



中国可持续能源项目

威廉与佛洛拉·休斯基金会
能 源 基 金 会
项目资助号: G-1110-14992

中国内河船舶柴油机排放清单研究

Technical Research of Emission Inventory of Diesel Engine for Inland-waterways Vessels in China



北京理工大学

汽车动力及排放测试国家重点专业实验室

2013 年 5 月

致 谢

感谢能源基金会中国可持续能源项目为本报告提供资金支持，同时也诚挚地感谢为本报告提出宝贵意见与建议的业内专家与同事。

报告作者

叶文韬，葛蕴珊

报告声明

本报告所有观点、解释、结论均属作者个人意见，不代表项目资助方。报告仅限于研究、个人学习或某个组织的内部传阅，不得翻印或者用于商业目的。如有不妥与谬误之处，敬请读者不吝批评和指正。

联系方式

北京市海淀区中关村南大街 5 号 邮编:100081

电话: 010 -68912035

:

目录

1 项目背景调研	1
1.1 我国航运现状.....	1
1.2 我国船舶用柴油机的主要生产企业.....	3
1.2.1 船用柴油机分类.....	3
1.2.2 低速船用柴油机.....	3
1.2.3 中速船用柴油机.....	3
1.2.4 大功率高速船用柴油机.....	4
1.3 国内外船舶排放法规现状.....	7
1.3.1 国际船舶法规 IMO 法规和 MARPOL 公约.....	7
1.3.2 美国环保局(EPA)对船舶的 NO _x 和 SO _x 的法规限制.....	9
1.3.3 瑞典环境保护署.....	10
1.3.4 中国防治船舶大气污染法规.....	10
1.3.5 中国船舶用柴油机排放标准的发展趋势.....	11
2 实验研究及方法	13
2.1 实验设备介绍.....	13
2.1.1 气态污染物排放测试仪器.....	13
2.1.2 颗粒物排放测试仪器.....	15
2.2 船舶排放测试方案.....	17
2.2.1 测试地点选取.....	17
2.2.2 被测船只的选取原则.....	17
2.2.3 船只行驶路线选取.....	19
2.2.4 船只运行工况选取原则.....	21
2.2.5 测试设备安装.....	21
2.2.6 测试流程.....	22
3 内河船舶柴油机实际工况下气态污染物的排放特性	23
3.1 江苏内河船舶排放气态污染物排放特性.....	23
3.1.1 船舶实际运行典型工况介绍.....	23
3.1.2 工况对排放特性影响.....	25
3.1.3 负荷对排放的影响.....	30

3.1.4 氮氧化物排放特性	32
3.1.5 燃油消耗特性	36
3.2 广东内河船舶柴油机气态污染物排放特性	39
3.2.1 广东内河客船气态污染物排放特性	39
3.2.2 广东内河货船气态污染物排放特性	44
3.3 小结	48
4 船用柴油机实际工况下颗粒物排放特性研究	49
4.1 工况对颗粒物排放特性影响	49
4.1.1 船舶实际航行工况下颗粒物排放分布情况	49
4.1.2 负荷变化对颗粒物排放特性影响	51
4.1.3 水流变化对颗粒物排放特性影响	51
4.2 粒径分布特性	52
4.3 船舶柴油机 PM _{2.5} 与 PM ₁₀ 排放特性	53
4.4 小结	55
5 内河船舶排放因子及清单研究	56
5.1 我国内河船舶分布情况	56
5.1.1 我国船舶的保有量及燃油消耗量	56
5.1.2 江苏省船舶情况	57
5.1.3 广东省船舶情况	59
5.2 江苏段内河货运船舶排放因子及清单计算	61
5.2.1 根据货物周转量计算排放清单	61
5.2.2 根据燃油消耗计算排放清单	63
5.3 广东内河船舶排放清单计算	64
5.3.1 根据货物周转量计算排放清单	64
5.3.2 根据燃油消耗计算排放清单	65
5.4 船用柴油机排放监督管理建议	Error! Bookmark not defined.
结论	68
附录 船舶测试日期及发动机和船舶全貌图	70

