

迈向更严格的环境空气质量标准 “十五五” 机动车减排展望

郝吉明、吴烨、张少君、吴潇萌
清华大学环境学院

CONTENTS

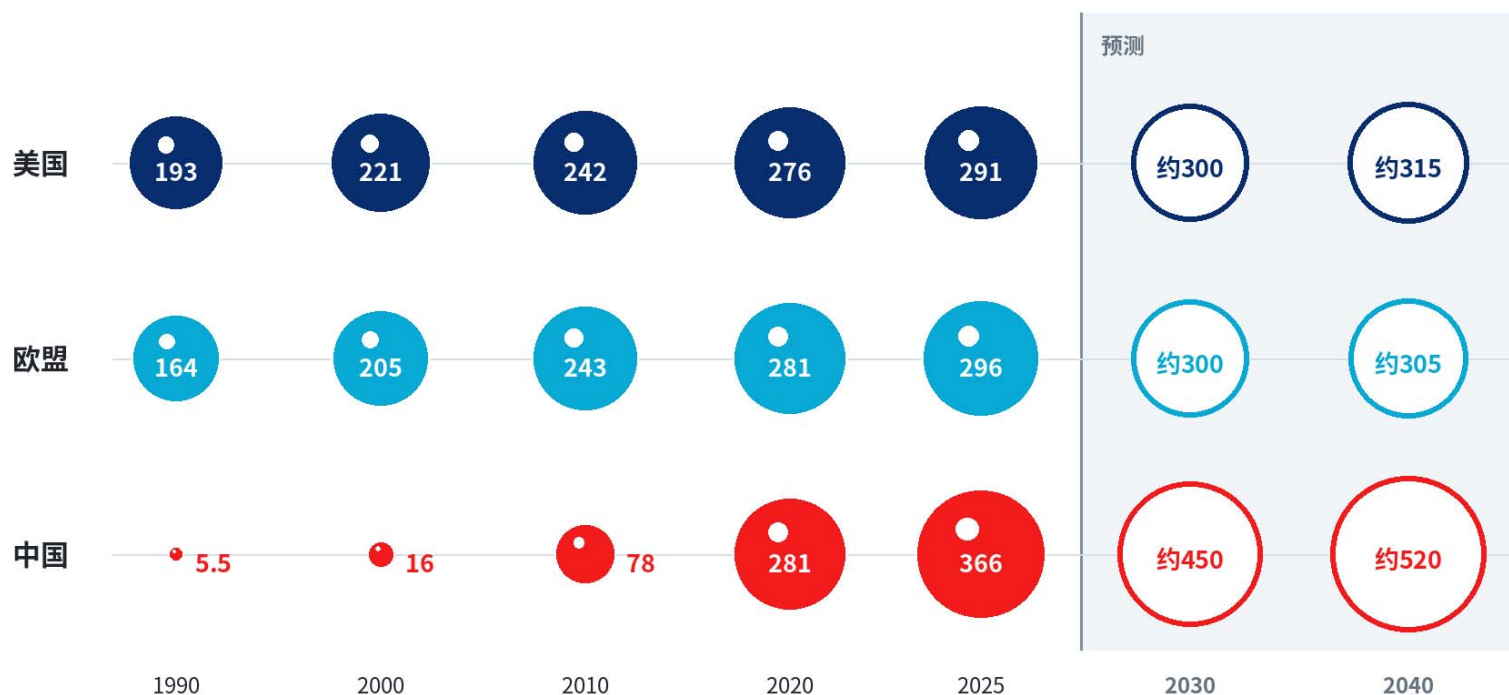
目录

- 01 中国机动车排放控制历程二十年
- 02 “十五五”时期的新挑战
- 03 典型案例分享
- 04 展望

中国汽车保有量在过去20年间快速增长

- 2009年，中国首次成为全球最大的汽车销量市场，2020年成为汽车保有量最大的国家
- 2021年，中国汽车保有量突破3亿（年均增长15%），是**全球唯一一个超过3亿的国家**
- 到2025年，中国千人均汽车保有量达261辆/千人，美国850辆/千人，欧盟670辆/千人

中、美、欧汽车保有量比较 单位：百万辆



数据来源：国家统计局、美国FHWA/EIA、欧盟委员会

“车-油-路” 一体的机动车排放综合控制体系

- 20多年来，中国通过持续加严新车标准、油品标准、实施在用车和交通管控措施，已形成 **“车-油-路” 一体的机动车排放综合控制体系**

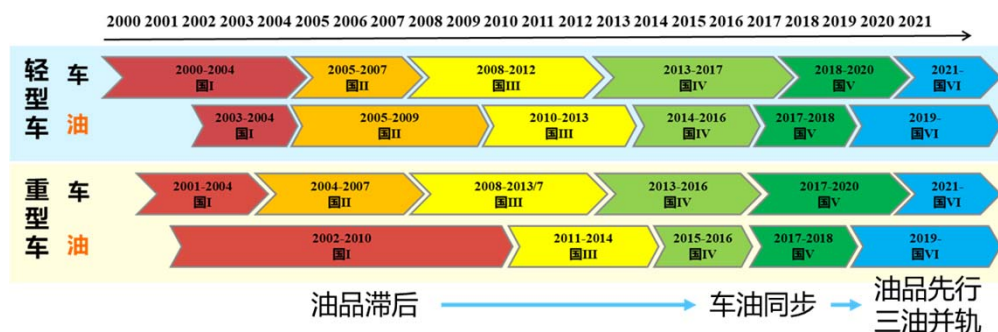


- 打赢蓝天保卫战三年行动计划
- 柴油货车污染治理行动计划
- 推进运输结构调整三年行动计划
-

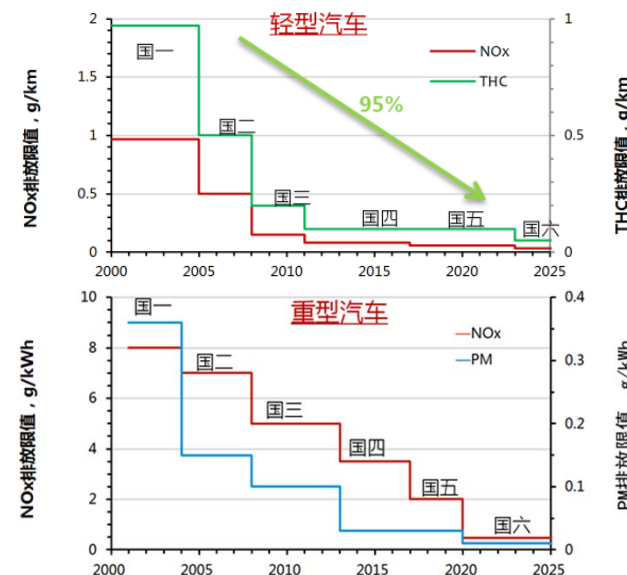
车油同步并轨，保障新车控制持续加严

- 加强新车排放控制是机动车排放控制体系中的核心内容
 - 国六与国一相比，单车污染物排放降幅90%以上
 - 国七和欧美新一轮排放标准持续加严，限值进一步大幅收紧
- “车油同步” 是保证新车标准加严减排效果的关键前提
 - 含硫量逐渐降低至<10 ppm（低硫柴油供应的滞后，曾经严重影响了柴油车防治污染的进展）
 - 开展车用生物燃料与乙醇混合汽油（E10）等试点；然而，生物燃料在中国的推广规模仍较低

中国新车和油品标准实施进程



新车标准持续加严



中国、美国、巴西欧盟生物燃料推广对比

▼ 2020年产量 (百万吨)



多种先进技术融合，强化在用车排放监管

- 多技术手段融合的在用车检验方法体系（I/M）：包括排放年检、道路排放抽检、车载测试、道路遥感等多技术手段
- 实施**OBD远程监控**强化在用车监管，未来还需**融合跟车监测**等先进排放感知技术、构建**人工智能驱动的排放监管智能体**，提升高排放车辆精准识别和闭环监管能力

常态化的环保监管机制



在用车辆的检查与维护

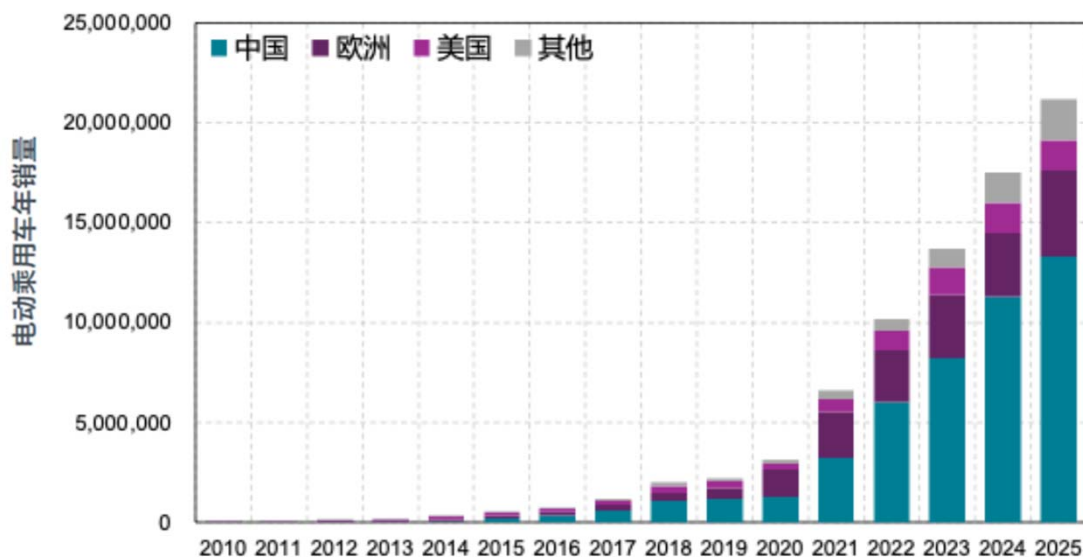


OBD在线监管



全方位激励新能源汽车发展，迈向道路行驶的零排放

- 新能源车在公共车队的示范推广：公交、出租、公共卫生、货车车队
- 私家新能源车的推广措施：购置补贴、税费减免、基础设施建设和“双积分”政策等
- 截止2025年，全国新能源汽车保有量达**4379万辆**，占全球新能源汽车总量的**50%以上**



