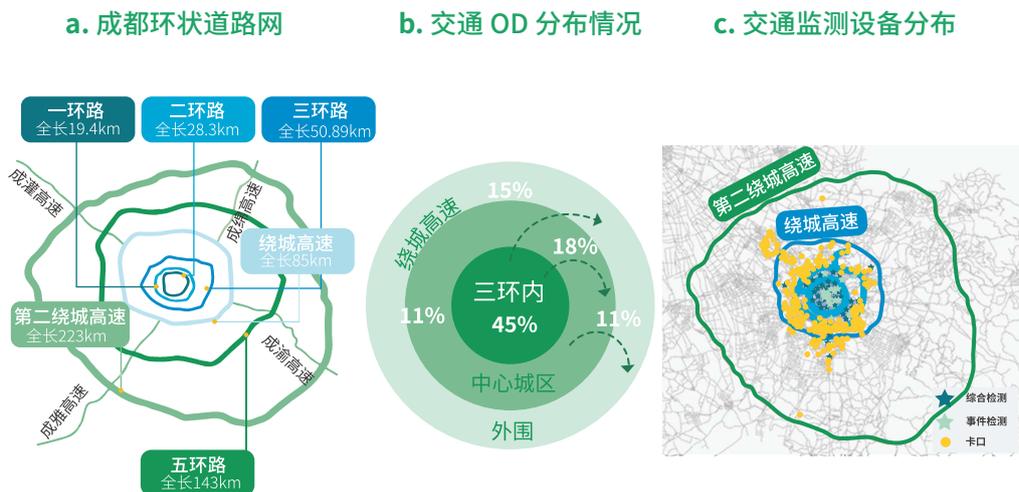


图6.13 | 成都的交通出行和监测设备分布情况

研究进一步在低排放区范围内增设超低排放区。超低排放区内执行更为严格的准入门槛，更加鼓励清洁能源出行以保障良好的空气质量，选址主要从交通运行、人口岗位、职住平衡、社会需求等方面进行考虑。从交通运行特征来看，早晚高峰时段成都的一环路全线与三环路南侧高新区（如金融城）的拥堵情况尤为严重，且一环路、高新南区金融城片区内医院、学校密集，学生、病人等群体对空气质量敏感程度更高，此类片区属于“高价值区域”，对空气质量有着较高需求。因此，设定成都一环内与金融城作为成都超低排放区的试点（见图 6.12）。结合成都机动车排放标准构成，按照国际通用的高标准限制、增加出行成本的原则，设定限制车辆为所有柴油货车、国三及以上的汽油小客车和轻型货车。

根据两个区域的特点，设置不同的拥堵费及准入机制：一环路为封闭式环状道路，道路条件较好，较宜采用收费准入制；金融城片区高峰商务出行较多，机动车出行比例更高，可考虑采用高峰期征收拥堵费的方式。

基于低排放区（绕城高速内）、超低排放区（一环、金融城）等区域的实际情况，各区域的具体交通管控政策总结如表 6.1。其中，低排放区的政策较为温和，超低排放区的政策影响较大。

表6.1 | 低排放区和超低排放区具体政策方案

区域	管控措施
绕城高速内 (低排放区)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 货车：国三及以下标准的柴油货车，限行时间全天； 2. 客车：国二及以下标准的小汽车，限行时间为全天； 3. 客车：国三标准的小汽车，限行时间为工作日高峰时段（7:00-9:00）、（17:30-19:00）。 4. 外地车辆：通过人工排查方式，与本地车同一标准限制，前三次警告，后续开始惩处。
一环路范围内 (超低排放区)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 货车：所有柴油货车禁止驶入； 2. 客车：国三及以下标准小汽车禁止驶入； 3. 停车费用起步费提高至 20-25 元； 4. 不满足准入标准的小汽车购买通行证或按天收费； 5. 外地车辆：通过人工排查方式，与本地车同一标准限制，前三次警告，后续开始惩处。
金融城片区内 (超低排放区)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 货车：所有柴油货车禁止驶入； 2. 客车：国三及以下标准小汽车禁止驶入； 3. 客车：国四及以上标准小汽车高峰期驾驶收费。收费时段 7:00-9:00、17:30-19:30； 4. 停车费用起步费提高至 20-25 元； 5. 外地车辆：通过人工排查方式，与本地车同一标准限制，前三次警告，后续开始惩处。