表目录

表 1.1 2006-2009 年我国船机产量、主要机型及用途	6
表 1.2 《船舶污染防治国际公约》附录 VI 中的 NO _x 排放限值 (克 /千瓦时)	8
表 1.3 EPA TIER2 对 1 类和 2 类发动机排放限值.....	9
表 1.4 非道路移动机械装用柴油机排放限值 (第一阶段)	11
表 1.5 非道路移动机械装用柴油机排放限值 (第二阶段)	11
表 1.6 拟定的船用柴油机排气污染物限值 (I 阶段)	12
表 2.1 SEMTECH 对各污染物组分的测量精度	15
表 2.2 ELPI 测量粒径分级 (单位: μm)	16
表 2.3 ELPI 设备参数.....	16
表 2.4 江苏段测试船舶信息	18
表 2.5 广东段测试船舶信息	19
表 5.1 2000-2010 年我国机动船拥有量和牵引功率	56
表 5.2 2011 年中国水上运输船舶构成 (按航行区域划分)	56
表 5.3 2000-2010 年中国机动船舶燃料消耗量	57
表 5.4 2011 年江苏省水路客货运输量	57
表 5.5 2011 年江苏省各市营业性水路客货运输量	58
表 5.6 2011 年江苏省营业性运输船舶燃料消耗情况	58
表 5.7 2011 年广东省交通运输生产完成情况	59
表 5.8 2011 年广东省各市水路旅客周转量、货物周转量	60
表 5.9 2011 年广东省各市运输船舶燃料消耗	60
表 5.10 江苏段各功率段船舶单位周转量污染物排放量.....	62
表 5.11 江苏段平均单位货物周转量污染物排放量.....	62
表 5.12 江苏省 2010 年基于周转量船舶排放清单.....	62
表 5.13 江苏段测试船舶实际排放因子.....	63
表 5.14 江苏段基于燃油消耗排放因子.....	63
表 5.15 江苏省 2010 年基于燃油消耗的船舶排放总量.....	64
表 5.16 广东段测试船舶单位周转量污染物排放量.....	64
表 5.17 广东段基于活动量的排放因子.....	65

表 5.18 广东省 2011 年基于活动量的船舶排放总量.....	65
表 5.19 广州段测试船舶实际排放因子.....	65
表 5.20 广东省客船货船基于燃油消耗排放因子.....	65
表 5.21 广东省基于燃油消耗的船舶排放总量.....	66
表 5.22 各类船舶排放因子.....	66
表 5.23 全国综合排放因子.....	66
表 5.24 历年排放总量.....	67

图目录

图 1.1 2011 年全国内河航道通航里程构成	2
图 1.2 2006-2011 年全国水上运输船舶拥有量	2
图 1.3 MARPOL 附录 VI 中规定的国际船舶运输燃油硫含量下降时间表	9
图 2.1 SEMTECH-DS 外观图	13
图 2.2 流量计实物图	15
图 2.3 ELPI 实物图	16
图 2.4 测试船舶实物图	18
图 2.5 江苏段测试船舶行驶路线	20
图 2.6 广东段测试船舶行驶路线	21
图 2.7 测试设备安装实物图	22
图 3.1 江苏段测试船舶典型工况介绍	24
图 3.2 江苏段各污染物随时间变化情况	25
图 3.3 江苏段各工况 CO 排放情况	27
图 3.4 江苏段各工况 HC 排放情况	28
图 3.5 江苏段各工况 NO _x 排放情况	30
图 3.6 不同负荷下各污染物排放情况	31
图 3.7 不同负荷下各污染物排放变化趋势	32
图 3.8 江苏段各船舶 NO _x 排放情况	33
图 3.9 江苏段 NO _x 排放平均值	33
图 3.10 江苏段各船舶不同工况温度情况	34
图 3.11 江苏段货船分工况温度平均	35
图 3.12 不同工况船舶速度平均	36
图 3.13 江苏段货船 NO/NO _x 情况	36
图 3.14 江苏段货船分工况油耗情况	37
图 3.15 不同载荷下百公里油耗分布	38
图 3.16 不同负荷下百公里油耗情况	39
图 3.17 广东客船实际行驶情况	40
图 3.18 广东段客船瞬时排放情况	41

图 3.19 广东货船基于时间和浓度的瞬时排放情况.....	42
图 3.20 船舶速度与排气流量情况	42
图 3.21 不同转速下各污染物瞬时排放情况.....	43
图 3.22 不同速度下 NO _x 各成分瞬时排放情况.....	43
图 3.23 广东货船行驶情况	44
图 3.24 不同水流情况下各污染物排放情况.....	45
图 3.25 不同水流情况下发动机转速与船舶速度情况.....	45
图 3.26 定距桨工作性能曲线示意图	46
图 3.27 不同水流情况下客船与货船各污染物排放情况.....	47
图 4.1 货船颗粒物瞬时排放情况	49
图 4.2 单船各工况颗粒物排放情况	50
图 4.3 江苏段所测船舶不同工况下颗粒物排放情况.....	50
图 4.4 不同负荷下颗粒物排放情况	51
图 4.5 不同水流情况下颗粒物排放情况	51
图 4.6 不同工况下颗粒物数量与质量粒径分布.....	53
图 4.7 不同工况下 PM _{2.5} 与 PM ₁₀ 数量浓度情况.....	54
图 4.8 不同工况下 PM _{2.5} 与 PM ₁₀ 质量浓度情况.....	54
图 5.1 谏壁趸船实际调研功率分布	62

1 项目背景调研

当今世界，能源与环保问题成为关系国计民生的重大问题。尤其是近年来，随着世界经济的不断发展，车船保有量与日俱增，随着人们环保意识的不断增强，控制车船的有害排放的要求日益强烈，车船的排放污染已引起国际社会的广泛关注。

