

国六重型柴油车低负荷试验报告

(国际清洁交通委员会)

本试验报告经审核,符合厦门环境保护机动车污染控制中心质量保证程序有关规定,可正式交付客户。

(签字)	(签字)	(签字)
吕涛	赖益土	苏盛
编制	审核	批准
日期:	日期:	日期:

未经厦门环境保护机动车污染控制中心书面许可,不允许部分复制本报告。报告中所有数据保留每种测量方法适用的有效数字。

除非特别声明,本报告试验结果及结论仅对来样负责。

特别说明:试验报告仅用于客户科研、教学、内部质量控制、产品研发等目的,仅供内部参考。

厦门环境保护机动车污染控制中心
中国厦门市集美区金龙路 98 号 5 楼 (361023)
联系电话: +86 592 6367188

目录

项目综述	3
1 项目背景	3
2 试验样车及燃料	3
2.1 试验样车	3
2.2 试验燃油	4
3 项目试验	5
3.1 试验内容	5
3.2 试验描述	5
3.2.1 试验准备	5
3.2.2 试验设备及连接	5
3.2.3 试验路线及循环	7
4 试验结果及分析	12
4.1 道路排放水平	12
4.1.1 S01 样车	12
4.1.2 S02 样车	15
4.2 道路排放模态	18
4.2.1 NO _x 排放	18
4.2.2 N ₂ O 排放	22
4.2.3 NH ₃ 排放	25
4.3 整车油耗试验	27
4.3.1 试验结果	27
4.3.2 排放控制水平	28
4.3.3 颗粒排放分析	29
4.4 油耗一致性	31
4.5 NO _x 传感器分析	32
5 结论	35
附录一 样车信息	Error! Bookmark not defined.

项目综述

为评估低负荷对车辆排放控制的影响,选取两辆 N₃ 类国六阶段在用重型柴油货车进行实际道路行驶排放试验,试验内容包括在用符合性 PEMS 试验、典型城市工况试验和 LLC 低负荷工况试验三项。与此同时,为评估车辆油耗和排放协同控制水平,样车在完成实际道路行驶试验后进行实验室整车油耗试验。项目试验测量的污染物包括常规 (CO、NO_x 和 PN₂₃) 和非常规 (N₂O、NH₃ 和 PN₁₀) 污染物。试验结果表明:

- (1) 对装配 SCR 后处理的柴油车,低负荷导致 NO_x 排放严重恶化 (国六标准限值的 1.34~4.0 倍),但对 CO 和 PN₂₃ 排放影响有限。正常运行的非城市车辆,冷启动是 NO_x 排放的主要阶段,排放占比可达 50% 以上;对于运行在低负荷区域的城市或非城市车辆,冷启动的影响有所减弱 (占比大约为 20~30%),长怠速 (>2min) 后的起步过程 (SCR inlet temp<250°C 前) 是主要的 NO_x 排放阶段。
- (2) 两台试验样车 N₂O 排放水平大约为 0.132~0.283g/kWh,为欧 7 CLOVE 提案限值 (HD3@90% limit: 0.06g/kWh) 的 2.20~4.72 倍。NH₃ 排放水平大约为 0.141~0.494g/kWh,为欧 7 CLOVE 提案限值 (HD3@90% limit: 0.065g/kWh) 的 2.17~7.6 倍。
- (3) 整车油耗试验中,S01 样车 3 项污染物排放均满足国六标准限值要求且有较大余量,S02 样车 CO 和 PN₂₃ 排放满足限值要求,但 NO_x 排放是限值的 2~3 倍。两辆样车 Sub₂₃ 增量大约为 80~120%,但当 DPF 发生再生时,Sub₂₃ 增量可达 2300%。稀采和直采的 PN₂₃ 排放差异在 20% 以内,但当 DPF 发生再生时,稀采 PN₂₃ 是直采 PN₂₃ 的 4.6 倍。

1 项目背景

2021 年中国移动源环境管理年报显示,柴油货车排放的氮氧化物 (NO_x) 和颗粒物 (PM) 分别占汽车排放总量的 78.5% 和 90.6%,重型柴油车排放问题尤为突出。2018 年发布的重型国六阶段标准要求 2021 年 7 月 1 日起禁止生产 (或进口)、销售不符合国六排放标准的重型柴油车。相较于国五标准,国六加严了排放限值,NO_x 和 PM 分别降低 77% 和 67%;采用更接近实际工况的发动机测试循环 (WHTC/WHSC),增加低速低负荷占比,考核冷启动和低温热管理排放控制水平。同时,引入整车 PEMS 排放测试 (不含负荷低于 10% 的排放点),评估实际道路排放情况。与此同时,加州环保署 (CARB) 和西南研究院 (SwRI) 的研究表明,重型柴油车在低负荷工况下 NO_x 排放较高,特别是市区或特定行业车辆 (诸如公交、快递配送、短途货运、食物配送或环卫等车辆)。因此,国际清洁交通委员会 (ICCT) 委托厦门环境保护机动车污染控制技术中心 (以下简称“VETC”) 对两辆国六重型柴油车进行实际道路排放测试,评估车辆在低负荷条件下常规和非常规 (NH₃ 和 N₂O) 排放污染物的控制水平。此外,为考察车辆油耗和排放协同控制能力,车辆在完成实际道路排放测试后返回试验室进行整车油耗-排放测试。

2 试验样车及燃料

2.1 试验样车

根据 ICCT 的要求,VETC 从厦门市场租赁两辆有代表性 (包括品牌、销量、排量和排放控制技术路线等) 的国六阶段在用重型柴油车 (N₃ 类) 进行试验,试验前 ICCT 对所选样车进行了确认。样车的基本信息见表 1 (详细信息见附录一),外观见图 1。

表 1 样车基本信息

样车编号	型号	车辆类型	生产企业	发动机型号	排量 (L)	EGR 配置	后处理系统	初始里程 (km)
S01	BJ5186X XY-2M	重型厢式 货车	北汽福田汽车股 份有限公司	F4.5NS6 B220	4.5	无	DOC+DPF+ SCR+ASC	10816
S02	CA4189P1 K2E6A80	重型半挂 牵引车	一汽解放青岛汽 车有限公司	CA6DL6 -38E6	8.6	有	DOC+DPF+ SCR+ASC	24133



图 1 样车外观照片

2.2 试验燃油

为更好地表征在用车辆的实际排放水平, 采用市售柴油进行试验, 燃油指标符合 GB19147-2016《车用柴油》标准要求, 主要燃油参数见表 2。

表 2 燃油参数

参数	单位	测量值	参数	单位	测量值
十六烷值	—	52.9	硫含量	mg/kg	3.4
20℃下密度	g/cm ³	830.0	50℃下铜腐蚀	—	1a
馏程	—	—	10%蒸余物残炭	%(m/m)	<0.1
—50%点	℃	247.3	灰分	%(m/m)	<0.001
—95%点	℃	348.3	水分	mg/kg	痕迹
—终馏点	℃	358.3	酸度	mg KOH/100mL	1.03
闪点	℃	64.0	氧化安定性	mg/100mL	<0.1
冷滤点	℃	-10	润滑性 (60℃)	μm	298
20℃下粘度	mm ² /s	3.773	脂肪酸甲酯	%(V/V)	<0.1
多环芳香烃	%(m/m)	1.4	机械杂质含量	%(m/m)	无
碳	% (m/m)	85.7	氢	% (m/m)	13.8
氧	% (m/m)	<0.5	--	--	--

3 项目试验

3.1 试验内容

每辆样车一共进行 4 项试验, 分别为在用符合性 PEMS 试验、典型城市道路工况试验, CARB LLC 低负荷试验以及整车油耗试验。其中, 整车油耗试验在试验室底盘测功机系统上进行, 其余 3 项试验均为道路测试。详细试验内容见表 3。

表 3 试验内容

序号	试验内容 ⁽¹⁾	单车次数 (次/辆)	样车数量 (辆)	次数 (次)	测量要求
1	在用符合性 PEMS 试验 ⁽²⁾	2	2	4	- 测量污染物包括 NO,NO ₂ ,NO _x ,CO,CO ₂ ,PN23 ,N ₂ O 及 NH ₃ -采集 OBD 数据。
2	典型城市道路工况试验 ⁽³⁾	2		4	-测量污染物包括 NO,NO ₂ ,NO _x ,CO,CO ₂ ,PN23,N ₂ O 及 NH ₃ -采集 OBD 数据。
3	CARB LLC 低负荷试验	1		2	- 参照 CARB LLC 测试循环特征参数设计试验路线; -测量污染物包括 NO,NO ₂ ,NO _x ,CO,CO ₂ ,PN23,N ₂ O 及 NH ₃ - 采集 OBD 数据。
4	整车油耗试验 ⁽⁴⁾	1		2	-测量污染物包括 NO,NO ₂ ,NO _x ,CO,CO ₂ ,PN23,N ₂ O 及 NH ₃ , 增加试验室 PN23 和 PN10 测量; - 采集 OBD 数据。

(1) 所有试验均为冷起动试验, 试验载荷为 10%; .
 (2) 在用符合性 PEMS 试验测试工况按照城市车辆测试工况进行, 即 70%市区+30%市郊;
 (3) 典型城市道路工况要求至少 2 小时或者 40km 以上;
 (4) 按照 GB27840-2011 标准进行整车油耗试验, 试验内容包括 1 次冷起动和 3 次热起动 C-WTVC 循环试验。

在完成以上计划试验内容后, S02 样车额外再进行了一次在用符合性 PEMS 试验, 试验按 N3 类非城市车辆路线进行, 即市区、市郊和高速的时间比例分别为 20%、25%和 55%, 以评估两种不同试验路线下车辆的排放差异。

3.2 试验描述

3.2.1 试验准备

对接收到的样车进行车辆状态确认, 确认内容包括样车外观是否进行改装、排放关键零部件是否与信息公开一致、排放后处理系统是否正常工作及车辆 OBD 是否存在当前或历史故障。样车确认后, 进行尿素更换、燃油更换、样车配重 (10%) 及设备安装。每次试验开始前将样车自然浸置 (环境温度: 10°C-25°C) 至少 6 小时, 确保冷却液和机油温度不高于环境 2°C, 满足冷起动试验要求。

3.2.2 试验设备及连接

实际道路试验使用 Horiba OBS ONE 车载排放测试系统 (PEMS) 进行常规污染物测量, 测量的污染物种类包括 NO、NO₂、NO_x、CO、CO₂ 和 PN23。使用 Horiba QCL 车载排放测试系统进行非常规污染物测量, 包括 N₂O 和 NH₃。在试验室整车油耗试验中, 使用重型底盘测功机系统对车辆道路载荷及惯量进行模拟和加载, 使用 Horiba OBS ONE 和 Horiba QCL 在排气管处 (与实际

道路试验中的测点相同) 测量常规和非常规排气污染物。此外, 排气经全流稀释采样系统 (CVS) 稀释后, 在稀释通道 (DT) 中使用颗粒数量计数设备分别测量 PN23 和 PN10。设备连接见图 2 和图 3, 设备基本信息见表 4。

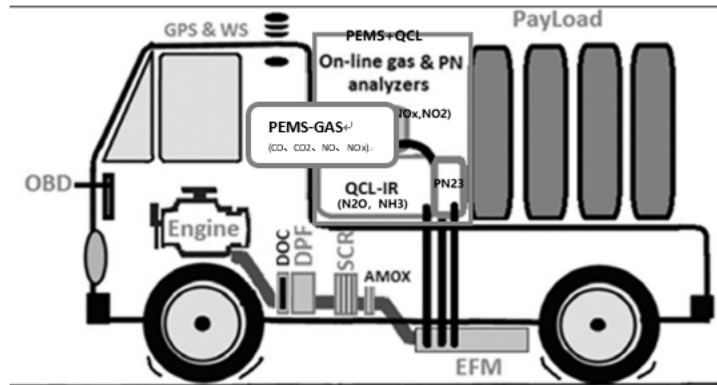


图 2 实际道路试验设备连接图

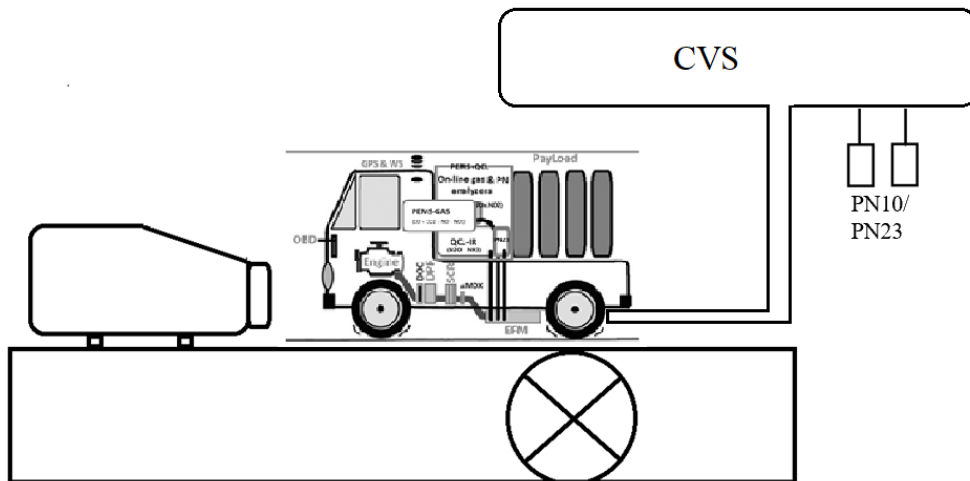


图 3 实验室整车油耗试验设备连接图

表 4 设备基本信息

序号	设备名称	型号	设备厂家	功能描述
1	车载排放测试系统 (PEMS)	OBS ONE	HORIBA	NO、NO ₂ 、NO _x 、CO、CO ₂ 和 PN23测量
2	QCL车载排放测试系统	MEXA 1400 QL-NX	HORIBA	N ₂ O和NH ₃ 测量
3	重型底盘测功机系统 (DYNO)	7349	Burke	道路载荷和惯量模拟
4	全流稀释采样测试系统 (CVS)	CVS i60	AVL	尾气稀释
5	PN23颗粒计数器	489	AVL	PN23测量
6	PN10颗粒计数器	489 APP	AVL	PN10测量

3.2.3 试验路线及循环

3.2.3.1 在用符合性 PEMS 试验

3.2.3.1.1 试验路线

试验采用 N3 类城市车辆用路线, 即试验由 70%市区和 30%市郊构成。路线全长大约 90km, 耗时大约 3 小时, 车辆累计功须达到发动机 WHTC 循环功的 4-7 倍。其中, 市区平均车速 15-30km/h; 市郊平均车速 45-70km/h, 允许实际构成比例有 $\pm 5\%$ 的偏差。路线途径金龙路→环美北路→海翔大道→厦漳同城大道最后返回金龙路, 具体路线见图 4。

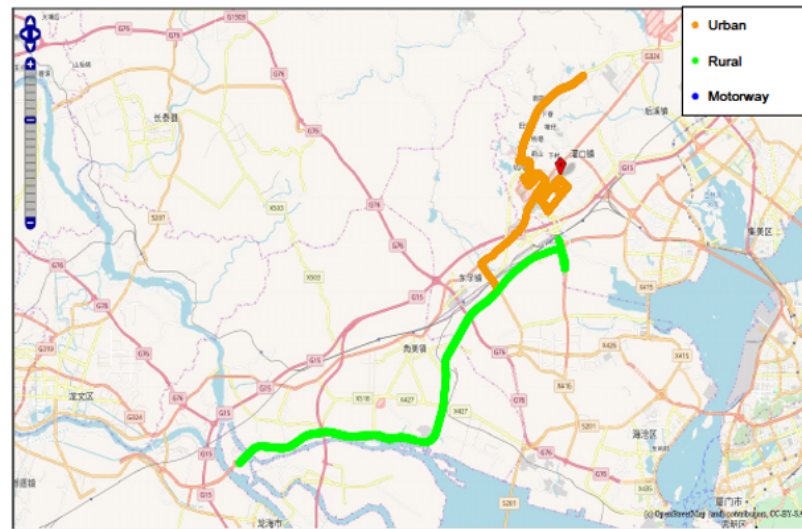


图 4 在用符合性 PEMS 试验路线 (城市路线)

S02 样车额外进行的 N3 类非城市车辆用路线是由 20%市区、25%市郊和 55%高速构成。路线全长大约 180km, 耗时大约 3.5 小时, 车辆累计功须达到发动机 WHTC 循环功的 4-7 倍。其中, 市区平均车速 15-30km/h; 市郊平均车速 45-70km/h, 高速平均车速大于 70km/h, 允许实际构成比例有 $\pm 5\%$ 的偏差。路线途径金龙路→厦漳同城大道→沈海高速, 并于高速停止试验, 具体路线见图 5。

