

## 中国下一阶段重型车排放标准建议 ——基于国VI车辆测试结果

作者: 牛天林、Felipe Rodríguez

关键词: 重型车 (HDV)、车辆测试、排放标准、油耗、温室气体(GHG)

### 背景

2021年, 重型货车在中国道路车辆保有量中的占比仅为4%, 但其氮氧化物排放占比高达道路车辆排放总量的79.8%, 颗粒物排放占比高达58.5%<sup>1</sup>。随着中国在清洁空气领域的大步迈进, 对于重型货车的排放控制也在快速发展, 管理法规也在日益加严。重型货车国VI-a阶段排放标准自2021年7月1日开始在全国范围实施, 在此之前, 已经有部分重点地区提前实施了该标准。国VI-b阶段标准将于2023年7月1日开始全面实施<sup>2</sup>。

大体而言, 国VI-a阶段标准等效于欧VI标准, 国VI-b阶段标准则小幅加严了测试要求, 同时要求车辆必须安装车载远程排放监控系统。尽管在国VI标准下, 重型货车的氮氧化物和颗粒物排放可比国V标准降低70%左右<sup>3</sup>, 但我们仍有机会实现重型货车排放的进一步下降。2021年12月28日发布的《“十四五”节能减排综合工作方案》要求研究制定下一阶段重型车排放标准, 主要污染物排放总量持续减少, 实现节能降碳减污协同增效<sup>4</sup>。

对国VI重型货车的实际行驶排放情况进行评估, 了解下一阶段排放标准(国VII)所需的潜在改进点, 是中国管理部门所需完成的一项实质性任

1 生态环境部, 《中国移动源环境管理年报-2021》, 2022年, 详见: <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202109/W020210910400449015882.pdf>; 和国家统计局, 《中国统计年鉴-2021》, 2022年, 详见: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexch.htm>。

2 生态环境部, 《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB 17691—2018), 2019年, 详见: [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqhbh/dqdywrrwzpfbz/201807/t20180703\\_445995.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqhbh/dqdywrrwzpfbz/201807/t20180703_445995.shtml)。

3 杨柳含子、何卉, “China’s Stage VI Emissions Standard for Heavy-Duty Vehicles (Final Rule)” (华盛顿, 国际清洁交通委员会, 2018), 详见: <https://theicct.org/publication/chinas-stage-vi-emissions-standard-for-heavy-duty-vehicles-final-rule/>; 和金铃芝等, 《“十四五”及中长期中国交通部门低碳化的机遇与路径》(华盛顿, 国际清洁交通委员会, 2021), 详见: <https://theicct.org/publication/opportunities-and-pathways-to-decarbonize-chinas-transportation-sector-during-the-fourteenth-five-year-plan-period-and-beyond/>。

4 发改委, 《国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知》, 2022年1月27日, 详见: [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/jnhnx/202201/t20220127\\_1313521\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/jnhnx/202201/t20220127_1313521_ext.html)。

鸣谢: 作者诚挚感谢国际清洁交通委员会内部同事杨柳含子和Sina Kazemi Bakhshmand为本报告提供指导及建设性意见。同时诚挚感谢来自厦门环境保护机动车污染控制技术中心的苏盛、赖益土和吕涛协助开展专业的车辆测试, 感谢来自机动车排污控制中心的李刚和来自清华大学的何立强为测试数据分析工作提供支持。

[www.theicct.org](http://www.theicct.org)

[communications@theicct.org](mailto:communications@theicct.org)

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

务。为了为有关部门提供支持，此报告展示了国VI标准的两辆N3类车辆<sup>5</sup>的实际道路测试研究结果。研究旨在更好地了解重型车实际行驶排放，了解现有货车发动机及排放控制技术的实际性能表现，从而为下一阶段排放标准提供政策建议。本次的车辆测试工作由厦门环境保护机动车污染控制技术中心（VETC）负责，在厦门市开展进行。

我们此次还研究了国家标准与最新出台的欧盟标准提案之间存在的差距，并探究如何弥补这些差距。欧盟委员会顾问团队（又称超低排放车辆联盟，简称CLOVE）已经为下一阶段欧盟标准（欧VII标准）提出了建议<sup>6</sup>。欧盟委员会预计将于2022年10月底正式发布欧VII标准。

## 测试车辆

我们选择了两款国VI-b标准认证的重型车，这两款车型的发动机排量和额定功率在其所属的车型和车辆质量段中均具有代表性。

如图1所示，1号车是一辆车辆总质量（GVW）18吨的厢式货车。其排放控制系统包括高效选择催化还原（SCR）系统、柴油机氧化催化器（DOC）、氨逃逸催化器（ASC）以及颗粒物捕集器（DPF）。车辆系统中没有外部废气再循环（EGR）回路，其发动机排量和额定功率分别为4.5L和162kW，从油耗标准分类上该车辆属于车辆总质量在16-20吨之间的普通（厢式）货车。



图1. 1号车技术规格以及与所在分类中其他车辆的对比情况

5 货运车辆（货车），车辆总质量（GVW）> 12,000 kg

6 Stefan Hausberger等，“Supplements to the Scenarios for HDVs Emission Limits and Test Conditions”（布鲁塞尔，2021），详见：[https://circabc.europa.eu/scd/a/e0063651-4e84-4b95-aac4-edb85a719764/AGVES-2021-04-27-HDV\\_Exhaust-v6b.pdf](https://circabc.europa.eu/scd/a/e0063651-4e84-4b95-aac4-edb85a719764/AGVES-2021-04-27-HDV_Exhaust-v6b.pdf)

如图2所示，2号车是一辆车辆组合总质量（GCW）41.8吨的半挂牵引车。其排放控制系统包括了额外的发动机EGR+中效SCR系统、DOC、ASC以及DPF。2号车的发动机排量和功率分别为8.6L和283kW，从分类上该车辆属于车辆组合总质量在40-43吨之间的牵引车。



图 2. 2号车技术规格以及与其所在分类中其他车辆的对比情况

在选择车辆的过程中，我们发现在车辆总质量（GVW）和额定功率相似的情况下，国VI重型货车的发动机排量会较先前排放标准的重型货车低一些。EGR联合中效SCR仍是主流排放控制技术，包括玉柴、潍柴和锡柴等在内的发动机生产企业广泛采用该技术路线。单纯使用高效SCR系统的方式也在变得越来越普及，康明斯和潍柴均采用了这种技术。

## 测试方法论

### 测试工况与负载

我们对每一辆车分别进行了几次道路测试。除了国VI标准中所要求的车辆在用符合性（ISC）测试以外，我们还对车辆进行了城市货运及低负载工况测试，以评估车辆在城市和特殊工况下的排放性能。其中，低负载测试采用的是加州空气资源委员会（CARB）开发的低负载工况（LLC）标准，这套工况是CARB针对重型车实际道路氮氧化物和颗粒物排放问题而在最新发布的公交客车管理法规(Omnibus)中提出的<sup>7</sup>。我们开展的所有实际道路测试都使用的是车载排放测量系统（PEMS）。

<sup>7</sup> Sara Kelly和Benjamin Sharpe, “California’s Heavy-Duty Omnibus Regulation: Updates to Emission Standards, Testing Requirements, and Compliance Procedures” (华盛顿, 国际清洁交通委员会, 2022), 详见: <https://theicct.org/publication/california-us-hdv-omnibus-reg-jan22/>.