在陆域上，世界各国纷纷制定符合各国国情的汽车尾气排放相关法规和标准，带动了减少和控制汽车发动机排气有害气体处理技术的相关研究。在海域上，由于船舶在海上的营运活动具有流动性强、扩散性大、持续时间长的特点，同时近年来随着海运事业的发展和陆上移动机械排放法规的不断严格，船舶柴油机的排放污染比例有不断上升的趋势，因此船舶排放污染已受到国际海事组织和世界各国政府的高度重视。

与此同时我国长期以来对船用柴油机的排放缺乏有效控制措施，船舶柴油机污染排放严重，严重影响了周边区域的环境空气质量，对港口城市造成了严重的污染。为评估船用柴油机的实际排放状况，并采取有效措施控制其污染排放，首先需要对船舶柴油机的排放状况进行深入了解。

1.1 我国航运现状

自上世纪 70 年代至今，我国海运业经过短暂而充实的起步期、奠定基础期、快速发展期，进入了 21 世纪的繁荣期，取得了举世瞩目的成就。

截至 2011 年底，全国内河航道通航里程 12.46 万公里。等级航道 6.26 万公里，占总里程的 50.3%。其中，三级及以上航道 9460 公里，五级及以上航道 2.60 万公里，分别占总里程的 7.6%和 20.8%。各等级内河航道通航里程分别为：一级航道 1392 公里，二级航道 3021 公里，三级航道 5047 公里，四级航道 8291 公里，五级航道 8201 公里，六级航道 18506 公里，七级航道 18190 公里，各级航道分布比例如图 1.1。各水系内河航道通航里程分别为：长江水系 64052 公里，珠江水系 15995 公里，黄河水系 3488 公里，黑龙江水系 8211 公里，京杭运河 1439 公里，闽江水系 1973 公里，淮河水系 17264 公里。

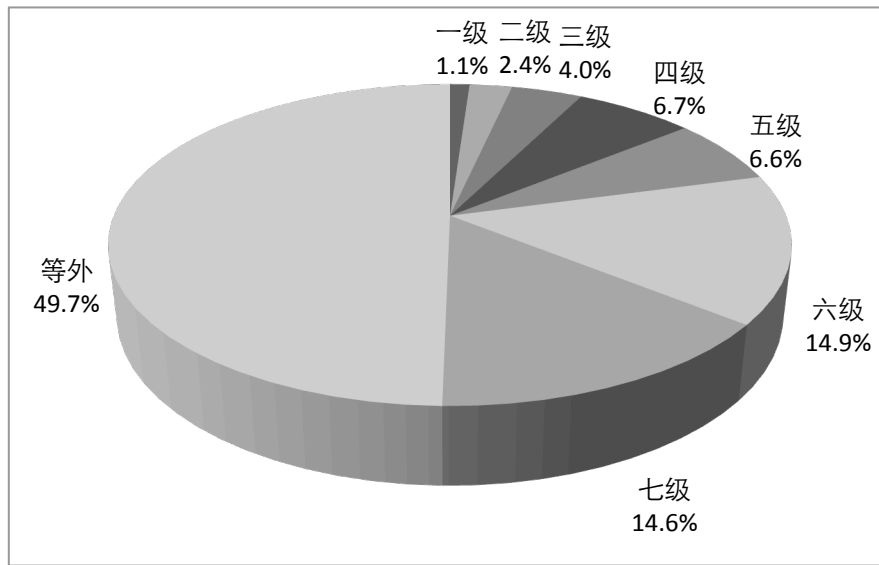


图 1.1 2011 年全国内河航道通航里程构成

全国内河航道共有 4186 处枢纽，其中具有通航功能的枢纽 2359 处。通航建筑物中，有船闸 865 座、升船机 44 座。

2011 年底，全国港口拥有生产用码头泊位 31968 个。其中，沿海港口生产用码头泊位 5532 个；内河港口生产用码头泊位 26436 个。全国港口拥有万吨级及以上泊位 1762 个。其中，沿海港口万吨级及以上泊位 1422 个；内河港口万吨级及以上泊位 340 个。

2011 年底，全国拥有水上运输船舶 17.92 万艘；净载重量 21264.32 万吨；平均净载重量 1186.35 吨/艘；载客量 100.84 万客位；集装箱箱位 147.52 万 TEU；船舶功率 5949.66 万千瓦。2006 年至 2011 年全国水上运输船舶数和净载重吨详见图 1.2。