电动公交车



电动物流车



电动出租车

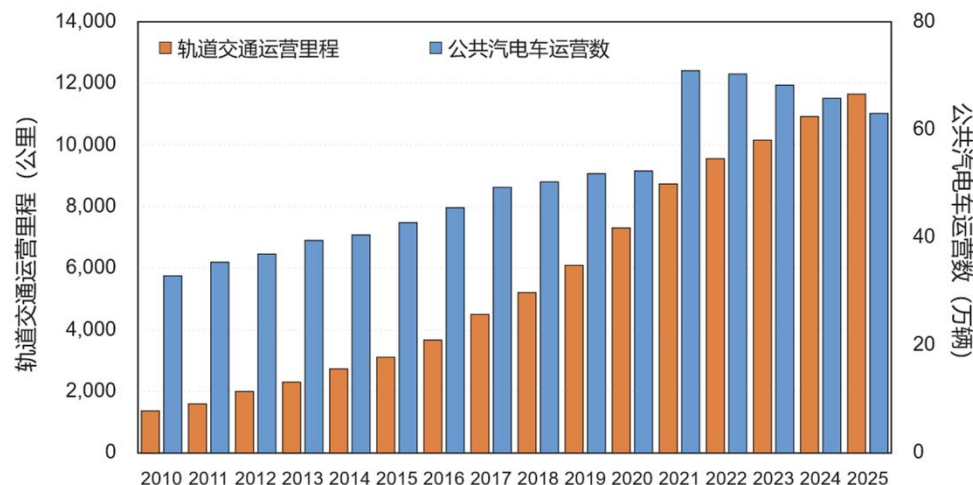


充电桩

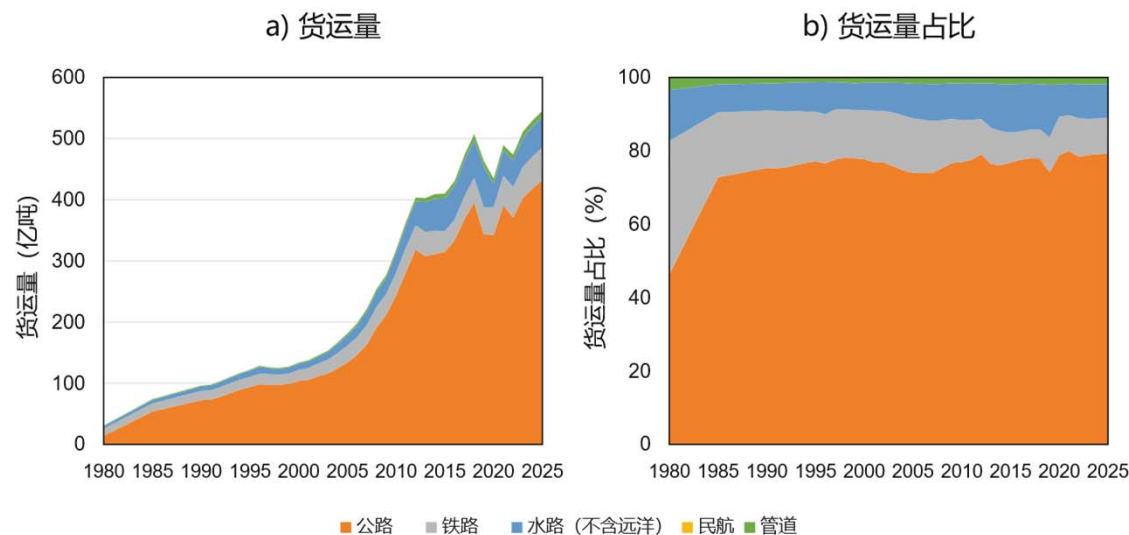
构建绿色出行体系，推动货运交通结构调整优化

- 国家层面确立了**城市公共交通优先**发展战略
 - 2025年全国城市轨道交通运营里程是2010年的8.5倍，公共汽电运营车辆比2010年增加了92%
- **运输结构调整**是治理柴油货车污染攻坚战、构建绿色交通体系的关键任务
 - 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”

全国城市公共交通发展状况



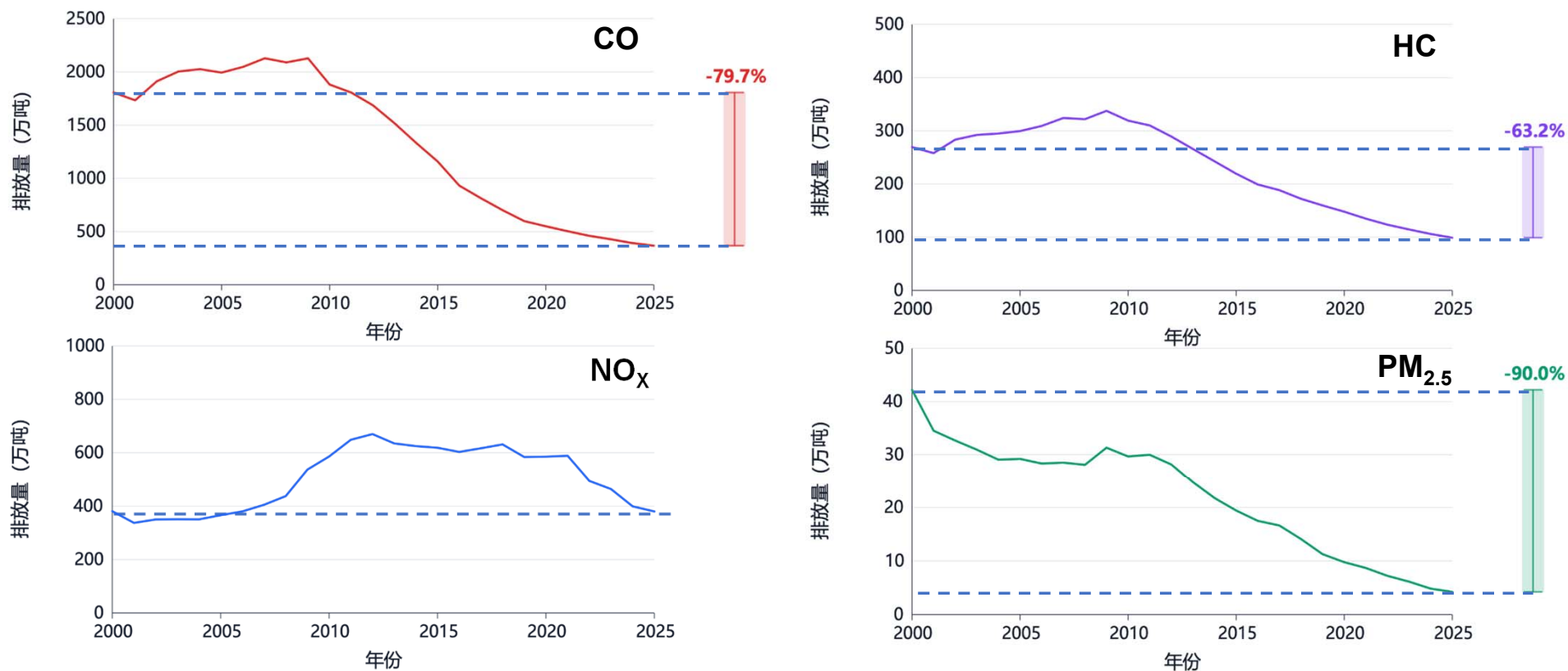
中国货运量及结构变化趋势



我国机动车排放污染综合控制的减排效益

- “车-油-路”一体化综合控制带来显著的大气污染物减排效益：2025年相对2000年，HC、CO和PM_{2.5}和排放分别下降**63.2%**、**79.7%**和**90.0%**，NO_x仍需进一步持续减排