我们同时也在实验室中进行了底盘测功机实验来测量重型车标准工况下的油耗、温室气体排放和 $PN_{10}$ （粒径超过10nm的颗粒物的粒子数量）。具体实验设计见表1。

表1. 测试详情及目标

1号车	2号车	实验目标
在N3车辆城市工况循环 (ISC-Urban) 下进行2次车辆在用符合性PEMS测试	在N3车辆城市工况循环 (ISC-Urban) 下进行2次车辆在用符合性PEMS测试 在N3车辆非城市工况循环 (ISC-Nonurban) 下进行两次PEMS测试	了解车辆为国VI法规 (17691-2018) 下的合规情况, 包含冷启动排放测量。
2次城市货运 (UD) PEMS测试	2次城市货运 (UD) PEMS测试	从设计上是为了复制典型的城市货运车辆使用情况, 包括频繁的长时间停靠, 高峰时段行驶, 行驶时间和距离设计为至少2.5小时总出行时间或40公里总行驶距离的典型设计。
1次低负载工况循环 (LLC) PEMS测试	1次低负载工况循环 (LLC) PEMS测试	基于CARB开发的低负载工况进行测试, 反映氮氧化物排放最差的行驶工况。
C-WTVC工况底盘测功机测试 <sup>a</sup> : 1次冷启动 + 4次热启动	C-WTVC工况底盘测功机测试: 1次冷启动 + 3次热启动	符合中国重型车燃料消耗量标准 (GB27840-2011), 为了了解车辆的燃料消耗量及 CO <sub>2</sub> 排放情况。

a 中国采用的世界统一瞬态工况。

图3和图4显示了两辆测试车辆部分ISC、UD以及LLC测试工况的速度曲线。为了确保环境温度足够评估冷启动所带来的影响, 车辆测试是在冬季开展的, 其中1号车是在2021年12月进行的测试, 2号车是在2022年2月进行的测试。

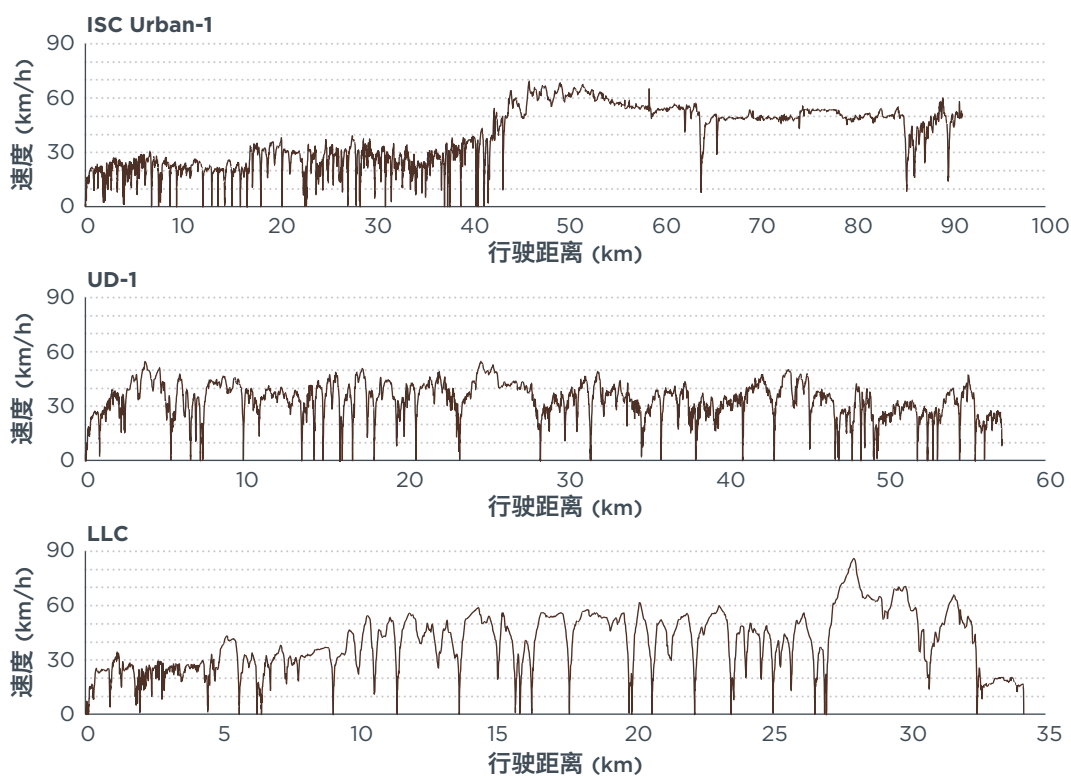


图3. 1号车的典型工况速度曲线

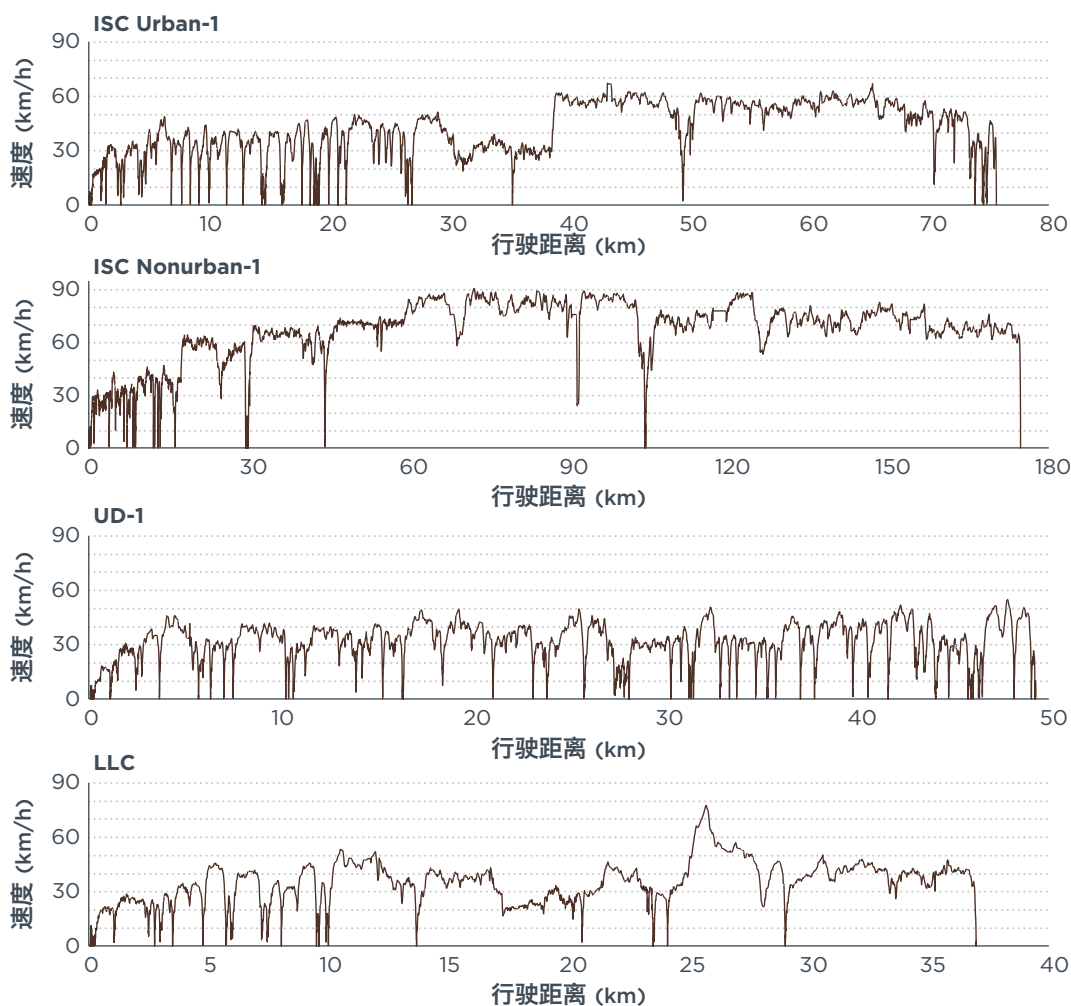


图4. 2号车的典型工况速度曲线

## 污染物及测试设备

国VI标准所管理的尾气污染物包括一氧化碳（CO）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）和粒径大于23 nm的颗粒物粒子数量（PN<sub>23</sub>）。目前，作为细颗粒物重要前驱物的氨（NH<sub>3</sub>）<sup>8</sup>、20年和100年全球变暖潜能值（GWP）均高达273的温室气体氧化亚氮（N<sub>2</sub>O）<sup>9</sup>以及PN<sub>10</sub>（囊括PN<sub>23</sub>以及粒径在10nm至23 nm的颗粒物粒子数量）尚未被纳入法规管理范围。此次对1号车和2号车进行的测试均涵盖了上述五类排放，同时还对车辆的油耗和CO<sub>2</sub>排放进行了测试。