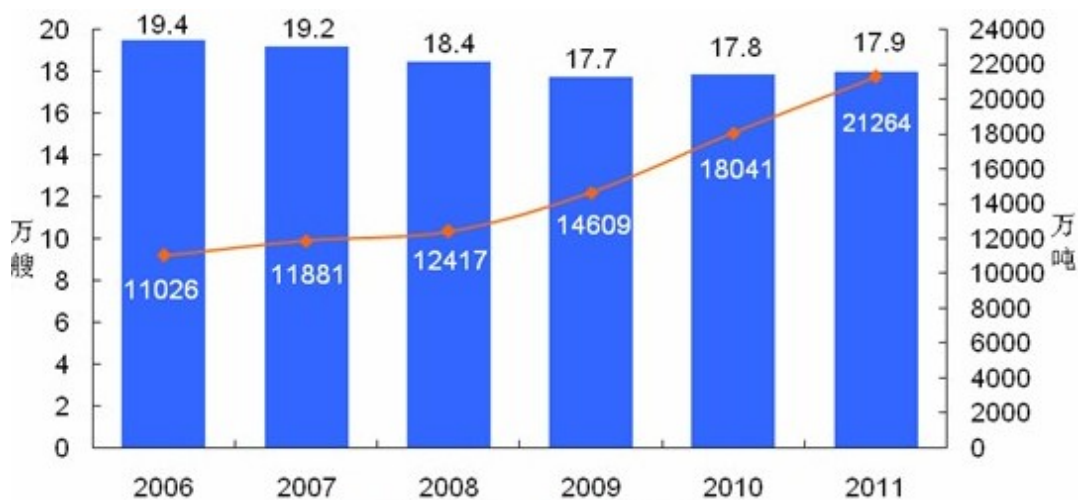


图 1.2 2006-2011 年全国水上运输船舶拥有量

与世界船舶构成相比，我国船舶结构组成存在着比较明显的缺陷：散货船比例相对较高，而油轮和集装箱轮比例相对偏低，船舶平均吨位小，平均船龄较老、船舶的大型化、集装箱化与国际水平相比还存在较大差距。

1.2 我国船舶用柴油机的主要生产企业

1.2.1 船用柴油机分类

由于柴油机的应用广泛，因此，为满足各种不同的使用要求，柴油机的类型也就多种多样。根据柴油机的各种不同特点以及不同的分类方法，船舶柴油机大体上有以下类型：

(1)按工作循环分类。有四冲程柴油机和二冲程柴油机。

(2)按进气方式分类。有增压柴油机和非增压柴油机。

(3)按曲轴转速分类。有高速、中速和低速柴油机。 高速柴油机： $n > 1000 \text{r/min}$ ；中速柴油机： $300 \leq n \leq 1000 \text{r/min}$ ；低速柴油机： $n < 300 \text{r/min}$ 。其中 n 为发动机额定转速。

(4)按柴油机结构特点分类。有筒状活塞式和十字头式柴油机有单列气缸和多列气缸式柴油机。

1.2.2 低速船用柴油机

目前世界船用低速柴油机市场仍被德国 MAN B&W, Wartsila- New Sulzer 和日本三菱重工三大公司垄断，它们的产量之和平均都在总功率的 85% 以上。近年来，国产船用主机生产已有较快发展，国内低速船用柴油机的生产企业主要包括沪东重机股份公司、大连船用柴油机厂和宜昌船舶柴油机厂。

沪东重机是我国最早研制大功率船用柴油机的专业化生产企业，公司通过引进船用中、低速大功率专用技术，先后制造出 MAN-B&W, WARTSILA、S.E.M.T 系列等多种机型的专利产品。

大连船用柴油机厂是中船重工所属大型低速柴油机生产厂，主要生产世界名牌 SULZER 和丹麦 MBD 两大系列大功率船用低速柴油机。目前企业已开发出 16 代 42 种机型的产品，经英国 LR，中国 CCS，美国 ABS，德国 GL，挪威 DNV，法国 PRS、日本 NK、意大利 RINA 等著名船级社检验，其技术质量指标全部达到国际标准，与世界先进水平保持同步。

1.2.3 中速船用柴油机

国外著名的中速柴油机制造厂家主要有德国 MAN B&W、芬兰 Wartsila、德国 MTU、美国 Cateillar、韩国 Hyundai、日本洋马、大发等公司。

我国船舶中速柴油机通过技术合作、专利或许可证引进及自主开发研制,在国内已经形成了一定的生产能力,主要企业包括镇江中船设备有限公司、安庆船用柴油机厂、陕西柴油机重工有限公司、重庆长江柴油机厂、新中动力机厂、沪东重机股份公司等。国内企业的产品系列繁多,缸径分布密集(160-400 mm),功能较单一,国产中速机技术水平落后,仅用于渔船、内河航行船舶等。我国制造的远洋船舶上配套的中速机 70%直接购买国外进口原装机,其余 30%几乎都是国外许可证技术制造的产品,技术依赖于国外,没有自主知识产权。

镇江中船设备有限公司有 30 年专业生产中速柴油机的历史,先后引进 MAN-B&W 的 L16/24、L21/31、L23/30、L27/28、L28/32 和 L32/40 系列机型的生产许可证,功率范围 430-10000kW,排放满足 IMO 的 NO_x 排放标准。