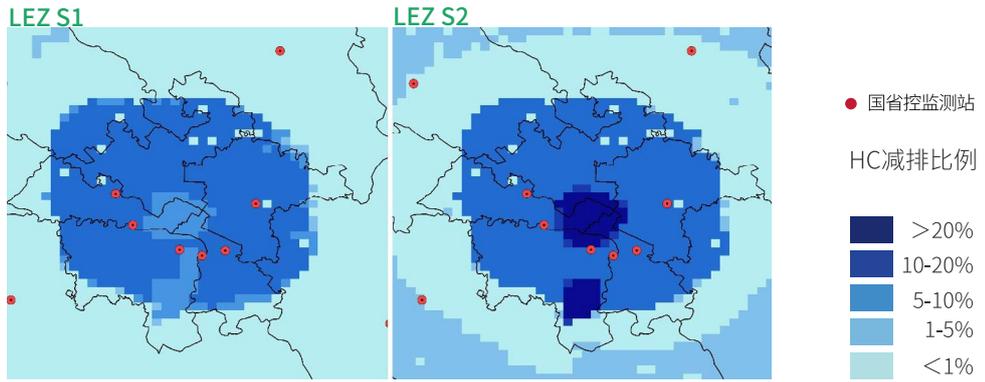
注：豁免车辆包括 1) 悬挂新能源汽车号牌的汽车；2) 持 C5 驾驶证的残疾人驾驶的残疾人专用汽车；3) 巡游出租车、公交车、军车、警车、消防救援车、救护车、工程抢险车以及洒水车、吸污车、垃圾车等环卫用车；4) 悬挂使馆号牌车辆及经批准临时入境外籍车辆；5) 法律法规规定的其他不受行驶线路行驶方向限制的车辆。

为多层次评估方案的实施效果，本研究设计了两个模拟情景。第一个情景为低排放区情景（LEZ S1），仅考虑将绕城高速内区域设置成低排放区；第二个情景为超低排放区情景（LEZ S2）：在绕城高速内低排放区基础上，同时增设一环内超低排放区和金融城超低排放区。

综合智能交通实时大数据和交通流仿真模拟，结果表明实施低排放区政策后，绕城高速内、一环、金融城区域的交通出行及机动车里程总量均有不同程度的下降。低排放区的交通活动水平下降幅度在 5~7%，超低排放区内下降比例在 7~14%。进一步应用机动车排放综合决策系统进行排放模拟评估，可获得不同情景下绕城高速内机动车排放削减比例的高分辨率的空间分布（如图 6.14）。结果表明，低排放区情景（LEZ-S1）下，可实现绕城高速区域内 9~12% 的 HC 减排和 8~12% NO_x 减排，但一环内和金融城片区由于交通拥堵仍未彻底缓解，减排力度略低于其他区域；而在更严格的超低排放区情景（LEZ-S2）下，在一环内和金融城区域内可实现 24~29% 的 HC 减排和高达 39~70% NO_x 减排效益。

应用 RapidAir 模型评估了低排放区实施后交通排放变化导致的道路边 NO₂ 浓度改善效益（如图 6.15）。对于低排放区（LEZ-S1），机动车 NO_x 排放削减能够带来 6~9% 的 NO₂ 浓度削减；而在增设超低排放区（LEZ-S2）后，一环和金融城区域内的道路交通环境的浓度削减效益分别可达 23% 和 38%。