测量CO、NO<sub>x</sub>、PN<sub>23</sub>和CO<sub>2</sub>均使用的是HORIBA OBS ONE PEMS分析仪；测量NH<sub>3</sub>和N<sub>2</sub>O使用的是HORIBA QCL设备；PN<sub>10</sub>则是唯一通过底盘测试进行测试的污染物，使用AVL的CVS i60通道进行全流稀释定容采样。

8 Junsu Park等, "Contributions of Ammonia to High Concentrations of PM2.5 in an Urban Area," *Atmosphere* 12, no. 12 (2021年12月14日): 详见: 1676, <https://doi.org/10.3390/atmos12121676>.

9 联合国政府间气候变化专门委员会, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis," Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, 详见: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter\\_07\\_Supplementary\\_Material.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_07_Supplementary_Material.pdf).

## 排放测试结果

我们采用移动平均窗口法（MAW）对所有PEMS测试数据进行了分析，在对数据进行评估的同时我们将排放结果与国VI法规限值以及前文提到的CLOVE欧VIII提案限值分别进行了比较。

所有法规污染物排放均根据国VI标准按照90百分位MAW值（MAW 90%）与国VI车辆实际道路排放限值进行比较。我们分别分析了包含和不包含冷启动过程的排放结果（包括MAW 90%值），但根据国VI规定，我们在进行国VI合规性判断时剔除了冷启动排放结果。

此外，我们还根据CLOVE 欧VII提案对其100百分位值（MAW 100%）和MAW 90%值一同进行了评估，并将统计结果与CLOVE 欧VII提案中的相应限值进行了比较（分别为CLOVE-100 和CLOVE-90）。

图5展示了所有有效窗口的MAW结果，以及非MAW分析的行程平均排放结果，具体包括以下内容：

- » 包含及不包含发动机冷启动<sup>10</sup>的CO、NO<sub>x</sub>、PN<sub>23</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>所有MAW排放结果的箱线图。
- » CO、NO<sub>x</sub>、PN<sub>23</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>排放的关键MAW值：
  - » 所有MAW结果的90百分位窗口值（MAW 90%），标记为菱形；
  - » 所有MAW结果的100百分位窗口值（MAW 100%），标记为圆形。
- » CO、NO<sub>x</sub>、PN<sub>23</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>的行程平均排放结果，未进行任何MAW后处理，标记蓝色叉号。
- » 标准限值：
  - » 国VI标准中的CO、NO<sub>x</sub>和PN<sub>23</sub>限值，标记为红色实线（N<sub>2</sub>O 和NH<sub>3</sub>尚未纳入管理范畴）。
  - » CLOVE欧VII提案中的CO、NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O和NH<sub>3</sub>限值。其中CLOVE 100百分位限值（CLOVE-100），即MAW分析中排放最差的窗口，标记为绿色虚线；CLOVE 90百分位限值（CLOVE-90）标记为橙色虚线。

<sup>10</sup> 冷启动的定义是车辆启动时发动机冷却液的温度等于环境温度，发动机冷却液温度达到70 °C则冷启动结束。

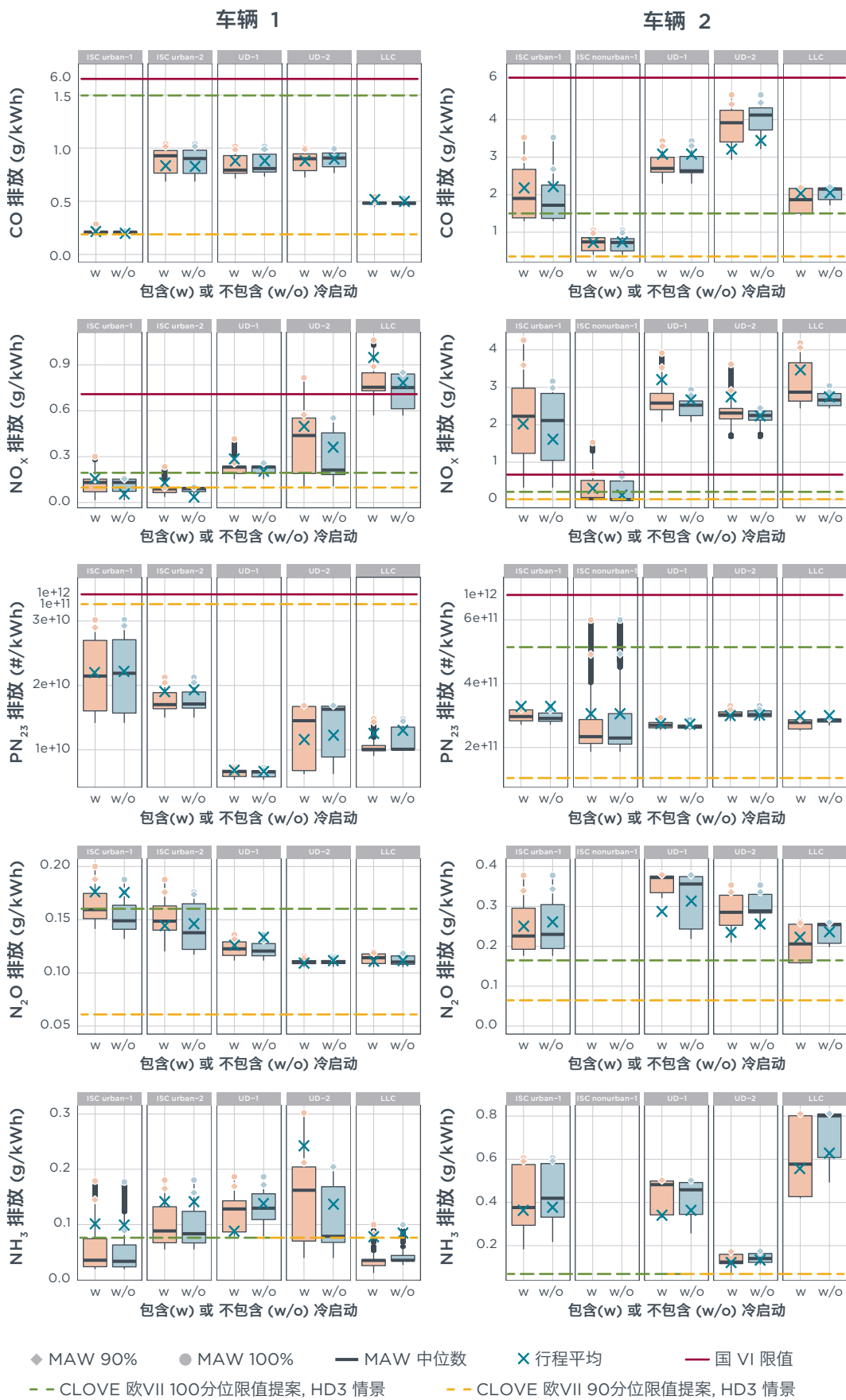


图5. 所有有效PEMS测试的排放结果的MAW和行程平均分析结果。注：PN<sub>23</sub>图中标注的CLOVE限值是PN<sub>10</sub>的提议限值，放在图中仅供参考。