安庆船用柴油机厂是船用中速柴油机专业化生产企业,企业的主导产品是 DK-20、DK-26 和 DK-28 系列柴油机,具有 NO_x 排放低,能满足 IMO 提出的 21 世纪环保技术要求,生产的“安庆-大发”牌柴油机能满足 CCS、LR、GL、ABS、NK、BV、NDV 等世界各船级社的规范要求。

陕西柴油机重工有限公司主要生产机型有 6DK-28、MAN 9L21/31、MAN L32/40 和 16PC2-6 柴油机。

1.2.4 大功率高速船用柴油机

大功率高速船用柴油机一直被 MTU、Deutz、MWM、SACM、Pielstick, Ruston 和 Paxman 等几大公司占有,其产品均为 V 型、四冲程,缸数 12-20,转速 1200-1800r/min,平均有效压力 2.0-3.2MPa,活塞速度 10.5-13 m/s,最大爆发压力 15-18MPa,燃油消耗率 198-210 g/(kW·h)。目前,各制造商在材料选择、设计结构、优化系统、试验研究和加工制造等方面做了许多工作,并取得了显著进步,其发展趋势大致为:采用系列化设计,并通过变型满足多用途需要;不断开发新型的大功率高速柴油机,适应船舶市场的供需变化;严格整机的耐久试验,提高工作的可靠性;提高强化系数,提高柴油机使用的经济性;采用各种不同的喷射装置或喷射方式,完善燃烧过程,降低 NO_x 的排放量,适应日益严格的环保要求。特别是德国 MTU 公司开发的 595 系列、2000 系列、

4000 系列以及最新的 8000 系列，代表着高速柴油机的发展方向。

我国大功率高速船用柴油机生产企业主要有：济南柴油机股份有限公司、淄博柴油机总公司、潍柴动力股份有限公司、上海柴油机股份有限公司、玉柴集团和河南柴油机重工有限公司。代表机型有：上海柴油机股份有限公司的 18V180ZC，潍柴动力股份有限公司的 170Z 和济南柴油机股份有限公司的 190 系列。根据中国内燃机工业协会所得 2006-2009 年我国主要生产企业的船机产量、主要机型及用途详见表 1.1。

表 1.1 2006-2009 年我国船机产量、主要机型及用途

船机类型	生产企业	2006 年产量		2007 年产量		2008 年产量		2009 年产量		机型	用途
		台	万 kW	台	万 kW	台	万 kW	台	万 kW		
低速柴油机	沪东重机有限公司	79	208	89	119	103	131	87	110		
	大连船用柴油机有限公司	41	51	52	78	75	124	72	96		
	宜昌船舶柴油机有限公司	26	17	35	28	52	40	52	36		
	合计	146	176	176	225	230	295	181	242		
中速柴油机	镇江中船设备有限公司	262	26	312	33	450	45	431	44	L23/30、L14/24、L28/32、L27/38、L21/31	远洋、近海、内河航运主机和发电机组
	安庆中船柴油机有限公司	119	10	201	18	402	34	400	33	DK-20、DK-26、DA-28	内河船舶
	陕西柴油机重工有限公司	145	43	186	49	278	64	309	65	PA6、PC2-5/6、DK、MTU956 L16/24、L21/31	内河船舶
	合计	526	79	699	100	1130	143	1140	142		
中、高速船机	潍柴动力股份有限公司	1000								WP12, Deutz226B, WD615, WD618, R6160, X170ZC, CW200ZC	内河航运、渔业等船用动力, 市场占有率 70%以上
	淄博柴油机总公司	300									内河船舶、渔船
	济南柴油机股份有限公司	300								190 系列	内河船舶
	合计	10600									

1.3 国内外船舶排放法规现状

1.3.1 国际船舶法规 IMO 法规和 MARPOL 公约

海洋船舶是全球氮氧化物(NO_x)的主要排放源。2007年,海洋船舶约排放NO_x2500万吨,占全球NO_x排放量的15-30%。NO_x包括一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO₂),是造成酸雨和近地面臭氧等区域空气质量问题的主要污染物。为了减少船舶NO_x排放,已经实施了一系列国际管理规定并开发了一系列技术装置。

IMO 国际海事组织 (International Maritime Organization) 是联合国负责海上航行安全和防止船舶造成海洋污染的一个专门机构,国际海事组织更是一个促进各国政府和各国航运业界在改进海上安全,防止海洋污染与及海事技术合作的国际组织。国际海事组织(IMO)在1997年9月26日的缔约国大会上通过了增补了的“防止船舶造成空气污染规则”MARPOL 73/78 1997 议定书,在该议定书新增的附则VI的第13条规定了有关船用柴油机的氮氧化物(NO_x)的排放限制。根据船用柴油机的额定转速,给出了规定的最大允许排放值。MARPOL 73/78 1997 议定书已于2005年5月19日在缔约国大会上批准生效,适用于额定输出功率大于130kW的船用柴油机(MARPOL 73/78 附则VI第13条规定的特殊情况即碰撞或搁浅事故中的油污染除外)。

