



2025年长三角空气质量管理技术研讨会

2025 Yangtze River Delta Clean Air Forum

重型车电动化推动城市减污降碳

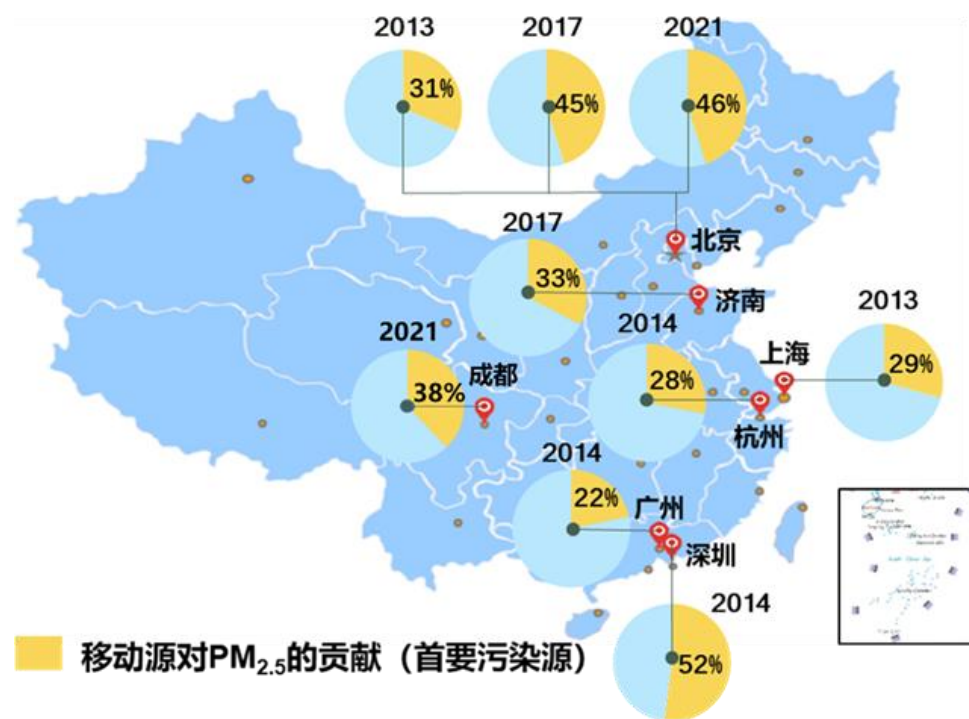
清华大学环境学院 张少君

2025年8月29日

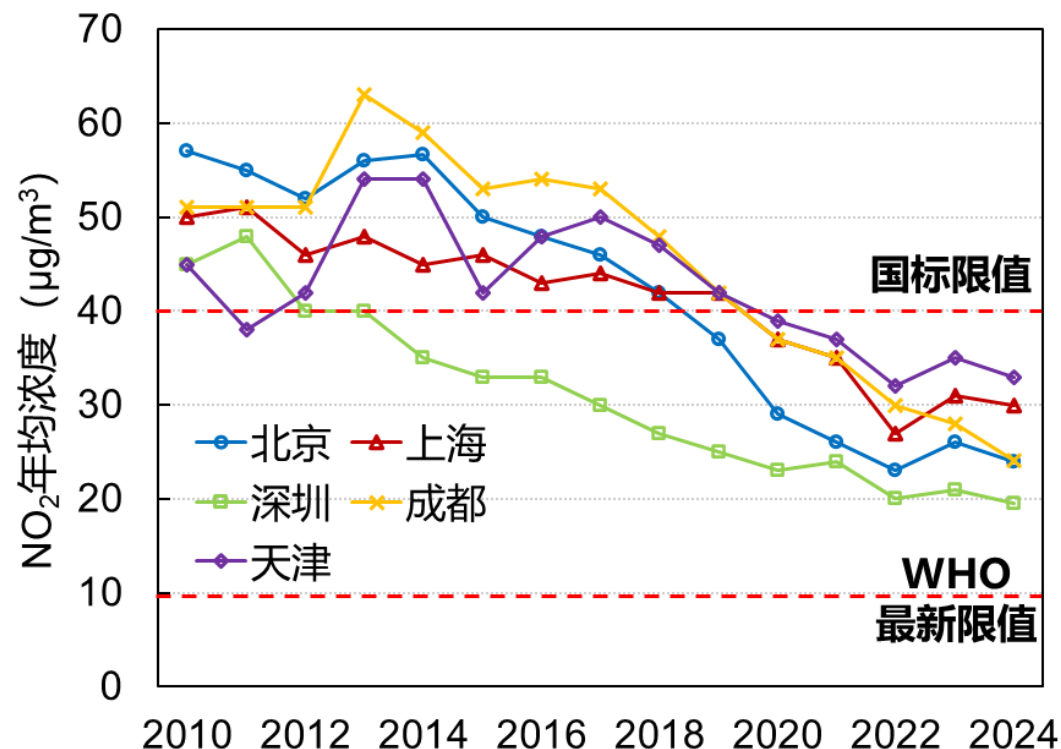
重型柴油货车也是区域空气污染的重要贡献源

- 机动车**高速增长**、**高频使用**和**高度聚集**，是大城市最重要PM_{2.5}和O₃贡献源
- NO₂改善趋势减缓甚至**反弹**，需要深入开展**柴油货车治理**和**低碳能源转型**

我国大城市PM_{2.5}源解析结果



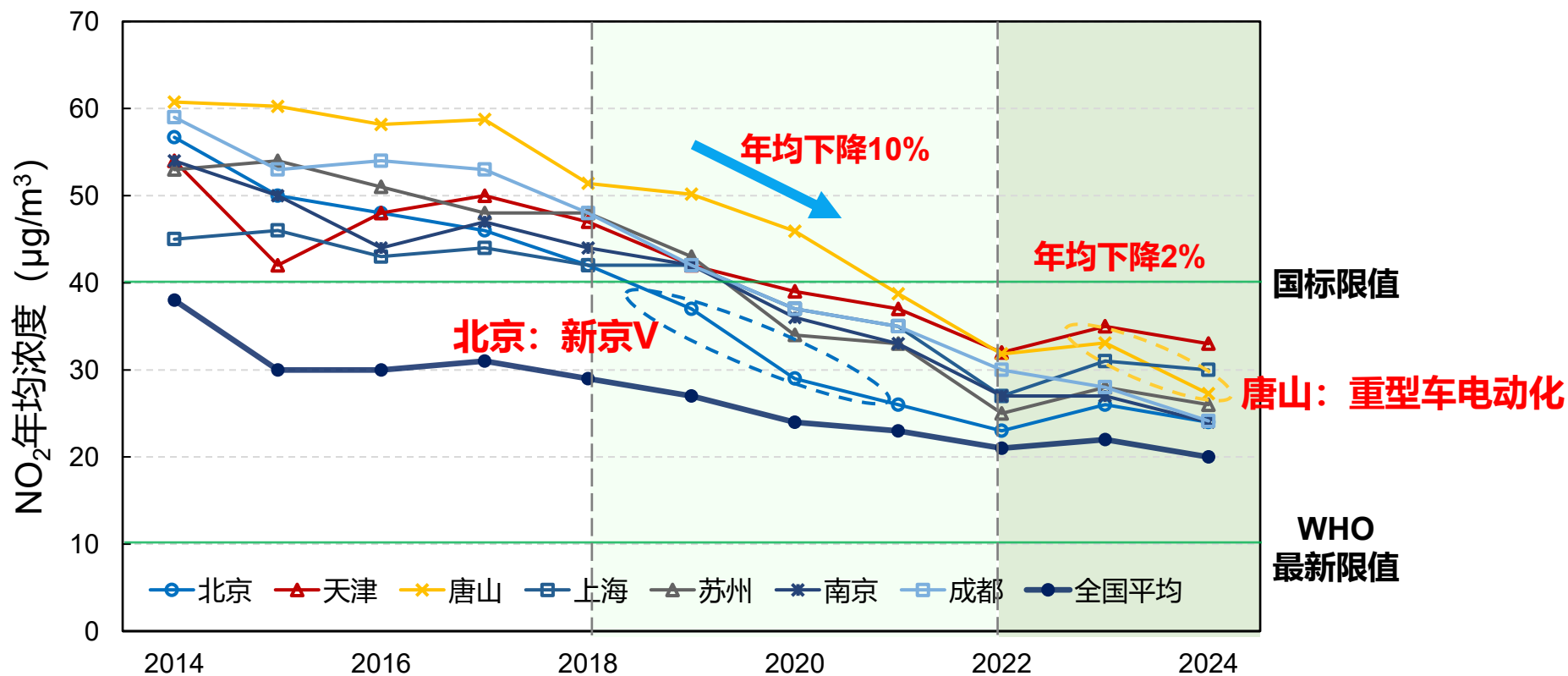
重点城市NO₂浓度变化趋势



重点城市群NO₂浓度改善幅度不及预期

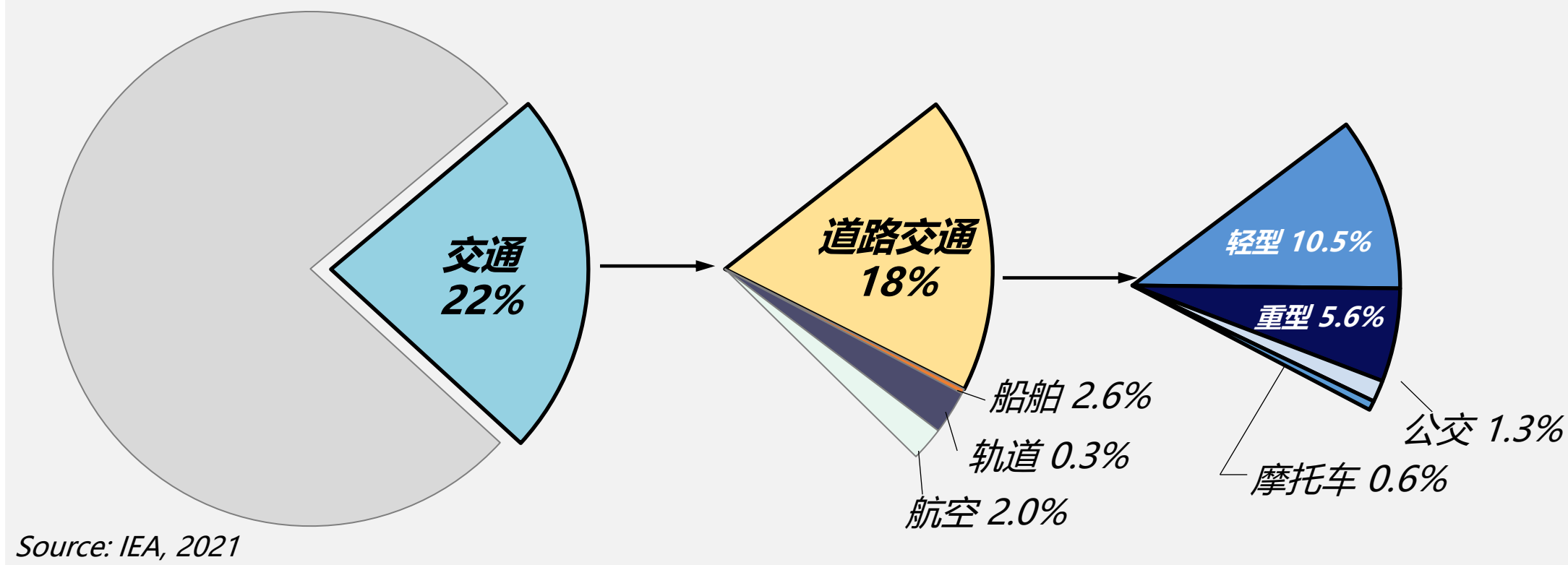
- 京津冀、长三角、汾渭等区域城市群NO₂浓度改善总体**趋缓**，部分城市甚至出现**反弹**
- **重型货车电动化成效较好的典型城市NO₂浓度快速下降**

全国重点城市NO₂年均浓度变化趋势



重型柴油货车是道路交通碳排放的重要贡献源

全球交通碳排放来源解析：重型车贡献近6%的燃烧源CO₂排放。



- 本课题组测算显示，2022年中国重型货车保有量为956万辆（占全部机动车保有量3%），贡献3.8亿吨的CO₂排放（**占中国道路交通CO₂排放约40%**）。