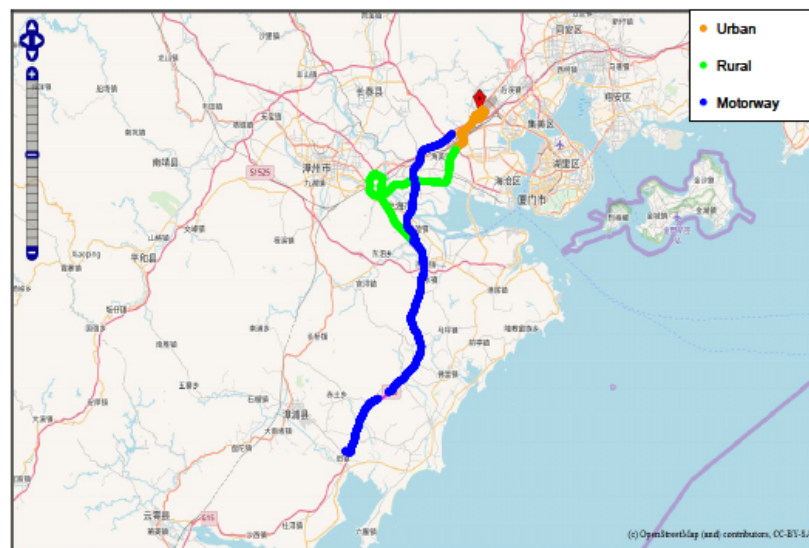


图 5 在用符合性 PEMS 试验路线 (非城市路线)

3.2.3.1.2 试验循环

S01 样车在用符合性 PEMS 试验 (2 次) 的试验循环及工况见图 6, S02 样车在用符合性 PEMS 试验 (2 次, 城市路线) 和额外进行的 1 次非城市路线试验的循环见图 7。需要注意的是: S02 样车第 2 次试验过程中 (ISC2), 车辆提示燃油滤清器需要清洁而发生限扭导致试验失败, 后续分析剔除该次试验数据。

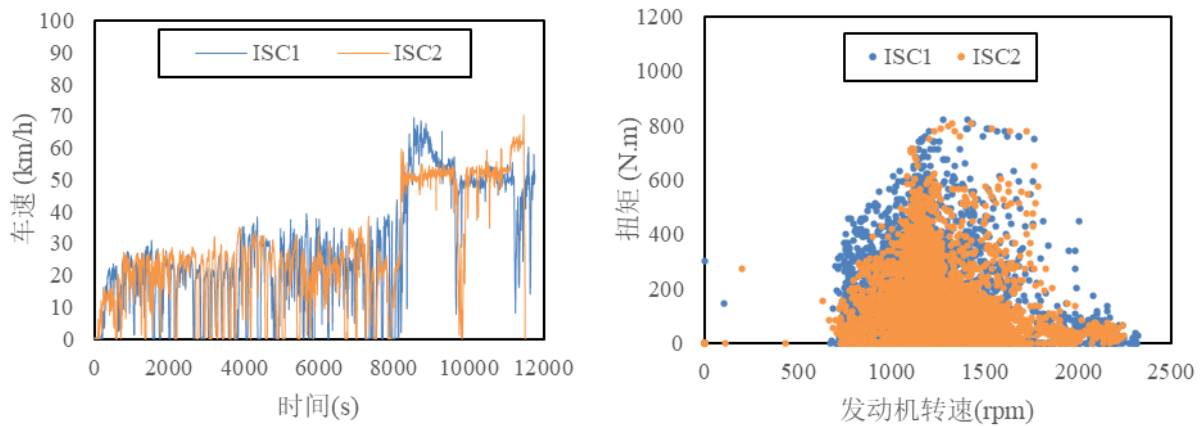


图 6 S01 样车在用符合性 PEMS 试验循环

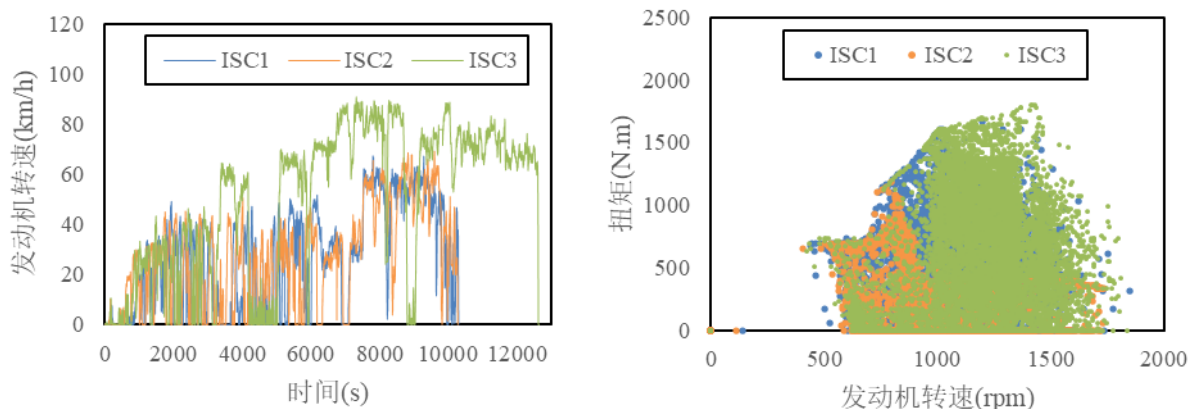


图 7 S02 样车在用符合性 PEMS 试验循环

3.2.3.2 典型城市道路工况试验

3.2.3.2.1 试验路线

根据选取的车辆类型, 结合车辆实际运用环境, 规划的典型城市道路工况要求运行时间不低于 2 小时, 总运行里程不低于 40km。试验旨在复刻典型城市运营工况, 包括频繁进出站的启停、充足的站内停留时间以及道路交通高峰期影响等。实际规划的路线总里程大约 55km, 耗时大约 2.5 小时。路线途径金龙路→灌口大道→孙坂北路→海翔大道→同集中路, 随后原路返回并停止试验, 具体路线见图 8。

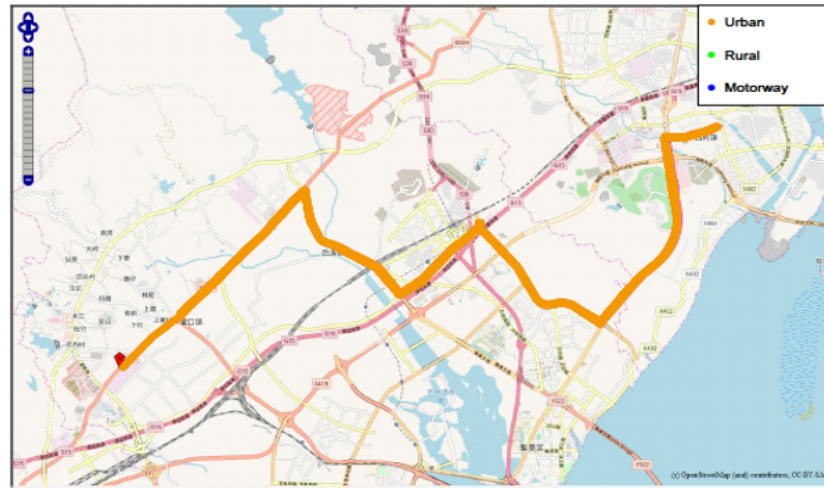


图 8 典型城市道路工况路线

3.2.3.2.2 试验循环

S01 和 S02 样车典型城市工况试验 (各 2 次) 的试验循环及工况见图 9 和图 10。

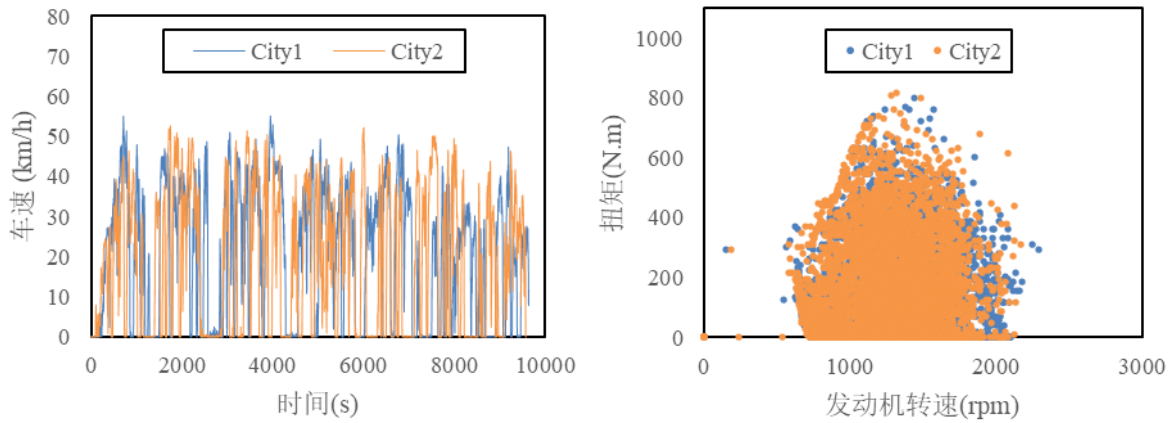


图 9 S01 样车典型城市工况试验循环

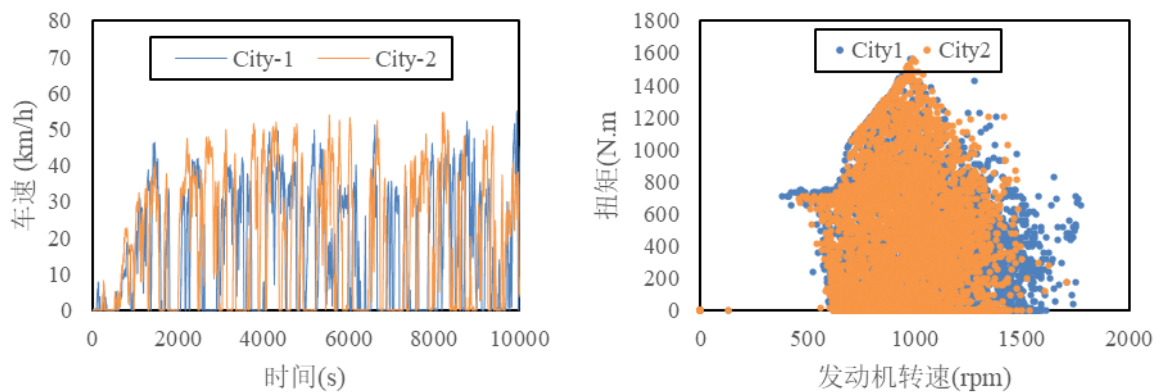


图 10 S02 样车典型城市工况试验循环

3.2.3.3 CARB LLC 低负荷试验

3.2.3.3.1 试验路线

低负荷测试循环 (Low Load Cycle, LLC) 是由西南研究院 (SwRI) 为美国加州空气资源委员会 (California Air Resources Board, CARB) 开发的重型整车和发动机测试循环, 以更好地表征柴油车辆在低负荷作业的工况特点。LLC 整车循环持续时间为 5505s, 平均车速 16.53km/h, 怠速时间 2171s, 最高车速 82.8km/h, 平均加速度 0.27m/s^2 , 最大加速度 1.59m/s^2 , 持续低负荷运行、高至低负载切换运行和低至高负载切换运行, LLC 循环见图 11。

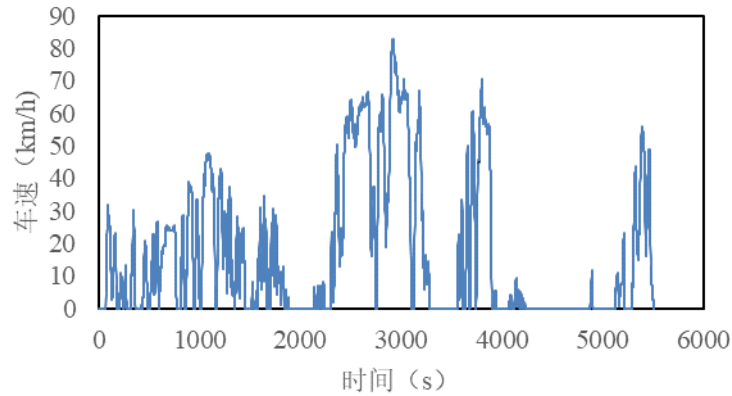


图 11 低负荷测试循环 (LLC)

实际规划的低负荷测试循环要求与 LLC 循环在工况特征上接近, 路线途径金龙路→环美北路→灌新路停止试验, 全长大约 30km, 耗时 1.5 小时, 具体路线见图 12。

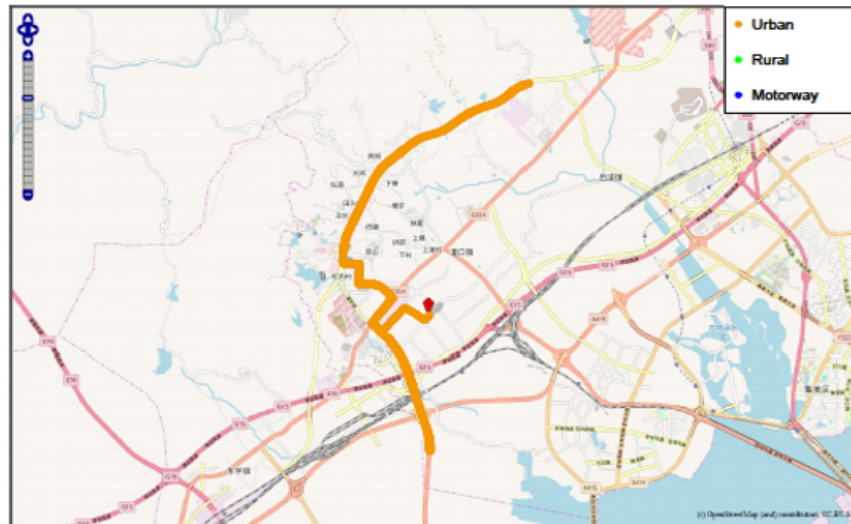


图 12 低负荷测试路线

3.2.3.3.2 试验循环

S01 和 S02 样车低负荷工况 (各 1 次) 的试验循环见图 13 和图 14。

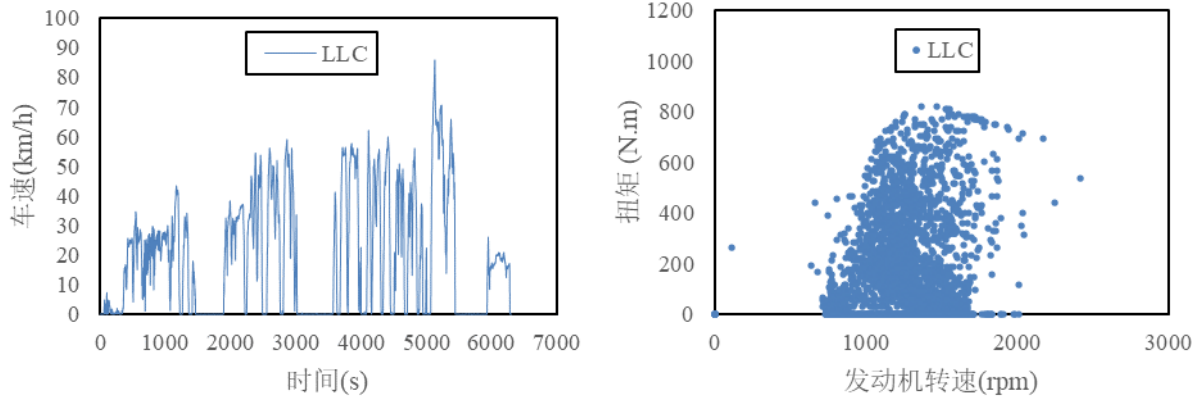


图 13 S01 样车低负荷试验循环

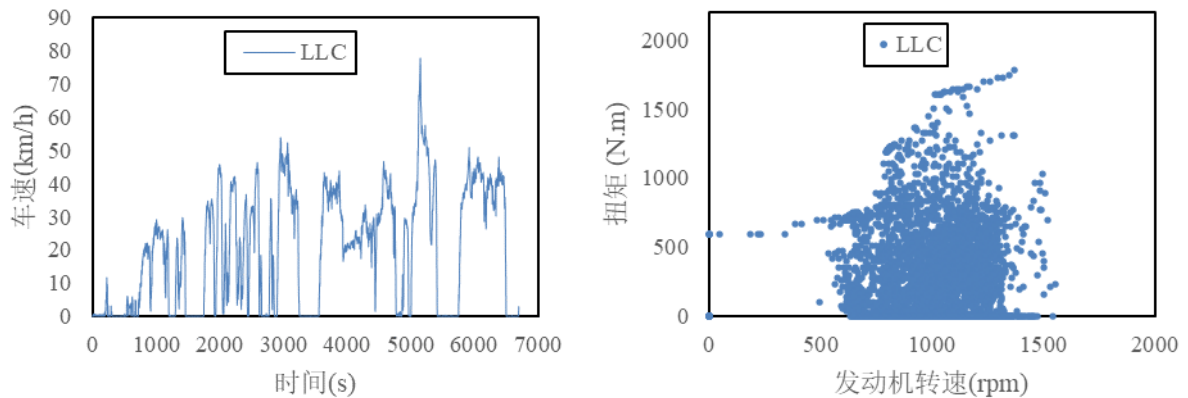


图 14 S02 样车低负荷试验循环

3.2.3.4 整车油耗试验

重型车国六标准 (GB 17691-2018) 对排放和油耗的协同控制提出了要求, 附录 L 明确规定了整车底盘测功机污染物排放测量的方法。试验采用重型底盘测功机模拟车辆道路载荷和惯量, 采用实际道路试验的车载排放设备 (Horiba OBS ONE 和 QCL) 测量常规和非常规排气污染物。试验采用 GB/T 27840-2011 《重型商用车辆燃料消耗量测量方法》规定的 C-WTVC 循环, 试验循环见图 15 所示。