全国机动车污染物排放总量变化趋势，2000-2025

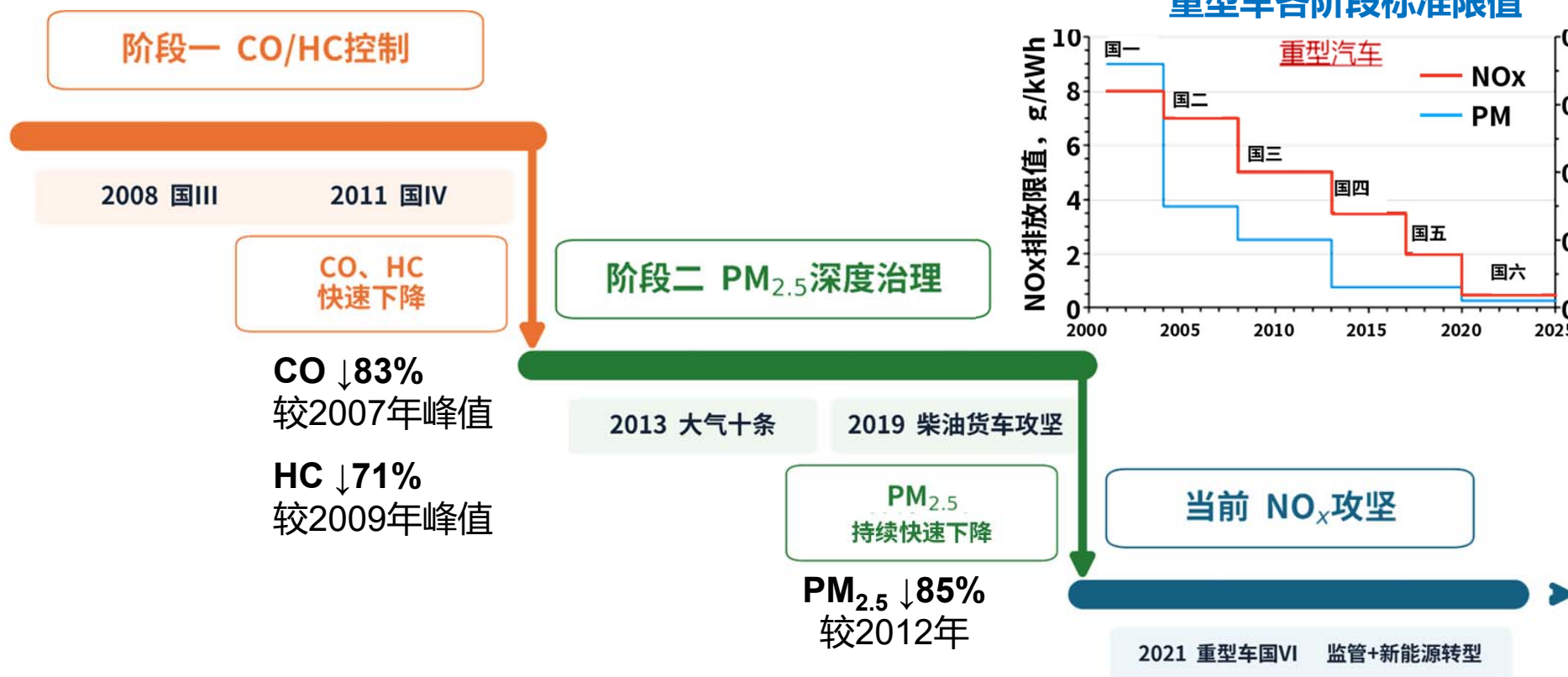
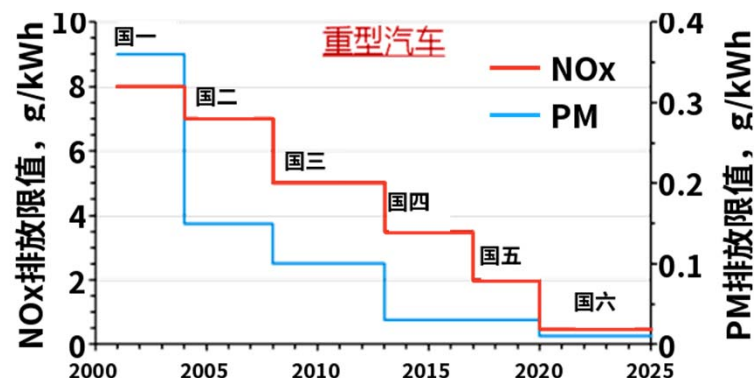


数据来源: Wen, et al., ES&T, 2023(2000-2019)和清华大学持续更新 (2020-2025)

机动车污染治理重点正在阶段式推进

- CO、HC和PM_{2.5}排放已先后实现大幅削减，**NO_x深度减排仍面临较大挑战**
- 治理重点由CO、HC控制和颗粒物深度减排，逐步转向NO_x治理攻坚

重型车各阶段标准限值



机动车控制的“中国故事”和“中国方案”

- 系统梳理中国机动车排放控制历程二十年（2000-2019），以北京、上海、深圳和成都四个代表性大城市为例介绍其各有特色的机动车排放控制实践案例
- 2023年11月亚洲清洁空气大会（BAQ），正式发布《中国大城市机动车排放控制——20年历程回顾与展望》英文报告，为全球城市的政策制定者探索城市交通绿色低碳发展路径提供“中国故事”和“中国方案”