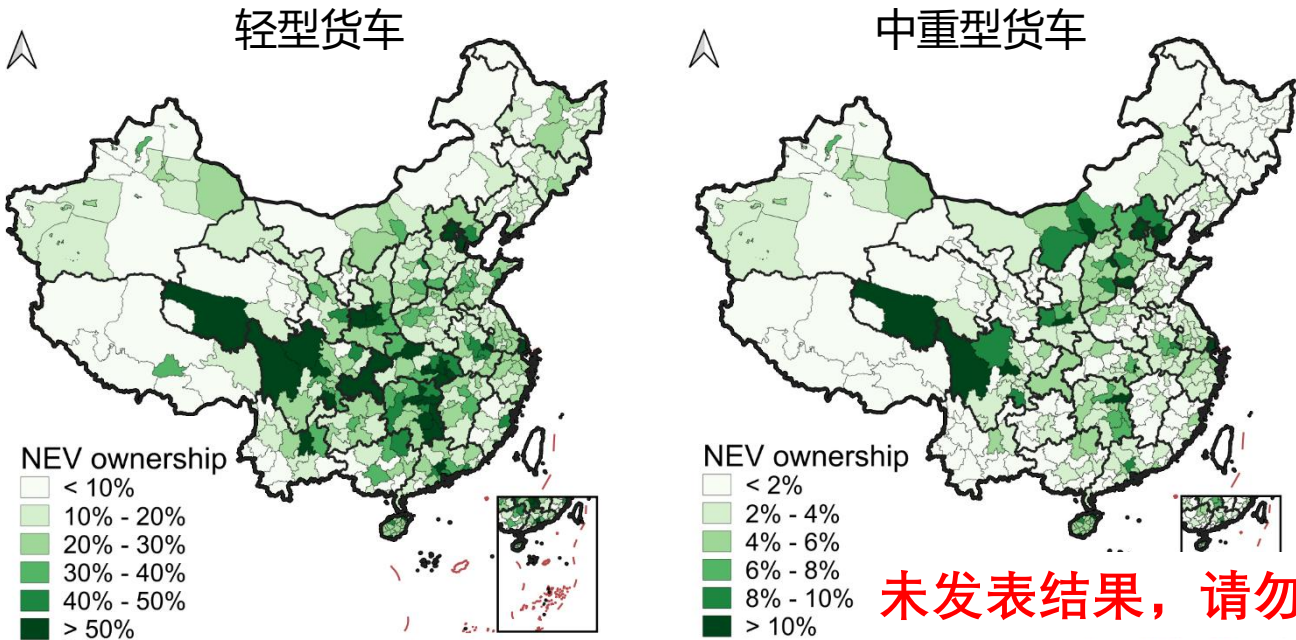
交流三个问题的研究进展

- 重型车新能源化/电动化的空气质量效果
- 细分场景的技术可行性与经济可行性
- 部分场景电动化的实践探索：以成都为例

中国城市货车新能源化推广情况

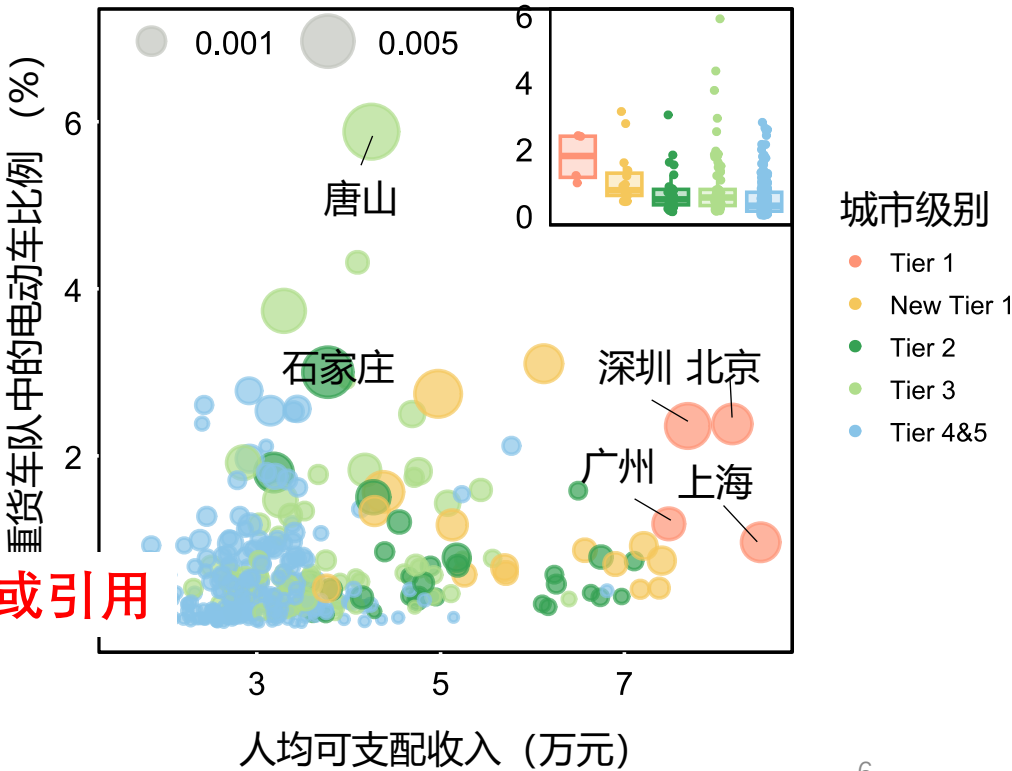
- 新能源重型货车渗透率在西南地区及华北地区较高，其中唐山是保有量占比最大的城市
- 货车电动化受政策驱动较大，与城市经济发展水平关联度较弱

2023年地市级新能源货车保有量



数据来源：中汽数据

不同级别城市新能源重货占比及与收入的关联性

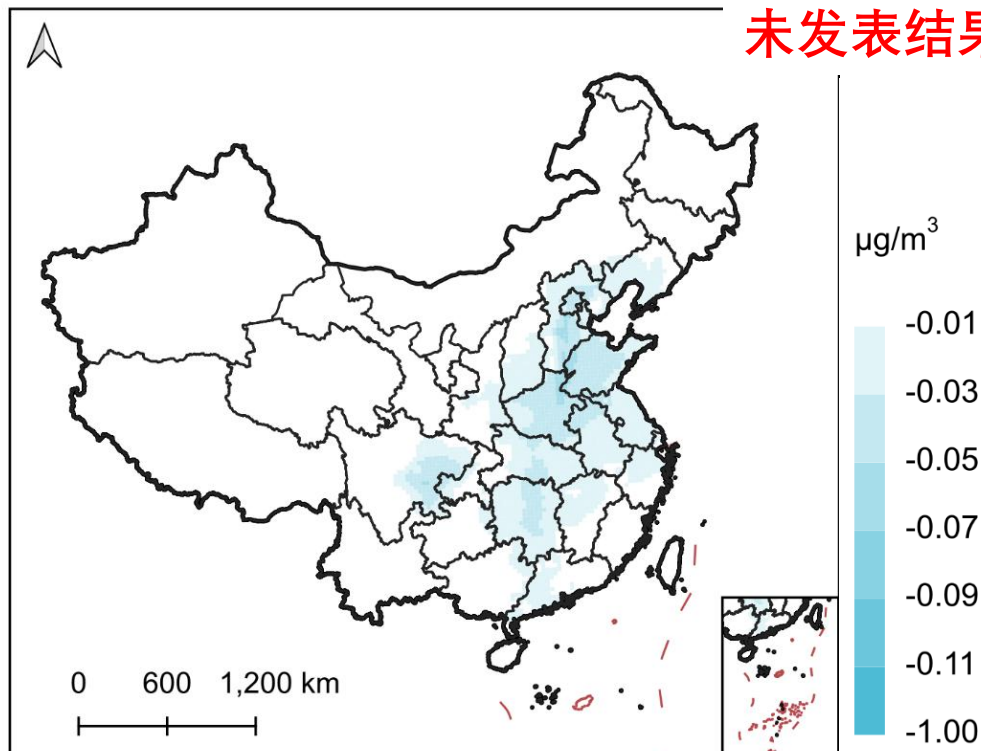


未发表结果，请勿转发或引用

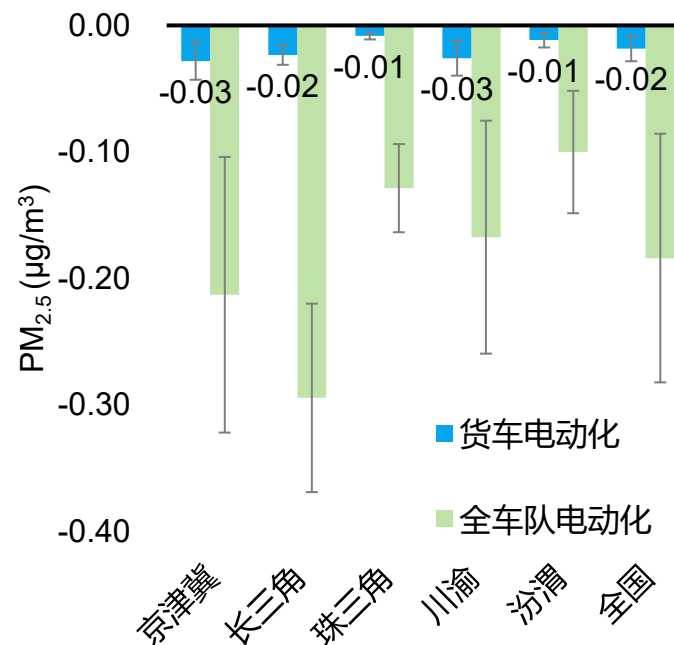
现状年货车电动化的空气质量影响评估

- 2023年，已推广的电动货车可削减0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的PM_{2.5}和0.02 ppb的MDA8 O₃人均暴露浓度
- 货运电动化可减少892例早死，占全车队电动化总健康效益的10%

货车电动化导致的浓度削减



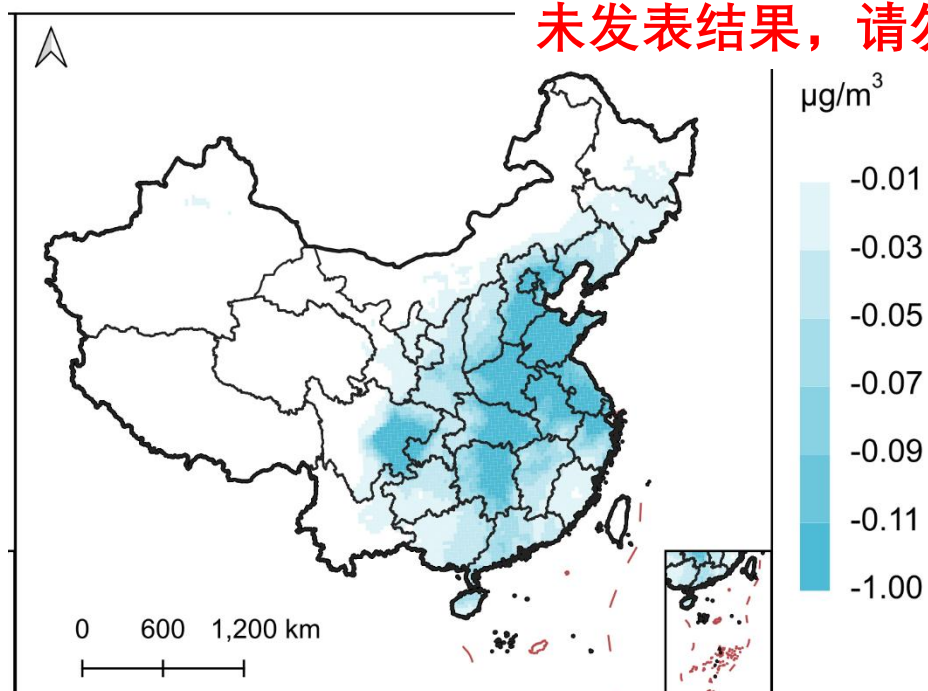
年均PM_{2.5}暴露浓度削减



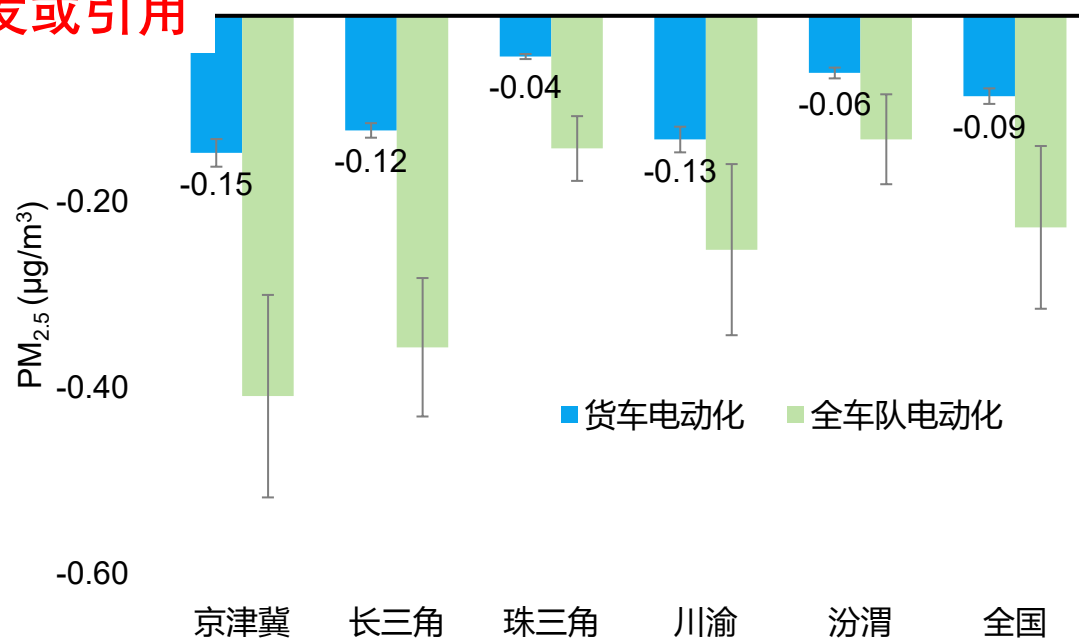
未来年货车电动化的空气质量影响评估

- 2030年货车电动化在全国内可削减0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 $\text{PM}_{2.5}$ 和0.2 ppb的MDA8 O_3 人均暴露浓度
- 京津冀、长三角和川渝地区电动货车对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度削减高达0.15、0.12和0.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- 货运电动化可减少10074例早死，占全车队电动化总健康效益的38%