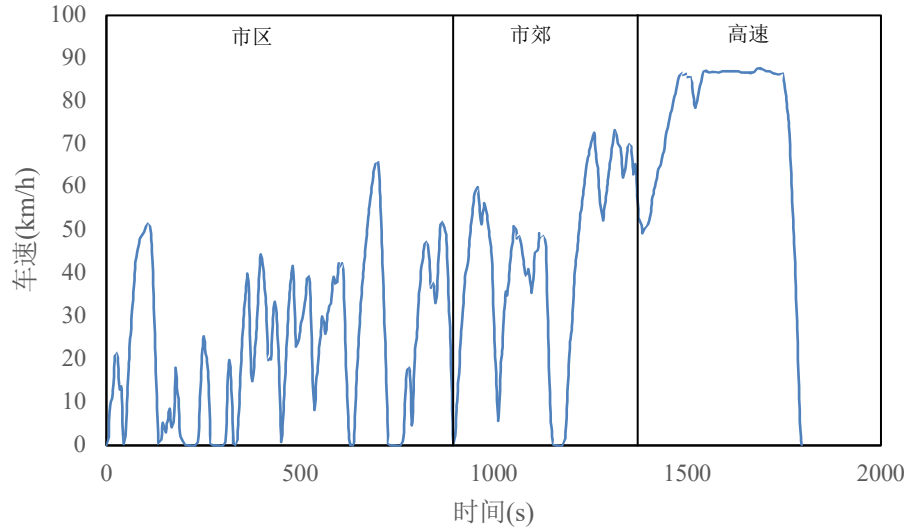


图 15 C-WTVC 试验循环

4 试验结果及分析

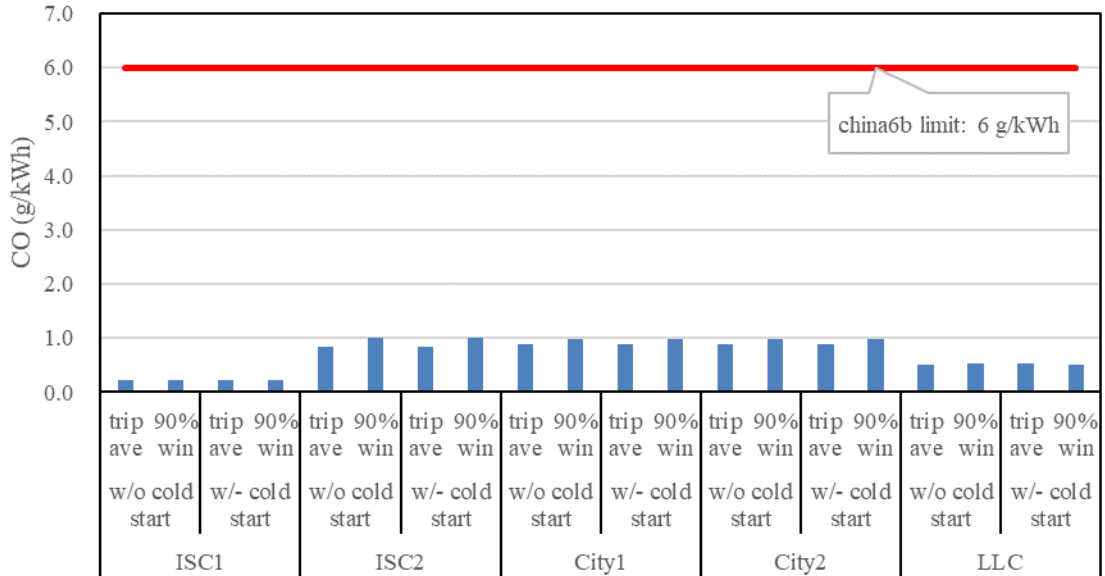
试验数据处理采用重型国六标准要求的移动平均功基窗口法和行程平均法两种，同时，为评估冷起动阶段的影响，两种数据方法均进行了包含和不包含冷起动分析。

4.1 道路排放水平

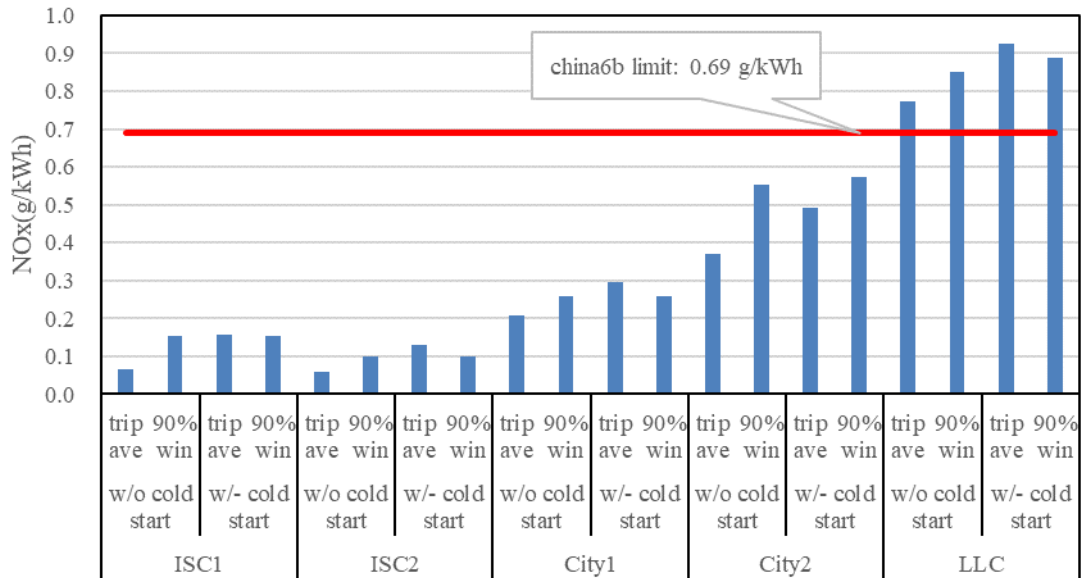
4.1.1 S01 样车

通过对比 90%分位数 (90% win) 移动平均功基窗口法与行程平均 (trip ave) 的排放结果，对样车的常规污染物 (CO、NO_x 和 PN₂₃) 和非常规污染物 (N₂O 和 NH₃) 进行分析。样车包含与剔除冷起动后的排放结果见图 16 (a-e)。从排放结果上看：

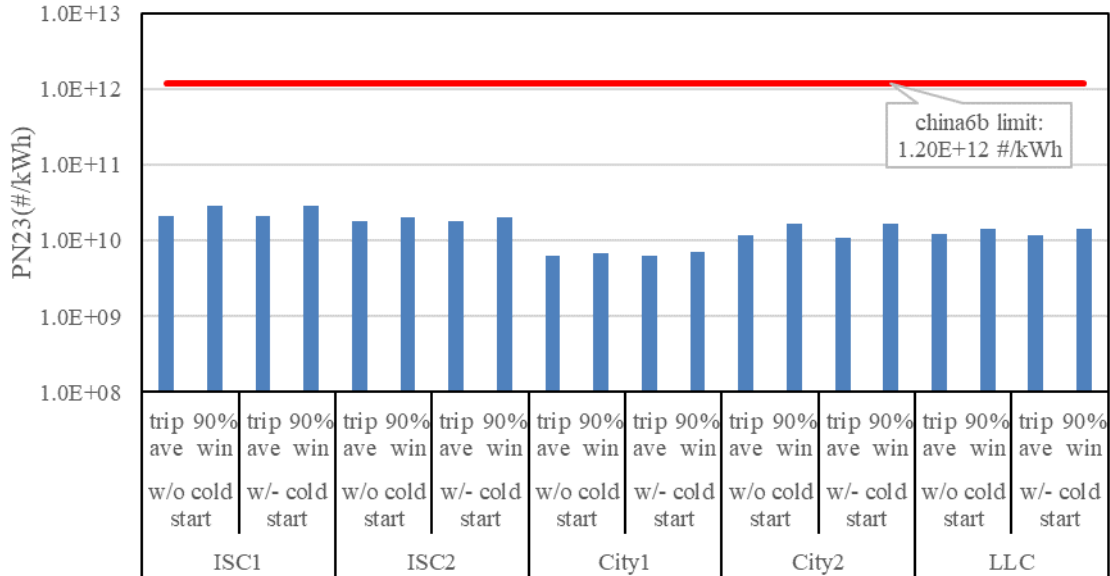
- 相较于国 6b 阶段限值，CO 和 PN₂₃ 排放均有较大余量，分别为限值的 10%和 1~2%；
- 在用符合性 PEMS 试验和典型城市工况试验的 NO_x 排放低于国 6b 限值，但低负荷工况试验 (LLC) 的 NO_x 排放则超出限值 (最大达到限值的 1.34 倍)；
- 对于 N₂O，平均 90%窗口排放和平均行程排放分别为 0.132g/kWh 和 0.147g/kWh，分别为欧 7 CLOVE 提案限值 (HD3@90% limit: 0.06g/kWh) 的 2.20 和 2.45 倍；
- 对于 NH₃，平均 90%窗口排放和平均行程排放分别为 0.141g/kWh 和 0.123g/kWh，分别为欧 7 CLOVE 提案限值 (HD3@90% limit: 0.065g/kWh) 的 2.17 和 1.89 倍；
- 对于 NO_x 排放，trip ave 比 90% win 低大约 32% (5 次试验两种方法偏差平均)；
- 对于功基窗口法 NO_x 排放，包含冷起动比剔除冷起动的结果高大约 1.7% (5 次试验包含和剔除冷起动结果偏差的平均值)。



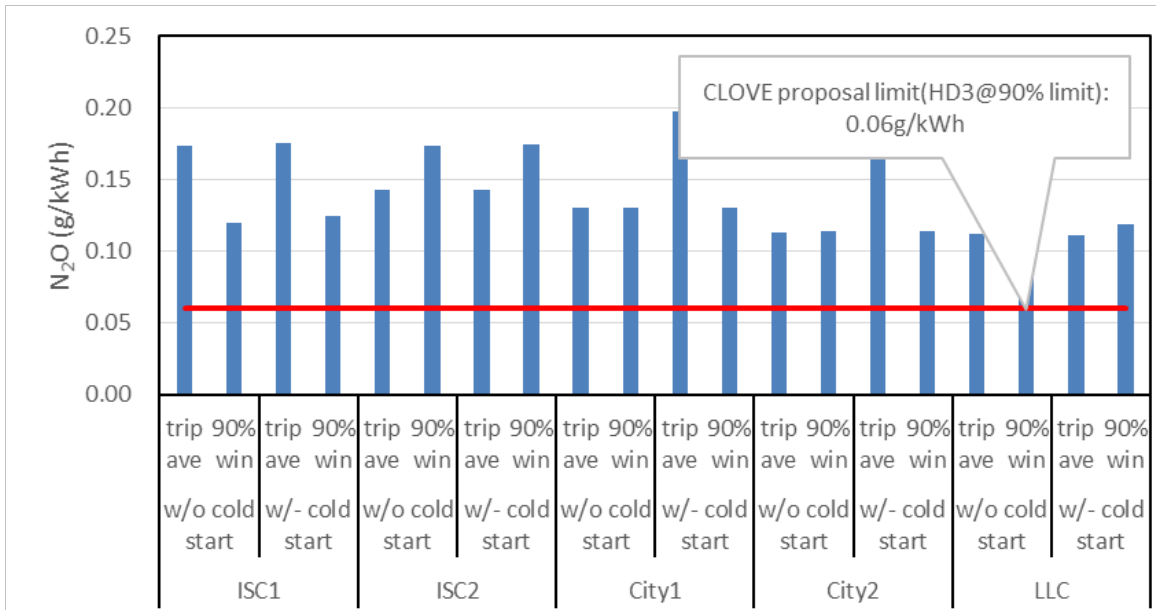
(a) S01 样车 CO 排放结果



(b) S01 样车 NOx 排放结果



(c) S01 样车 PN23 排放结果



(d) S01 样车 N₂O 排放结果

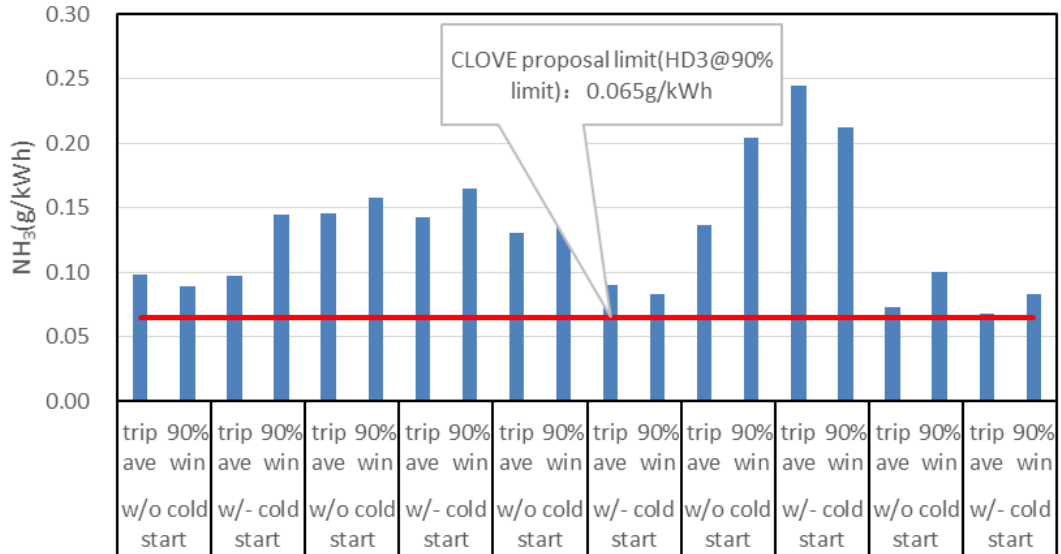
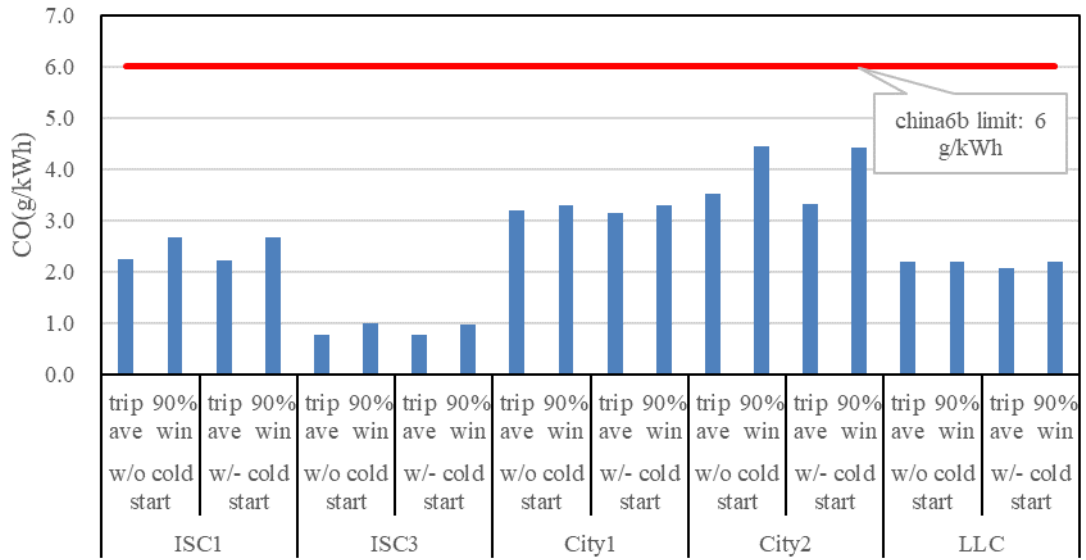