中英文研究报告



报告负责人

中外专家组长



吴焱



丁焰

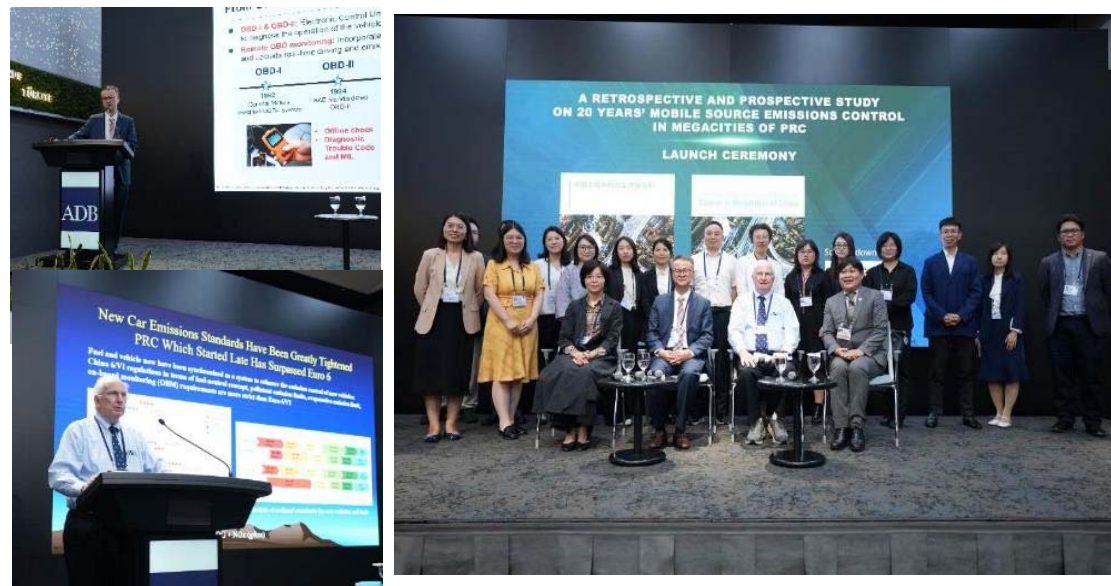


郝吉明



Michael
Walsh

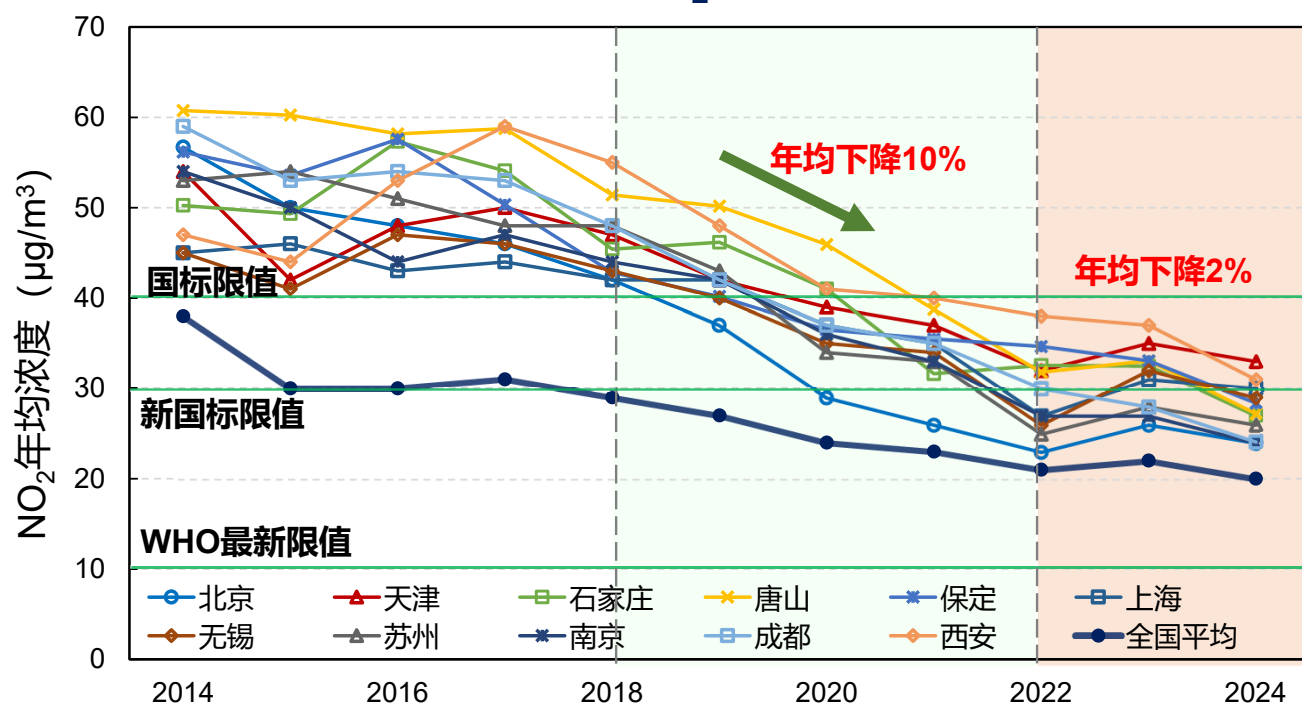
BAQ大会的报告发布及团队合影



重点城市群NO₂浓度改善幅度不及预期

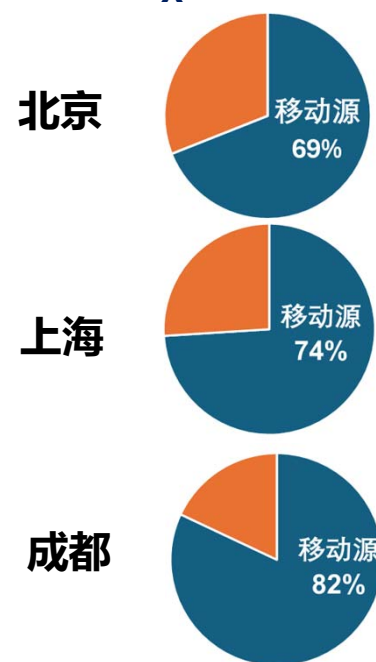
- 京津冀、长三角、汾渭等区域城市群近三年NO₂浓度改善**趋缓**，部分城市甚至出现**反弹**
- 近年来，NO_x污染治理成效不足，亟需针对**重点排放源**寻找**精准有力**的治理抓手

全国重点城市NO₂年均浓度变化趋势



数据来源：生态环境部

移动源在人为源
NO_x排放的占比

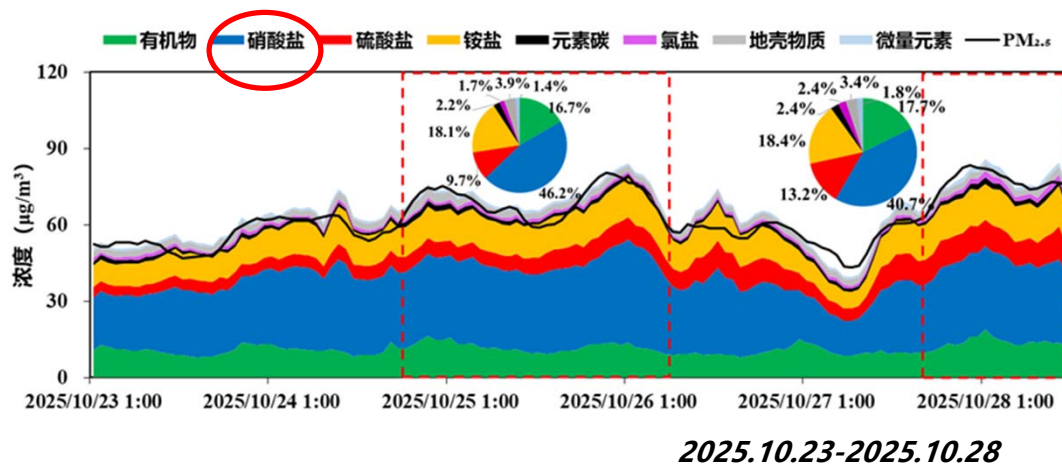


NO_x是PM_{2.5}和O₃复合污染的关键前体物

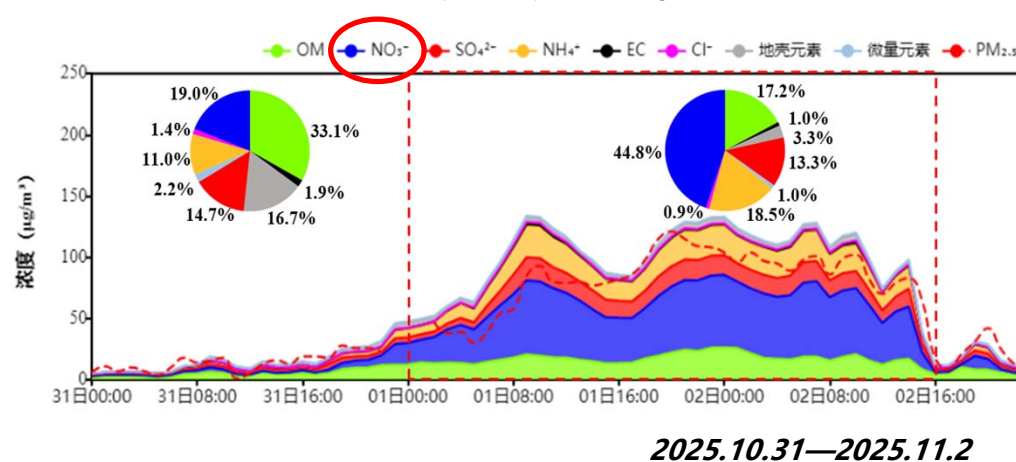
- 二次颗粒物已成为我国大城市 PM_{2.5} 的主要组分，其中**硝酸盐浓度的占比快速上升**，是当前最主要的无机组分，北京、上海等大城市的年均硝酸盐占比已达 **25~30%**
- 京津冀和长三角区域的PM_{2.5}污染高值部分时段，硝酸盐占比已达 **40~50%**

京津冀和长三角区域的城市群的硝酸盐组分占比逐渐提升

京津冀及周边“2+36”城市



长三角区域



数据来源：中国环境监测总站；上海市生态环境局

大城市进入移动源控制为主导的大气治理新阶段

2025世界新能源汽车大会 2025 WORLD NEW ENERGY VEHICLE CONGRESS

北京大气治理进入新阶段：移动源控制成为主导

- 过去十年北京PM_{2.5}浓度快速改善，燃煤与工业源治理成效显著，移动源贡献2024年首次过半
- 新阶段**移动源控制成为主导**，柴油车治理将成为近期推动北京空气质量持续改善的重要突破口



由燃煤治理为主导 → 燃煤与机动车治理并重 → 进入以移动源治理为主导的新阶段



郝吉明 HAO Jiming

中国工程院院士、美国国家工程院外籍院士
Academician of the Chinese Academy of Engineering
Foreign Member of the US National Academy of Engineering

WNEVC

目录

CONTENTS

- 01 中国机动车排放控制历程二十年
- 02 “十五五”时期的新挑战
- 03 典型案例分享
- 04 展望

发展新质生产力，赋能美丽中国建设

- **“十五五”规划**明确发展**新质生产力**是破局关键，强调科技创新推动传统产业升级，确保如期实现碳达峰目标，全面推进美丽中国建设
- **美丽中国**建设明确要求持续深入打好蓝天保卫战，到2035年，全国**细颗粒物浓度**下降到 **25** 微克/立方米以下，实现空气常新、蓝天常在

全面推进美丽中国建设



授权发布 | 中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见

新华社北京1月11日电

中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见

(2023年12月27日)

建设美丽中国是全面建设社会主义现代化国家的重要目标，是实现中华民族伟大复兴中国梦的重要内容。为全面推进美丽中国建设，加快推动人与自然和谐共生的现代化，现提出如下意见。