a. HC



b. NO_x

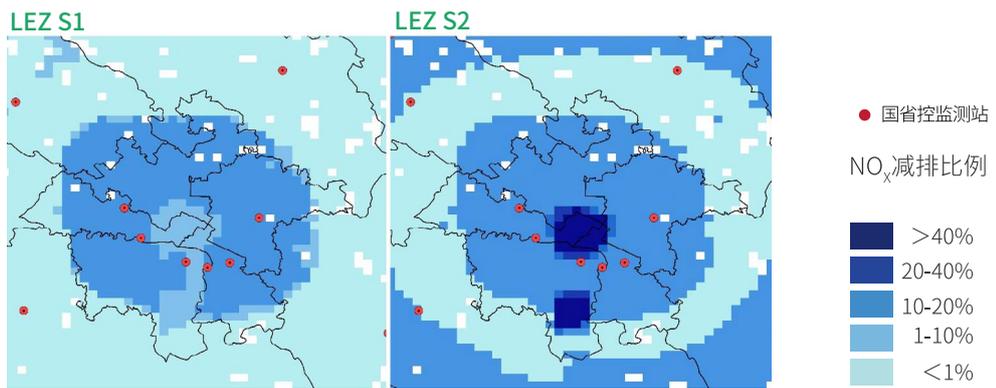


图6.14 | 不同情景下绕城高速内机动车排放削减比例的空间分布

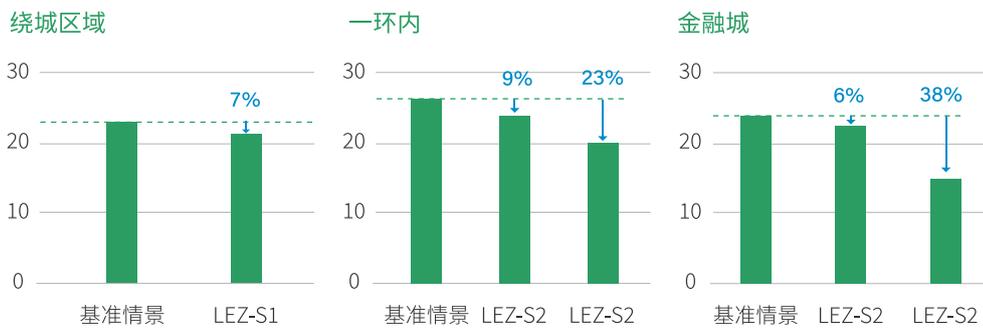
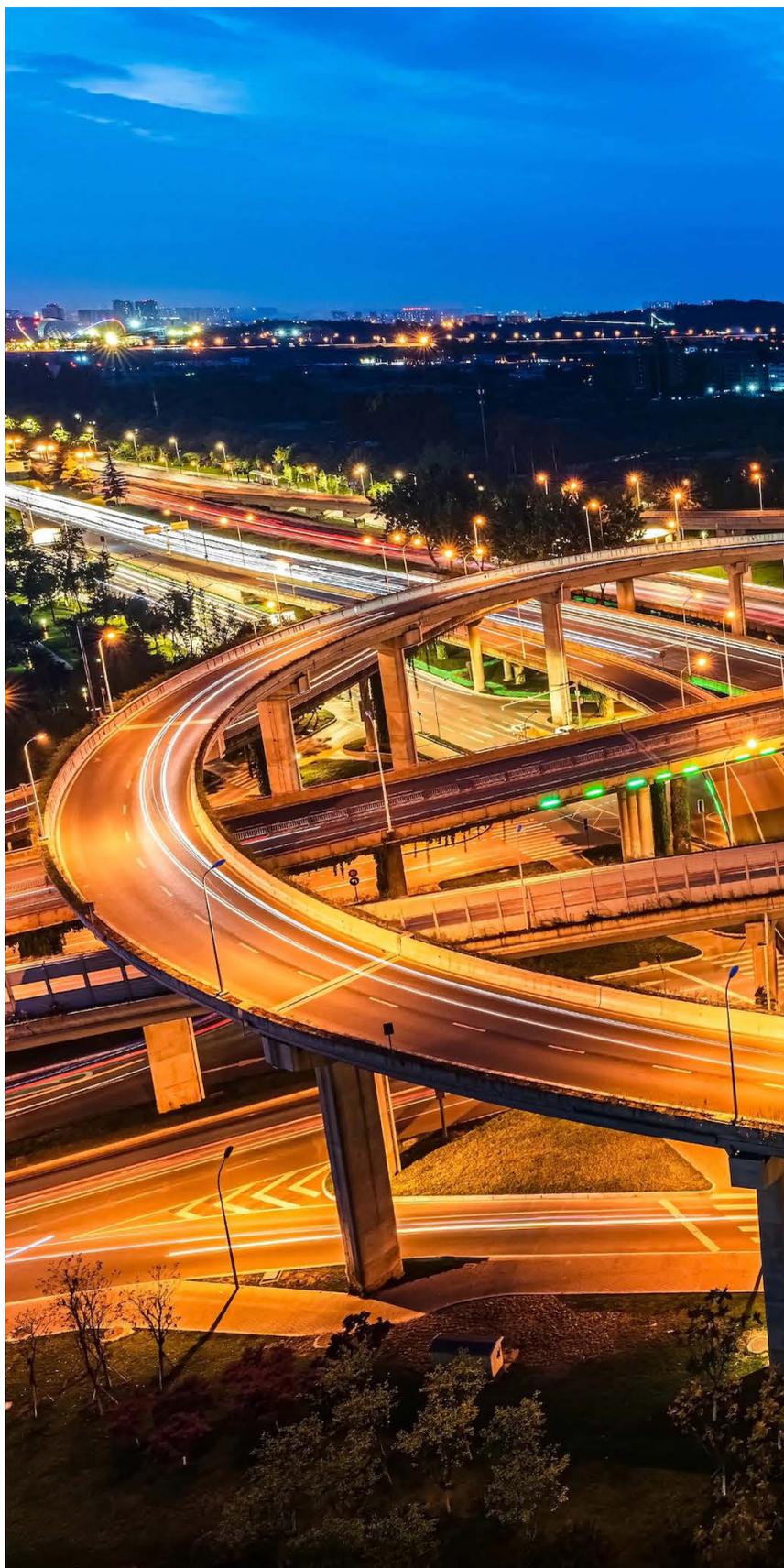


图6.15 | NO₂ 浓度平均削减效益 (µg/m³)

低排放区政策的实施可以显著降低区域内的交通活动水平和机动车污染物排放，进而改善城市空气质量。此外，将低排放区政策与新能源汽车推广、运输结构调整等综合考虑，可进一步拓展为“绿色低碳示范区”，实现污染物和 CO₂ 协同深度减排，这或将成为未来大城市绿色低碳交通系统的一个重要方向。但需要注意的是，低排放区政策从研究到落地是一项系统工程，需要事前法律和配套体系保障、事中各环节精准设置、事后动态跟踪评估。另外，精准的车辆识别和排放核算系统是保证政策准确性与权威性的重要前提；大力发展公共交通、改善慢行环境，提高居民在示范区内的出行便利，最大限度降低对区域内居民生活的影响，才能保障低排放区政策的顺利落地推行。