 (e) S01 样车 NH₃ 排放结果

图 16 S01 样车道路试验排放结果

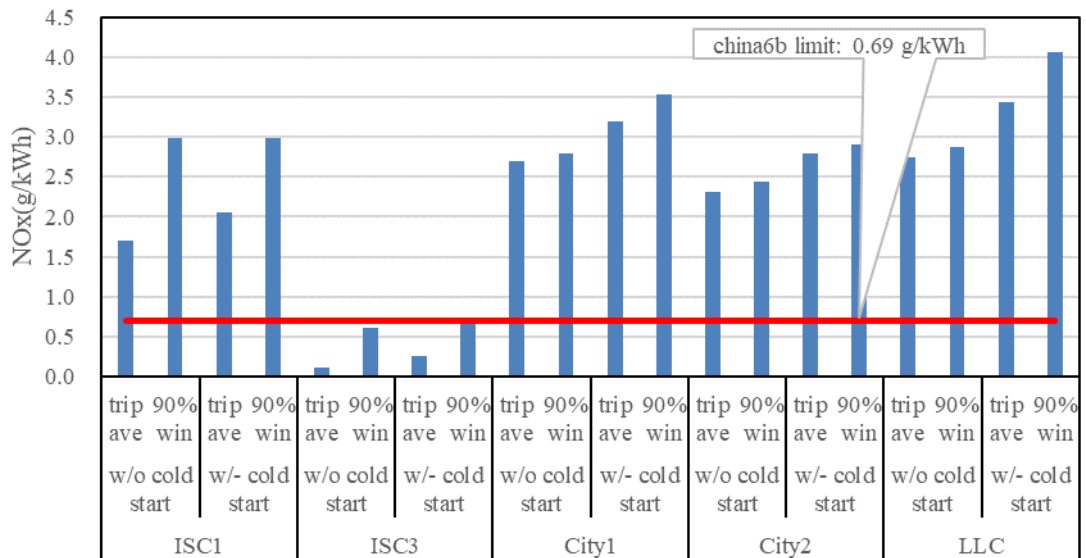
4.1.2 S02 样车

对比 90%分位数 (90% win) 的移动平均功基窗口法与行程平均 (trip ave) 排放结果, 对样车的常规污染物 (CO、NO_x 和 PN₂₃) 和非常规污染物 (N₂O 和 NH₃) 进行分析。样车包含与剔除冷起动后的排放结果见图 17 (a~e)。从排放结果上看:

- 相较于国 6b 阶段限值, CO 和 PN₂₃ 排放均有较大余量, 分别为限值的 45%和 25%;
- 除 ISC3 (非城市路线) 外, 样车其他试验的 NO_x 排放均超出国 6b 限值, 90%窗口平均排放和平均行程排放分别为 2.363g/kWh 和 2.773g/kWh, 分别为限值的 3.4 和 4.0 倍。ISC3 试验 90%窗口排放和平均行程排放分别是限值的 89%和 17%。
- 对于 N₂O, 90%窗口平均排放和平均行程排放分别为 0.283g/kWh 和 0.222g/kWh, 分别为欧 7 CLOVE 提案限值 (HD3@90% limit: 0.06g/kWh) 的 4.72 和 3.70 倍;
- 对于 NH₃, 90%窗口平均排放和平均行程排放分别为 0.494g/kWh 和 0.307g/kWh, 分别为欧 7 CLOVE 提案限值 (HD3@90% limit: 0.065g/kWh) 的 7.60 和 4.72 倍;
- 对于 NO_x 排放, trip ave 比 90% win 低大约 27% (5 次试验两种方法偏差平均);
- 对于功基窗口法 NO_x 排放, 包含冷起动比剔除冷起动的结果高大约 20% (5 次试验包含和剔除冷起动结果偏差的平均值)。



(a) S02 样车 CO 排放结果



(b) S02 样车 NOx 排放结果



(c) S02 样车 PN23 排放结果

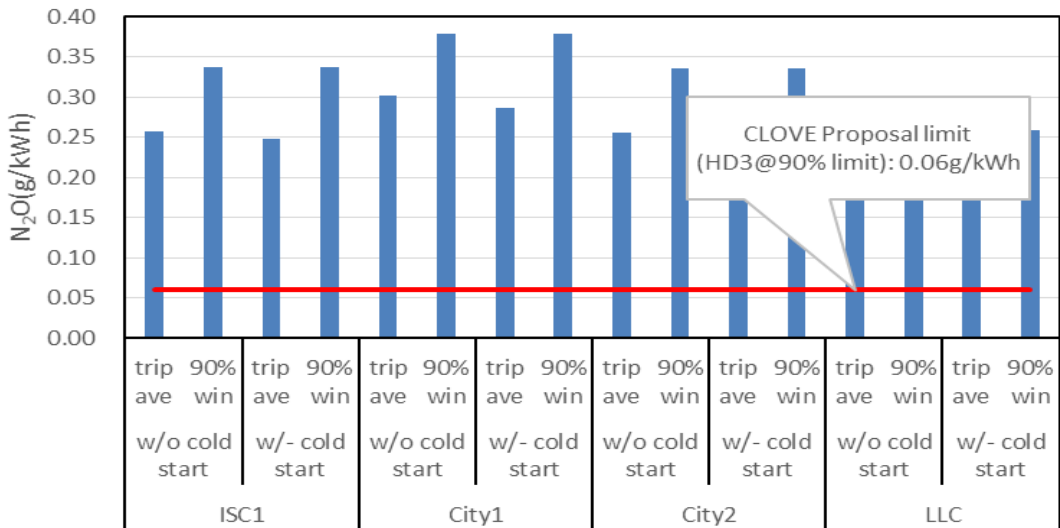
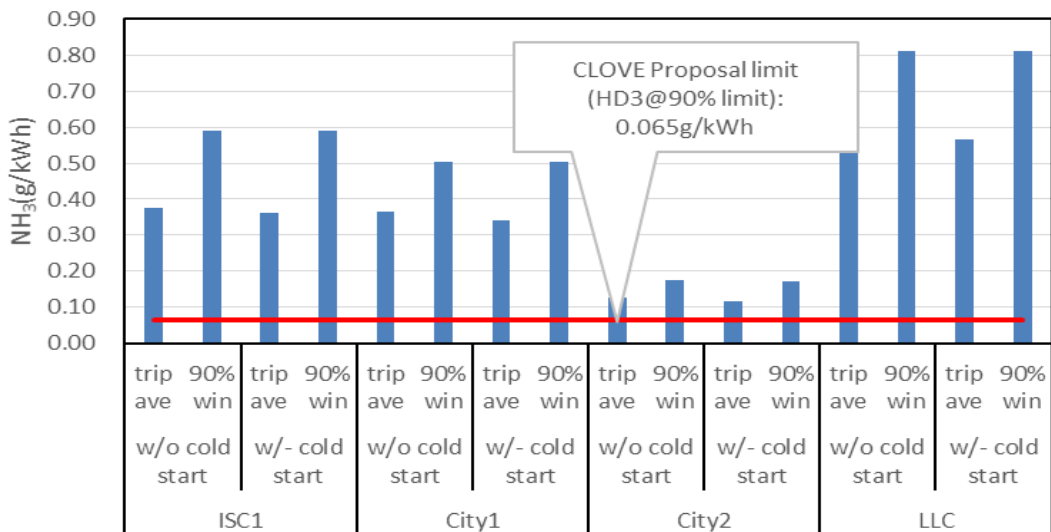

 (d) S02 样车 N₂O 排放结果

 (e) S02 样车 NH₃ 排放结果

图 17 S02 样车道路试验排放结果

4.2 道路排放模态

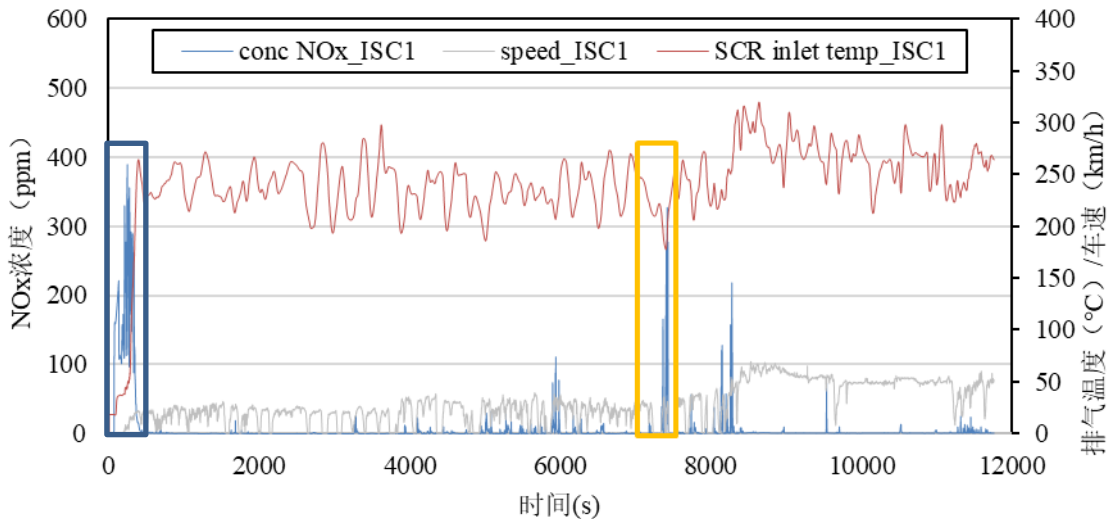
由 4.1 节可知, 2 辆柴油样车实际道路试验排放的 CO 和 PN23 均有较大余量 (相较于限值), 而低负荷对 NO_x 排放影响较大。因此, 本节主要对样车 NO_x、N₂O 和 NH₃ 排放进行分析。

4.2.1 NO_x 排放

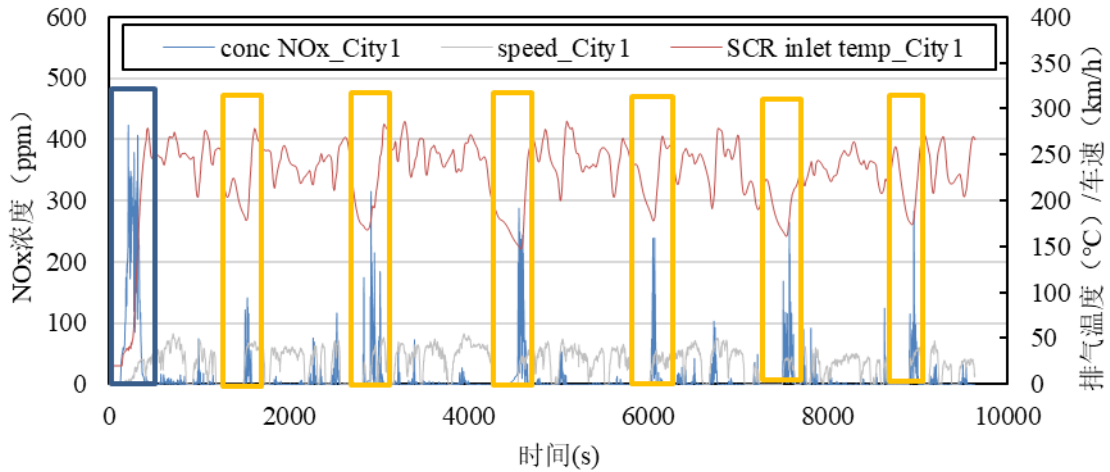
4.2.1.1 排放模态分析

两辆样车分别选取一次在用符合性 PEMS 试验、典型城市工况试验和 LLC 低负荷试验进行分析, S01 和 S02 样车 NO_x 排放见图 18 和图 19 所示。从排放结果上可以看出:

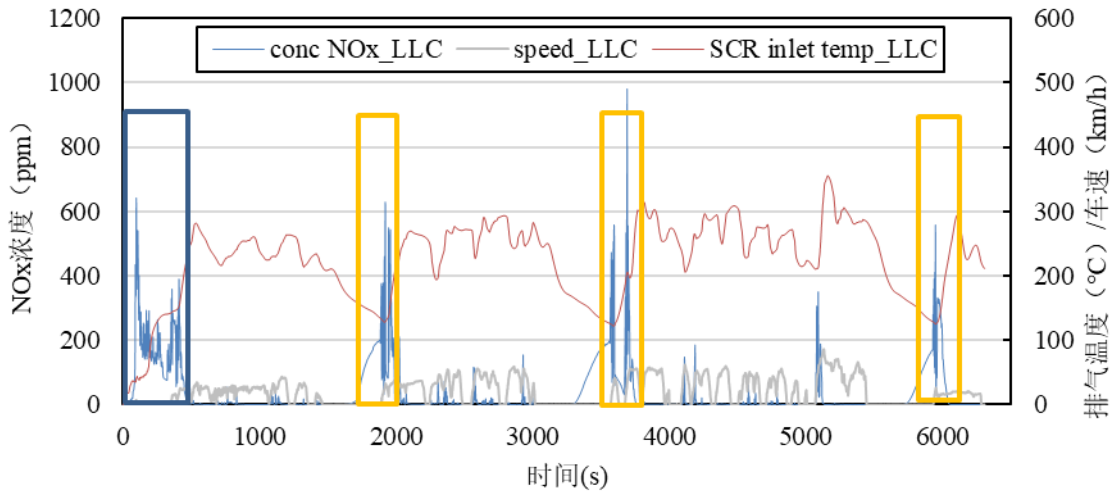
- 冷起动 (蓝色框体部分) 仍是 NO_x 排放的重要阶段, 冷起动影响持续时间取决于运行的工况和环境条件;
- 长怠速 (>2min) 导致排气温度降低 (SCR inlet temp<200°C), 随后的起步阶段 (SCR inlet temp<250°C前, 200°C后 NO_x 开始逐渐减小直至 250°C NO_x 低于 50ppm) 是产生 NO_x 排放的最主要阶段 (橙色框体部分)。
- S01 及 S02 样车, 在 SCR 正常工作温度时 NO_x 排放浓度低于 100ppm, S01 冷启动阶段和长怠速后 NO_x 排放浓度接近 400ppm, 峰值达到 900ppm 以上。S02 样车在冷启动阶段和长怠速后 NO_x 排放浓度接近 800ppm, 峰值超过 1400ppm。



(a) S01 样车 NO_x 实时排放 (ISC1)