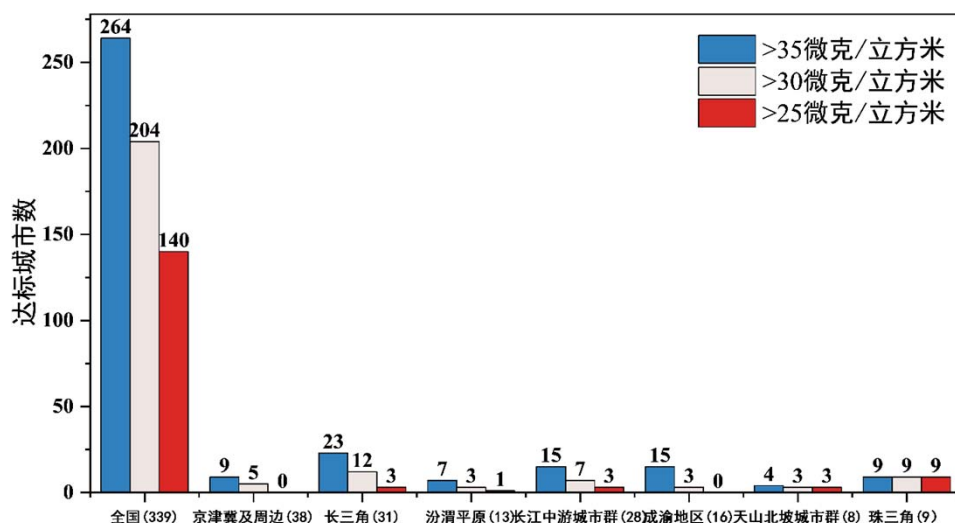
“十五五”规划纲要（草案）



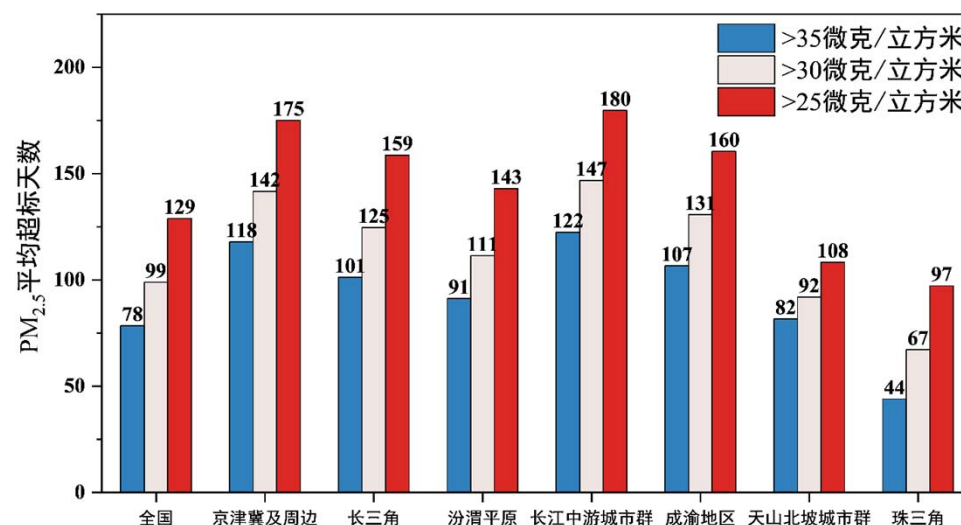
新空气质量标准下污染治理形势严峻

- **新版《环境空气质量标准》发布**：新标准PM_{2.5} (25 μg/m³) 下，全国仅有**140个城市达标**，达标城市数**下降47%**；过渡标准 (30 μg/m³) 下，仅有**204个城市**达标，达标城市数下降**23%**
- 新标准同步**加严NO₂**年均 (30 μg/m³) 和日均浓度限值 (50 μg/m³)