MARPOL 是国际防止船舶造成污染公约 (The International Convention for the Prevention of Pollution From Ships) 的简称 (中文简称为“防污公约”)。MARPOL 公约是世界上最重要的国际海事环境公约之一。该公约旨在将向海洋倾倒污染物、排放油类以及向大气中排放有害气体等污染降至最低的水平。它的设定目标是:通过彻底消除向海洋中排放油类和其他有害物质而造成的污染来保持海洋的环境,并将意外排放此类物质所造成的污染降至最低。所有悬挂缔约国国旗的船舶,无论其在何海域航行都需执行 MARPOL 公约的相关要求,各缔约国对在本国登记入级的船舶负有责任。MARPOL 公约有六个附则,分别对不同类型的船舶污染做出了相关规定,其中附则VI为防止船舶造成大气污染规则。

(1) MARPOL 公约对 NO_x 排放的限制

在 MARPOL 公约最新修订的附录 VI 中提出要逐步减少新船舶的 NO_x 排放。附录 VI 中原有的排放限值现在称为“I 阶段(TIER I)”,未来将要实施的排放限值则称为“II 阶段(TIER II)”和“III 阶段(TIER III)”。最新的公约附录 VI 管理要求详见表 1.2。原来的 I 阶段 (TIER I)标准适用于 2000 年 1 月 11 日以后生产的发动机或 2000 年 1 月

11 日以前生产但经过主体改造的发动机。另外，修订后的附录 VI 已于 2010 年 7 月开始实施，要求船上装备的 1990 年 1 月 11 日至 2000 年 1 月 11 日之间生产的，动力输出大于 5000 千瓦且单汽缸排量大于等于 90 升的柴油发动机在商业条件允许的情况下进行核准升级。升级的目的为确保 NO_x 排放达到 I 阶段(TIER I)要求。

II 阶段 (TIER II) 标准适用于 2011 年 1 月 1 日之后生产的或在 2011 年 1 月 1 日以后进行过主体改造的船用柴油发动机。

III 阶段 (TIER III) 标准适用于 2016 年 1 月 1 日之后生产的或在 2016 年 1 月 1 日以后进行过主体改造的船用柴油发动机，不过具体实施情况还要取决于 2013 年进行的评估总结。III 阶段 (TIER III) 标准将只对航行于排放控制区 (ECA 区) 的船舶实施。目前，经过国际海事组织 (IMO) 批准的 ECA 区共有 3 个：波罗的海、北海和北美地区 (美国及加拿大)。

表 1.2 《船舶污染防治国际公约》附录 VI 中的 NO_x 排放限值 (克 /千瓦时)

阶段	实施日期	NO _x 限值		
		n<130	130≤n<2000	n>2000
I 阶段 (TIER I) **	2000	17	45*n ^{-0.2}	9.8
II 阶段 (TIER II)	2011	14.4	44* n ^{-0.2}	7.7
III 阶段 (TIER III) ***	2016	3.4	9* n ^{-0.2}	1.96

* 不包括 130 千瓦以下的船用柴油发动机或仅用于应急情况的船只。

** 附录 VI 2004 年才正式纳入公约，但其对 2000 年 1 月 1 日以后运行的 300 千瓦以上的新发动。

*** III 阶段 (TIER III) 标准仅在排放控制区内实施。表中的“n”表示发动机额定速度 (rpm)。

(2) MARPOL 公约对 SO_x 排放的限制

IMO 组织是联合国设立的管理国际海事运输的机构，该组织发布的《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL 73/78) 中已经要求降低燃油硫含量限值。MARPOL 附录 VI 中规定了燃油硫含量上限，作为控制 SO_x 排放的一种手段。

从 2012 年 1 月 1 日起，在世界范围内硫含量上限从 4.5%(45,000 ppm) 降低至 3.5%(35,000 ppm)。鉴于目前硫含量平均值为 2.7% (27,000ppm)，降低限值所能起到的作用十分有限。硫含量上限降低至 0.5% (5000ppm) 的要求才能算是有实质意义的降低，但这还要根据 2018 年进行的评估的情况再决定。

IMO 组织管理规定中允许各国设立排放控制区 (ECA)，在 ECA 区域内航行的船只需要遵守更加严格的燃油硫含量标准。自 2010 年 7 月 1 日起，要求进入 ECA 区域的船只使用硫含量上限 1%(10,000 ppm) 的燃油。到 2015 年 1 月 1 日，限值将进一步降低至 0.1% (1,000 ppm)。

MARPOL 附录 VI 中的燃油硫含量限值降低时间表见图 1.3。目前，北美（美国和加拿大沿岸 200 海里范围）已经被划定为 NO_x 和 SO_x 的 ECA 区域，欧洲（波罗的海和北海海域）已经被划定为 SO_x 的 ECA 区域或硫氧化物排放控制区。