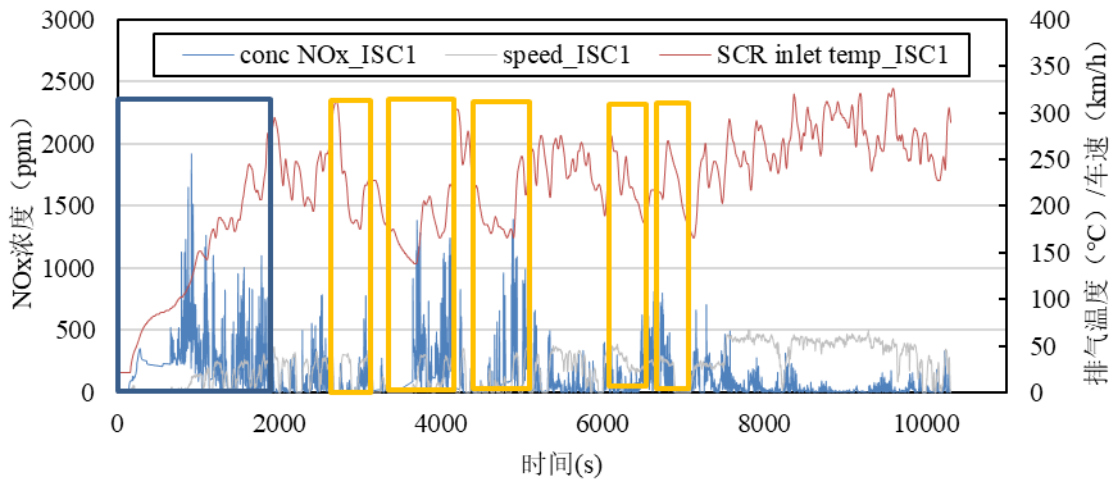


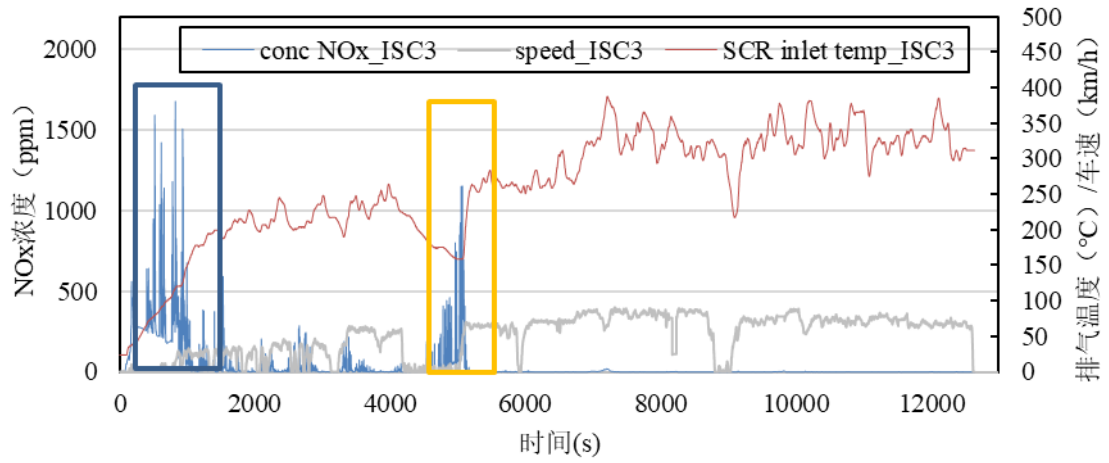
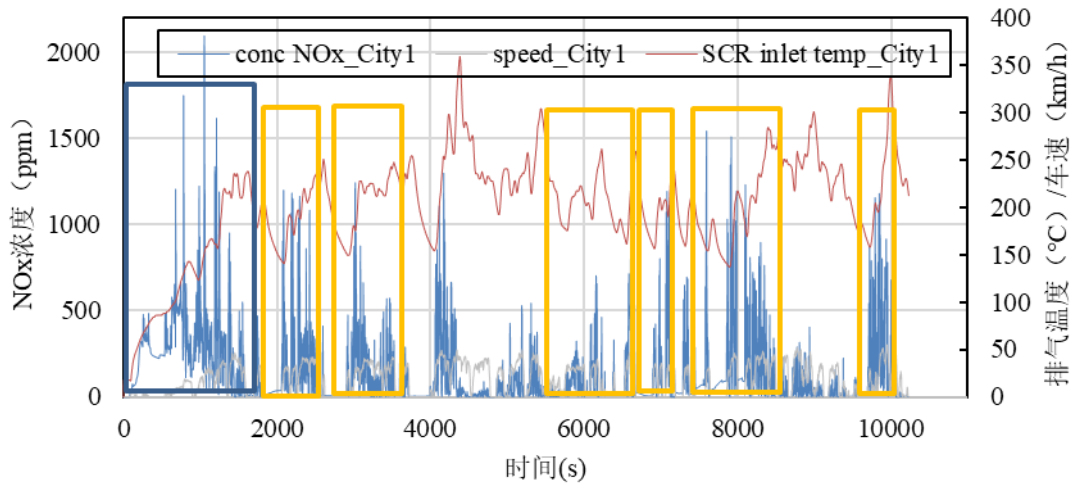
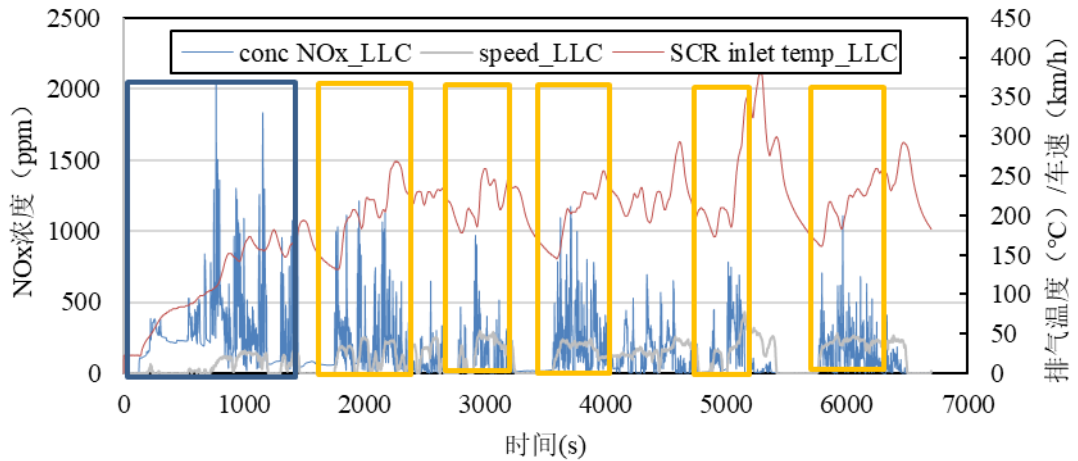
(b) S01 样车 NOx 实时排放 (City1)



(c) S01 样车 NOx 实时排放 (LLC)

图 18 S01 NOx 实时排放



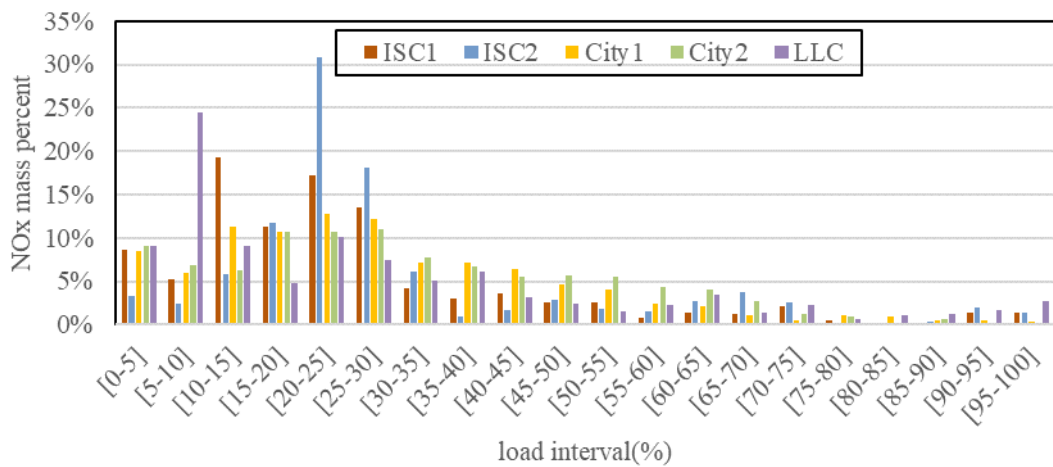
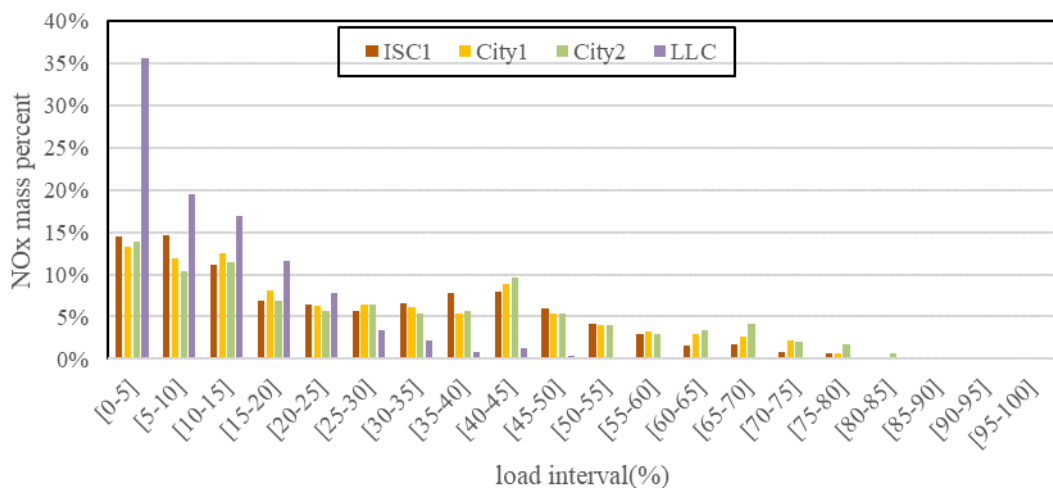
(a) S02 样车 NO_x 实时排放 (ISC1)

 (b) S02 样车 NO_x 实时排放 (ISC3)

 (c) S02 样车 NO_x 实时排放 (City1)


(d) S02 样车 NO_x 实时排放 (LLC)

 图 19 S02 样车 NO_x 实时排放

4.2.1.2 主要排放阶段分析

以 5% 为一个发动机负荷区间对逐秒排放进行分区, 统计各负荷区间下 NO_x 累积质量排放占比。从图 20 和图 21 可以看出, 两辆样车低于 40% 的负荷区间均是 NO_x 排放的主要区域 (NO_x 质量排放均超过 70%), 而这正是冷起动和长怠速 (>2min) 后车辆起步阶段 (SCR inlet temp<250°C 前) 所在区域。图 22 是样车冷起动阶段 NO_x 排放占总排放的比例, 结果显示: 对于正常运行的非城市车辆, 冷起动是 NO_x 排放的主要阶段, 占比可达 50% 以上; 对于运行在低负荷区域的城市和非城市车辆, 在冷起动 NO_x 排放较高的情况下同时还增加了长怠速所导致的 NO_x 排放增加, 长怠速 (>2min) 后的起步过程是主要的 NO_x 排放阶段。


 图 20 S01 样车不同负荷区间下 NO_x 排放质量占比

 图 21 S02 样车不同负荷区间下 NO_x 排放质量占比

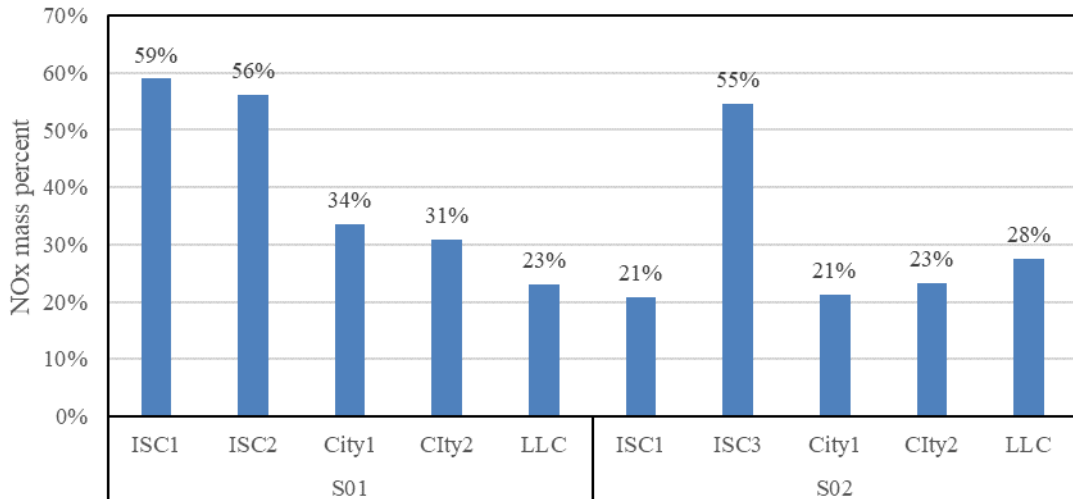
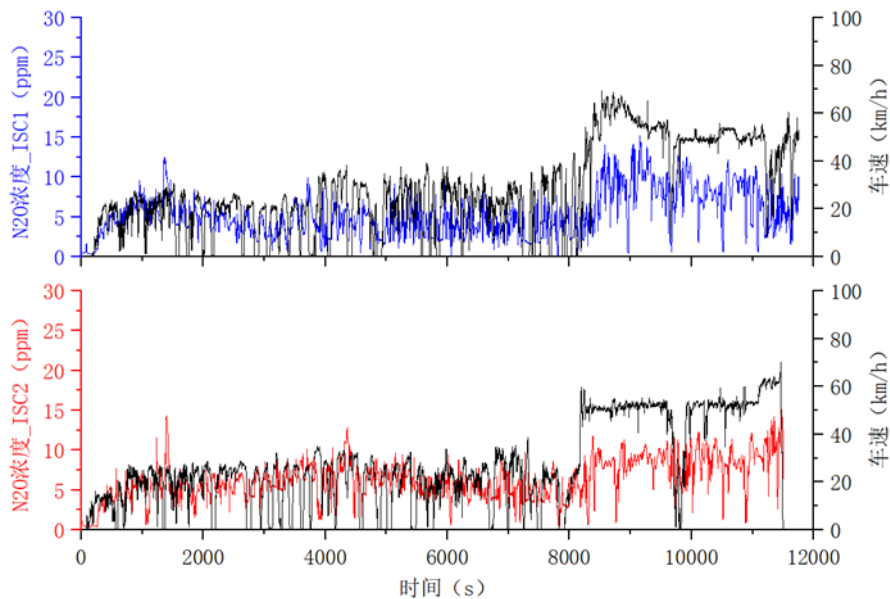


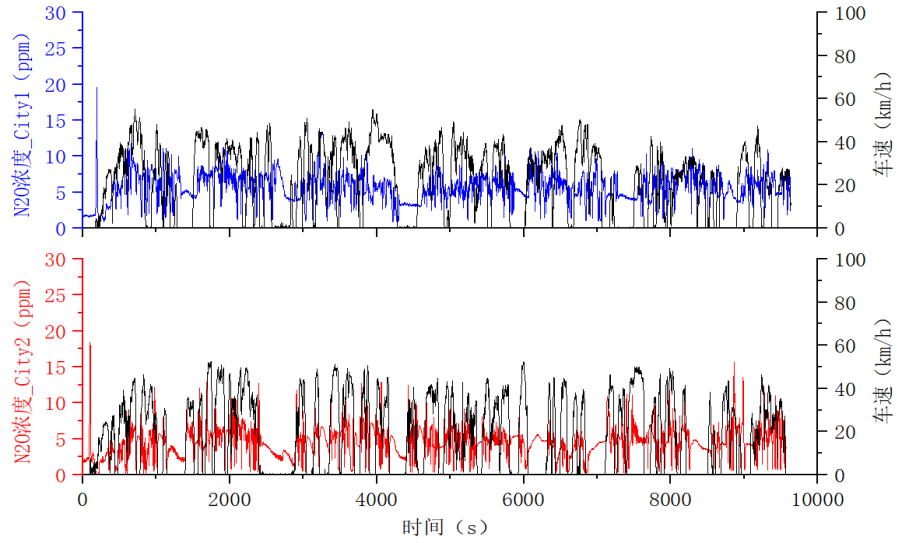
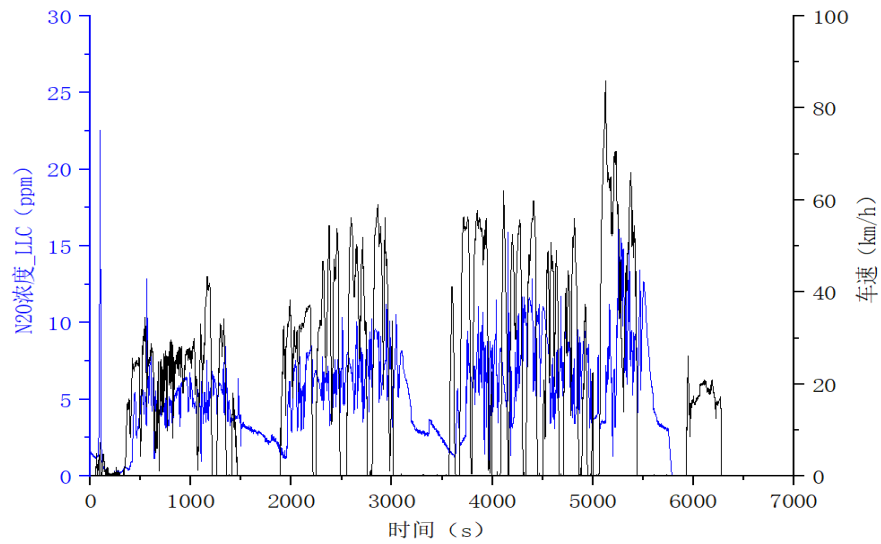
图 22 冷起动 NOx 排放质量占比

4.2.2 N₂O 排放

对 2 辆样车实际道路试验的 N₂O 排放进行分析, 具体见图 23~图 24, 从实时排放结果上看:

- 冷起动和低负荷对 N₂O 排放影响均不明显, 怠速阶段 N₂O 排放显著降低;
- S01 样车 N₂O 基本控制在一个恒定范围 (5~10ppm), 排放随着车速提高略微增加;
- S02 样车平均 N₂O 排放大约为 15ppm, 排放随着加速或急加速的发生而急剧增加, 与 CO 排放存在一定相关性。


 (a) S01 样车 N₂O 实时排放 (ISC)