图片来源:Pixabay

07

7.1 总结	166
7.2 展望	172

总结与展望

7.1

总结

随着社会经济的持续快速发展和城市化进程的不断深化，中国的汽车市场经历了长达 30 年的高速增长，成为了中国经济奇迹的一个缩影。2009 年，中国成为全球汽车新车销量第一的国家；2013 年，中国成为全球首个新车销量突破 2000 万辆的国家；2021 年，中国超越美国，成为全球汽车保有量最大的国家。中国快速的机动化进程在给国家和人民带来持续的产业发展、社会进步、出行便利等一系列好处的同时，也给空气质量、人群健康、能源安全和气候变化带来了严重的挑战。

早在上世纪 90 年代中期,中国就已经清醒地意识到今后机动车排放将带来的空气污染问题,并寻求借鉴欧美发达国家先进的控制经验。2000 年,中国实施国一轻型车新车排放标准,正式拉开了国家层面系统控制机动车排放的帷幕。过去 20 年间,中国实施了逐步加严的新车和油品标准、加强在用车监管、推广新能源汽车和交通管控等一系列措施,构建起“车-油-路”一体化的机动车排放综合控制体系。目前,中国已全面实施了第六阶段的新车排放标准和油品标准,初步构建了融合多种先进技术手段的实际道路在用监管体系,起步交通运输结构和交通能源结构调整,并已成为新能源汽车推广数量最多的国家。中国正逐步缩小与欧美等发达国家在机动车排放控制水平上的差距,并在机动车保有量快速增长的同时实现了污染物排放的有效控制和削减,即“机动车增长与污染排放的脱钩”。

大城市为推动中国的机动车排放控制进程发挥了至关重要的示范和引领作用。由于机动车在城市高度聚集和高频使用的特点,大城市的决策者有更强的动力制定更严格的政策措施来减少机动车排放进而改善城市空气质量。同时,大城市率先开展的控制实践经验也有助于国家层面的控制政策更快和更有效地实施。例如,北京 1997 年率先推广无铅汽油,1999 年实施轻型汽油车国一排放标准,均在 1~2 年后被推广至全国范围实施,并成为过去 20 年车-油同步控制的典范;上海率先确立了公共交通优先发展的战略,并积极开展了车用能源多样化的探索和示范应用;深圳成为全球首个公交和出租车队全面电动化的城市,构建了健全的新能源汽车产业布局;成都开发了基于智能交通大数据的机动车排放综合决策系统,实现更精细化的交通排放监管与决策。这些城市结合自身特点开展了各有特色的机动车排放控制实践,并在实践中推动中国机动车排放污染综合控制体系的不断完善,也为其他城市探索绿色低碳的交通发展路径提供了借鉴。

总结北京、上海、深圳和成都四大城市和全国 20 年机动车污染排放控制历程的重要经验如下：

一、车油同步并轨，保障新车控制持续加严

实施更严格的机动车排放标准来加强新车污染排放控制是机动车排放控制体系中的核心内容,也是过去 20 年中国各大城市机动车排放控制减排效益的最大贡献者。1999 年 1 月,北京成为中国第一个实施轻型汽油车国一排放标准(相当于欧 1 排放标准)的城市。此后,北京在新车排放控制方面一直处于国内领先地位,比全国提前实施了轻型汽油车和重型柴油车等车型的多个阶段的新车排放标准,为全国持续加严新车排放标准提供了宝贵的经验。2020 年,北京先于全国正式实施轻型车与重型车的国六标准,已与世界上最严格法规接轨。新车标准的持续加严,既推动了汽车产业持续的升级换代,也直接加快了庞大车队的整体清洁化进程。

但是从北京获得的更重要的经验是：只有同步实施油品和车辆标准，才能使新车排放标准的实施获得最大减排效益。北京早在 1990 年代就开始提高车用油品质量，逐步实现了车用油品的无铅化（1998 年）和低硫化（2012 年）。在全国由于油品标准滞后而多次推迟新车标准的背景下，北京领先全国实施了第二到第五阶段油品标准，确保了油品标准和新车排放标准的同步实施，为推动全国逐步实现“车油一体化”进程（例如国五阶段的“车油同步”和国六阶段的“三油并轨”）起到了良好的示范作用。

新车排放标准和油品质量标准的同步加严对北京的机动车污染物减排发挥了最主要的贡献。在过去 20 年的北京机动车总减排效益中，车油同步对 CO、HC、NO_x、PM_{2.5} 分别贡献了高达 74%、73%、66%、55% 的减排量。

二、多种先进技术融合，强化在用车排放监管

在用车实际道路排放往往显著高于排放限值，因此，对庞大的在用车队进行有效监管，始终是机动车排放控制的重点和难点。北京等城市经过 20 年的实践，初步形成了多技术手段融合的在用车检验方法体系，并建立起常态化的环保监管机制。