## 国VI标准合规性分析

如图5所示，在不包含冷启动排放的情况下，将车辆对应的在用符合性（ISC）工况MAW 90%排放结果与国VI道路车辆排放限值进行比较，可以看到1号车和2号车的CO、NO<sub>x</sub>和PN<sub>23</sub>排放均符合国VI标准限值。其中，1号车是一辆18吨的整体式货车，对应ISC城市工况测试结果进行国VI标准合规评估；2号车是一辆36吨的半挂牵引车，对应ISC非城市工况测试结果进行国VI标准合规评估，测试路线依照国VI标准ISC路线要求进行，未包含冷启动。

国VI标准中的相关要求原则上适用于发动机，并不适用于整车。2号车搭载的同款8.6L柴油发动机也可以适用于车型较小的普通货车，这将会导致ISC城市工况成为合规性测试的适用工况。因此，在本章中我们也会讨论2号车在ISC城市工况测试下的排放性能。

两辆车均能够满足CO排放限值且具有较大的达标余量空间，MAW 90%排放结果仅为国VI标准6 gCO/kWh限值的1/3-1/20。然而，值得注意的是，2号车在ISC城市工况下的CO排放为2.7 gCO/kWh，是1号车在相同工况循环下CO排放的10倍。

氮氧化物排放方面，1号车的MAW 90%排放结果为0.10-0.15 gNO<sub>x</sub>/kWh，远低于国VI标准中0.69 gNO<sub>x</sub>/kWh的道路车辆排放限值。相比之下，2号车在ISC非城市测试中的MAW 90%排放结果为0.62 gNO<sub>x</sub>/kWh，几乎是擦线达标。如果包括冷启动排放，则2号车的MAW 90%排放结果将刚好达到0.69 gNO<sub>x</sub>/kWh的限值。此外，如果在ISC城市测试下对2号车的发动机进行评估，则其排放会大幅超标，MAW 90%的排放结果为3.0 gNO<sub>x</sub>/kWh，约为国VI道路车辆排放限值的4.4倍。

虽然两辆货车的PN<sub>23</sub>排放结果均大幅低于国VI标准限值，但2号车的排放量是1号车的10倍。国VI标准中的道路车辆排放限值为 $1.2 \times 10^{12}$  #/kWh，2号车在ISC城市测试中的排放结果为 $2.93 \times 10^{11}$  #/kWh，在ISC非城市测试中的排放结果为 $4.94 \times 10^{11}$  #/kWh。

在接下来的章节中，我们将对所有污染物和所有工况的排放性能进行深入分析，其中也包括目前国VI标准车辆在用符合性（ISC）法规中尚未涵盖的污染物及工况。

## NO<sub>x</sub>和NH<sub>3</sub>排放分析

柴油发动机尾气中的固定氮以NO<sub>x</sub>和NH<sub>3</sub>两种排放物的形式存在，固定氮排放物在大气中发生反应会形成颗粒物污染（如PM<sub>2.5</sub>），对人体健康有最为严重的危害。在中国，机动车尾气排放正是PM<sub>2.5</sub>污染的主要源头之一。因此，污染物排放法规必须要确保NO<sub>x</sub>控制技术（在大多数情况下为SCR系统）不会导致NH<sub>3</sub>排放量的增加。



从图5所示的结果中可以看出，冷启动排放对NO<sub>x</sub>排放性能的影响最大。这一现象并不出乎意料，因为SCR系统必须达到其激活温度（通常为200°C）才能有效减少NO<sub>x</sub>排放<sup>11</sup>。同样，NH<sub>3</sub>排放是氨（SCR还原剂）从SCR系统中逸出的后果，而SCR系统表面的氨存储能力也取决于其系统温度。

图6和图7展示了三中不同测试工况循环下的NO<sub>x</sub>排放量的累积占比，并用不同颜色表示SCR的上游温度变化。在SCR处于启动温度时，曲线显示为白色；在SCR温度低于200°C时曲线变为蓝色；当温度高于200°C时曲线变为红色。

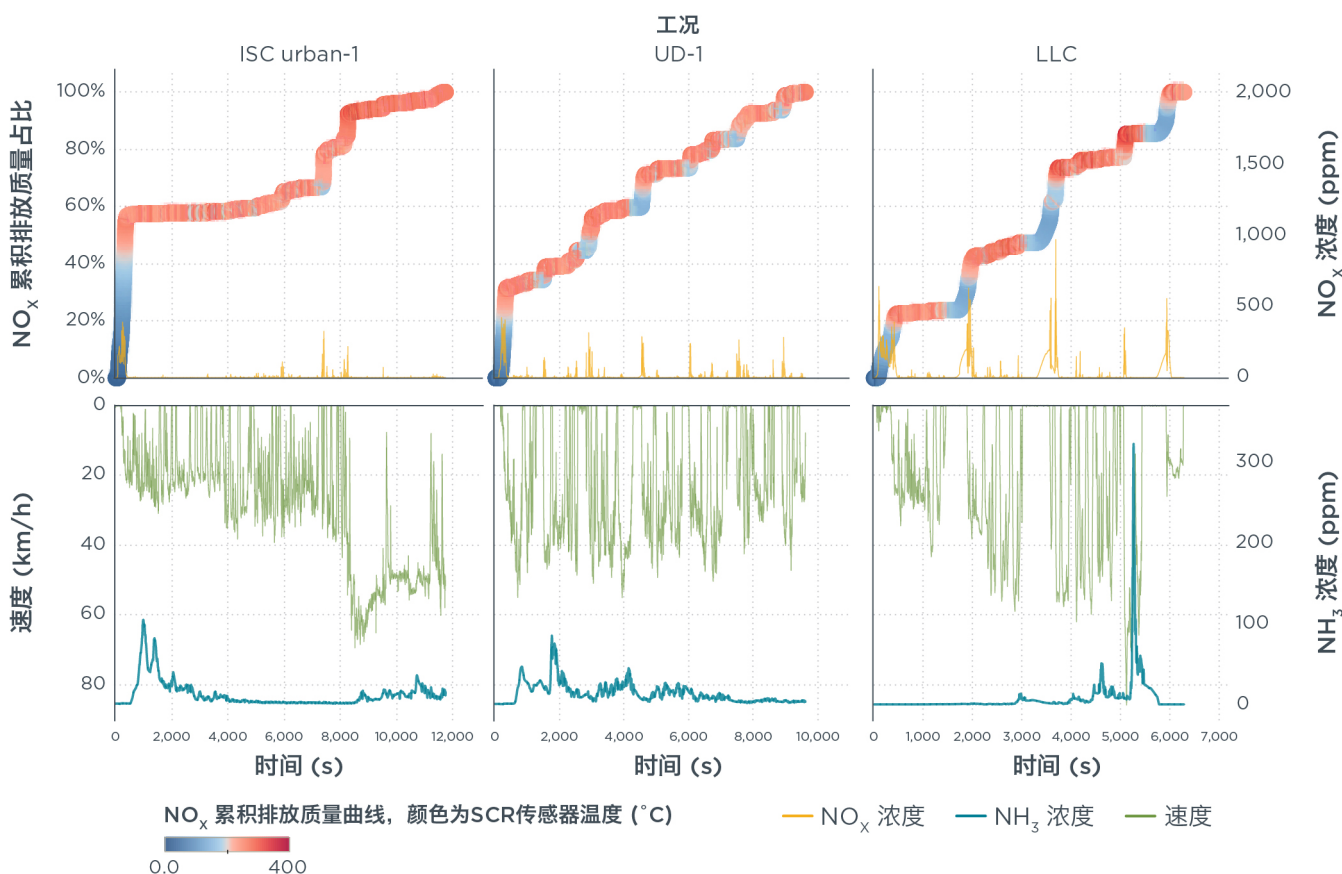


图6. 1号车在ISC-Urban、UD-1及LLC工况测试中的NO<sub>x</sub>排放量累积占比、NO<sub>x</sub>浓度、NH<sub>3</sub>浓度以及速度剖面

11 Xinmei Yuan、Hongqi Liu和Ying Gao, "Diesel Engine SCR Control: Current Development and Future Challenges," Emission Control Science and Technology 1, no. 2 (2015年5月1日): 121-33, 详见: <https://doi.org/10.1007/s40825-015-0013-z>.