(b) S01 样车 N₂O 实时排放 (City)(c) S01 样车 N₂O 实时排放 (LLC)图 23 S01 样车 N₂O 实时排放

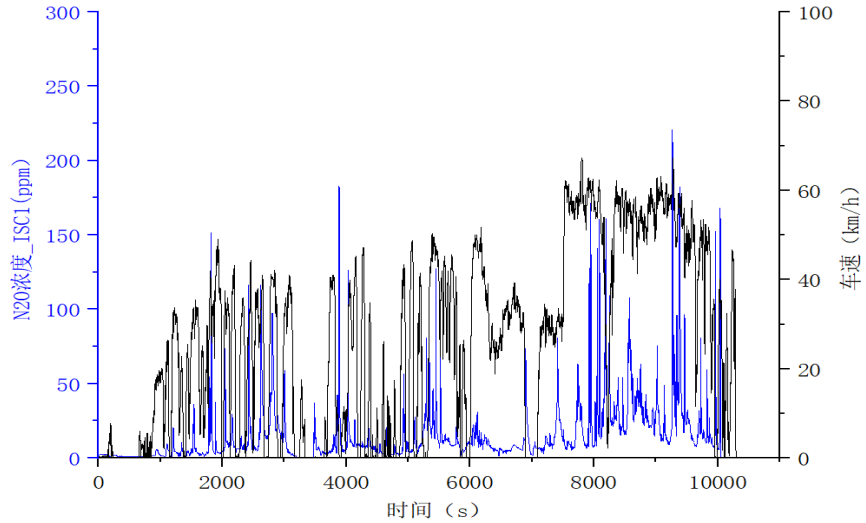
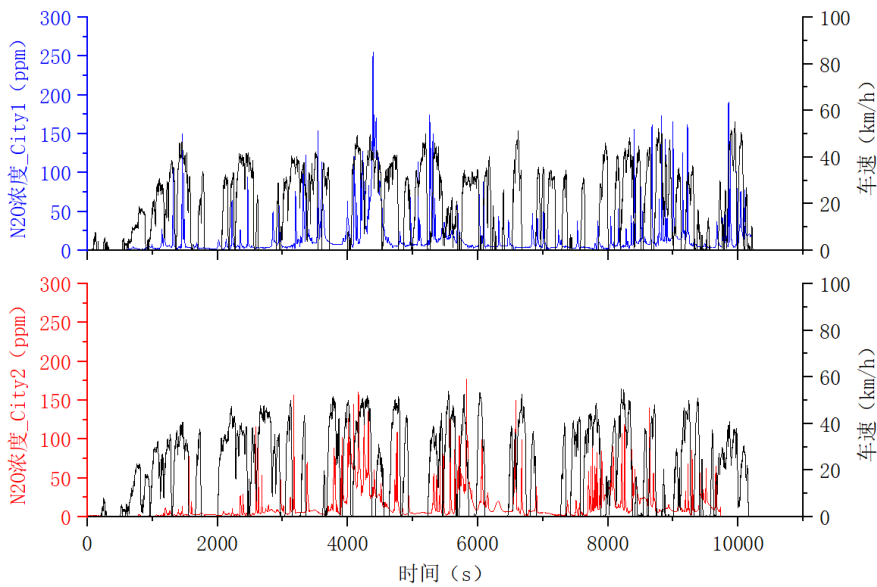
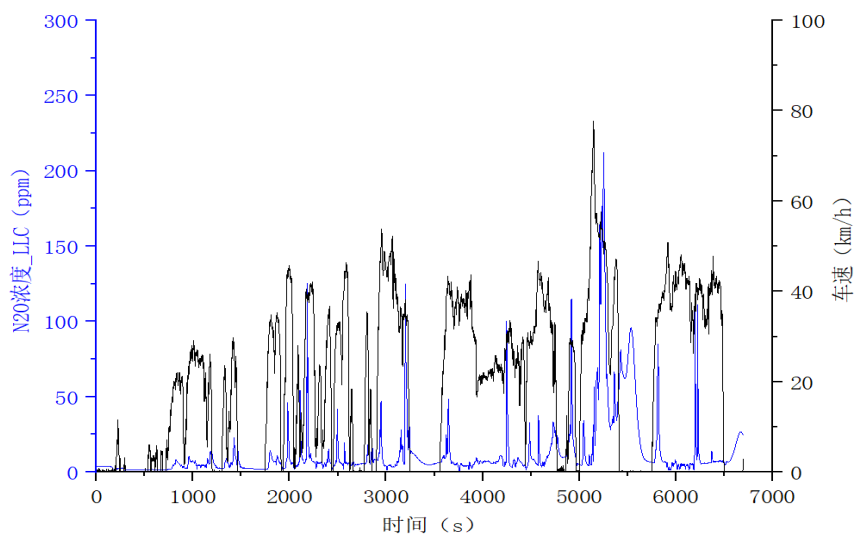
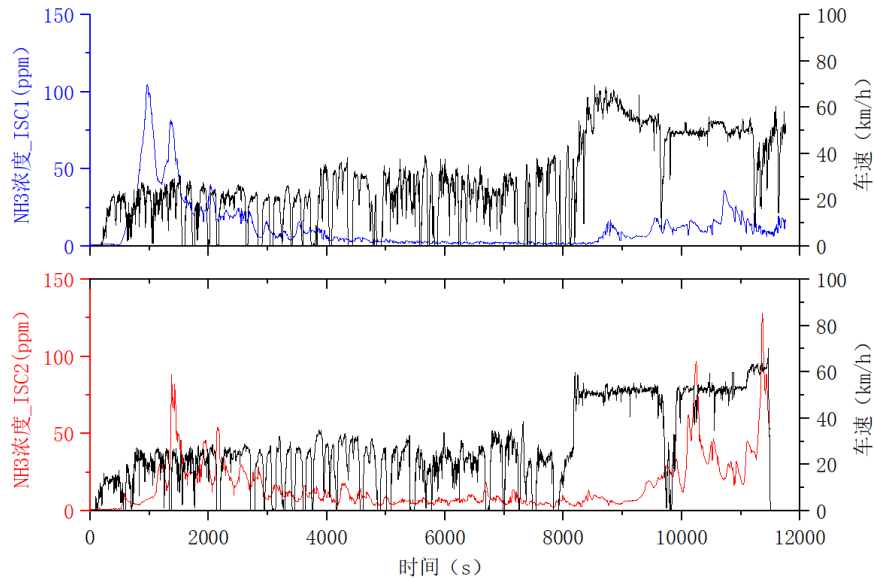
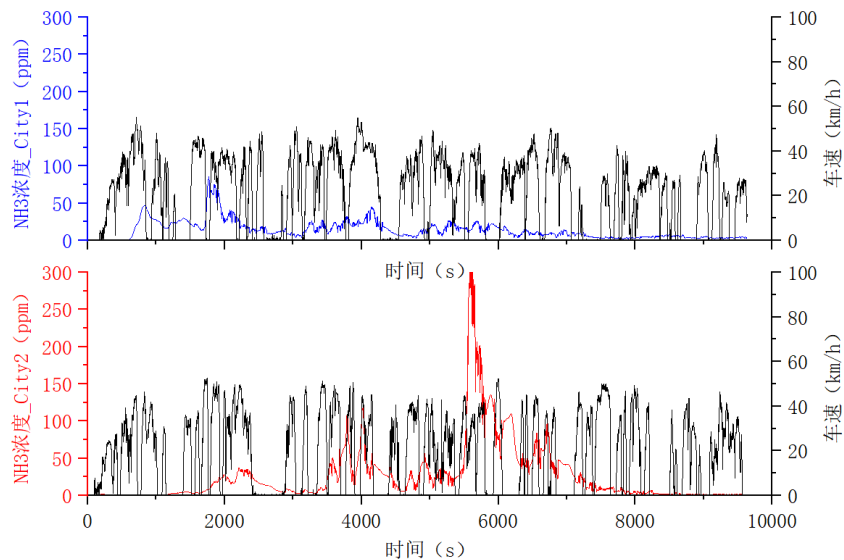
(a) S02 样车 N₂O 实时排放 (ISC)(b) S02 样车 N₂O 实时排放 (City)(c) S02 样车 N₂O 实时排放 (LLC)

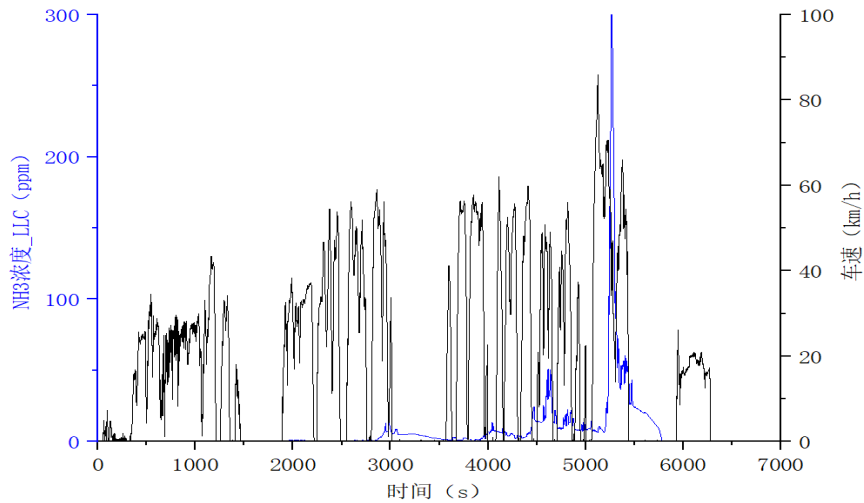
图 24 S02 样车 N₂O 实时排放

4.2.3 NH₃ 排放

对 2 辆样车实际道路试验的 NH₃ 排放进行分析, 具体见图 25~图 26, 从实时排放结果上看:

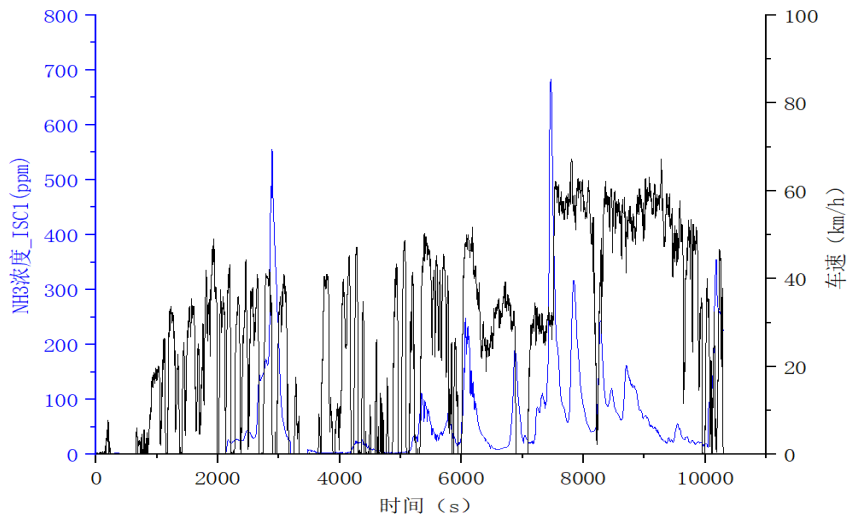
- 冷起动对 NH₃ 排放影响不明显;
- NH₃ 排放试验重复性较差, 无明显的排放产生规律, 部分 NH₃ 排放峰值出现在冷起动后, 推测由于 SCR 系统随着排温升高开始工作, 尿素分解产生的氨气逐渐增加, 从而出现 NH₃ 排放浓度增加。


 (a) S01 样车 NH₃ 实时排放 (ISC)

 (b) S01 样车 NH₃ 实时排放 (City)

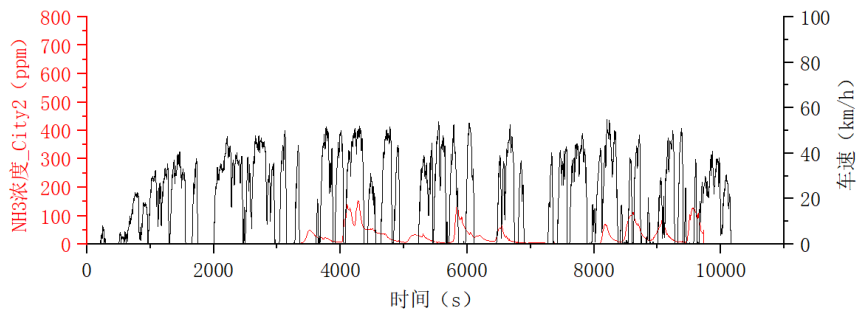
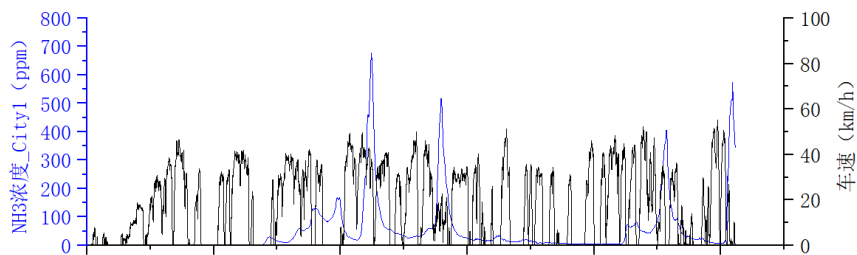


(c) S01 样车 NH₃ 实时排放 (LLC)

图 25 S01 样车 NH₃ 实时排放



(a) S02 样车 NH₃ 实时排放 (ISC)



(b) S02 样车 NH₃ 实时排放 (City)

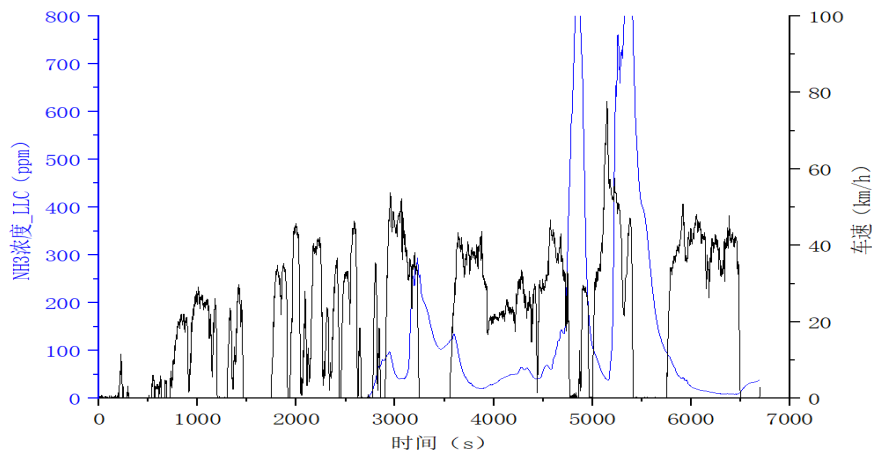

 (c) S02 样车 NH₃ 实时排放 (LLC)

 图 26 S02 样车 NH₃ 排放

4.3 整车油耗试验

4.3.1 试验结果

样车完成道路试验后进行整车油耗试验, 试验室底盘测功机系统模拟道路载荷和惯量, 车载测试系统 Horiba OBS ONE 和 QCL 分别测量常规及非常规 (N₂O 和 NH₃) 污染物。同时, 位于稀释通道的 PN23 (PN23_dil) 和 PN10 (PN10_dil) 设备对稀释后的颗粒物数量进行测量。为与道路试验负荷加载保持一致, 整车油耗试验也进行 10% 负荷加载, 而道路载荷则采用 GB/T 27840-2011 第 6.3.2 条推荐的行驶阻力算法进行试验。所有排放污染物试验结果根据 GB/T 27840-2011 表 1 特征里程分配比例, S01 样车市区、市郊、高速加权比例为 10%、40%、50%, S02 样车市区、市郊、高速加权比例为 10%、30%、60%。项目原计划进行 1 次冷起动和 3 次热起动 C-WTVC 循环试验, 但 S01 样车在第二次热起动试验 (C-WTVC-H2) 过程中 DPF 发生再生, 因此 S01 额外再进行了一次热起动试验, 具体试验结果见表 5。

表 5 整车油耗试验结果

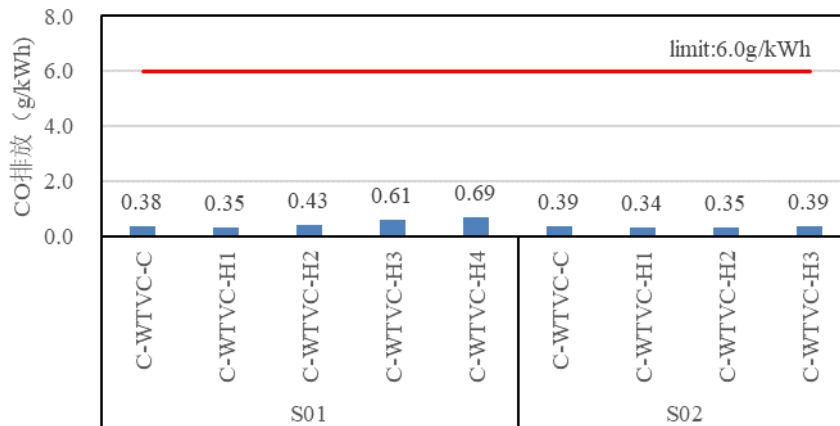
样车编号	试验循环	CO	NO _x	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	PN23 _{raw} ⁽¹⁾	PN23 _{dil}	PN10 _{dil}	FE
		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	#/kWh	#/kWh	#/kWh	L/100km
S01	C-WTVC-C	0.383	0.128	715.248	0.104	0.379	6.25E+10	7.36E+10	6.11E+10	23.395
	C-WTVC-H1	0.346	0.211	701.018	0.061	0.025	3.59E+10	3.75E+10	8.24E+10	22.802
	C-WTVC-H2	0.433	0.266	840.856	0.101	0.006	1.21E+11	5.93E+11	1.42E+13	27.297
	C-WTVC-H3	0.613	0.412	717.253	0.113	0.003	2.22E+10	2.70E+10	5.69E+10	23.458
	C-WTVC-H4	0.692	0.229	724.462	0.113	0.001	1.95E+10	2.28E+10	4.97E+10	23.858
S02	C-WTVC-C	0.389	1.721	731.726	0.142	0.231	6.01E+11	3.73E+11	NA ⁽²⁾	25.537
	C-WTVC-H1	0.340	1.163	737.448	0.132	0.431	2.52E+11	1.46E+11	2.88E+11	24.525
	C-WTVC-H2	0.350	1.020	719.032	0.099	0.293	2.15E+11	1.19E+11	2.73E+11	23.823
	C-WTVC-H3	0.392	0.866	731.898	0.123	0.348	2.19E+11	1.20E+11	2.69E+11	23.886