货车电动化导致的浓度削减



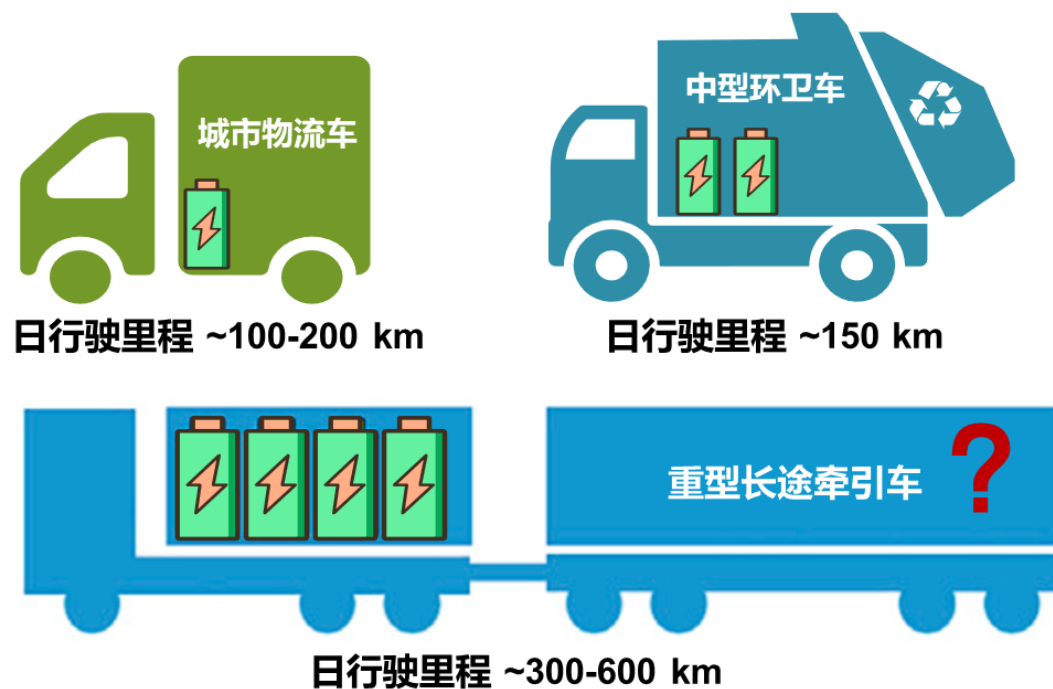
年均 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露浓度削减



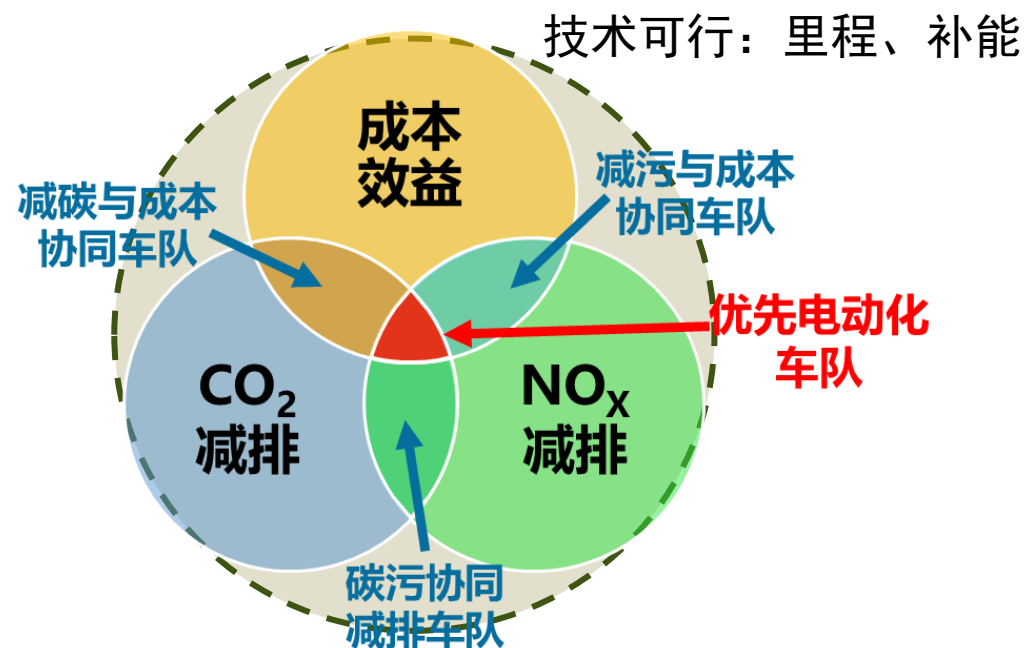
不同场景货车电动化的实际挑战

- 电动货车推广普遍存在续航里程、购置成本和基础设施等诸多方面顾虑和挑战
- **细分场景的货车使用特征和技术需求差异巨大**，目前电动货车技术的可行性和经济成本也存在差异

不同细分场景的货车使用特征差异大



协同优化目标



车载大数据支撑货车电动化推广的精细评估

- 现有研究多使用车队平均（单一参数）或模型模拟值开展评估，**忽略了细分场景之间、不同车辆之间使用特征的异质性**
- 车载感知大数据为深入评估货车车队的真实车用行为、成本特征以及环境效益提供重要数据

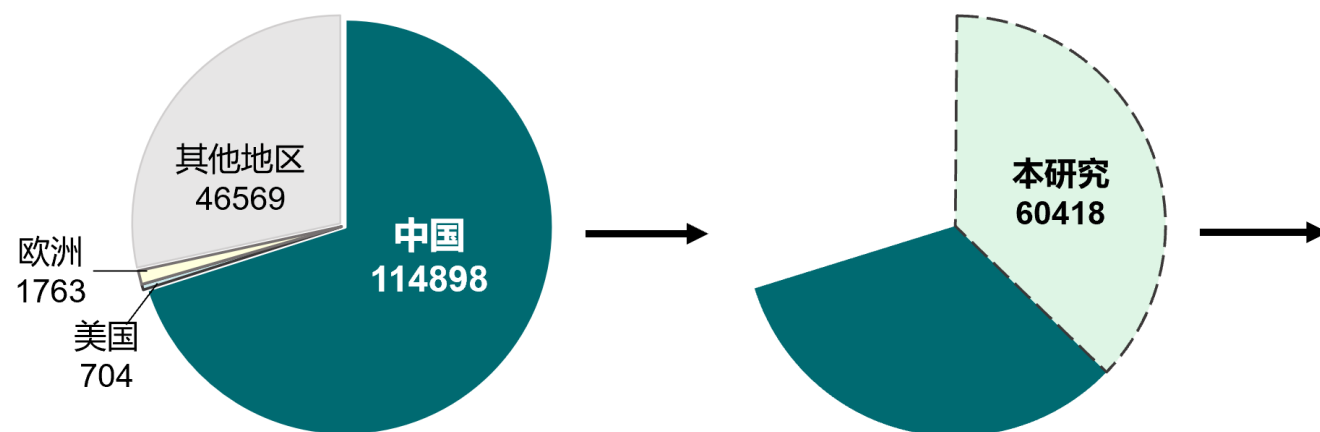


主要采集信息		
	柴油车	电动车
实际 出行 数据	采集日期与时间 车速 转速 瞬时油耗 定位信息（经纬度） 累计里程 环境温度	采集日期与时间 车辆状态（行驶/充电/停车） 车速 转速 SOC 电耗/充入电量 定位信息（经纬度） 累计里程 电池型号
		车重 用途 归属地 车辆价格

收集大样本货车实际运行数据

- 已分析了6万辆电动货车和5.5万辆柴油货车实际道路活动和充电数据
 - ▣ 电动货车数据涵盖7个省级区域、9大类车型规格/场景，使用年份覆盖2021年全年

2021年全球电动货车保有量



电动货车数据分析依托国家新能源车大数据联盟

Zhao et al., Nature Energy, 2024.

电动货车细分市场分类

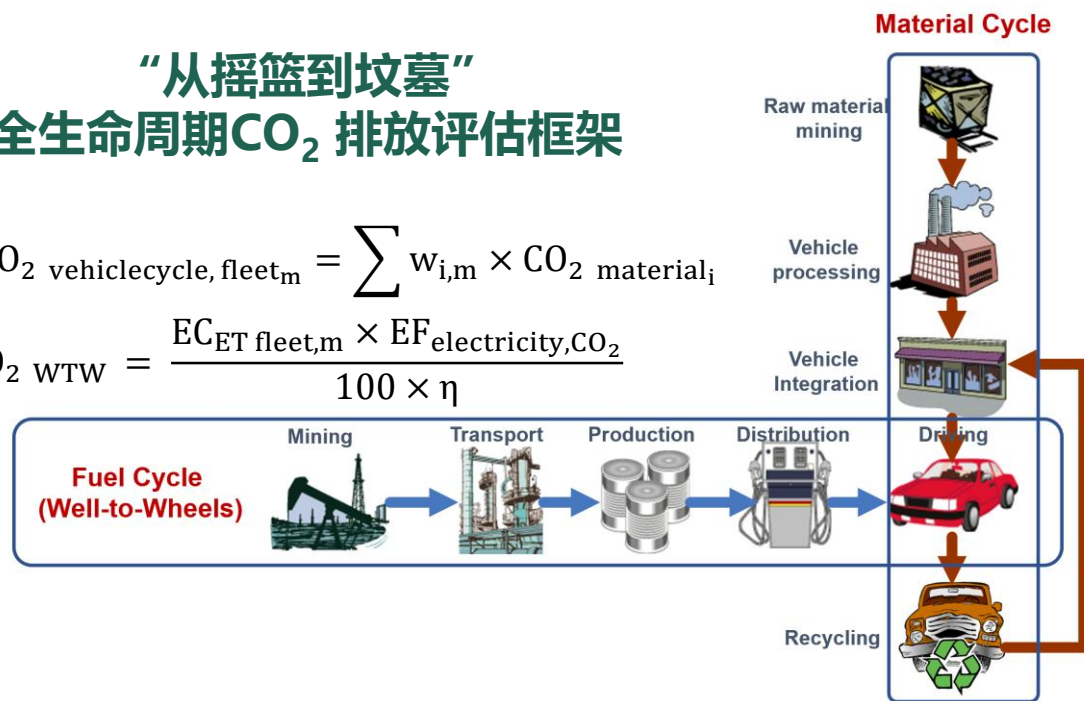


设置货车电动化的效果评估指标

- **电动化技术可行性：基于运输需求的替代比例。** 1) 柴油车队中可被1:1电动化替代的车辆比例； 2) 未来全车队电动化替代比例（考虑运输效率差异）
- **成本效益：总拥有成本（TCO）。** 包含车辆购置成本、燃料、维护成本、税费
- **全生命周期环境效益：CO₂与NO_x。** 建立企业-工艺级生命周期排放模型