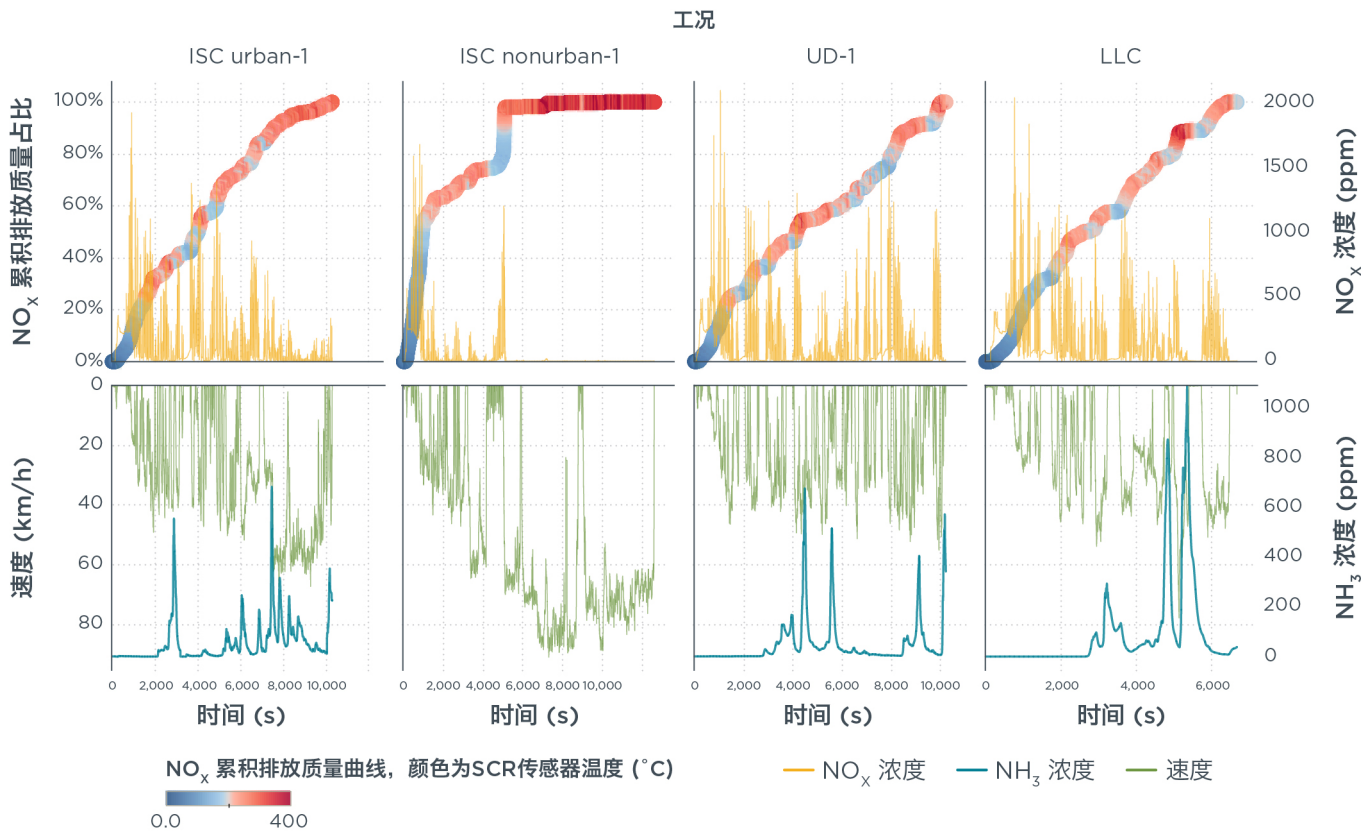


图7. 2号车在ISC-Urban、UD-1及LLC工况测试中的NO<sub>x</sub>排放量累积占比、NO<sub>x</sub>浓度、NH<sub>3</sub>浓度以及速度剖面

无论是1号车还是2号车都会在测试开始初期产生大量NO<sub>x</sub>排放，因为此时SCR系统处于低温状态。此外，每当SCR系统温度降至200°C以下时，累积排放量曲线中就会出现额外的NO<sub>x</sub>排放峰值，在累计排放曲线上反馈出阶梯式增长。城市工况测试中的频繁停靠和LLC工况测试中的长时间怠速也会导致出现NO<sub>x</sub>排放峰值，因为SCR系统温度会在停车和怠速期间有所下降。特别是低负载工况测试中的长时间怠速，其产生的影响与冷启动排放的量级相同。这些结果与业内的共识是一致的，也再次体现了SCR系统应用主动式热管理的必要性，从而实现SCR系统快速预热以及确保SCR系统在运行期间保持较高温度。

图8展示了两辆测试车辆的SCR系统激活时间。其中，2号车的SCR系统激活时间要大幅长于1号车。在所有三次测试中，2号车的SCR系统均要在车辆启动后超过1000秒才能工作，特别是在低负载工况测试中，需要超过1600秒才能工作。相比之下，1号车的SCR系统仅需100至300秒即可完成预热。这些研究结果表明，国VI货车的SCR热管理存在很大的差异性，因此SCR技术在应用方面存在潜在改进空间，具体措施包括快速预热和保温策略等，从而进一步控制NO<sub>x</sub>排放。

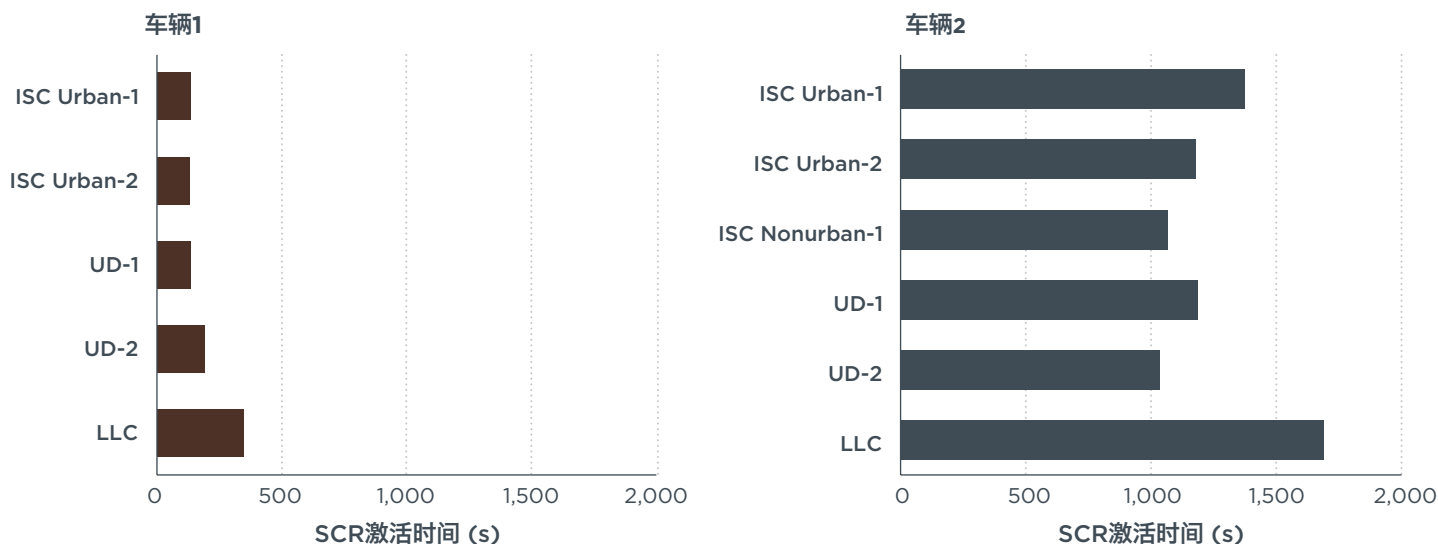


图8. 两辆测试车辆启动后的SCR系统激活时间

图6和图7中还展示了尾气中 $\text{NH}_3$ 浓度的实际情况。在急加速状态下，如果SCR系统温度不够，会导致 $\text{NH}_3$ 大量瞬时逃逸。尾气中的 $\text{NH}_3$ 排放也可能是SCR高温状态下其表面的氨脱附的结果。SCR系统和氨逃逸催化器（ASC）必须实现适当校准，才能避免产生氨逃逸排放。此外，还有一些其他方式可以防止氨逃逸，例如尿素加热、双SCR系统以及基于模型的控制策略等。