(1) PN23_{raw} 为车载测试系统 OBS ONE 直采测量结果 ;
 (2) S02 样车 C-WTVC-C 试验过程中 PN10 无读数。

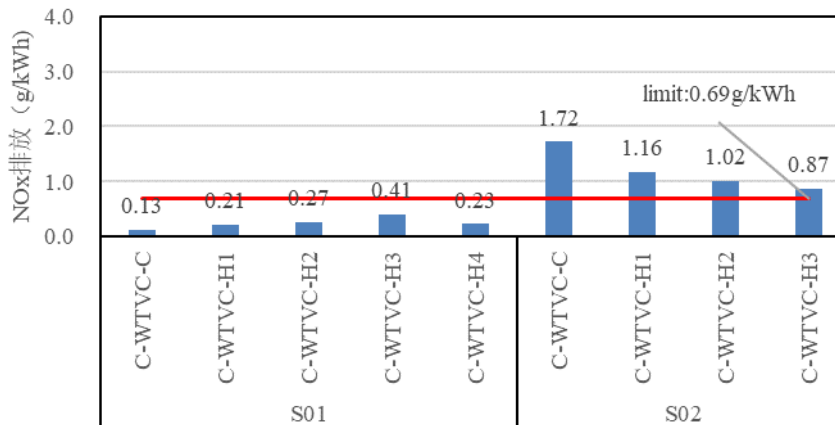
4.3.2 排放控制水平

为考察样车油耗和排放协同控制水平,参考整车 PEMS 试验限值对常规污染物 (CO、NO_x 和 PN₂₃) 进行合规性分析,结果如图 27 所示:

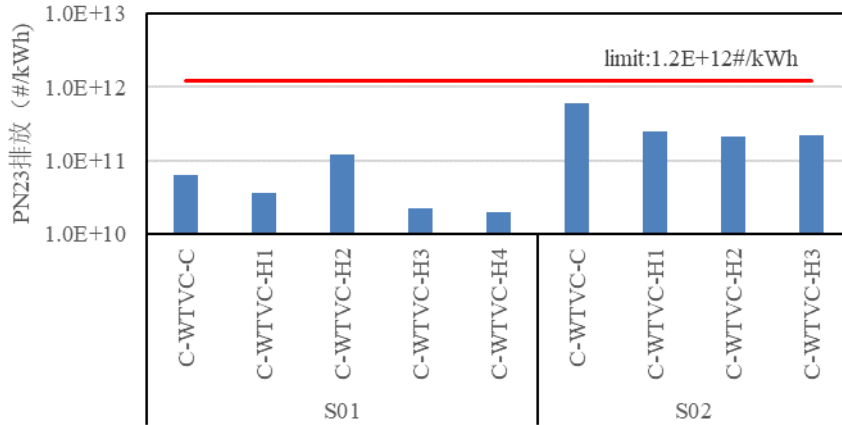
- S01 样车 3 项污染物排放均满足限值要求且有较大余量,即便第二次热起动试验 (C-WTVTC-H2) DPF 发生再生,PN₂₃ 仍能满足要求;
- S02 样车 CO 和 PN₂₃ 排放满足限值要求,但 NO_x 排放是限值的 2~3 倍。同时,过量的 NO_x 排放导致 NH₃ 排放处于较高水平 (热起动平均结果为 0.29g/kWh),与道路试验 NH₃ 排放基本相当;
- 两辆样车 N₂O 排放水平基本相当 (大约 0.10g/kWh),且冷起动或再生期间未见明显 N₂O 排放。



(a) 样车油耗试验中 CO 排放



(b) 样车油耗试验中 NO_x 排放



(c) 样车油耗试验中 PN23 排放

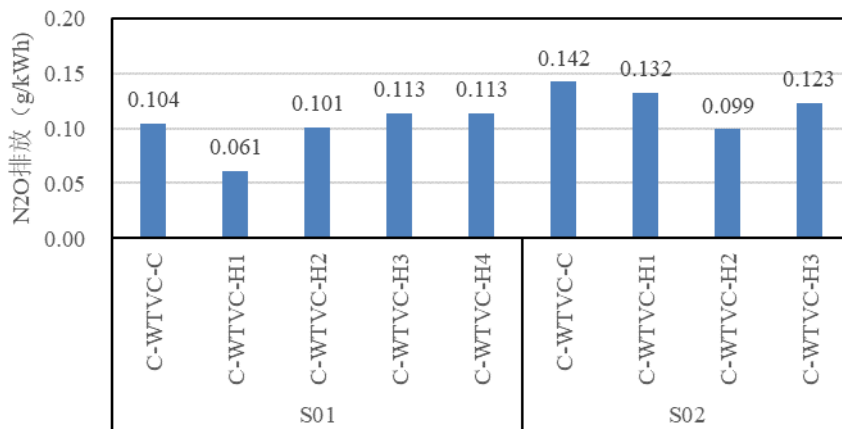
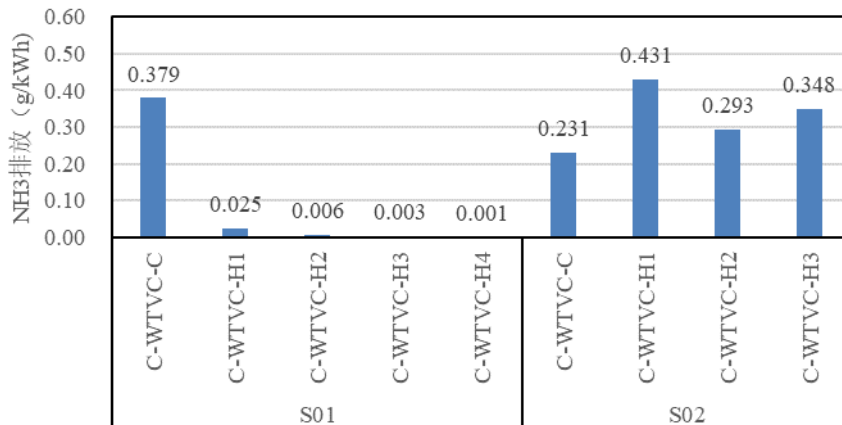

 (d) 样车油耗试验中 N₂O 排放

 (e) 样车油耗试验中 NH₃ 排放

图 27 样车油耗试验排放控制水平

4.3.3 颗粒排放分析

在整车油耗试验中,除 OBS ONE 直采测量 PN23 外,稀释通道的两台颗粒计数设备同时测量 PN23 和 PN10。试验过程中, S01 样车第二次热起动试验 (C-WTVC-H2) DPF 发生再生, S02 样车冷起动试验(C-WTVC-C)PN10 设备异常无测量结果。本节主要分析 PN10 排放水平,并对比稀采和直采 PN23 排放差异,具体试验结果见图 28 和图 29, PN23_dil 表示稀采 23nm 以上颗粒物

数量, PN23_raw 表示直采 23nm 以上颗粒物数量, Sub23=稀采 10nm 以上颗粒物数量/稀采 23nm 以上颗粒物数量-1:

- 两辆样车 Sub23 增量 (Sub23%=PN10/PN23-1) 大约为 120%, 但当 DPF 发生再生时, 大量小于 23nm 的颗粒排出, Sub23 增量可达 2016%;
- 对于 PN23 排放, 稀采和直采的差异在 50%以内, 但当 DPF 发生再生时, 稀采 PN23 是直采 PN23 的 4.6 倍。其原因可能为稀采颗粒物排放测量结果高于直接排气管中采样结果, 可能的原因是部分挥发性有机物在稀释过程中凝结成核, 核态颗粒物在稀释过程中吸附、凝聚等 (23nm 以下转化成 23nm 以上), 也可能是由于排气出口到稀释通道的管路在高温下释放出部分吸附的 SPN。根据以往我们对颗粒物的研究, 推测有一部分挥发态和半挥发态颗粒物在经过稀释空气冷凝后发生了聚集, 导致高浓度的挥发态和半挥发态颗粒物在 ET-VPR 系统中不能被完全去除, 导致在 ET 末端再次形成颗粒物。从而使得再生时稀采 23nm 会大于直采 23nm。
- S01 冷启动试验, 直采 PN23 大于稀采 PN23 约 59%, 推测原因为冷启动试验由于整车排气管路及部分稀释通道温度较低, 颗粒物排出后存在吸附现象, 导致稀采 PN23 测得浓度较低。在经过冷启动试验后管路吸附性逐渐降低, 直采与稀采差异逐渐减小。

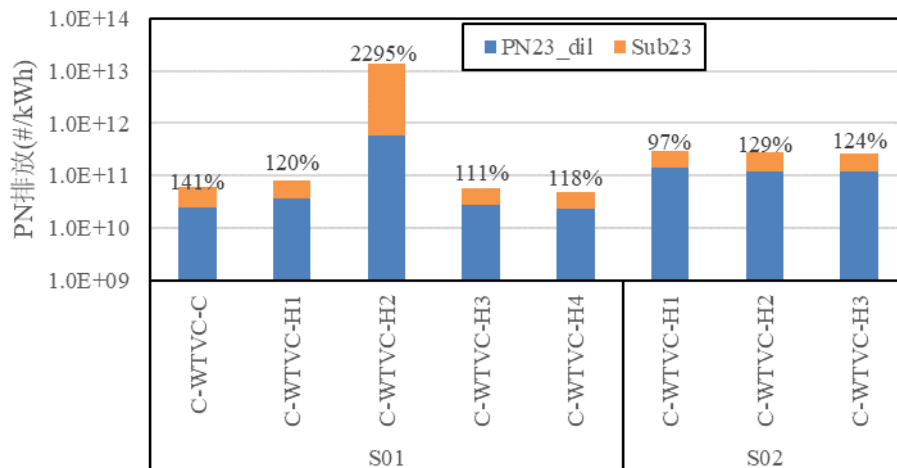


图 28 样车 PN10 排放结果

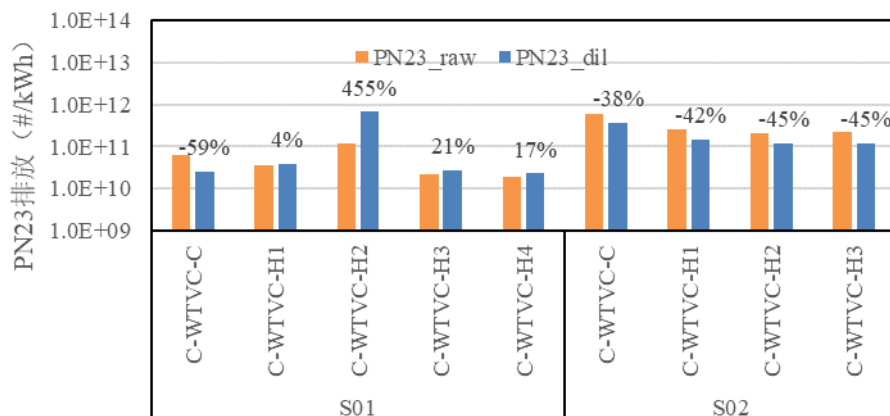


图 29 PN23 排放直采和稀采结果

4.4 油耗一致性

OBD 油耗数据能间接地反应车辆的 CO₂ 排放情况水平, 对未来国家碳排放监管起到良好的辅助作用。因此, 重型国六标准要求 PEMS 试验结束后须对油耗一致性进行验证, 以评估车辆 OBD 输出的油耗是否准确。标准推荐的回归线斜率为 0.9~1.1, 而相关系数则强制要求不低于 0.90。项目使用样车 OBD 输出的瞬时油耗和碳平衡计算的油耗进行数据比对, 一致性验证结果见图 30 和图 31 (重复试验均选第一次试验数据进行分析):

- S01 样车油耗一致性验证结果满足标准要求;
- S02 样车油耗一致性验证回归线斜率满足要求, 但相关系数低于标准要求限值 (大约为 0.88~0.89)。