“从摇篮到坟墓” 全生命周期CO₂ 排放评估框架

$$CO_2 \text{ vehiclecycle, fleet}_m = \sum w_{i,m} \times CO_2 \text{ material}_i$$
$$CO_2 \text{ WTW} = \frac{EC_{ET \text{ fleet},m} \times EF_{\text{electricity},CO_2}}{100 \times \eta}$$



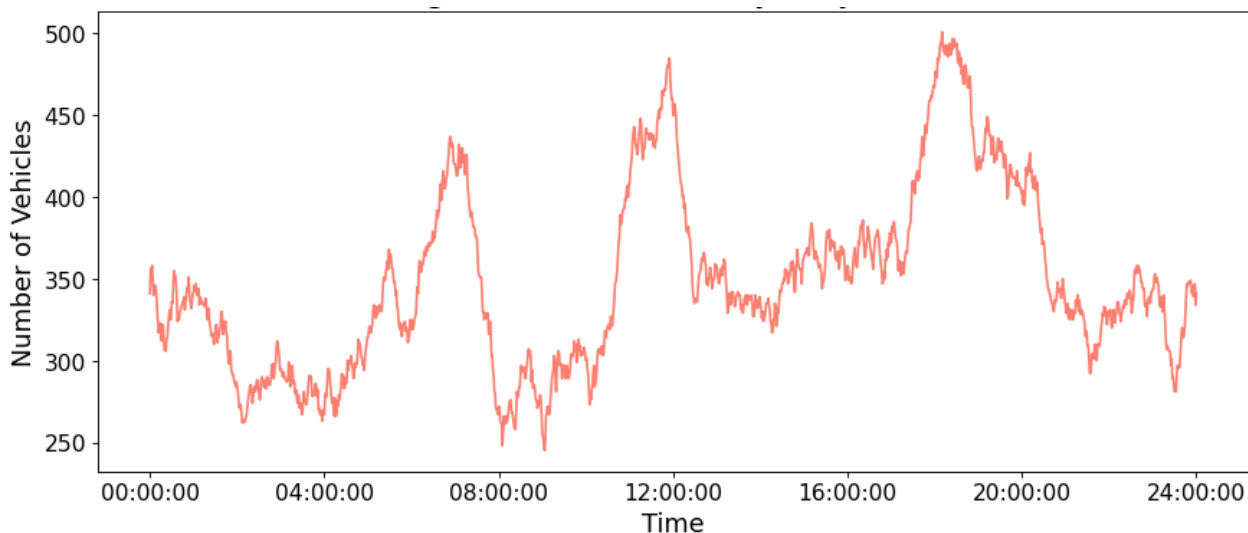
总拥有成本（TCO）评估

- 购置成本（含补贴） PC_{ET_i}
- 燃料成本 FC_{ET_i}
- 保险税费 ITF_{ET_i}
- 过路费、维护与保养成本 MR_{ET_i}
- 残值 Res_{ET_i}

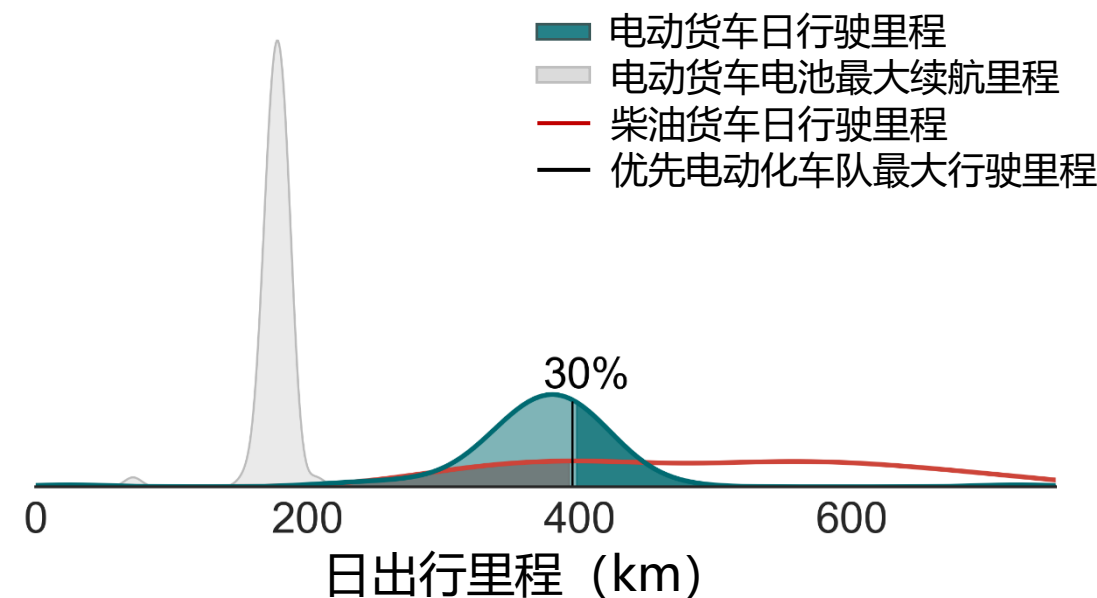
$$TCO_{ET_i} = \frac{PC_{ET_i} + [a \times (FC_{ET_i} + ITF_{ET_i} + MR_{ET_i}) - Res_{a,i}] \times \frac{1 - (1 - r)^a}{r}}{a \times VKT_{ET_i}}$$

电动化可行性早期评估：以重型牵引车队为例

- 电动重型牵引车使用强度较高，单次电池使用率超过80%且充电频繁
 - 平均单日充电2-4次以满足运输需求，充电时长影响了电动重型车队的工作效率
- 优先电动化车队：目前在柴油车队中，**30%**的重型牵引车队车辆可**直接实现1:1的电动化替代**



电动重型牵引车充电时间分布

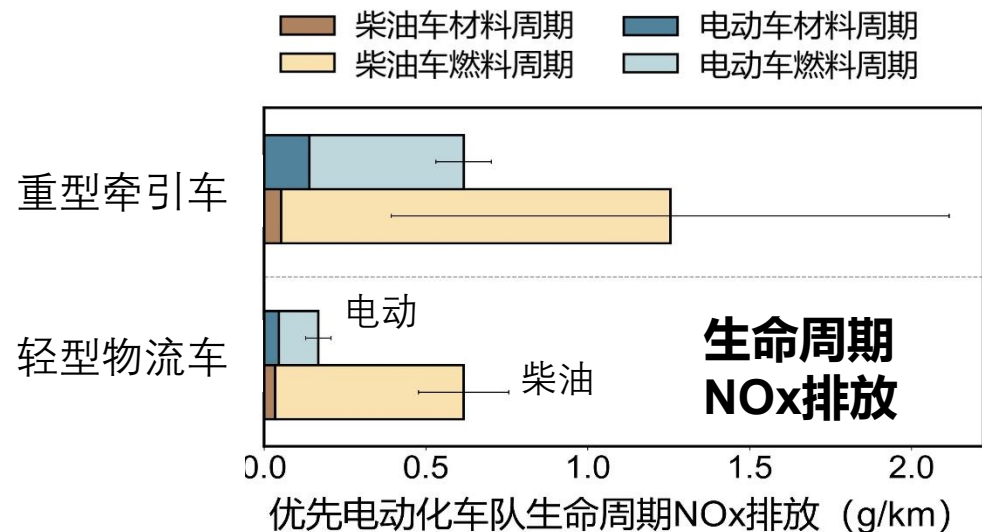
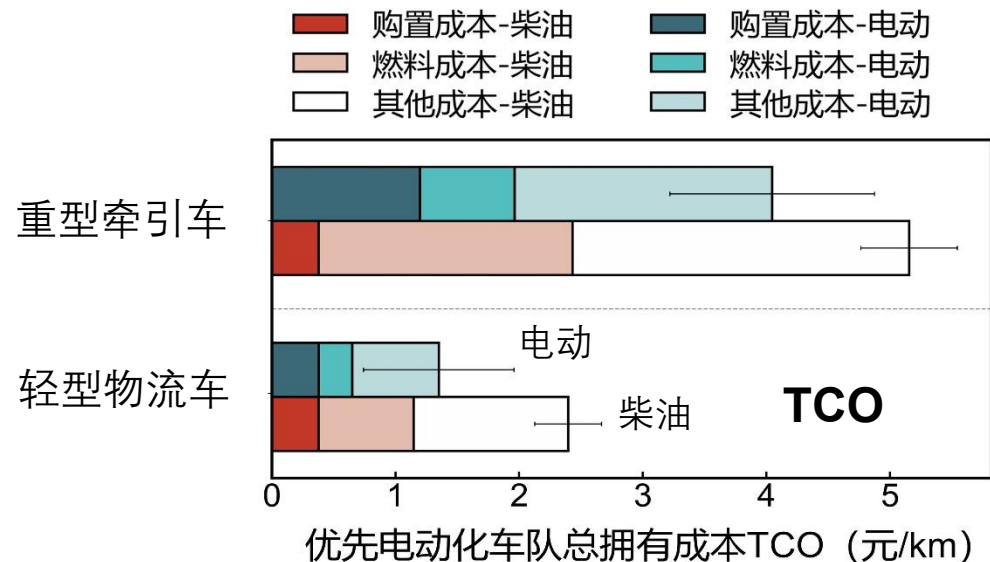
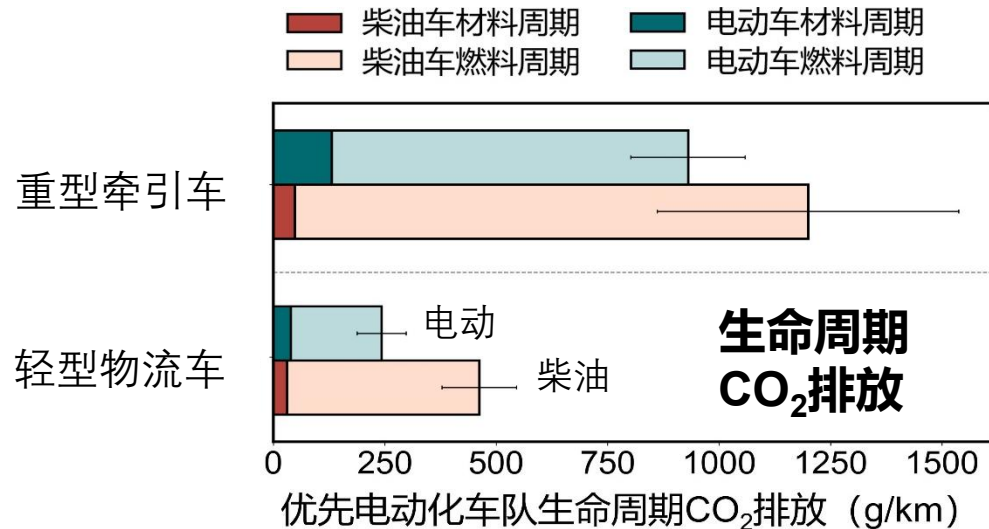


重型牵引车队日出行里程分布

可1:1替代车队具有更优的减排成本效益

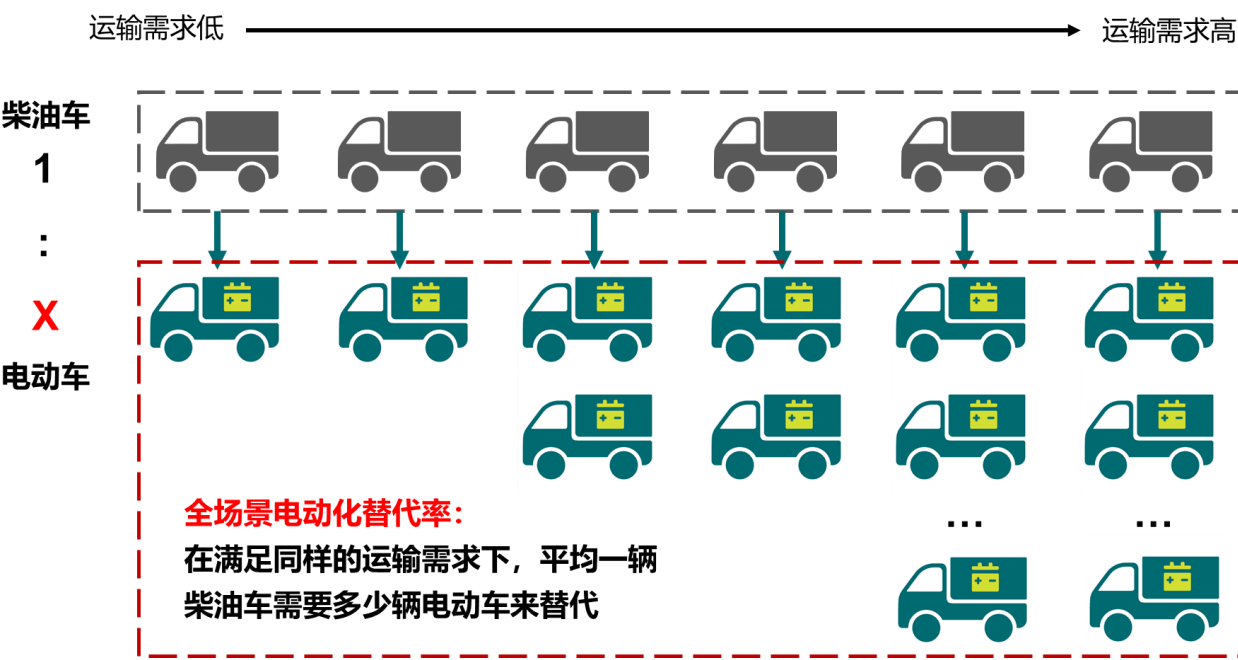
■ 将各使用场景可一比一替代的柴油车电动化可实现：

- >51%生命周期NO_x减排
- >22%生命周期CO₂减排
- >15%TCO降低



可行性仍是制约各车队电动化进程的关键因素

- **理想化的可行性评估指标：**全场景电动化替代率
- 各使用场景重型车队中可实现一比一替代的优先电动化车队比例为**16%~48%**，大部分车队的全场景电动化替代率在1.3~3.8之间，**重型牵引车为3.6**