通过应用更先进的检测技术，以持续改进在用车尾气检测的测试方法，这是北京强化 I/M 制度的核心举措。1999 年，北京修正了双怠速测试方法，对国一汽油新车执行不同的限值标准；2003 年开始全面实施更严格的稳态加载测试工况方法（ASM），此后随着新车排放标准的加严不断更新在用车排放检测限值。对于在用柴油车，北京于 2003 年执行加载减速烟度测试法（LugDown），并加严了 LugDown 测试的烟度排放限值。上述更先进的检测技术方法的实施和检测限值的持续加严，有力的提升了对高排放车的识别能力和检测准确性。

近年来，北京逐步强化对在用车的实际道路排放监管，积极推进先进监管技术的应用和监管平台的建设。先后探索应用了包括道路遥感测试、道路车载测试、远程在线车载诊断等一系列的先进监管技术。特别是，针对重型柴油车实际道路 NO_x 排放严重超标这一当今国际在用车控制领域的最大挑战，北京率先实施了一系列重型车远程监管法规和标准，成为全球首个开始实践远程 OBD 联网监管的城市。2018 年以来北京相继试点了国四、国五在用重型车的 OBD 改造，并制订了原厂加装 OBD 远程排放监控的地方标准和实施条例，提前实施满足国六标准的 OBD 加装和数据传输要求，目前已初步形成了联网十万辆量级的重型在用车排放在线监管平台。

采用强有力且高效的 OBD 远程在线监管，使得新京五重型柴油车 NO_x 排放水平比无 OBD 监控的国五车排放降低了约 50~70%，这导致近年来北京重型车队 NO_x 排放持续大幅下降，为北京 PM_{2.5} 和 NO₂ 浓度持续降低做出了重要的贡献。2020 年北京柴油货车车队的 NO_x 排放相比

2017年削减了43%，超过美国加州柴油车队同期的减排幅度（~37%）。这一成果也实实在在体现在空气质量的改善上，同期北京NO₂浓度削减37%，NO₂年均浓度已于2019年首次达标。

三、坚持城市公共交通优先战略，推动货运结构调整优化

在城市化进程中重塑公共交通体系，鼓励绿色可持续的城市出行模式是城市发展绿色低碳交通系统的根本之策。上海、北京等城市高度重视公共交通体系和慢行交通体系的优化，通过高效、绿色、低碳的交通模式转变应对日益上升的交通出行需求压力。

上海在全国率先确立了“公共交通优先”作为城市交通的核心发展战略，依托城市规划和交通规划制定了一系列发展轨道交通、优化公交线路、鼓励公共交通和慢行交通出行等相关政策措施，结合私人小汽车上牌摇号的限购政策，使上海交通出行结构得到显著优化，交通环境空气质量得到显著改善。截至2020年，上海公共交通出行占比已经提升到47%；轨道交通运营里程超过700公里，较2000年增加了10倍；公交专用道总长500公里，中心城区公交站点300米半径全覆盖；上海千人汽车保有量控制在180辆左右，为国内类似人均GDP大城市的最低水平。20年的坚守，上海成功探索出了一条将公共交通优先战略与传统机动车排放综合控制相结合的绿色低碳交通发展路径。

中国货运结构高度依赖公路运输。“打赢蓝天保卫战”和“推动运输结构调整”三年行动计划明确将调整运输结构作为治理柴油货车污染防治攻坚战的关键任务之一。推进大宗货物运输“公转铁、公转水”为主攻方向，多部门实施了配套的经济措施和基础设施建设的支持政策。三年行动计划实施以来，货物运输结构公路一家独大的局面开始得到缓解：铁路货运量占比开始止跌反弹，2017-2020年均增幅接近7%；公路货运量占比由2017年的78%降至2020年的74%；环渤海、长三角等地区沿海港口的大宗货物运输结构明显优化。但与1980年铁路货运占比超过30%相比，运输结构的调整优化才刚刚起步，任重道远。

四、全方位激励新能源汽车发展，推动汽车迈向道路零排放

新能源汽车推广具有显著的减污降碳协同效益，是中国构建清洁高效的现代能源体系和产业绿色低碳转型的关键抓手，也是未来实现“美丽中国”和“碳中和”发展目标的关键举措。

深圳是中国首批开展新能源汽车示范和推广的城市之一，连续六年被评为“世界电动汽车之都”。目前新能源汽车推广已接近40万辆，占深圳机动车总保有量的11%，电动化率在国内大城市中处于领先；是全球首个实现了公交和出租车队全面电动化的城市，并连续五年成为全