新标准下，全国仅有140个城市达标



新标准下，全国总污染天数将升高65%



新能源汽车成为2035国家自主贡献目标的重要组成

- 习近平总书记在联合国气候变化峰会上正式宣布了2035年国家自主贡献目标
- **总目标：**中国全经济范围温室气体净排放量比峰值下降7%-10%



非化石能源消费占能源消费总量的比重达到30%以上



风电和太阳能发电总装机容量达到2020年的6倍以上、力争达到36亿千瓦



森林蓄积量达到240亿立方米以上



新能源汽车成为新销售车辆的主流



全国碳排放权交易市场覆盖主要高排放行业

气候适应型社会基本建成

- 《**节能与新能源汽车技术路线图3.0**》：提出2035和2040年商用车新车中新能源化比例达到55%和75%

绿色交通转型：减污和降碳需“时间-空间”差异化推进

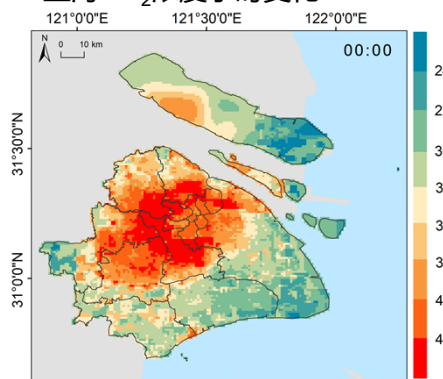
“排放-浓度”局地、快速响应

关注区域治理 | 短时间周期（小时/日）

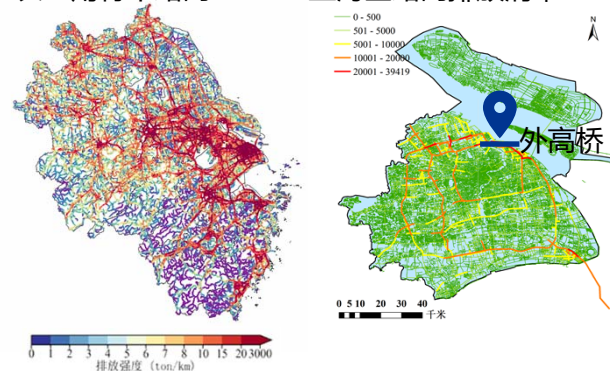
减污

城市/区域**精细化**治理
面向区域性、短周期问题
关键指标：NO₂, PM_{2.5}, O₃等

上海NO₂浓度小时变化



长三角骨干路网 → 上海全路网排放清单



协同

全球、长周期累积影响

关注供应链转型 | 长时间周期（月/年）

降碳

全国/全球**宏观统筹**
系统性应对全球气候变化
关键指标：CO₂, CH₄, N₂O等



能源行业低碳转型

低碳电力
生物柴油
绿色甲醇

材料行业低碳转型

钢材减碳
铝材减碳
电池材料减碳
电池生产减碳



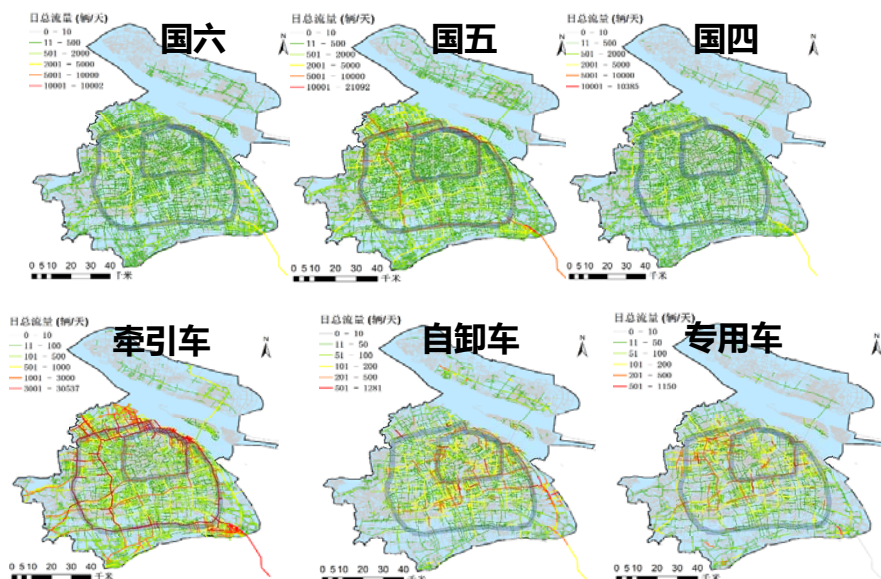
电池、整车效率提升

电池回收
高性能电池
轻量化设计

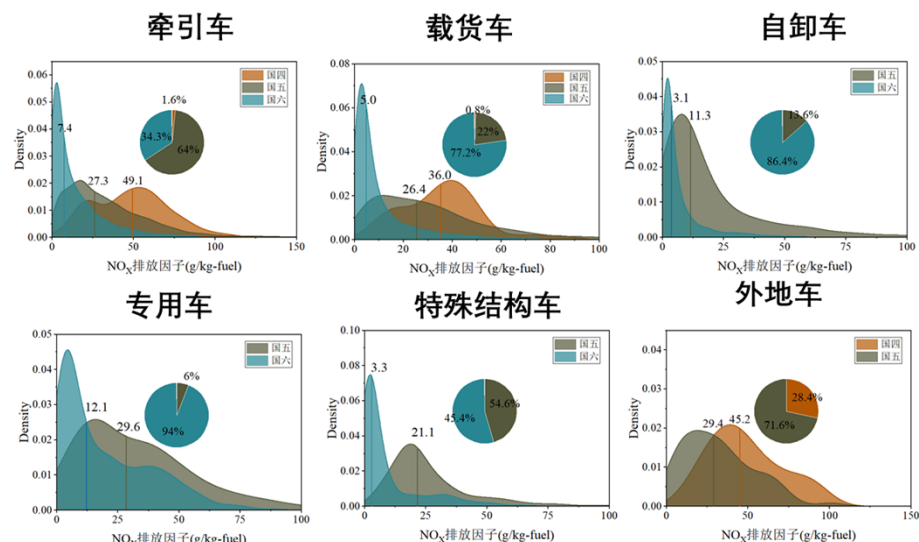
绿色
转型

打造高可信度多源融合的减污降碳数据底座

高时空分辨率的货车活动水平解析



细分车型的排放水平分布



GPS轨迹数据

| 上海行驶的重型车

营运车辆
24万辆

OBD数据

| 全部国六/部分国五

3.5t以上柴油车
19万辆

大样本跟车

| 随机跟测车辆

上海及周边
8000辆

车辆信息数据

| 登记注册车辆

上海所有汽车
550万辆

地理信息数据

| 城市/城际路网

上海全路网
12万路段

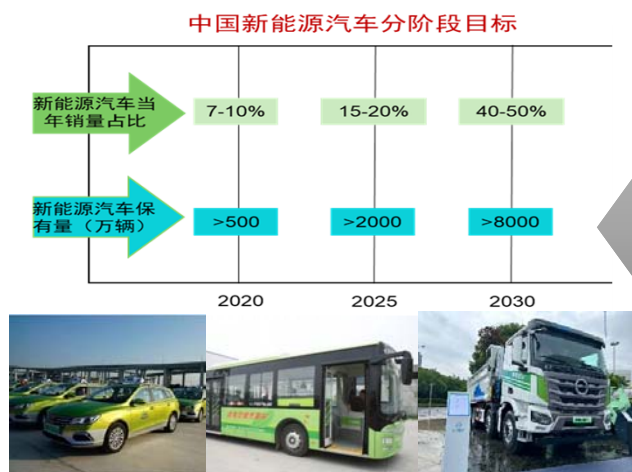
新能源车运行数据

| 所有新能源车辆

上海新能源汽车
150万辆

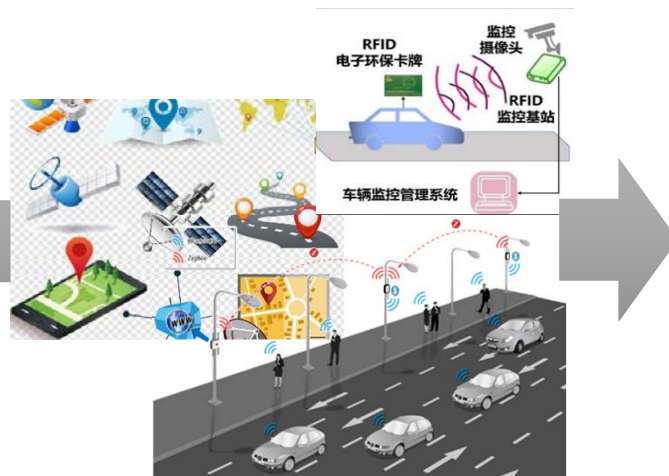
未来交通领域绿色转型的关键技术路径

- 持续推动新车标准升级、老旧车队淘汰更新、油品质量改善，强化“车·油·路”一体化监管
- 积极探索和引领**绿色能源转型**、**运输结构调整**，利用物联网、大数据和人工智能等**先进智慧技术**支撑排放监管和综合决策



新能源转型

重点车队能源推广
新能源配套基础设施建设
购置补贴、通行豁免、充电优惠



智慧技术支撑

大样本在线排放监测
交通活动动态识别
人工智能综合决策平台



交通结构调整

多式联运互联互通
推进“公转铁”“公转水”
加快铁路专用线建设

CONTENTS

目录

- 01 中国机动车排放控制历程二十年
- 02 “十五五”时期的新挑战
- 03 典型案例分享
- 04 展望

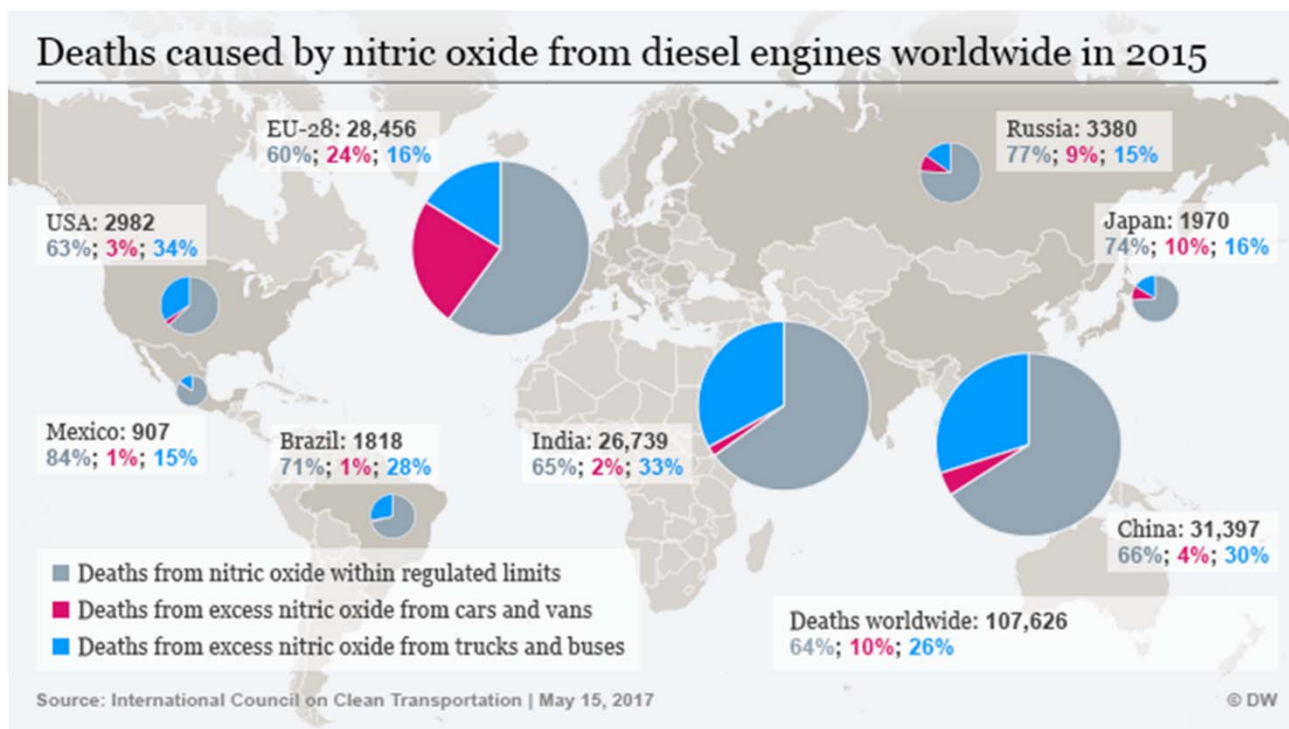
柴油车排放污染是全球共同面临的重大环境挑战

- 2017年，Nature论文阐述了全球柴油机NO_x排放导致严重的空气污染与健康风险：全球因柴油车NO_x排放贡献的PM_{2.5}和O₃污染导致早逝超过10万人
- **2025年，柴油车NO_x排放问题仍未得到有效解决，空气质量与健康风险依旧严峻**



May 25, 2017 Issue

Anenberg et al., Nature, 2017; ICCT



重型车治理是实现2035美丽蓝天的关键抓手

- 实现2035美丽蓝天空气质量目标 ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) , NO_x 需要减排超过**1/3** (500万吨)
- **重型车深度治理**能够提供总减排量的**1/3** (约150-200万吨) , 是实现美丽蓝天的关键!

2035美丽蓝天前体物减排目标

前体物	当前排放量 (万吨)	2035年目标排放量 (万吨)
NO_x	1500	<1000
NH_3	1000	800-900
VOCs	人为源: 2000-2500 天然源: ~4000 S/I VOCs: >300	~1500

中国工程院项目: 《空气质量持续改善行动计划》实施情况评估, 2026

形成“远程监控+道路实测”的排放大数据体系

- 建立重点城市**OBD远程监管**平台，实现对国六重型车的监测、管理以及违规线索识别
- 开展大规模的**实际道路跟车排放**测试，累积样本量 2.4 万辆次

远程OBD平台



跟车排放测试

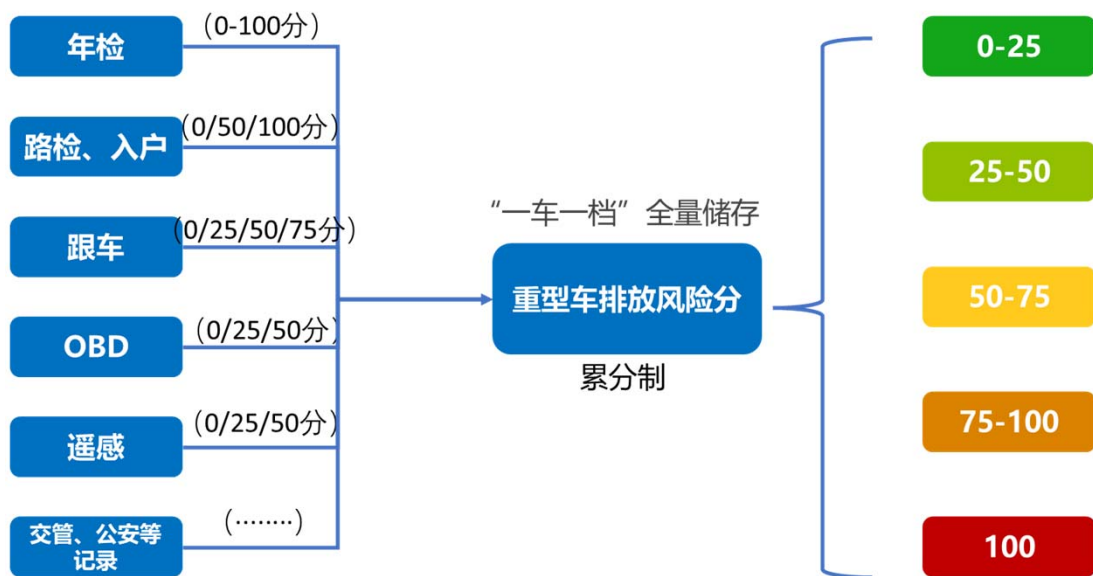


重点研发项目 2017YFC0212100、2022YFC3703600成果

人工智能技术赋能高排放柴油车智慧管理

- 上海整合生态环境、交通、公安、北斗定位、第三方检测、视觉中枢等补充数据6类核心数据，建立 **“一车一档”** 数据库，覆盖31.5万辆在沪运行车辆
- 结合年检、跟车、OBD、路检、入户多源感知数据，构建重型车“黑白灰” **动态分级管理** 机制