测试结果表明，在控制 $\text{NO}_x$ 排放和 $\text{NH}_3$ 逃逸方面，1号车上的高效SCR要优于2号车上的中效SCR+EGR。在将排放性能与CLOVE欧VII提案限值进行比较时，这一点反映的尤为明显。虽然两辆测试车辆都不符合CLOVE-90和CLOVE-100限值（分别为 $0.09 \text{ gNO}_x/\text{kWh}$ 和 $0.175 \text{ gNO}_x/\text{kWh}$ ），1号车的MAW 90%排放水平超过CLOVE-90标准限值12%-888%，MAW100%结果超CLOVE-100标准160%-1080%；而2号车MAW90%和MAW100%的结果则是分别超过CLOVE相应标准667%-4410%和773%-2339%。上述测试结果均包含冷启动排放，超标范围区间为不同测试工况的测试结果。

在 $\text{NH}_3$ 排放方面，1号车也比2号车更接近于满足CLOVE 欧VII提案中设定的 $65 \text{ mg NH}_3/\text{kWh}$ 的目标。在不同的测试工况循环下，1号车的MAW 90%结果超过CLOVE-90限值27%-154%，MAW 100%结果超过CLOVE-100限值54%-178%；而2号车相对于CLOVE-90和CLOVE-100的欧VII提案限值分别超出166%-1146%和171%-1149%。

## PN<sub>23</sub>和PN<sub>10</sub>排放分析

国VI标准中针对PN<sub>23</sub>排放量设定了限值，PN<sub>23</sub>即粒径大于23nm的固体颗粒物。挥发性颗粒物、半挥发性颗粒物以及粒径小于23 nm的固体颗粒物目前未纳入法规管理范围。然而，这些未纳入管理范围的颗粒物不仅可以直接

造成人体污染暴露，还能够在二次气溶胶和PM<sub>2.5</sub>形成中发挥作用，会对人类健康产生有害影响。

将中国管理法规中的固体颗粒物粒径阈值从23 nm降低到10 nm（即测量PN<sub>10</sub>）并不需要对现有测量系统进行大幅投资或重大修改。事实上，PN<sub>10</sub>测试技术现在已经足够成熟，足以保证将PN<sub>10</sub>纳入污染物排放法规。本节评估了当前DPF系统对PN<sub>10</sub>的过滤效率，同时评估了如果将监管粒径阈值加严至大于10nm小于23 nm将会给过滤系统带来哪些额外挑战。

由于目前PEMS系统尚不具备适合进行道路PM<sub>10</sub>测量的设备，我们仅在法规油耗底盘测试中对PN<sub>10</sub>在C-WTVC工况下的排放量进行了评估。PN<sub>23</sub>则在道路测试和实验室测试条件下均进行了测量。图9展示了两辆测试车辆的PN<sub>23</sub>和PN<sub>10</sub>行程平均排放量。

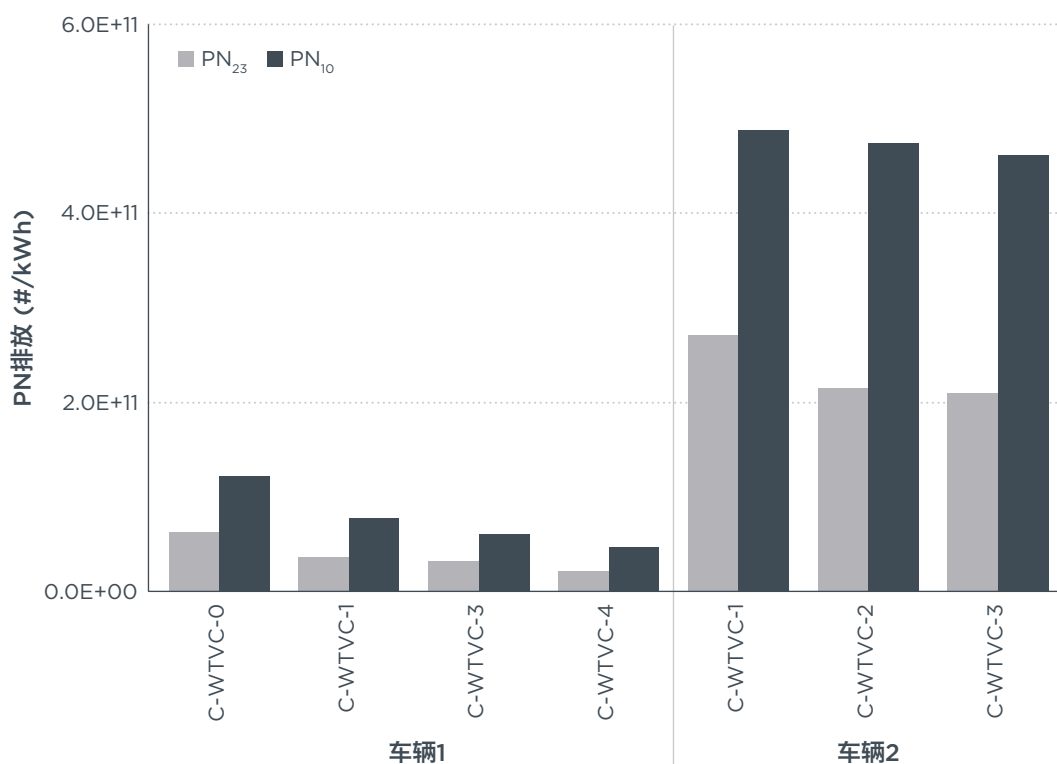


图9. 两辆测试车辆在C-WTVC工况底盘测功机测试中的PN<sub>23</sub>和PN<sub>10</sub>测量结果

两辆测试车辆PN<sub>10</sub>与PN<sub>23</sub>排放量之间的差异存在相似性。在不同的测试中，1号车的PN<sub>10</sub>排放量比PN<sub>23</sub>高87%-112%，2号车的PN<sub>10</sub>排放量比PN<sub>23</sub>高80%-120%。这意味着，如果下一阶段排放标准继续忽略大于10 nm小于23 nm的颗粒物，那么在颗粒物的主要粒径尺寸范围内，将有约50%的PN排放处于管理范围之外。因此，设定PN<sub>10</sub>限值对于有效控制PN排放而言至关重要。

与NO<sub>x</sub>和NH<sub>3</sub>排放情况相同，2号车的PN排放性能也不如1号车。与2号车辆相比，1号车的排放结果与CLOVE欧VII限值更为接近。

假设 $PN_{10}$ 排放量是 $PN_{23}$ 排放量的两倍，如上文所述，1号车已经可以满足CLOVE 欧 VII提案中的限值目标（CLOVE-90和CLOVE-100分别设定为 $1 \times 10^{11} \#/kWh$ 和 $5 \times 10^{11} \#/kWh$ ）。如图5所示，2号车需要将其PN排放量分别减少85%-90%和25%-60%，才能够达到CLOVE-90和CLOVE-100限值。