球新能源电动货车保有量最大的城市。

深圳电动汽车的飞速发展得益于该城市完善的配套体系建设和健全的新能源汽车产业布局。10 余年来，深圳陆续出台了新能源汽车发展直接相关的政策文件超过 30 项，从发展规划、标准规范、补贴激励、基础设施等多个方面形成了完善的配套服务和支撑保障体系。例如，深圳制定了多样化的补贴方式与激励措施，涵盖新能源车购置、使用、基础设施和电池回收全生命周期，充分发挥了经济激励对刺激新能源车发展的巨大作用。于此同时，深圳高度重视新能源产业布局，聚集了 2000 多家新能源汽车相关企业，形成了完善的新能源汽车产业链，成为了全球范围内新能源汽车企业最集中的城市之一。

深圳新能源汽车快速发展成为保障“深圳蓝”目标实现的重要助力。2014 年以来，深圳 NO₂ 浓度大幅改善，其中 35% 的效益来自于交通电动化。随着今后更大规模的新能源车推广，将持续为深圳协同控制 PM_{2.5} 和峰值 O₃ 污染带来可观的空气质量改善和人群健康效益，同时对降低道路交通生命周期温室气体排放贡献也日趋显著。

五、鼓励车用能源多样化尝试，积极探索生物燃料的示范推广

生物燃料是中国交通能源多样化、清洁化和低碳化的重要技术路径之一。过去 20 年，中国积极开展了车用生物燃料的试点探索。为了调整能源结构、改善生态环境质量、降低 CO₂ 排放，更好地应对高存量陈化粮处理问题，生物燃料乙醇汽油近年来不断发展和推广。2017 年发改委等十五部委联合发文推广乙醇汽油，并确定了生物乙醇产业总体布局。目前中国已有 15 个省份全部或者部分地市封闭销售 E10 乙醇汽油，生物乙醇推广规模近 300 万吨。

为妥善解决餐厨废弃油脂（“地沟油”）回流餐桌导致的食品安全问题，上海通过建立“收、运、储、调、用”全产业链闭环治理模式，在公交和货车等重型车辆上开展了 B5 和 B10 生物柴油的规模化应用。目前，上海餐厨废弃油脂日收集量已达 200 余吨，每年 B100 生物柴油产量已超 5 万吨，可替代接近 1% 的上海交通柴油消耗，形成了一定的节能减排效益，为城市车用能源多样化提供了有益的经验。

需要指出的是，与美国、巴西等国相比，我国生物燃料推广的规模还远远落后。2020 年，美国和巴西生物乙醇的产量已经分别达到 4160 万吨和 2430 万吨，欧盟生物柴油的产量也已达到 1360 万吨。随着碳达峰和碳中和目标的提出，中国在生物燃料的研发和推广亟需进一步加大力度。

六、打造智能交通大数据系统，支撑机动车排放精准管控

发展智能交通技术，基于交通大数据实现城市交通排放控制决策的精细化、智慧化转型是一个重要的技术发展趋势。作为一座不实施限牌、限购政策的城市，成都致力于通过智能交通管控的方式解决交通和环境问题。近年来，成都高度重视发展智能交通技术，建设了高密度的交通监测网络，中心城区部署的4000余个交通监控卡口可实时监测道路车流活动水平并匹配详细的车辆信息。进一步融合全路网交通流机器学习模拟方法，开发了实时动态的机动车排放综合决策系统。该系统平台可实现全路网/单道路车流量、排放量的连续72小时实时动态展示，以及短期和中长期排放控制决策效益分析，极大提高了交通排放监管的时效性、精细度和智能化。在成都世警会空气质量保障、新冠疫情期间交通排放动态跟踪、低排放区政策规划等案例中得到了成功的应用，为成都的机动车排放控制精准决策提供了重要技术支持。

通过对成都实施低排放区政策的可行性及预期效果的前期研究表明，低排放区政策的实施可以显著降低区域内的交通活动水平和机动车污染物排放，进而改善城市空气质量。此外，将低排放区政策与新能源汽车推广、运输结构调整等综合考虑，可进一步拓展为“绿色低碳示范区”，实现污染物和CO₂协同深度减排，这或将成为未来大城市绿色低碳交通系统的一个重要方向。但需要注意的是，低排放区政策从研究到落地是一项系统工程，需要事前法律和配套体系保障、事中各环节精准设置、事后动态跟踪评估。这一利用智能交通大数据系统实现精细化交通排放监管与决策的经验，将为其他同样面临快速机动化趋势的城市提供新的解决思路。

7.2

展望

在取得上述骄人成绩的基础上，我们需要清醒的看到中国未来的机动车排放控制仍然任重道远。而且，未来中国汽车市场仍将保持持续稳定的增长趋势，预计 2030 年汽车保有总量将达到 4~5 亿辆的巨大规模。在如此庞大规模的汽车保有体量下，构建高效的可持续的绿色低碳交通体系是未来中国道路交通发展的核心挑战。