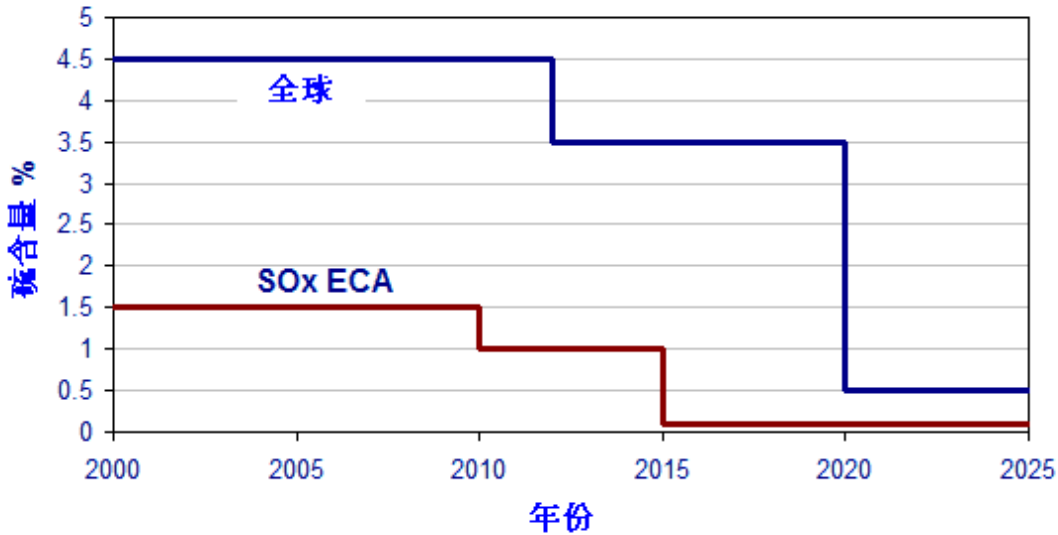


图 1.3 MARPOL 附录 VI 中规定的国际船舶运输燃油硫含量下降时间表

1.3.2 美国环保局(EPA)对船舶的 NO_x 和 SO_x 的法规限制

美国环境保护署 (EPA) 对于在美国注册的气缸扫气容积 V_d 为 2.5-30dm³ 的船舶颁布了更加严格的发动机排放限制 Tier2，并于 2007 年开始生效执行。该限值相对 IMO Tier1 来说，NO₂ 大约要降低 25%-40%。而且限值中包括 NO_x+CnHm、CO、PM 等。表 1.3 列出 EPA Tier 2 的所有限值。

表 1.3 EPA Tier2 对 1 类和 2 类发动机排放限值

扫气容积 V_d/dm^3	类别	NO _x +CnHm g/kwh	PM g/kwh	CO g/kwh
2.5≤5.0	1	7.2	0.20	5.0
5.0≤15.0	2	7.8	0.27	5.0
15.0≤20.0	2 (<3.3MW)	8.7	0.50	5.0
15.0≤20.0	2 (>3.3MW)	9.8	0.50	5.0
20.0≤25.0	2	9.8	0.50	5.0
25.0≤30.0	2	11.0	0.50	5.0

对 SO_x 控制方面，北美加入 SO_x 的 ECA 区域将从 2012 年 8 月开始实施。要求从 2007 年开始使用硫含量不超过 0.05% (500ppm) 的柴油。到 2012 年，这部分船舶还将转换使用超低硫柴油 (0.0015% 或 15ppm)。这和美国对道路车辆燃油品质的

要求是一致的。

1.3.3 瑞典环境保护署.

瑞典除了接受国际海事组织的相关规定外,又制定了一些更加严格的规定。例如,从1998年起,瑞典当局对进入其海域的船舶,根据船舶上柴油机的实际NO_x和SO_x排放值大小征收不同比率的污染税。大于12g/kWh的全额征收;在12g/kWh和2g/kWh之间的按比例缴纳;小于2g/kWh的征收最少。

1.3.4 中国防治船舶大气污染法规

为防治大气污染,保护和改善生活环境和生态环境,保障人体健康,促进我国经济和社会的可持续发展,2000年9月1日,我国制定实施的《中华人民共和国大气污染防治法》第三十二条,机动车船向大气排放污染物不得超过规定的排放标准。

我国国家检验检疫总局在2008年7月30日发布了GB/T15097-2008《船用柴油机排气排放污染物测量方法》标准,该标准于2009年2月1日实施,代替GB/T15097-94《船用柴油机排气排放污染物测量方法》标准。该标准适用范围为船用柴油机排气污染物的台架测量,船上测量可参照使用。GB/T15097-2008属于测试方法推荐标准,在标准中没有给出排放限值要求。

GB/T15097-2008中的测试循环为:对恒速船用主机,包括柴油机电力驱动和调距桨装置,采用ISO8178-4:1996中的E2循环进行排放测试;对按推进特性运行的船用主机和辅机,采用ISO8178-4:1996中的E3循环进行排放测试;对恒速运行的船用辅机,采用ISO8178-4:1996中D2循环进行排放测试;对变速、变负荷运行的船用辅机,采用ISO8178-4:1996中C1循环进行排放测试。