## 温室气体排放分析

二氧化碳（ $CO_2$ ）是燃烧柴油燃料的必然产物。氧化亚氮（ $N_2O$ ）排放则是在 $NO_x$ 被催化还原为氮气的过程中在车辆排放控制系统内形成的。SCR系统在 $250^\circ C$ 左右会通过分解硝酸铵而生成 $N_2O$ 。在 $500^\circ C$ 以上的温度下，形成 $N_2O$ 的主要机制则是氨逃逸催化剂中的 $NH_3$ 发生氧化。

目前， $CO_2$ 是国VI标准下唯一必须进行测量和报告的温室气体，但没有出台管理限值。 $N_2O$ 在国VI法规下尚未受到任何形式的监管。

无论是PEMS测试还是底盘测功机测试， $CO_2$ 排放都是以单位做功排放量（ $g/kWh$ ）为单位来报告的，不过 $CO_2$ 排放也可以根据燃油消耗情况以距离为单位（ $g/km$ ）来进行评估<sup>12</sup>。表2展示了两辆测试车辆所有测试的 $CO_2$ 排放结果。整体上，2号车的单位做功 $CO_2$ 排放低于1号车。这一结果符合我们的预期，因为大型发动机往往具有更佳的热效率。

尽管测试是在10%最大有效负载条件下进行的，但1号车在标准油耗测试C-WTVC工况下的 $CO_2$ 排放仍高于该车型的认证 $CO_2$ 排放，而后者是在100%有效负载下测定的。

表 2. 1号车和2号车所有测试的 $CO_2$  排放情况

测试	工况	1号车		2号车	
		单位功率排放 (g/kWh)	单位距离排放 (g/km)	单位功率排放 (g/kWh)	单位距离排放 (g/km)
PEMS 道路测试	ISC城市	910.1	405.6	753.8	722.8
	ISC非城市	—	—	671.8	764.4
	城市货运	882.1	544.7	773.1	830.7
	低负载工况	871.0	553.8	785.6	787.8
底盘测功机 测试	C-WTVC	737.4	629.2	750.1	663.0
	C-WTVC (认证值)	—	600	—	910

测试结果表明， $N_2O$ 排放是测试车辆温室气体排放中不可忽略的组成部分。图10展示了两辆测试车辆的温室气体排放量，采用GWP-100值将 $CO_2+N_2O$ 排放折算为 $CO_2$ 当量排放。 $N_2O$ 排放量在1号车尾气温室气体排放总量中的平均占比为5%，在2号车尾气中的平均占比为9%。因此，除了

12 本文假设柴油消耗量与 $CO_2$ 排放量的换算率为2600 g/L。

CO<sub>2</sub> 排放之外，对N<sub>2</sub>O排放进行管理也是降低重型车温室气体排放总量的关键，必须予以认真考虑。

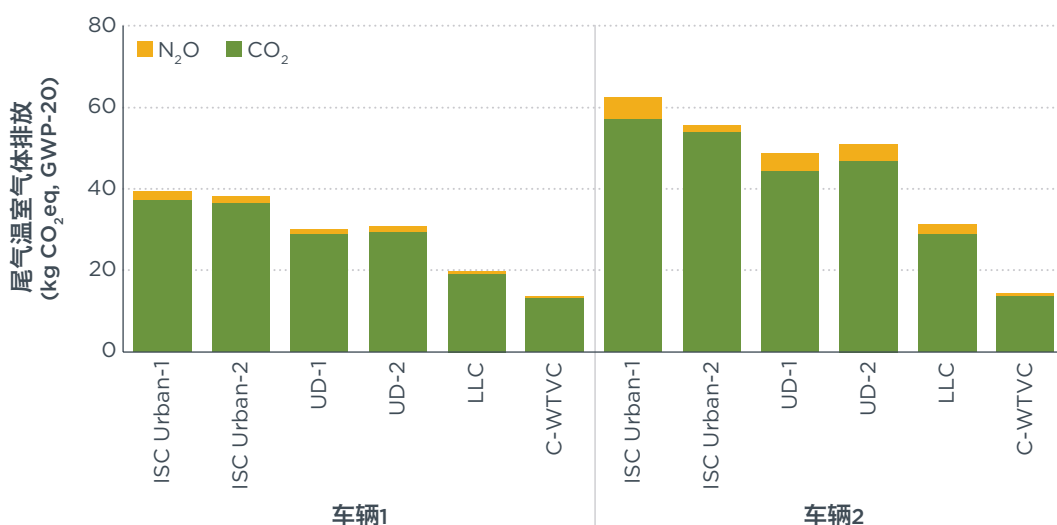


图10. 两辆测试车辆所有PEMS和实验室测试的尾气CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O排放结果

就N<sub>2</sub>O排放而言，两辆测试车辆均未达到CLOVE-90和CLOVE-100的N<sub>2</sub>O限值（分别设定为0.06 gN<sub>2</sub>O/kWh和0.160 gN<sub>2</sub>O/kWh）。如上文图中图5所示，1号车的排放表现相对较好，在部分测试中可以达到CLOVE-100限值，其MAW 90%计算结果与CLOVE-90限值相比超标90%-191%。2号车的排放结果与CLOVE-90限值相比超标330%-531%，与CLOVE-100限值相比超标64%-139%。超标范围区间为不同测试工况的测试结果。

## 主要结论及政策建议

虽然两辆测试车辆均符合国VI排放标准，但都远未达到CLOVE提出的欧VII提案限值。在标准规定的车辆在用符合性（ISC）测试中，两辆车所有法规污染物均能满足国VI标准要求，且其中CO和PN排放还有较大的达标余量<sup>13</sup>。但如果将车辆排放结果与CLOVE 欧VII提案进行比较，特别是与CLOVE-90限值相比，其排放性能仍与标准限值存在较大差距。对于管理法规所涵盖的大部分污染物，两辆测试车辆的排放均高于CLOVE-90限值，其中唯一的例外是1号车在底盘测功机测试下测量的PN排放结果。而对于非法规污染物，无论是NH<sub>3</sub>还是N<sub>2</sub>O，两辆车的排放结果均无法达到欧VII提案限值。

在所有平行开展的PEMS测试工况和相同的底盘测功机测试（C-WTVC工况）中，一汽解放半挂牵引车（2号车）的空气污染物和温室气体排放整体高于福田的厢式货车（1号车）。导致上述结果的潜在原因既包括发动机技术方面的差异（如发动机设计和功率），也包括排放控制系统技术方面的差异（如SCR和DPF的差异）。

13 1号车的标准ISC测试工况为ISC城市工况，2号车则为ISC非城市工况。

氮氧化物排放控制在某些特定情况下表现不佳，中国需要改进相关管理法规。冷启动过程、低负载工况、长时间怠速工况以及SCR技术都会对NO<sub>x</sub>排放产生重大影响。冷启动过程产生的NO<sub>x</sub>排放可占实际行驶NO<sub>x</sub>排放总量的20%-60%，1号车和2号车在低负载工况测试中的NO<sub>x</sub>排放结果分别是国VI法规限值的1.3倍和4倍，这主要是由冷启动和长时间怠速导致的。此外，2号车SCR的催化还原效率较低，且SCR系统激活时间较长，也导致了2号车的NO<sub>x</sub>排放明显高于1号车。

非法规污染物排放也是非常重要的，下阶段标准同样需要对NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O和PN<sub>10</sub>制定相关标准。NH<sub>3</sub>已被认定为是PM<sub>2.5</sub>污染的重要前驱物，而两辆测试车辆的NH<sub>3</sub>排放均难以满足欧VII标准要求。测试结果表明，将N<sub>2</sub>O排放纳入计算，车辆的温室气体排放量会比单纯考虑CO<sub>2</sub>排放时增加3%-9%；将PN<sub>10</sub>纳入计算，PN排放量会比仅监管PN<sub>23</sub>时增加44%-55%。