一、深度减排是持续改善空气质量和协同应对气候变化的关键

世界卫生组织 2021 年修订了空气质量标准,进一步加严 PM_{2.5}、O₃ 和 NO₂ 等污染物的指导值。本研究聚焦的北京、上海、深圳和成都四座城市年均 PM_{2.5} 浓度大致在 20~35 μg/m³, 仍显著高于纽约、伦敦和东京等国际大都市水平 (10 μg/m³ 左右), 并远超 WHO 最新指导值 (5 μg/m³)。O₃ 浓度超标问题日益凸显, 意味着机动车排放控制的科学性和精准性仍需强化。同样面临 O₃ 超标的美国加州地区明确将移动源 NO_x 深度减排作为今后的重要政策方向。十四五期间中国明确将 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制作为空气质量管理的重点工作, 2035 年美丽中国建设目标则明确了推动空气质量稳步提升和基本消除重污染天气的任务。因此, 推动道路交通的持续深度减排是实现近中期空气质量改善的关键工作, 也是推动中国大城市空气质量与世界一流城市尽快接轨的核心举措。

中国提出了 CO₂ 排放力争于 2030 年前达峰, 并努力争取 2060 年前实现碳中和的宏伟目标。中国交通部门过去 10 年 CO₂ 排放年均增加 6%, 是增速最快的主要部门; 其中道路机动车排放贡献占比高达 80% 左右。在当前以传统汽柴油为主的燃料结构和以道路交通为主的交通结构下, 交通部门需要实行更加积极的绿色低碳转型政策, 支撑中国实现 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和的目标。未来还需进一步提升交通工具能效, 持续降低燃油车能耗和 CO₂ 排放; 加速运输结构优化, 促进客运结构向高铁和公共交通转移、货运结构推进“公转铁”和“公转水”; 发展新能源和替代燃料技术, 提高电力、氢能、低碳生物燃料等的渗透速度。因此, 2060 碳中和目标将长期引领中国机动车的能效提升、结构优化和清洁能源转型, 并将对进一步削减大气污染物排放和改善空气质量带来巨大的协同效益。

二、发挥标准和技术引领作用, 持续加严燃油车排放控制

历经半个多世纪的持续强化控制, 美国加州洛杉矶地区仍然面临 O₃ 超标的空气污染问题, 加州明确将移动源 NO_x 深度减排作为今后的重要政策方向。加州空气资源委员会 (CARB) 已通过下一阶段的重型车 NO_x 超低排放限值, 该限值比国六限值加严 90% 以上。欧盟汽车排放法规咨询顾问组也提出了对重型车欧七 NO_x 排放限值加严 90% 的建议。此外, 未来的排放标准将更突显技术中立和燃料中立的原则, 并重点监管车辆在实际道路的排放表现。除了加严传统的大气污染物 (如 NO_x、THC/NMHC) 的排放限值, 将进一步拓展污染物的监管种类, 并协同温室气体排放控制。例如, 在排放标准中考虑对 NH₃、HCHO 等高活性大气前体物的监管, 制定包括 CH₄、N₂O 等非 CO₂ 类温室气体的排放限值。

在未来更加严格的排放标准引领下, 汽车和发动机企业面临的既是挑战又是发展机遇, 需要研发超低排放的更高效发动机和后处理控制技术。例如, 在满足超低 NO_x 排放标准方面, 紧

耦合 SCR+排气热管理和 PNA+SCR 两条技术线路已被提出。在未来碳达峰和碳中和目标的引领下，除了持续坚定的推广新能源汽车发展和运输结构调整优化，传统燃油车实际道路能效的提升和 CO₂ 排放持续下降也是关键的技术路径之一。因此，大力发展轻型车的混合动力和轻量化技术，重型车发动机效率提升和停缸技术、排气能源管理和动力总成电气化技术，引入低碳的生物燃料技术等等，将是今后降低传统燃油车 CO₂ 排放的关键。

三、交通能源清洁低碳转型，推动汽车全产业链绿色发展

交通能源清洁低碳转型是实现多污染物控制和 CO₂ 协同减排的治本之策。在轻型乘用车领域，电动汽车相比汽油车已具备显著的生命周期 CO₂ 减排优势。随着电力清洁化的深入推进，轻型电动汽车生命周期减碳优势将更加突出。在新能源车补贴逐步退坡的过程中，发挥轻型电动汽车使用过程的成本优势并实现更大推广规模，是中国交通尽快实现碳达峰的关键举措。在商用车领域，大幅推广新能源汽车是交通部门中长期实现碳中和的难点和重大挑战所在。应当看到各类交通场景的商用车行驶特征存在显著差异，对新能源汽车也存在差异化的技术需求，应当尽快开展细分交通场景的环境和成本效益综合研究，明晰对应使用场景下具有优势的新能源车辆技术选择。目前，中国商用车新能源车推广主要集中在城市公交车队和轻中型货车领域，重型货车未来技术选择还存在不确定性。应当统筹经济成本和减排潜力，对各类重型货车宜电宜氢、相应基础设施方案和发展节点做出优化判断。中国已经在重点区域开展了燃料电池汽车示范计划，应当结合该示范项目及时跟进，科学评估氢燃料电池车生命周期 CO₂ 和空气污染物排放，并对氢能基础设施健康有序发展给出规范和意见。