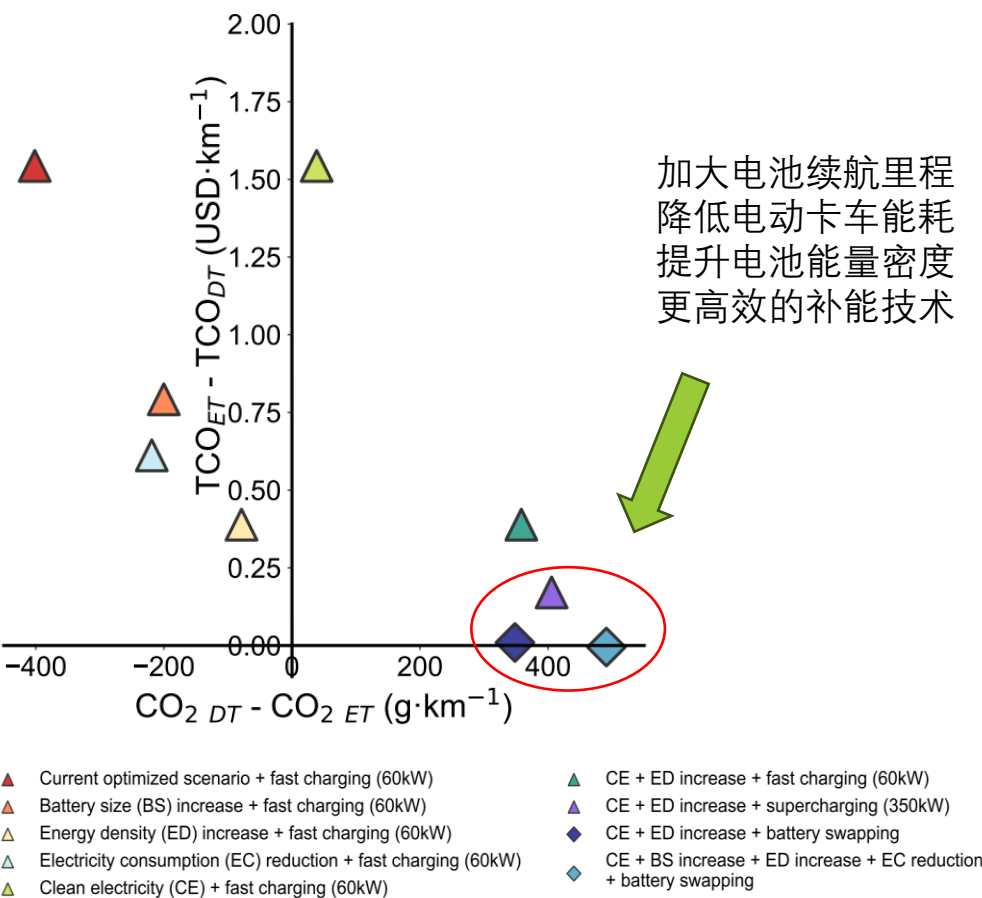
分场景重型车队优先电动化车队比例、全场景电动化替代率

使用场景	优先电动化车辆比例（%）	全场景电动化替代率
轻型物流车队	22.8	3.8
轻型环卫车队	21.8	1.9
轻型垃圾车队	20.1	0.5
中型载货车队	15.8	3.4
中型环卫车队	40.3	1.6
中型垃圾车队	24.9	1.3
重型自卸车队	31.6	1.8
重型牵引车队	30.3	3.6
重型垃圾车队	47.6	1.3

电动牵引货车未来优化情景评估

- 电池能量密度提升 (220Wh/kg)、降低电耗 (25%)、高效补能 (换电或350kW以上超快充) 的长续航电动重卡有望在2030年实现全场景电动化的成本和环境效益双赢

重型牵引车电动化优化情景的全场景电动化评估结果



nature energy

Analysis

<https://doi.org/10.1038/s41560-024-01602-x>

Challenges and opportunities in truck electrification revealed by big operational data

Received: 17 July 2023

Accepted: 11 July 2024

Published online: 12 August 2024

Check for updates

Pei Zhao^{1,2,3}, Shaojun Zhang^{1,2,4,5}, Paolo Santi^{2,5}, Dingsong Cui⁶, Fang Wang¹, Peng Liu^{4,7}, Zhaosheng Zhang⁸, Jin Liu⁹, Zhenpo Wang^{6,7}, Carlo Ratti^{2,9} & Ye Wu^{1,2,4}

The electrification of trucks is a major challenge in achieving zero-emission transportation. Here we gathered year-long records from 61,598 electric trucks in China. Current electric trucks were found to be significantly underutilized compared with their diesel counterparts. Twenty-three per cent of electric delivery trucks and 30% of semi-trailers could achieve one-on-one replacement with diesel counterparts, while on average 3.8 electric delivery trucks and 3.6 electric semi-trailers are required to match the transportation demand that is served by one diesel truck separately. For diesel trucks that are capable of one-on-one replacement, electric trucks have 15–54% and 1–49% reductions in cost and life-cycle CO₂ emissions, respectively. Enhancements in usage patterns, vehicle technologies and charging infrastructure can improve electrification feasibility, yielding cost and decarbonization benefits. Increased battery energy densities with optimized usage can make one-on-one electrification feasible for more than 85% of diesel semi-trailers. In addition, with cleaner electricity, most Chinese electric trucks in 2030 will have lower expected life-cycle CO₂ emissions than diesel trucks.

The comprehensive mitigation of carbon dioxide (CO₂) emissions from the transport sector is essential for achieving carbon neutrality. It was estimated that heavy-duty vehicles (HDVs) accounted for approximately 30% of all transport CO₂ emissions globally in 2020¹. As fleet electrification is recognized as an important solution to decarbonize the transportation sector, many countries and regions have set ambitious targets to drive electrification in HDV fleets^{2–4}. In California (US), the Advanced Clean Fleets regulation requires that truck manufacturers increase the market share of zero-emission

vehicles to 100% by 2036⁵. Led by California, the US government has set 30% and 100% sales targets for zero-emission medium-duty (MD) and heavy-duty (HD) vehicles by 2030 and 2040, respectively⁶. The new HDV CO₂ emission standard proposed by the European Commission sets CO₂ emission reduction targets of 45% by 2030 and 90% by 2040 compared with the 2019 levels for HDV fleets⁷, which is also expected to drive the deployment of electric trucks (ETs). In China, no official national market target for ETs has been announced, but the China Society of Automotive Engineers⁸ has proposed a future

¹School of Environment, State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing, China. ²Sensable City Lab, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA. ³State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing, China. ⁴Beijing Laboratory of Environmental Frontier Technologies, School of Environment, Tsinghua University, Beijing, China. ⁵Instituto di Informatica e Telematica del CNR, Pisa, Italy. ⁶National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, China. ⁷Collaborative Innovation Center for Electric Vehicles in Beijing & National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing, China. ⁸School of Humanities and Social Sciences, Beijing Institute of Technology, Beijing, China. ⁹Department ABC, Politecnico di Milano, Milan, Italy. ^{*}These authors contributed equally: Pei Zhao, Shaojun Zhang. ✉e-mail: zhaosun@tsinghua.edu.cn; wangzhenpo@bit.edu.cn; yewu@tsinghua.edu.cn

成都：路权政策助力重型车电动化推广

成都市通过**路权保障**、法规引导、经济补贴等多种措施推动公共领域车辆电动化
渣土车智慧化监管平台通过接入运渣车车辆基础信息、GPS数据、排放阶段等信息，**实时跟踪**渣土车的**运行特征**，采用电子围栏技术捕获活跃的渣土车车辆

关于调整城区部分道路机动车通行管理措施的通告
对**建筑垃圾运输车**进入三环作出限制
新能源车不受本规定限制

成都市新能源建筑垃圾运输车推广实施方案 (2023-2025年)

- 全市新增的建筑垃圾运输车原则上应为新能源车。
- 至2025年底，全市政府性工程新能源建筑垃圾运输车参运比例原则上达100%，成都绕城高速以内新能源建筑垃圾运输车的比例力争达100%。



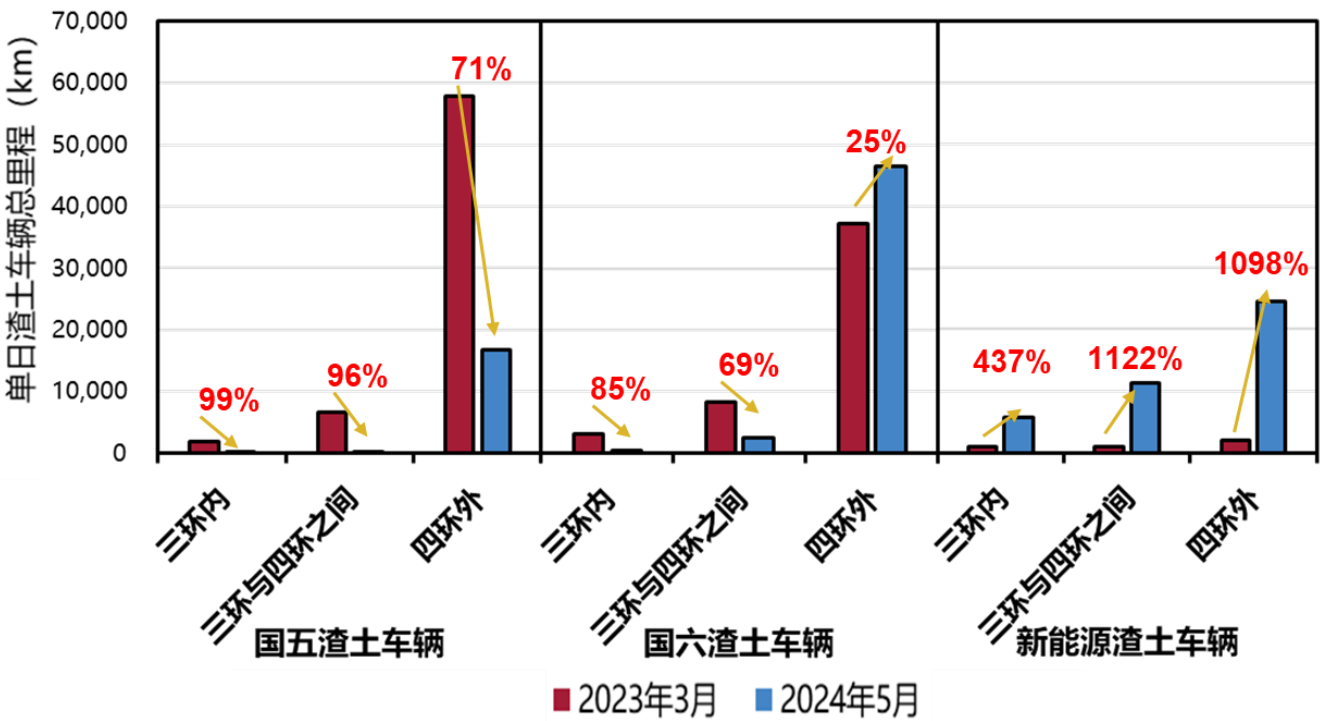
运渣车监管平台

运渣车电子围栏

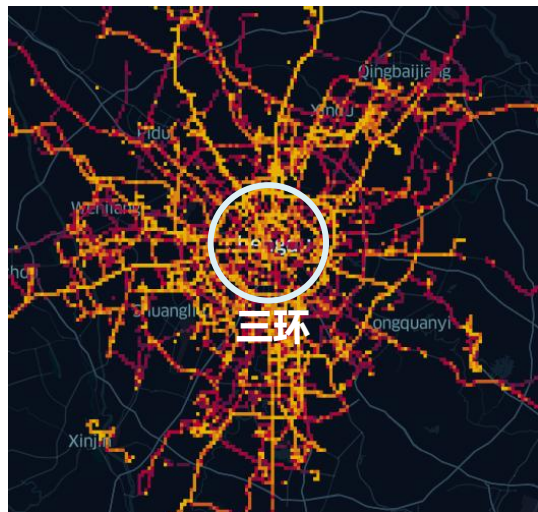
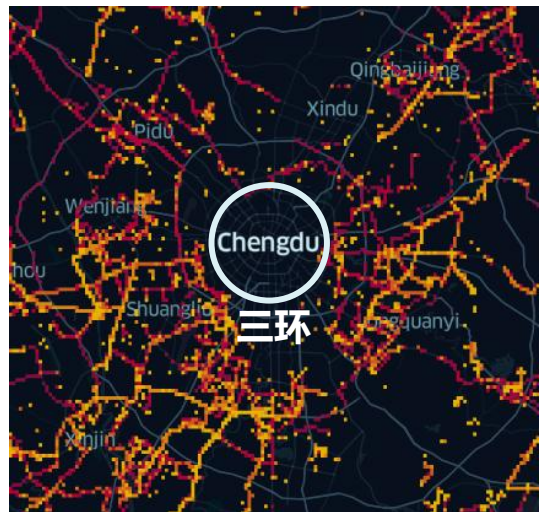
成都市的路权政策对渣土车辆活动水平的影响