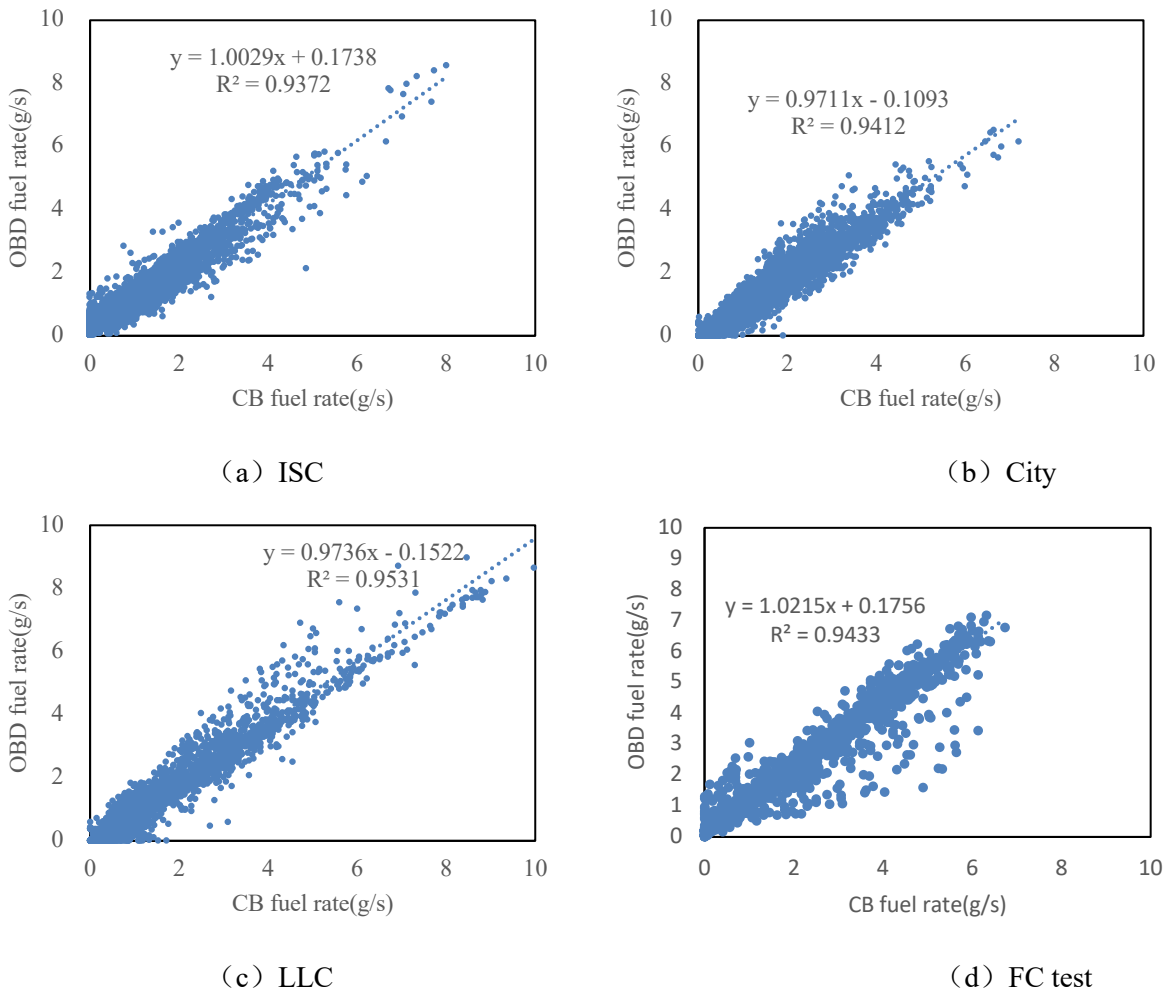


图 30 S01 油耗一致性验证结果

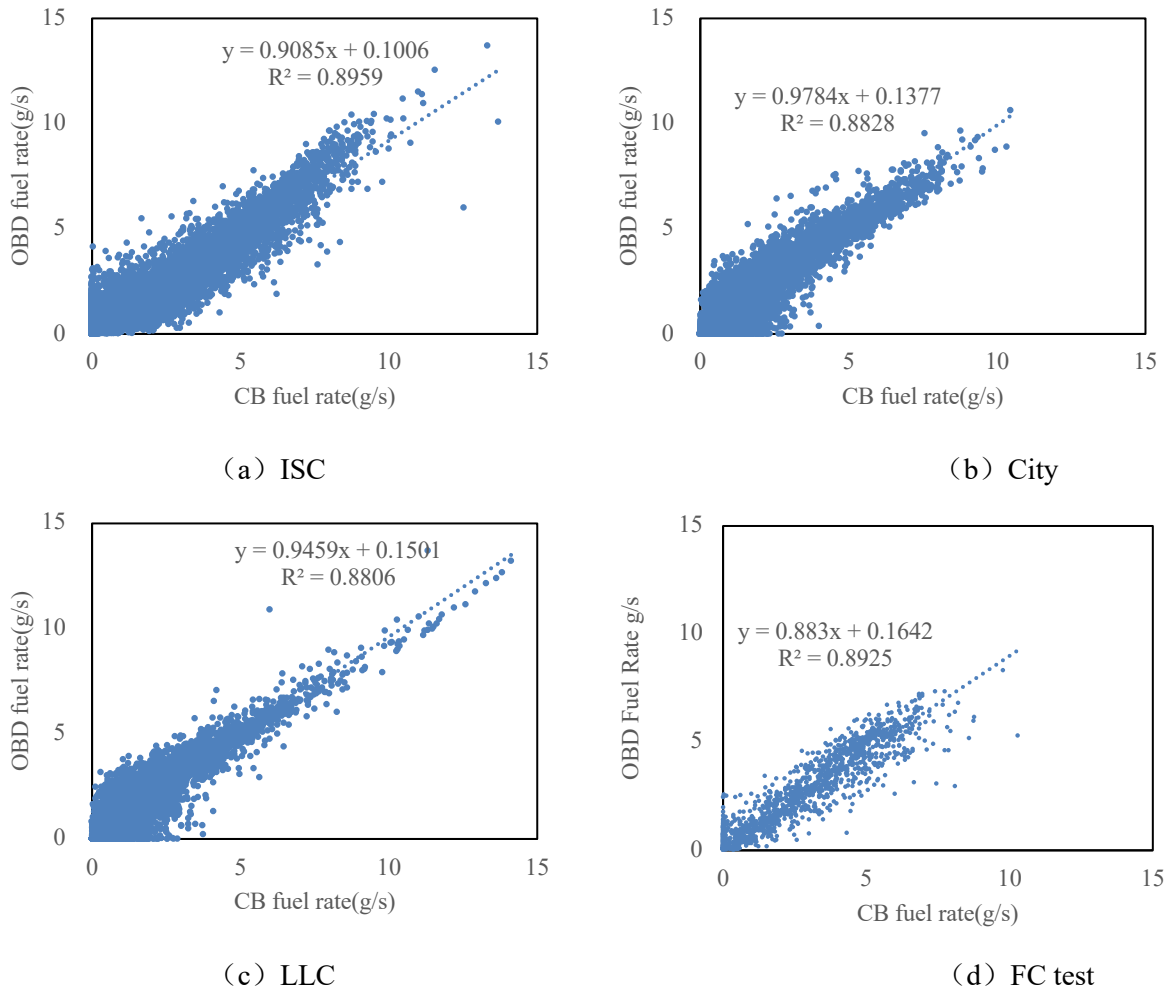


图 31 S02 油耗一致性验证结果

4.5 NO_x 传感器分析

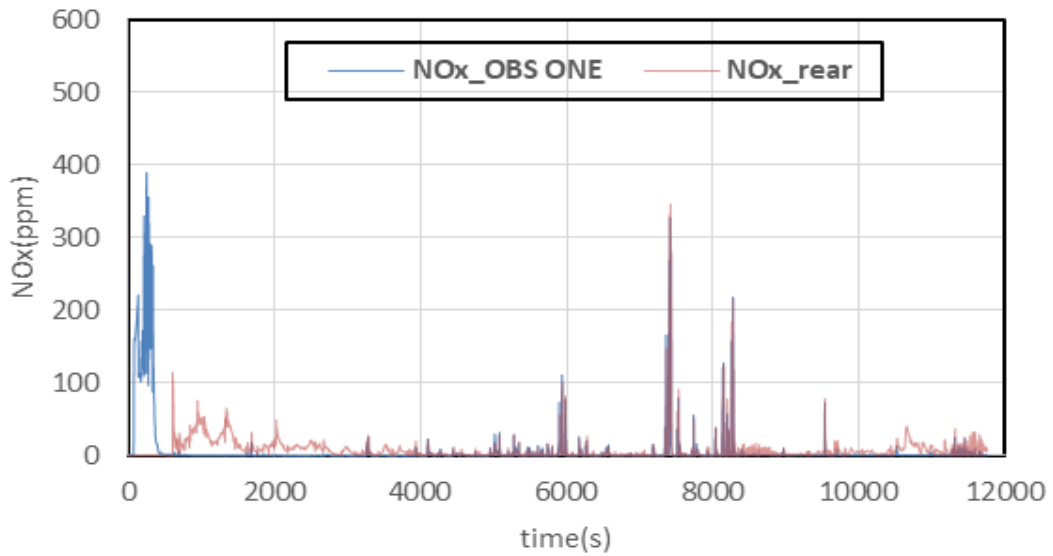
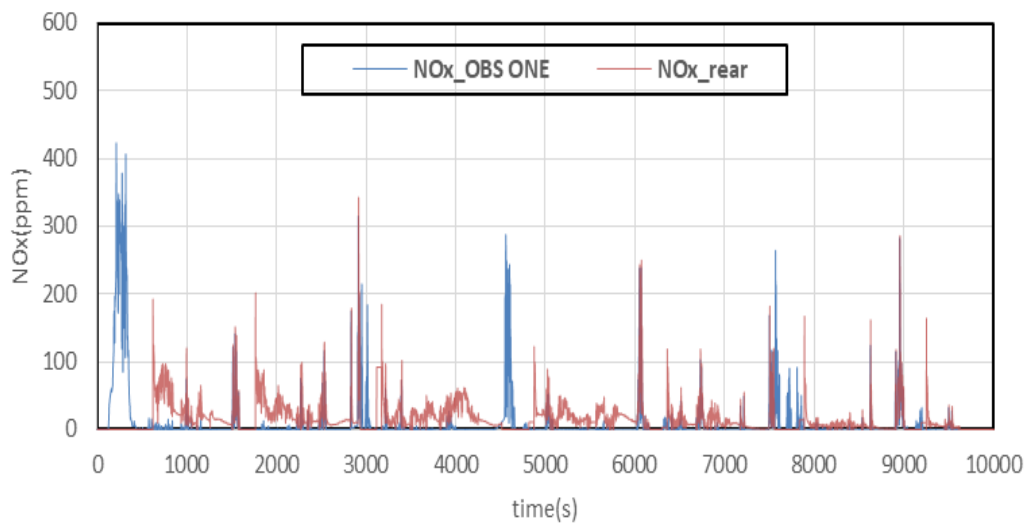
对装配 SCR 后处理的柴油车, ECU 通过 SCR 前后的 NO_x 传感器测量值动态调整尿素喷射量 (闭环控制)。同时, 基于前后 NO_x 传感器计算的转化效率是 OBD 系统监测 SCR 效能的重要手段。但是, NO_x 传感器并非在车辆运行全过程中均能保持正常工作状态, 当传感器未能达到正常工作温度 (冷启动阶段或长时间低负荷阶段), 其测量值处于缺省状态 (比如: 65535 或 0)。因此, 项目对后 NO_x 传感器的准确性 (与 PEMS 测量值对比)、前后 NO_x 传感器计算的 SCR 转换效率以及 NO_x 传感器异常工作时间进行统计分析, 结果见表 6 和图 32~图 33。

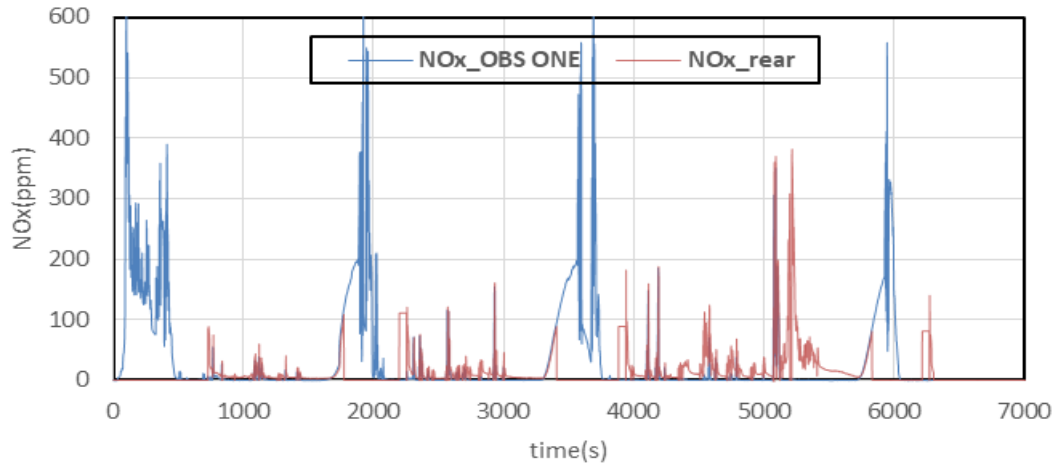
 表 6 NO_x 传感器对比

车辆编号	试验	平均浓度(ppm)			SCR 转换效率 ⁽¹⁾	浓度偏差 ⁽²⁾	传感器异常时间 (s)		传感器异常比例	
		OBS ONE	NO _x 传感器 (前)	NO _x 传感器 (后)			NO _x 传感器 (前)	NO _x 传感器 (后)	NO _x 传感器 (前)	NO _x 传感器 (后)
S01	ISC1	6.3	281.9	7.6	97%	21%	1382	541	12%	5%
	ISC2	4.6	246.7	13.3	95%	190%	1605	435	14%	4%
	City1	9.9	166.7	20.6	88%	108%	2811	1767	29%	18%
	City2	16.1	148.8	27.2	82%	69%	2812	1699	29%	18%
	LLC	37.6	95.9	10.1	90%	-73%	2530	1950	40%	31%
S02	ISC1	121	399	115	71%	-5%	1167	1372	11%	13%
	ISC3	35	570	21	96%	-41%	1061	4897	16%	73%

	City1	135	353	110	69%	-18%	1117	1340	11%	13%
	City2	131	409	95	77%	-28%	1158	1484	11%	15%
	LLC	153	215	86	60%	-44%	1014	1481	15%	22%

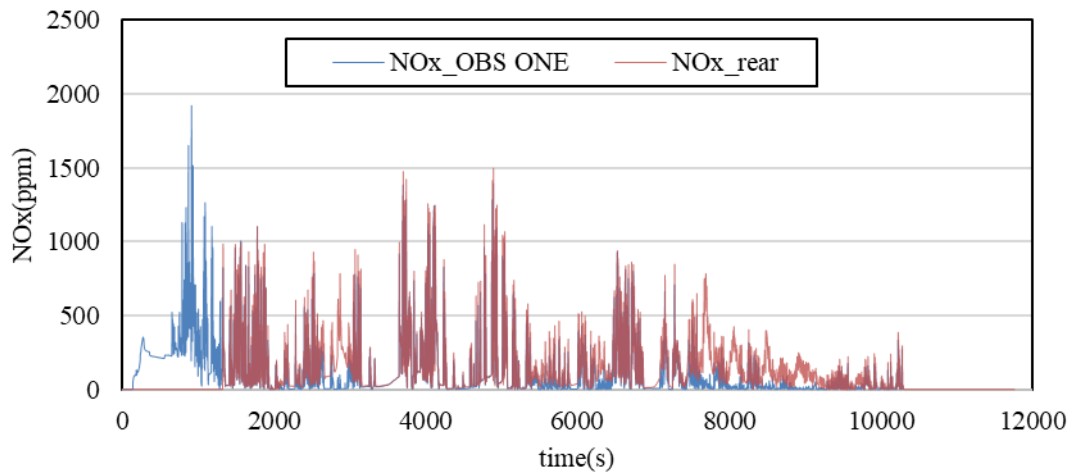
- (1) SCR 转换效率是后 NO_x 传感器和前 NO_x 传感器的比值;
 (2) 后 NO_x 传感器相对于 OBS ONE 的浓度偏差。


 (a) S01 样车 ISC1 试验 NO_x 排放浓度

 (b) S01 样车 City1 试验 NO_x 排放浓度

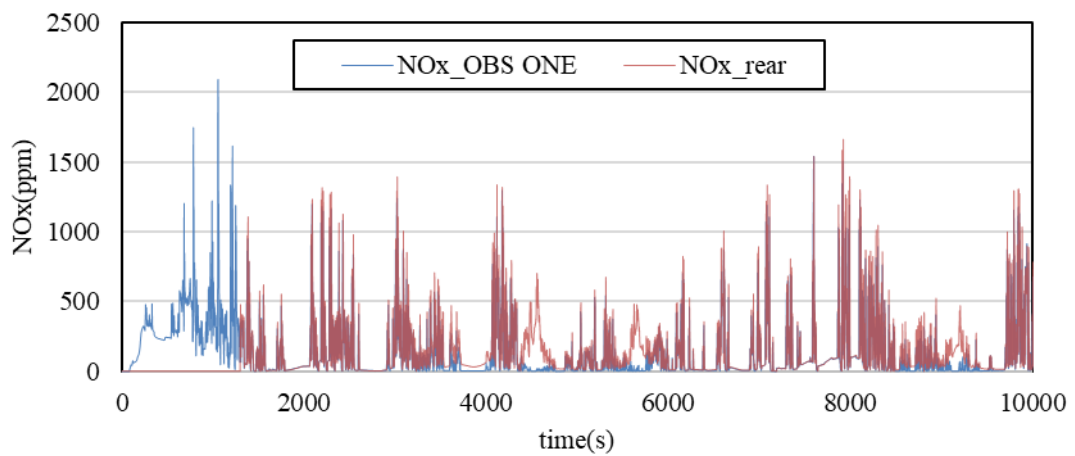


(c) S01 样车 LLC 试验 NOx 排放浓度

图 32 S01 车载 NOx 传感器与 PEMS 设备测量对比



(a) S02 样车 ISC1 试验 NOx 排放浓度



(b) S02 样车 City1 试验 NOx 排放浓度

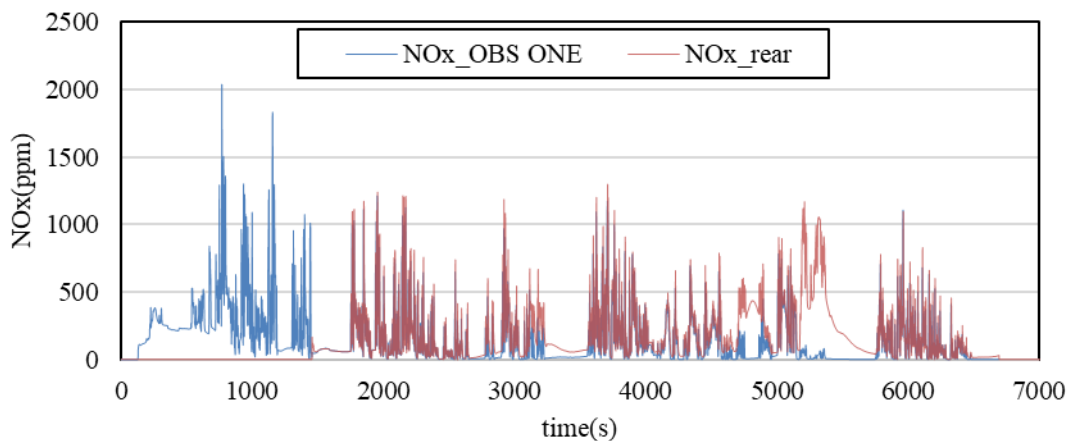

 (c) S02 样车 LLC 试验 NO_x 排放浓度

 图 33 S02 车载 NO_x 传感器与 PEMS 设备测量对比

5 结论

- (1) 为考核测试负荷对车辆排放控制的影响, 项目设计的道路试验负荷包含了在用符合性试验 (ISC)、典型城市工况试验 (City) 和低负荷工况试验 (LLC)。S01 样车 ISC 和 City 试验的 NO_x 排放满足国 6b PEMS 试验限值要求, 但 LLC 试验的 NO_x 排放是限值的 1.34 倍。S02 样车三项试验的 NO_x 排放均超出限值要求 (最大达限值的 4.0 倍), 为验证样车正常负荷条件下 NO_x 控制水平, 样车额外进行了一次非城市路线在用符合性试验 (ISC3), NO_x 排放结果大约为限值的 89%。与此同时, 两辆样车三项试验的 CO 和 PN23 排放均有较大余量。项目试验结果表明: 对装配 SCR 后处理的柴油车, 测试负荷主要影响 NO_x 排放, 但对 CO 和 PN23 排放影响有限。
- (2) 对于道路试验 N₂O 排放, S01 和 S02 样车窗口排放平均值分别为 0.132g/kWh 和 0.283g/kWh, 为欧 7 CLOVE 提案限值 (HD3@90% limit: 0.06g/kWh) 的 2.20 和 4.72 倍。对于道路试验 NH₃ 排放, S01 和 S02 样车窗口排放平均值分别为 0.141g/kWh 和 0.494g/kWh, 为欧 7 CLOVE 提案限值 (HD3@90% limit: 0.065g/kWh) 的 2.17 和 7.6 倍。
- (3) 冷起动和长怠速 (>2min) 后的起步阶段 (SCR inlet temp<250°C前) 是产生 NO_x 排放的最主要阶段。对于正常运行的非城市车辆, 冷起动是 NO_x 排放的主要阶段, 占比可达 50%以上; 对于运行在低负荷区域的城市或非城市车辆, 冷起动的影响有所减弱 (占比大约为 20~30%), 长怠速 (>2min) 后的起步过程是主要的 NO_x 排放阶段。
- (4) 整车油耗试验中, S01 样车 3 项污染物排放均满足限值要求且有较大余量, 即便第二次热起动试验 DPF 发生再生, PN23 仍能满足要求。S02 样车 CO 和 PN23 排放满足限值要求, 但 NO_x 排放是限值的 2~3 倍。
- (5) 整车油耗试验中, 两辆样车 Sub23 增量大约为 80~120%, 但当 DPF 发生再生时, 大量小于 23nm 的颗粒排出, Sub23 增量可达 2016%。对于 PN23 排放, 稀采和直采的差异在 50%以内, 但当 DPF 发生再生时, 稀采 PN23 是直采 PN23 的 4.6 倍。
- (6) 在样车油耗一致性验证中, S01 样车验证结果满足标准要求, S02 样车回归线斜率满足要求, 但相关系数 (大约为 0.88~0.89) 低于标准要求限值 (不低于 0.90)。