重型车排放分级管理机制



“黑白灰” 评级与阈值动态机制

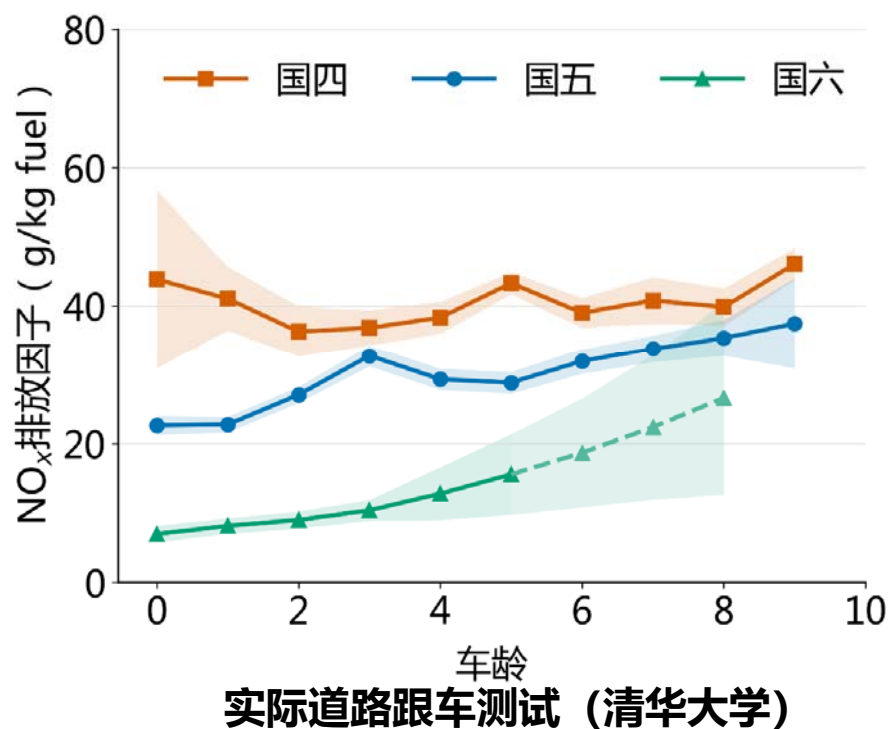
不搞“一刀切”，提高监管针对性及监管效能



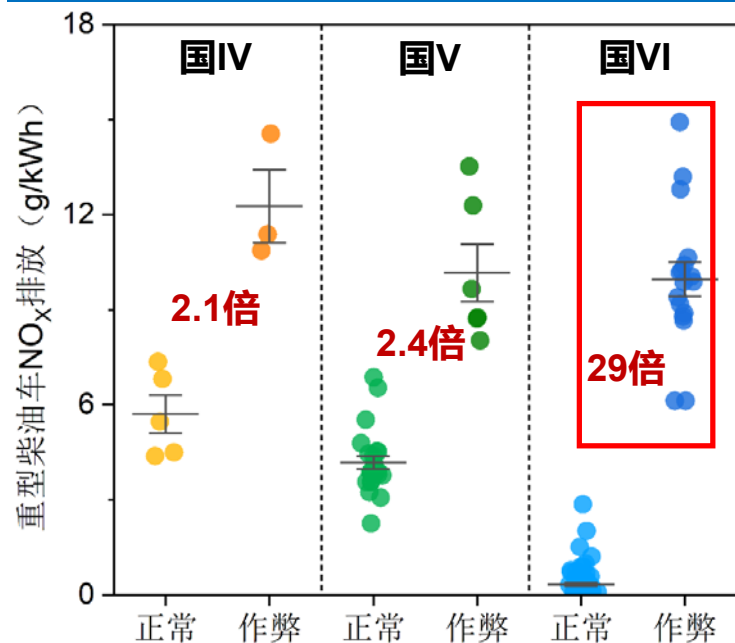
推动重型货车“退四，治五，管六，推新”

- 国四、国五、国六柴油重型货车的NO_x排放**均已出现劣化**，美欧研究也发现类似趋势
- 国六重型车的排放劣化趋势**更显著**，作弊车辆的NO_x排放比非作弊车辆**增加数十倍**

不同标准的重型柴油车NO_x排放劣化趋势



正常和作弊重型柴油车NO_x排放



PEMS测试 (机动车排污监控中心)

机动车污染控制智慧决策平台

- 面向城市机动车污染协同治理需求，构建交通-排放-环境一体化智慧决策平台，支撑污染治理由经验判断向数据驱动、科学决策转变
- 打通“措施-交通-排放-浓度-效益”链条，为北京、上海、成都等大城市的精准施策和长期规划提供决策依据

交通-排放动态追踪



交通污染物排放

交通活动水平

分车型排放贡献

96小时预测



未来96小时
交通活动水平

未来96小时
污染排放趋势

未来96小时
浓度预测

控制措施评估



事件回顾

措施评估

长期规划

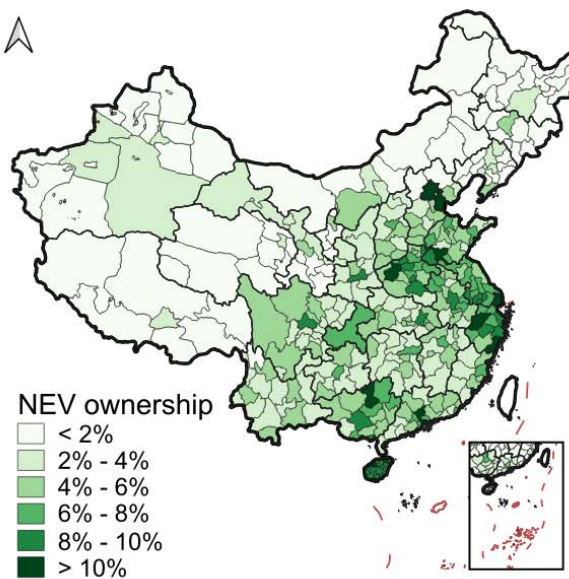
重点研发项目 2017YFC0212100、2022YFC3703600成果

新能源汽车高速发展，驱动中国绿色低碳转型

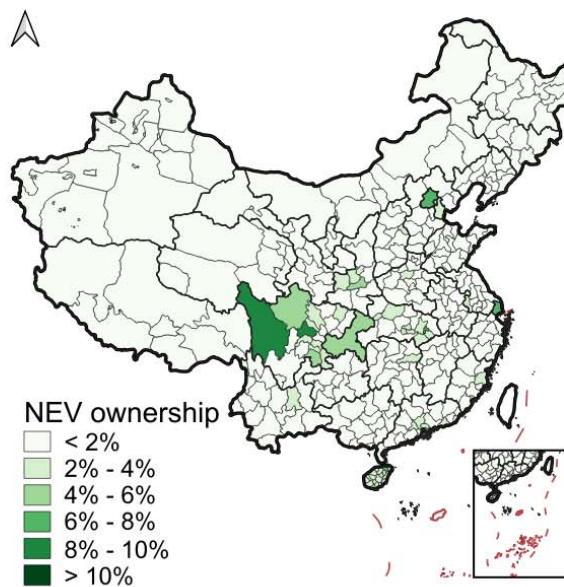
- 2025年中国新能源汽车保有量已**突破4000万辆**：小型客车的新能源推广已逐渐过渡到市场驱动阶段，**中重型车的转型仍需推进**

中国各车型地市级新能源车保有量占比

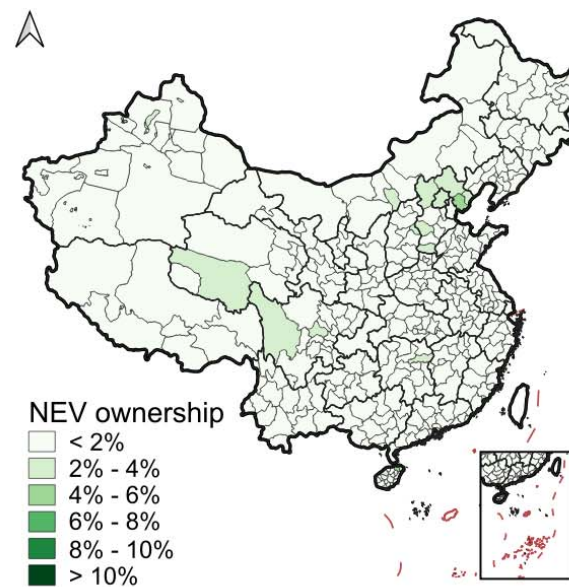
小型客车



轻型货车



重型货车



数据来源：中汽数据

国家加快部署新能源重卡规模化应用

- 交通运输部等十一部门联合发文，将新能源重卡规模化应用作为货运领域降碳减污的重要方向
- 政策导向由重点场景示范向**全场景、规模化应用**拓展，统筹**车辆推广、补能网络、运输通道**和**政策保障**协同推进