- 路权政策实施以来，不同区域的新能源渣土车队活动水平大幅提高（437%~1122%）
- 非新能源车辆在四环内活动水平下降（-69%~-99%）

不同排放标准的渣土车队真实活动水平变化情况



渣土车真实活动水平解析
(2024-12月某日全样本数据)



电动渣土车在路权政策情景下的成本比柴油车低19.7%

- 基于成都市单日全样渣土车GPS数据评估
- 成都市通过提高电动车辆路权，**提高电动车辆的出行里程**，从而降低电动车辆每公里总拥有成本，**实现每公里总拥有成本优于柴油车辆**

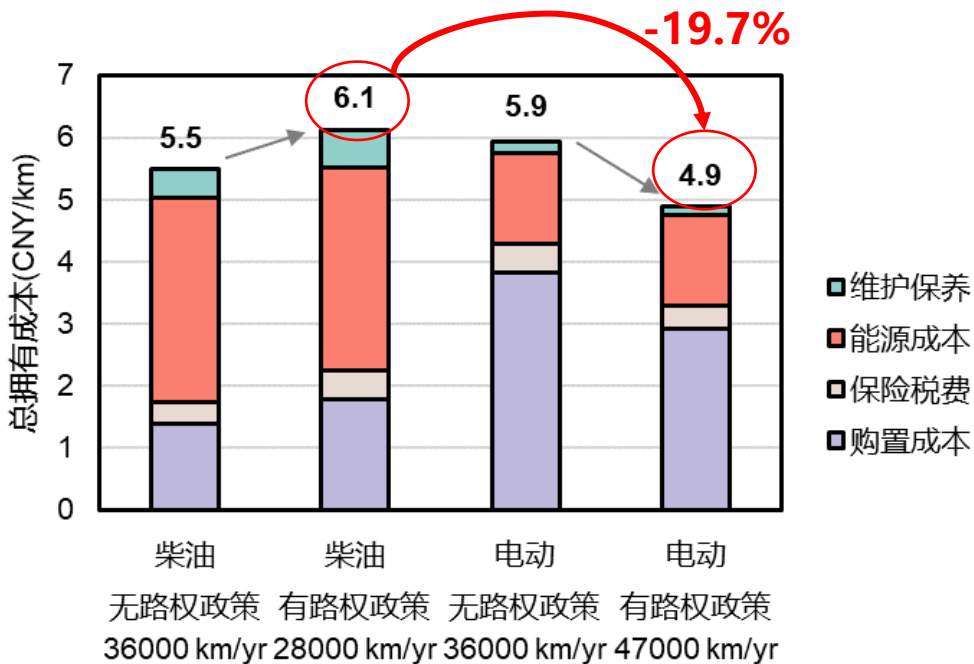
总拥有成本评估

- ✓ 购置成本（含补贴） PC_{ET_i}
- ✓ 燃料成本 FC_{ET_i}
- ✓ 保险税费 ITF_{ET_i}
- ✓ 过路费、维护与保养成本 MR_{ET_i}
- ✓ 残值 Res_{ET_i}

$$TCO_{ET_i} = \frac{PC_{ET_i} + [a \times (FC_{ET_i} + ITF_{ET_i} + MR_{ET_i}) - Res_{a,i}] \times \frac{1 - (1 - r)^a}{r}}{a \times \overline{VKT}_{ET_i}}$$

路权政策情景：使用柴油、电动车队**实际出行里程**计算总拥有成本

无路权政策情景：**假设所有车辆承担相同任务量**，即认为柴油、电动车辆的日出行里程为全体车队平均值

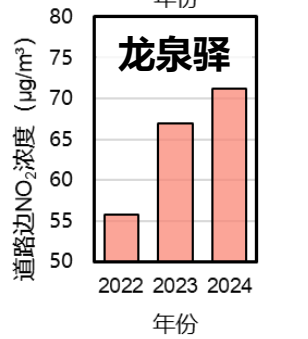
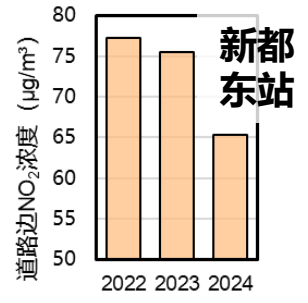
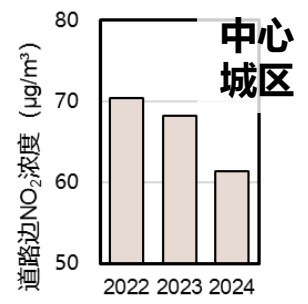
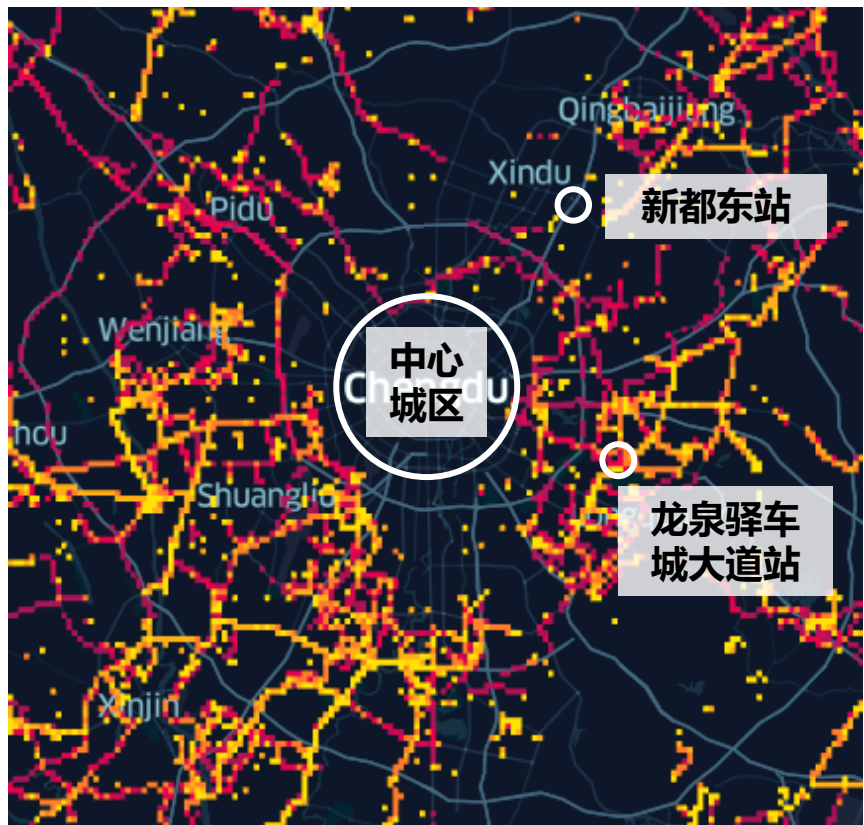
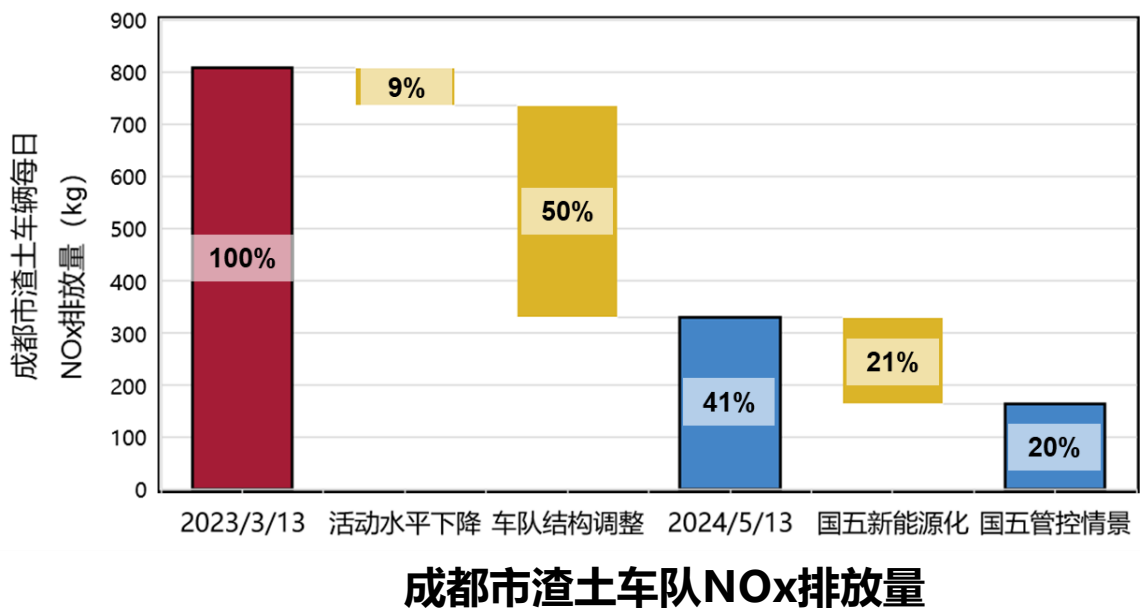


不同路权情景下柴油、电动建筑垃圾运输车辆的总拥有成本

注：假设车辆一年行驶200天

新能源渣土车辆的推广给成都市带来显著环境效益

- 2023至2024年间，渣土车队的车队结构调整实现了渣土车队50%的NO_x减排
- 进一步将在用国五渣土车辆新能源化，NO_x排放将进一步下降至2023年排放的20%
- 成都市中心城区道路边NO₂浓度呈现下降趋势，体现针对重型车辆的初步治理成效



结论

- 未来10年，货车的电动化空气质量效益有望超过乘用车，货车电动化成为中国城市突破移动源污染治理困境、解决多种大气污染物问题的重要途径。
- 从早期推广的电动货车来看，普遍存在低使用率的特征，限制了电动货车发挥减污降碳降本增效的潜力。
- 不同场景货车电动化的瓶颈因素存在差异，重型牵引车电动化主要受续航里程和基础设施的限制。
- 部分城市已经开展通过路权调控等措施的电动化激励政策，取得比较明显的效果。此外，大型货主、链主企业是未来清洁运输的重要抓手。