机动车和燃料的生产和使用涉及多个行业、多个部门，应当通过车辆和燃料终端产品的生命周期减排带动上游相关产业（如电池、钢铁、铝等）的协同绿色发展。应统筹能源链、产业链和供应链的数据融合，构建区域和城市层面新能源汽车和低碳清洁车用燃料的全生命周期评估平台，持续推动新能源汽车减污降碳效益的深化和低碳生物燃料技术的发展和普及。完善能源和交通系统的深度耦合，推进新能源汽车基础设施的智慧发展，探索换电网络和智慧充电等能源系统耦合方式，优化新能源汽车使用的便利性和减排潜力。

四、提升基础建设和服务能力，促进绿色出行和货运结构调整

中国的大中城市人口高度聚集，通过积极发展公共交通，一定程度上遏制了交通拥堵加剧的势头，但城市拥堵和交通污染问题仍然严峻，构建绿色智能的交通出行体系是未来城市可持续发展的重点和难点。应继续坚持“公交优先、慢行优先、绿色优先”的理念，调整城市交通出行结构向低能耗、低排放、高效率的交通方式转变，加强公共交通建设和运行效率提升，完

善慢速交通出行体验,倡导居民绿色出行。借助大数据和车联网技术构建智慧公交系统,实现“人-车-路-站-云”协同,合理规划公交运行路线,精准引导停靠站、信号控制优先放行等功能,多维度提升公共交通的服务水平和运行效率;打造科学完善的慢行交通系统,设置慢行交通专用路线和安全保障设施建设,全面提升骑行环境品质,提高慢行交通的吸引力和参与度;建立碳普惠等低碳激励机制,充分调动居民的绿色出行积极性,积极引导出行方式实现绿色、环保、低碳、健康转变。

中国重点区域和行业的运输结构调整工作起步较晚,在缓解了公路运输一家独大局面的同时,也暴露了运输结构调整面临的严峻挑战。首先,目前“门到门”公路运价仍明显低于铁路运价,尤其是在中短距离运输;其次,部分区域铁路集疏运能力不足,铁路专用线短缺、建设进度滞后、建设投入和使用成本较高,铁路货运服务水平仍亟待提升。因此,加快基础建设、提升服务水平和创新服务模式是推进货物运输结构调整的关键。今后要提升多式联运承载能力和衔接水平,基本形成大宗货物及集装箱中长距离运输以铁路和水路为主、短距离运输优先采用皮带廊道和新能源车船的发展格局。根据区域产业特点,摸清货物的产地和消费地,制定相适应的货运规划和大宗物资“公转铁、公转水”计划。例如,推进京津冀及周边地区、晋陕蒙煤炭主产区运输公转铁;加快长三角地区、粤港澳大湾区铁水联运和江海联运发展。

五、物联网 + 大数据时代技术创新,探索排放智慧管理新路径

未来机动车污染物和温室气体的深度减排对车辆排放精准感知和路网排放的实时监测和智能管控提出了重大需求。以 OBD 远程监控和路网交通大数据排放清单等技术为代表的“精准感知 + 大数据智能监管”将在今后机动车排放智慧化管理中发挥更加重要的作用。上述大数据技术除了用于污染排放监管,还能提供燃料消耗、车辆工况和运行轨迹等丰富信息,可有力支撑重点区域/城市和重点车队污染物和 CO₂ 排放协同管控,同时为新能源车推广、绿色交通出行、货运结构转型等重大任务提供科学决策支持。

智能化和网联化是未来车辆技术发展的大趋势。在数字中国的战略背景下,道路交通系统中的智能网联汽车和新型道路基础设施将成为大数据的产生者,也将成为大数据的受益者。在 5G、人工智能、大数据、云计算等新技术的融合促进下,城市将有望打造绿色、低碳、高效、智能的全新交通运行模式,形成车车互通、车路协同、车云一体的全方位监管和交通优化体系。现有“感知-决策”平台将逐步向“数字化、网联化、智能化”延伸发展,在精准管控的基础上,进一步实现智能路线规划、出行引导,全面优化提升交通效率,为改善空气质量和实现双碳目标提供智慧路径。

A scenic landscape featuring a vast blue sky filled with soft, white clouds. In the lower portion of the image, a range of mountains is visible, partially shrouded in a light mist or fog. The overall atmosphere is serene and clean, with a color palette dominated by various shades of blue and white.

在实现美丽中国和碳中和的征途上，中国的城市需要以优质生态环境为导向，协同控制交通污染物和温室气体排放，实现交通行业的绿色、低碳和可持续发展。北京、上海、深圳和成都作为机动车排放控制的排头兵和探路者，他们今后的努力和发展方向，将为中国和世界其他城市持续提供有益的经验。



照片来源: Pixabay

中国大城市机动车排放控制 20年历程回顾与展望

A Retrospective and Prospective Study on
20 Years' Mobile Source Emissions Control in Megacities of China