## 政策建议

基于上述主要结论，我们为中国下一阶段排放标准提出以下建议：

国VII标准应加严当前法规污染物排放限值。未来的排放限值，特别是NO<sub>x</sub>排放限值，应能够迫使生产企业采用现有可应用技术并加速推动新兴技术的商业化。加州空气资源委员会（CARB）在其Omnibus法规中已经证明通过组合应用排放控制技术可以将NO<sub>x</sub>排放当前排放水平基础上降低90%。

通过排放标准和限值推动生产企业应用可以同时减少NO<sub>x</sub>和CO<sub>2</sub>排放的技术。近年来，污染物排放与CO<sub>2</sub>排放之间的潜在权衡问题已经逐渐被消除，已经有许多技术可以同时减少NO<sub>x</sub>和CO<sub>2</sub>排放，还有更多技术可以在不增加CO<sub>2</sub>排放的情况下减少NO<sub>x</sub>。例如SCR快速预热和保温技术仅在冷启动和低负载运行状态下启用，几乎不会增加车辆整体燃油能效或温室气体排放。国VII标准应鼓励应用能够实现NO<sub>x</sub>和CO<sub>2</sub>协同减排的技术。

国VII标准应重点关注冷启动排放和低负载运行。为缩小排放管理限值与实际排放测量结果之间的差距，需要应用新技术和热管理策略。国VII标准应针对冷启动和低负载工况NO<sub>x</sub>排放提出明确的管理规定。

新标准应将PN<sub>23</sub>限值扩展或替换为PN<sub>10</sub>限值。加严固体颗粒物的尺寸阈值是可行的，无需对现有测量系统进行大规模投资或重大修改。未来国VII标准还应考虑通过制定合适的监管框架，将挥发性和半挥发性颗粒物纳入管理范畴，并开发制定合适的方法来进行排放测量和开展合规监管。

针对NH<sub>3</sub>和N<sub>2</sub>O出台严格的道路车辆排放限值。NH<sub>3</sub>是形成PM<sub>2.5</sub>的重要先驱物，而N<sub>2</sub>O是强效温室气体。美国已经针对N<sub>2</sub>O设定了限值，欧盟也将在欧VII标准中纳入N<sub>2</sub>O限值。目前，尽管国VI标准中已经以WHTC发动机工

况平均浓度限值的形式设定了NH<sub>3</sub>限值，但将NH<sub>3</sub>作为管理污染物纳入车辆在用符合性监管将能够推动生产企业更好地对排放控制系统进行校准。

扩大车辆在用符合性（ISC）测试的范围。目前，国VI标准中的ISC合规评价方法不能有效反映冷启动、低负载工况的排放性能。国VII标准恰恰为解决上述疏漏提供了契机，应确保所有行驶工况（包括冷启动和低负载）都被纳入监管范围。

出台严格的怠速NO<sub>x</sub>限值。例如参考CARB在Omnibus法规中将怠速排放限值设置为5 g/hr或更低，可以推动减少怠速技术的应用，例如自动关停系统和自动启停。另外还有一些技术可以避免怠速运行，例如电动辅助动力装置和车辆外接电源。



# 附录: 所有测试工况排放结果汇总

表A1. PEMS道路测试结果

	名称	冷启动 <sup>a</sup>	平均温度	平均速度	燃油经济性	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	PN <sub>2.5</sub>	总做功	
	工况循环 & 测试编号	包含或不包含	°C	km/h	L/100km	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	×10 <sup>10</sup> #/kWh	kWh	
1号车	ISC Urban-1	包含	22.6	28.0	15.6	0.231	897.4	0.156	0.175	0.097	2.12	41.6	
		不包含				0.214	870.7	0.066	0.174	0.098	2.13	40.4	
	ISC Urban-2	包含	22.1	27.8	15.6	0.845	951	0.130	0.143	0.143	1.80	38.5	
		不包含				0.830	921.4	0.059	0.143	0.146	1.82	37.4	
	UD-1	包含	25.2	21.4	19.2	0.882	858	0.295	0.125	0.090	0.63	33.8	
		不包含				0.883	841.5	0.209	0.130	0.137	0.64	31.7	
	UD-2	包含	21.4	18.5	22.7	0.880	922.9	0.493	0.109	0.245	1.11	31.7	
		不包含				0.890	905.8	0.369	0.113	0.136	1.16	29.3	
	LLC	包含	26.9	19.5	21.3	0.539	892.7	0.927	0.111	0.067	1.20	21.4	
		不包含				0.511	849.2	0.773	0.112	0.073	1.25	19.7	
	2号车	ISC Urban-1	包含	30.4	26.4	28.6	2.217	741.4	2.051	0.248	0.361	30.7	77.3
			不包含				2.238	727.9	1.670	0.257	0.376	30.7	74.0
ISC Urban-2		包含	30.1	26.5	27	— <sup>b</sup>	778.6	2.334	0.098	0.638	20.3	69.1	
		不包含				—	767.3	1.979	0.102	0.675	19.9	65.1	
ISC Nonurban-1		包含	26.7	49.9	29.4	0.779	678.2	0.260	—	—	31.8	200.0	
		不包含				0.778	672	0.118	—	—	31.8	195.6	
ISC Nonurban-2		包含	26.6	54.3	29.4	—	—	—	—	—	—	—	
		不包含				0.382	665.1	0.194	—	—	64.6	180.5	
UD-1		包含	21.1	17.3	34.5	3.146	791.5	3.202	0.286	0.342	27.6	55.9	
		不包含				3.204	774.8	2.699	0.302	0.365	27.3	52.2	
UD-2		包含	24.8	18.6	33.3	3.328	770.8	2.788	0.238	0.116	29.3	60.7	
		不包含				3.532	755.3	2.313	0.256	0.126	29.2	56.2	
LLC	包含	23.3	19.8	30.3	2.078	796.1	3.430	0.221	0.566	28.8	36.4		
	不包含				2.193	775	2.741	0.234	0.623	29.2	33.0		

<sup>a</sup> 本栏表示MAW结果是否包含冷启动阶段的窗口。

<sup>b</sup> 标注‘—’的单元格表示该数据未测量或由于某种原因导致数据无效。

表A2. 底盘(油耗)测试结果

	名称	冷启动	平均温度	平均速度	燃油经济性	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	PN <sub>2.5</sub>	PN <sub>10</sub>
	工况循环 & 测试编号	冷启动或热启动	°C	km/h	L/100km	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	×10 <sup>10</sup> #/kWh	×10 <sup>10</sup> #/kWh
1号车	C-WTVC-0	冷启动	20.0	40.2	24.6	0.427	745.7	0.087	0.087	0.341	6.30	12.3
	C-WTVC-1	热启动	19.9	40.6	23.4	0.375	719.8	0.066	0.066	0.037	3.70	7.78
	C-WTVC-2	热启动	20.1	40.6	27.3	0.468	834.6	0.106	0.106	0.008	59.3 <sup>a</sup>	1420 <sup>a</sup>
	C-WTVC-3	热启动	19.9	40.4	24.4	0.665	743.1	0.115	0.115	0.003	3.24	6.07
	C-WTVC-4	热启动	19.7	40.6	24.5	0.734	740.8	0.118	0.118	0.001	2.24	4.74
2号车	C-WTVC-0	冷启动	16.8	40.4	27.2	0.449	767.1	2.543	0.106	0.187	-	-
	C-WTVC-1	热启动	23.0	40.6	25.5	0.361	760.5	1.663	0.128	0.381	27.2	48.8
	C-WTVC-2	热启动	23.0	40.6	24.7	0.343	742.1	1.592	0.110	0.200	21.6	47.4
	C-WTVC-3	热启动	23.1	40.6	24.6	0.37	730.6	1.196	0.109	0.300	21.0	46.2

<sup>a</sup> 在C-WTVC-2测试过程中发生了一次DPF再生，导致PN<sub>2.5</sub>和PN<sub>10</sub>排放分别升高了16和180倍。