2025年长三角空气质量管理技术研讨会

2025 Yangtze River Delta Clean Air Forum

中国航空排放趋势及其空气质量影响

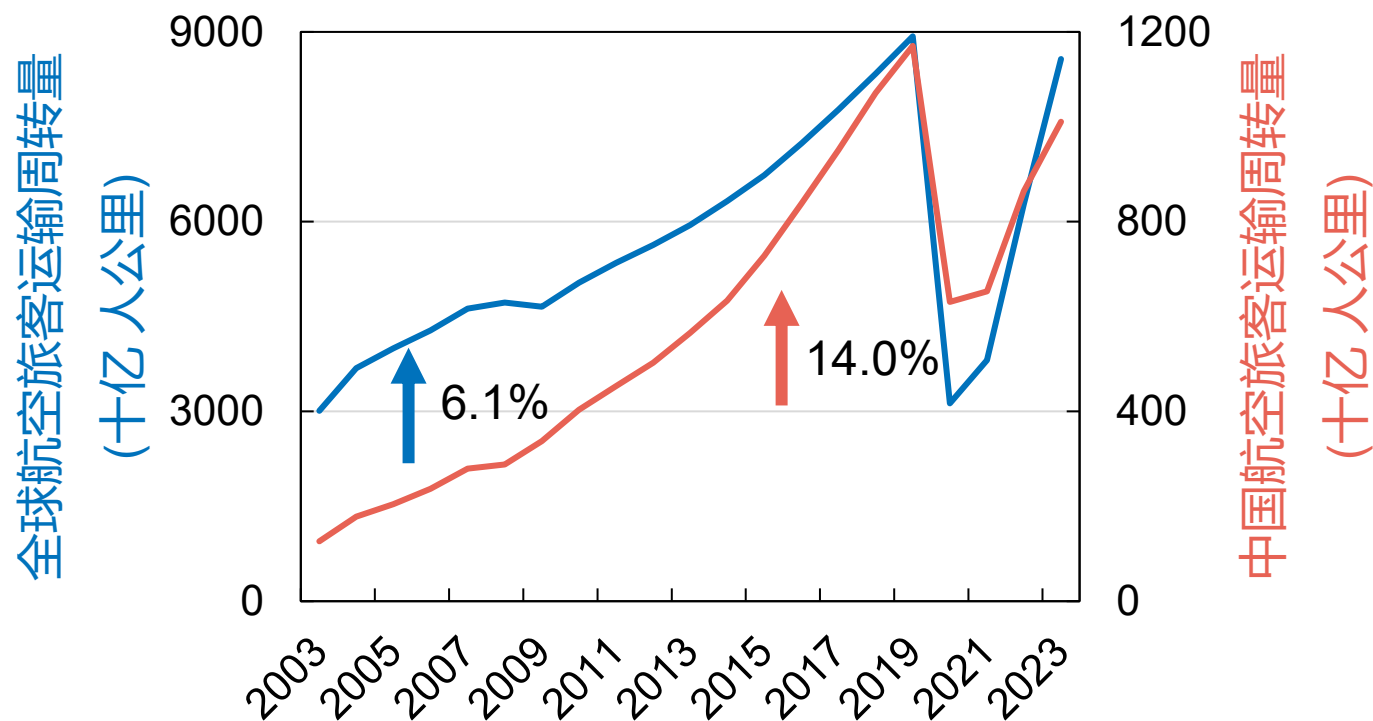
清华大学环境学院 张少君

2025年8月29日

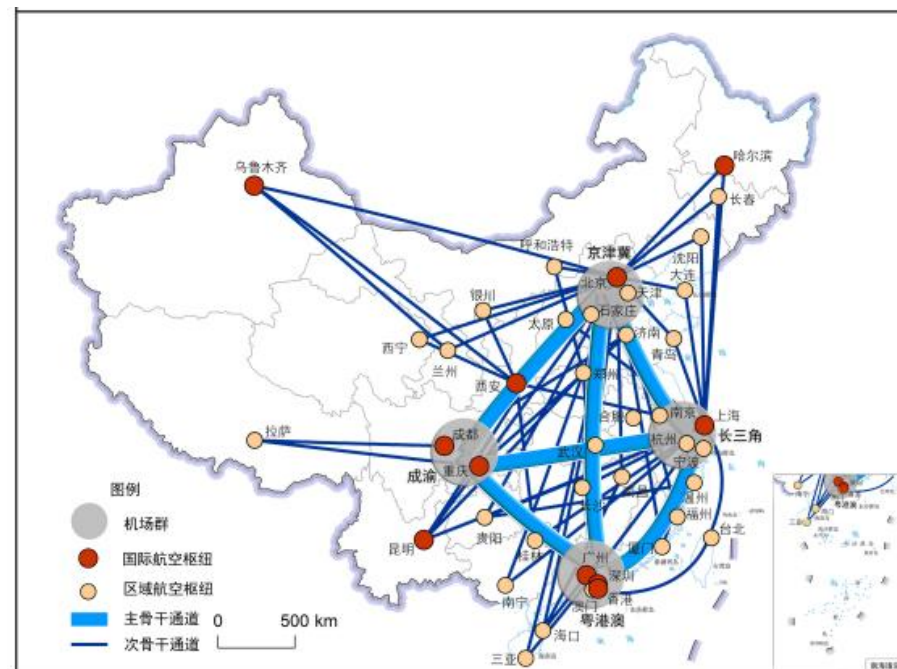
中国航空业持续快速发展

- 中国航空市场到2019年已达到1150亿人公里，自2000年以来年均增长率为**14%**
- 中国航空业持续**快速增长**，十四五期间规划新建了82座机场，2035年有望突破400座