交通运输部 发展改革委 工业和信息化部 公安部 自然资源部 生态环境部 中国人民银行 市场监管总局 金融监管总局 国家能源局 国家邮政局

文件

交规划发〔2026〕52号

交通运输部 国家发展改革委
工业和信息化部 公安部 自然资源部
生态环境部 中国人民银行 市场监管总局
金融监管总局 国家能源局 国家邮政局
关于印发《推动新能源重卡规模化
应用实施方案》的通知

现将《推动新能源重卡规模化应用实施方案》印发给你们，请

到2030年，新能源重卡规模化应用主要目标



高速公路新能源重卡货运量占比

18%



上海市“十五五”移动源污染治理重点

➤ 分领域推进新能源替代，强化在用排放监管与清洁运输配套

货车更新与新能源替代



30%以上

2030年中重型货车
新能源占比

国四全域限行、国五淘汰试点
研究国五分阶段限行

在用车监管

机械清洁替代与管控



7吨及以下

新增或更新叉车
基本实现新能源化

研究国三淘汰及分阶段禁用
推进定位监控与进出场管理

2027年执行在用车排放标准限值b

公共领域车辆新能源化



2030年

公交、出租、环卫、邮政、
物流配送等基本新能源化

新增或更新城市车辆用新能源
建筑垃圾车、搅拌车鼓励优先

聚焦重点货车、用车及运输企业

船舶绿色转型与岸电



5%以上

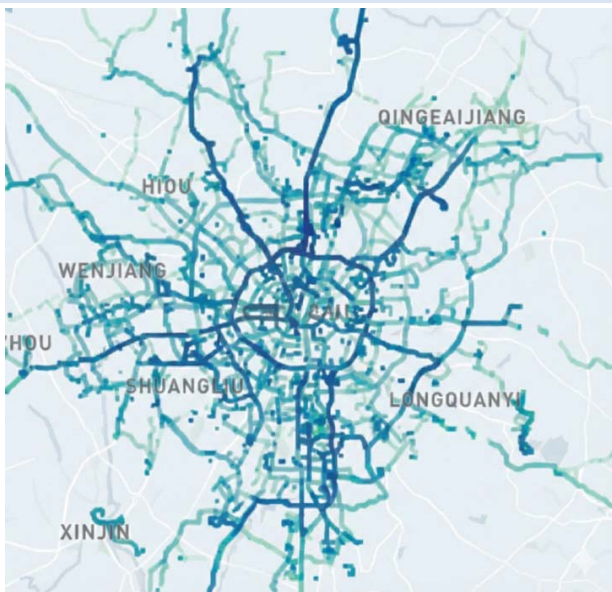
2030年新能源或清洁能源
船舶占比力争达到

公共领域船舶全面新能源化
高排放船舶分类管控、岸电应用

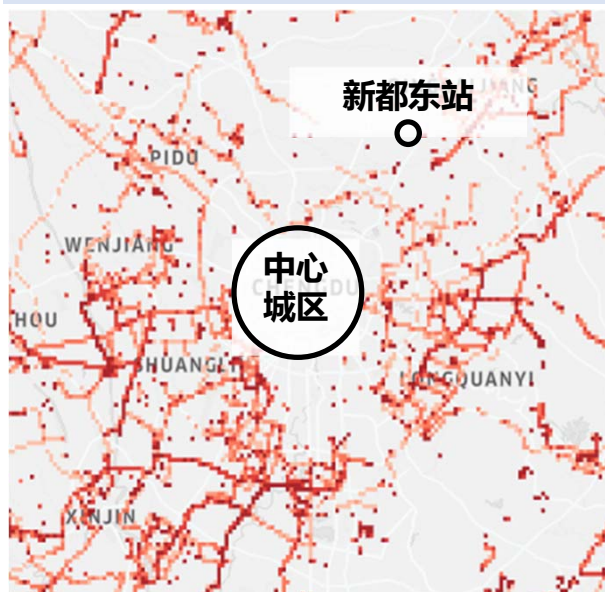
差异化路权驱动成都货车电动化转型与环境效益提升

- 划定“零排放”核心区，赋予新能源货车差异化通行权，有效提升电动车运营效率与经济性
- 2024年新能源渣土车推广使车队 **NO_x排放降低59%**，电动化带来显著环境效益，核心区域道路边NO₂年均浓度降低 8–12 μg/m³

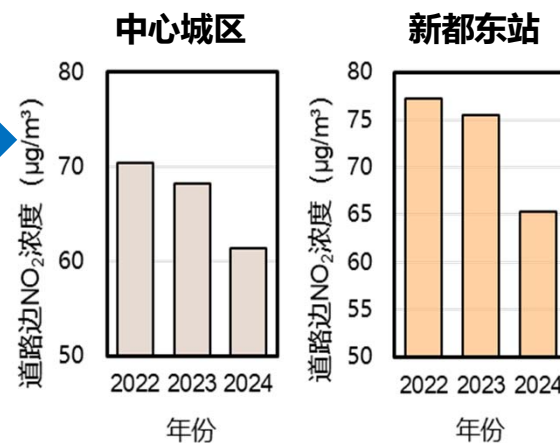
核心区电动车活动水平显著提高



柴油车退出城市核心及周边区域



路边站NO₂年均浓度
下降 8~12 μg/km²

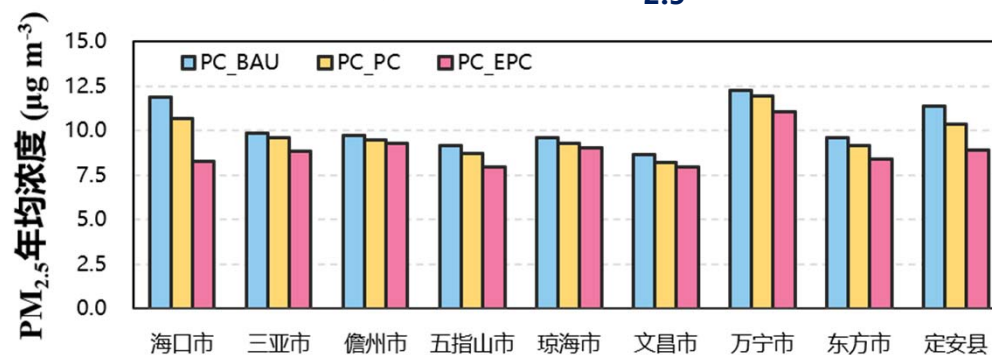


交通清洁化助力海南实现世界领先水平空气质量

- 海南实施交通能源清洁化战略，2030年起全岛全面禁止销售燃油汽车，新能源汽车占比超过45%，各市县基本建成一个机动车零排放区
- 相对BAU情景，海南禁售燃油车政策可使2035年PM_{2.5}平均浓度下降 $\sim 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，叠加存量车辆淘汰优化措施将削减 $\sim 1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，助力各市县PM_{2.5}年均浓度均可降至 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下



2035年不同政策情景下PM_{2.5}浓度变化



基准情景 (BAU)	• 不禁售燃油车，现状延续
政策情景 (PC)	• 2030年全面禁售燃油车，存量燃油车自然淘汰或报废
强化政策情景 (EPC)	• 进一步鼓励存量燃油车加速淘汰置换为新能源车； • 其他部门协同强化减污降碳政策

目录

CONTENTS

- 01 中国机动车排放控制历程二十年
- 02 “十五五”时期的新挑战
- 03 典型案例分享
- 04 展望

1

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

- PM_{2.5}和O₃协同控制是十五五及今后机动车污染控制的战略目标
- 2060碳中和目标将指引未来中长期道路交通行业的深度减污降碳

2

发挥标准和技术引领作用，持续加严燃油车排放控制

- 技术中立和燃料中立，重点监管车辆在实际道路的排放
- 强化关键污染物、新污染物与温室气体协同管控，完善新阶段机动车排放标准体系

展望

3

交通能源清洁低碳转型，推动汽车全产业链绿色发展

- 面向货运复杂场景，强化技术适配、补能体系与全生命周期成本协同优化
- 统筹能源链、产业链和供应链绿色转型，推动汽车全产业链减污降碳与高质量发展

4

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、慢行等绿色交通优先理念，基于“人-车-路-站-云”协同提升服务水平
- 强化多式联运高效衔接与协同组织，持续推动货运结构优化升级

5

加快新一代人工智能技术融合，推动交通治理模式创新

- “精准感知+大数据智能监管”是未来机动车排放智慧化管理的技术发展趋势
- 探索智能分析与决策新模式，推动交通治理向精准化、智慧化和协同化升级



敬请批评指正！