中国与全球航空旅客运输周转量增长对比（RPK，2003–2023年）



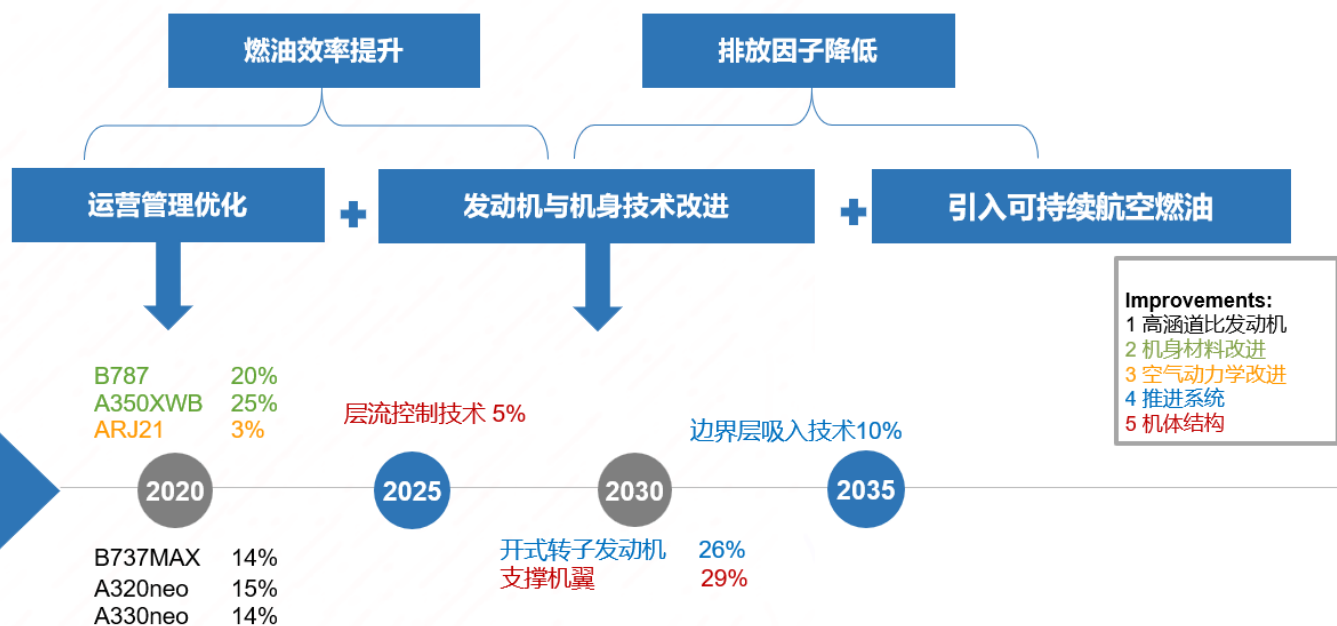
“十四五”计划中规划新建机场分布



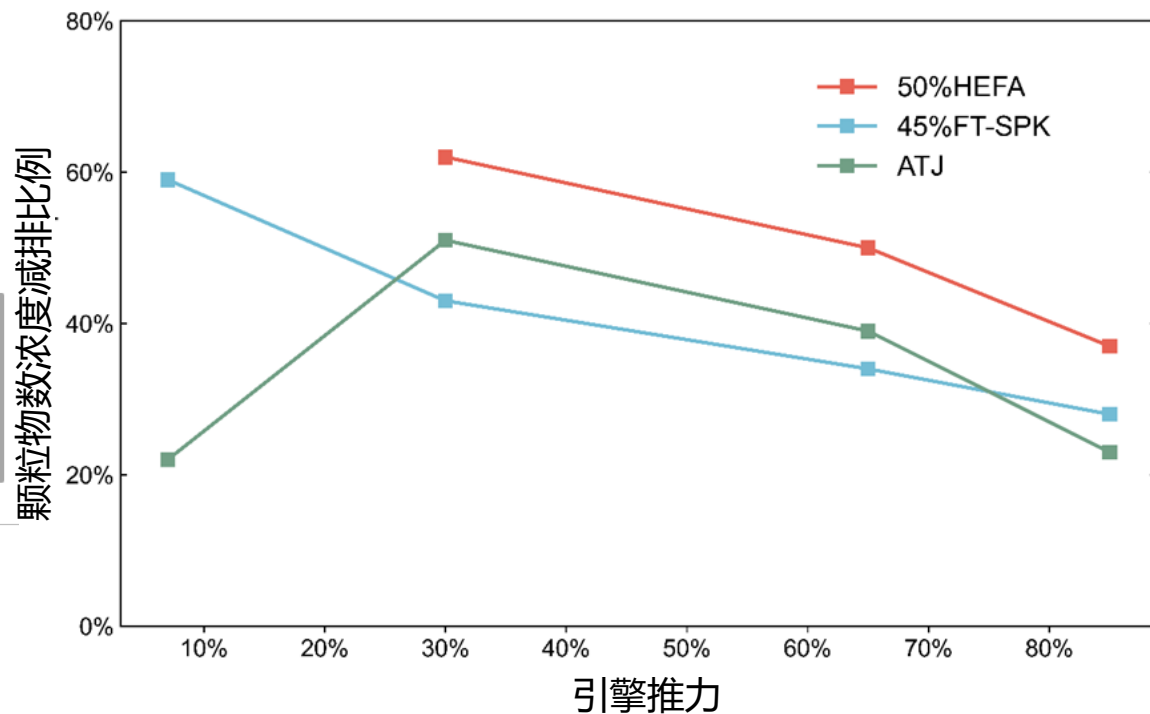
未来航空减排技术情景库及排放因子预测

- 目前航空业主要聚焦减碳，措施包括先进发动机/机身技术、运营优化和可持续航空燃料
- 上述措施可能通过降低油耗和改善单位燃油的污染物排放因子实现协同减污

未来可行的航空减排技术



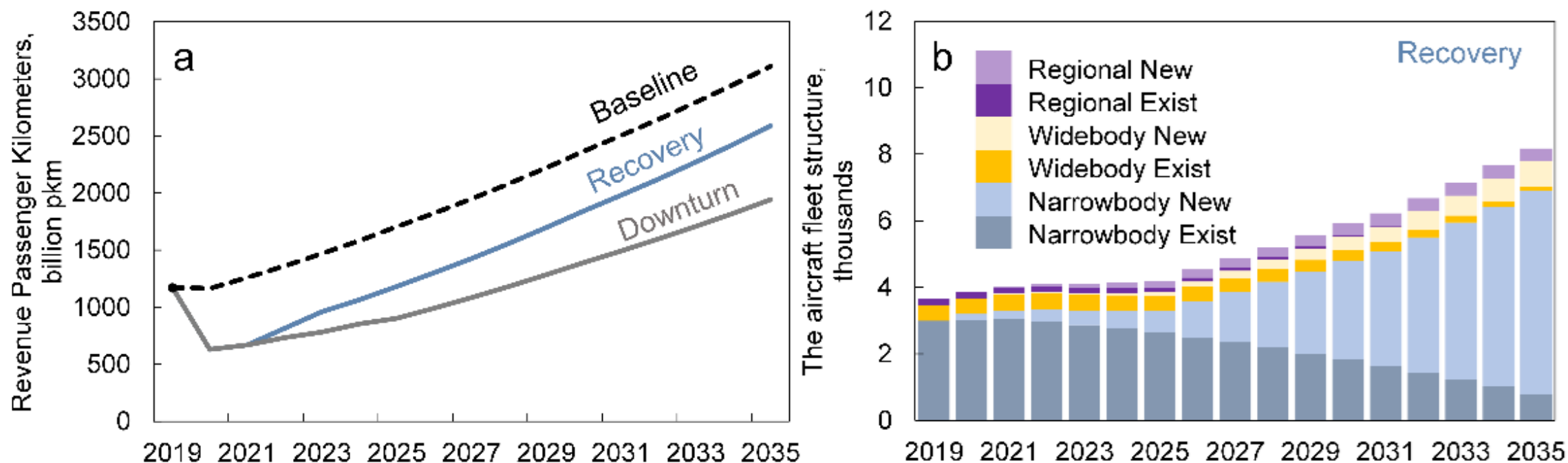
SAF对颗粒物排放因子的减排效应



民航市场与机队结构预测

- 到2035年，中国民航市场规模相对疫情前水平有望翻倍
- 机队也将快速扩张：恢复情景达到8000架，其中窄体客机为主导

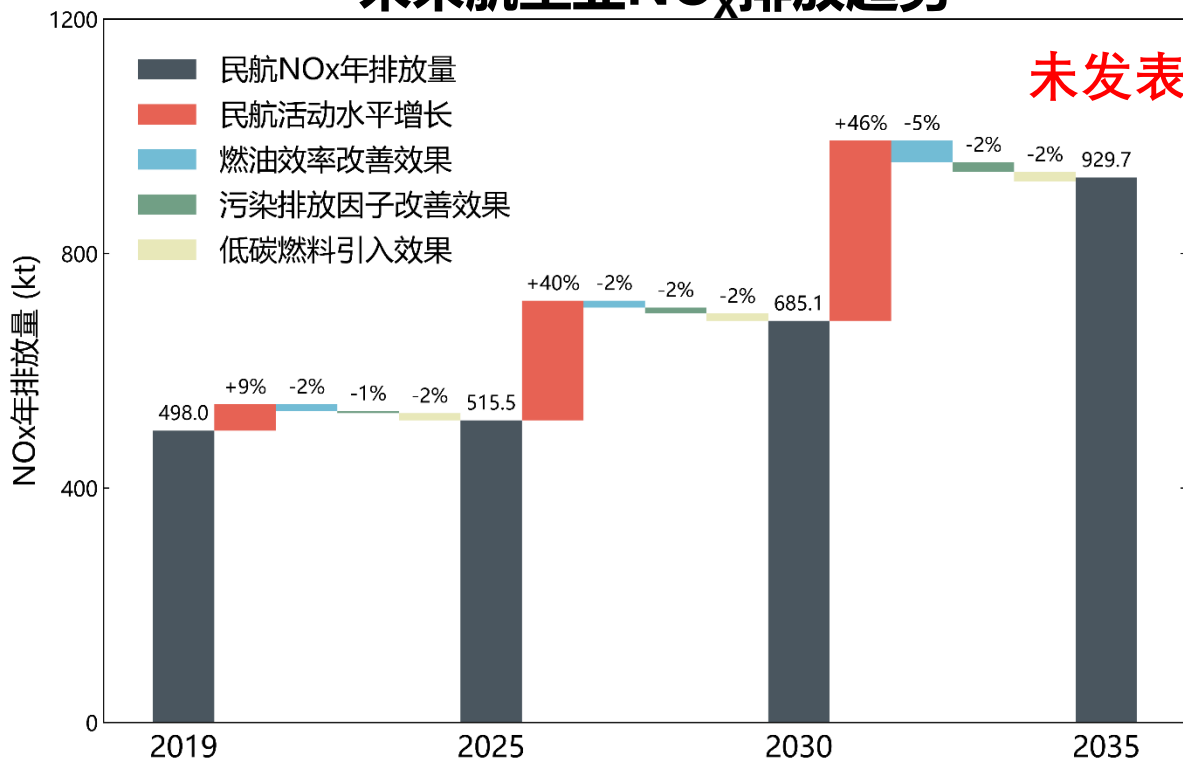
中国航空业2019–2035年在多种情景下的旅客周转量估算 (a)
及复苏情景下的机队结构 (b)



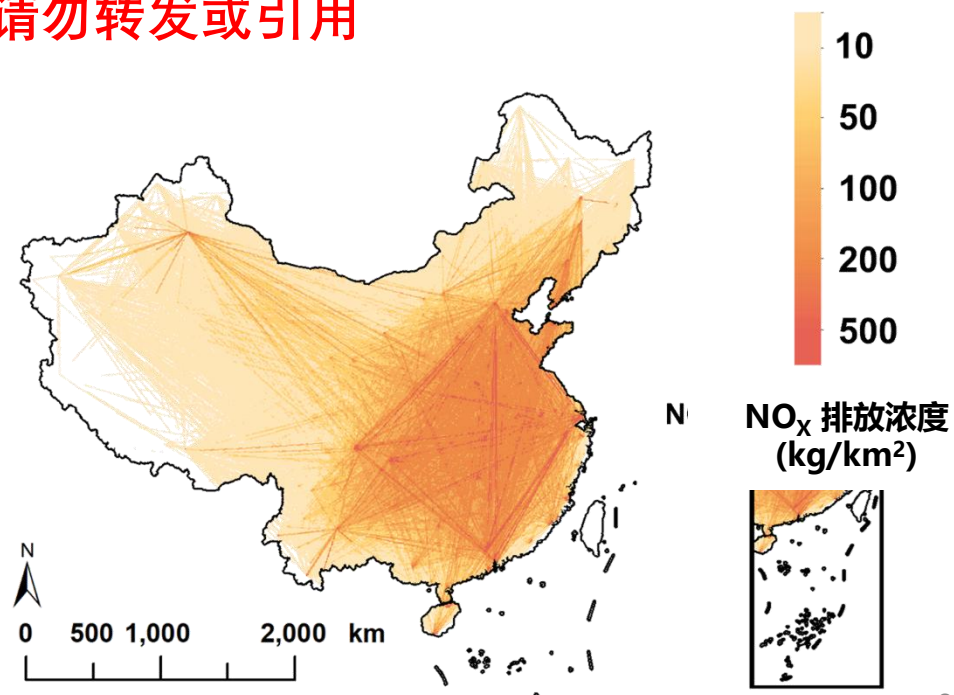
航空业快速增长使未来排放集中于核心枢纽

- 燃油效率提升和氮氧化物控制技术的改进不足以抵消航空业的快速增长
- 四大核心枢纽（北京、上海、成都、广州）仅覆盖中国8%的国土面积，但在2035年将贡献近23%的氮氧化物排放。

未来航空业NO_x排放趋势



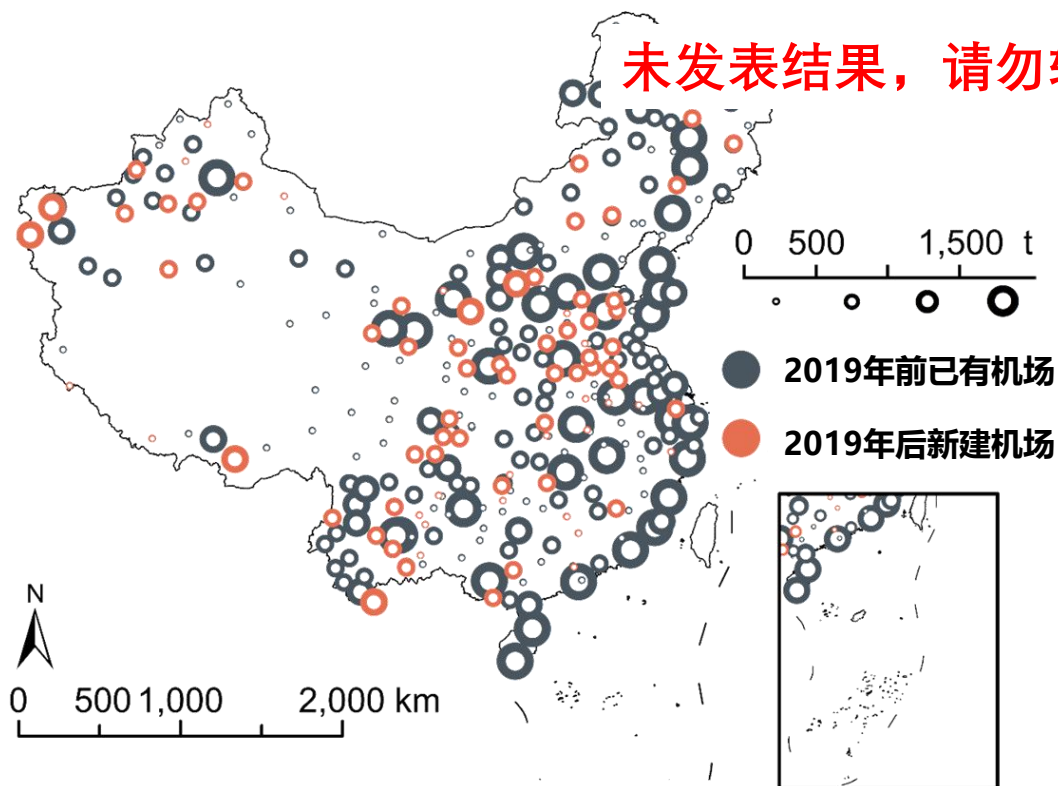
2035年航空业NO_x排放空间分布



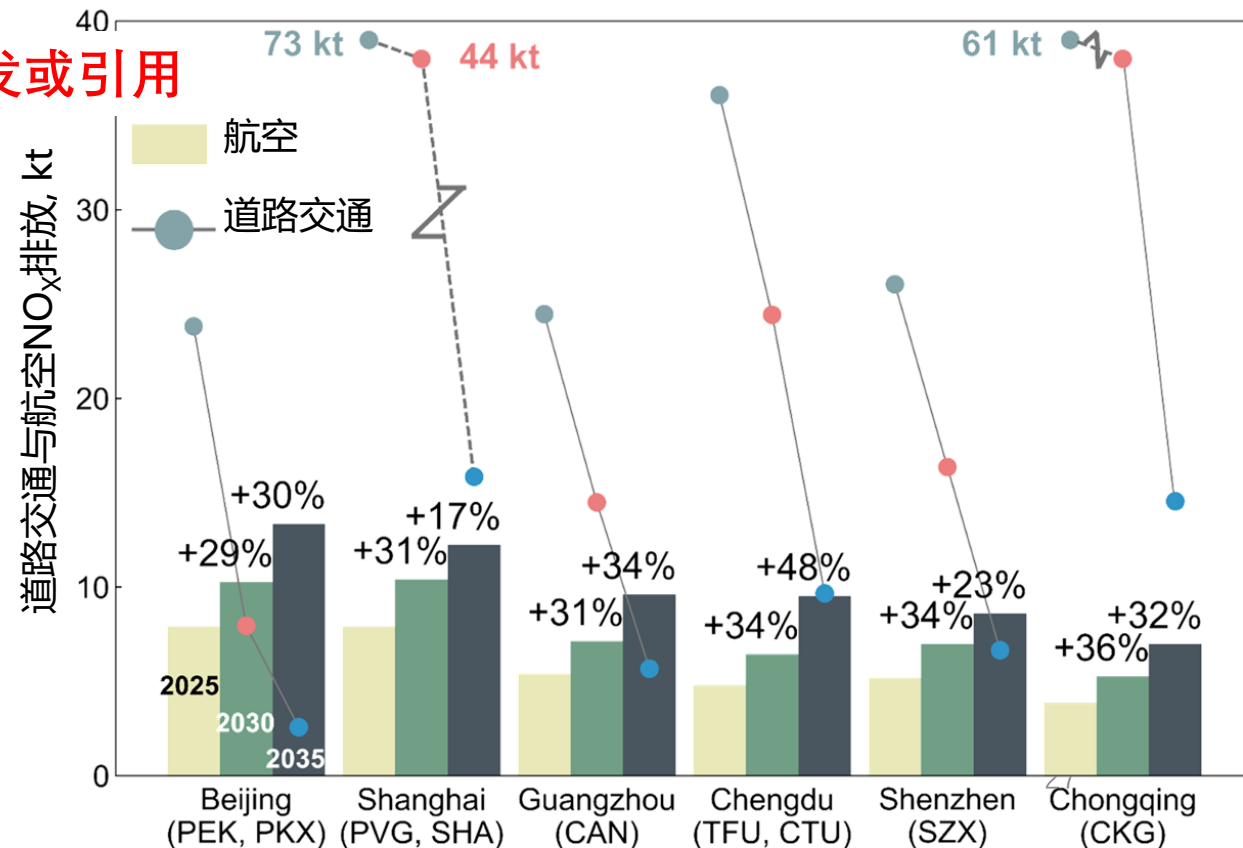
超大城市未来航空近地面NO_x排放可能超过道路排放

- 中国超大城市未来将存在高额地面航空排放，其NO_x排放量可能超过道路交通排放
- 空气质量模拟结果显示，航空排放对北京、上海等地的PM_{2.5}浓度贡献超过2 μg/m³

2019-2035航空近地NO_x排放增加趋势



中国大陆六大主要城市交通NO_x排放





THANK YOU

欢迎各位专家指导