同时我国作为IMO缔约国成员之一,严格执行MARPOL公约附则VI的规定,实施针对船舶氮氧化物NO_x排放限值标准。为了贯彻执行《73/78国际防止船舶造成污染公约》新增附件《防止船舶造成空气污染规则》的第13条及其附件《船用柴油机氮氧化物排放控制技术规则》的规定。中国船级社CCS在2000年公布了《船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南》。检验所依据的方法有:试验台实验、船上实验、船上柴油机参数检查法、船上简化测量法和船上直接测量和监测共5种方法。与已经发布的车用柴油机或者非道路移动机械排放标准不同的是,该标准不但采用发动机族的概念,还采用发动机组的概念。发动机组的概念适用于具有相似用途的小批量生产的柴油机,该柴油机在船上安装或使用过程中需要进行轻微调整或者改造,通常用于

大功率的主机。试验采用的循环和欧盟、EPA\MAPOL73/78 的规定均相同,采用 E2\、E3、D2 和 C1 循环。

另外,我国除了执行 MARPOL 公约附则 VI 的氮氧化物排放标准外,对额定净功率不超过 37KW 的非道路移动机械用柴油机用于船舶驱动,则参照 GB20891-2007《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值测量方法(中国 I、II 阶段)》排放标准执行,如表 1.4 及表 1.5 所示,其中第 I 阶段于 2007 年 10 月 1 日执行,第 II 阶段将于 2009 年 10 月 1 日开始执行。

表 1.4 非道路移动机械装用柴油机排放限值(第一阶段)

额定净功率 (P _{max})(kw)	CO g/kwh	HC g/kwh	NO _x g/kwh	HC+NO _x g/kwh	PM g/kwh
18≤P _{max} <37	8.4	2.1	10.8	-	1.0
8P _{max} <18	8.4	-	-	12.9	-
0<P _{max} <8	12.3	-	-	18.4	-

表 1.5 非道路移动机械装用柴油机排放限值(第二阶段)

额定净功率 (P _{max})(kw)	CO g/kwh	HC g/kwh	NO _x g/kwh	HC+NO _x g/kwh	PM g/kwh
18≤P _{max} <37	5.5	1.5	8.0	-	0.8
8P _{max} <18	6.6	-	-	9.5	0.8
0<P _{max} <8	8	-	-	10.5	1.0

1.3.5 中国船舶用柴油机排放标准的发展趋势

虽然我国各相关部门先后颁布了各类船用柴油机排放标准,但由于这些标准大多都属于推荐或者行业标准,不属于强制标准,因此迄今为止,事实上我国对船用柴油机的排放还没有严格的管理。

国家环保部已经开始组织制定我国内河和近海用柴油机排放标准,适用范围包括内河船、沿海船、江海直达船和海峡(渡)船上装用的柴油机排气污染物,预计该标准将于明年发布,2013 年开始实施,该标准将是我国第一个有关船用柴油机的强制排放标准。

表 1.6 是《船用柴油机排气污染物限值》标准编制组拟定中的船用柴油机排放标准限值。

表 1.6 拟定的船用柴油机排气污染物限值 (I 阶段)

船机类型	单缸排量 (SV) (L/缸) /	CO	HC+NO _x	PM	SO ₂
	额定净功率 (P) (kW)	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
第一类	SV < 0.9, 且 P ≥ 37	5.0	7.5	0.40	1.5
	0.9 ≤ SV < 1.2	5.0	7.2	0.30	
	1.2 ≤ SV < 5	5.0	7.2	0.20	
第二类	5 ≤ SV < 15	5.0	7.8	0.27	
	15 ≤ SV < 20 且 P < 3300	5.0	8.7	0.50	
	15 ≤ SV < 20 且 P ≥ 3300	5.0	9.8	0.50	
	20 ≤ SV < 25	5.0	9.8	0.50	
	25 ≤ SV < 30	5.0	11.0	0.50	

2 实验研究及方法

本课题利用由 SEMTECH-DS 和 ELPI 组成的车载排放测试系统，首次对京杭运河江苏段和珠江广州段具有代表性的 18 艘内河船舶进行实际排放测试。得到了不同工况下 CO、HC、NO_x 和 PM 的瞬态排放数据，并依此进行相关分析研究。

2.1 实验设备介绍

2.1.1 气态污染物排放测试仪器

实验中使用美国 Sensors 公司的 Semtech-DS 进行气态污染物的测量，SEMTECH-DS 尾气分析仪采用非分散红外分析法（NDIR）测量 CO 和 CO₂，氢火焰离子检测器（FID）测量 THC，非分散紫外分析法（NDUV）测量 NO 和 NO₂，电化学法测量 O₂ 含量。仪器在使用前需经约 1 小时的预热稳定，预热后采用纯 N₂ 进行调零，使用标准气体进行准确性及精确性校准，保证仪器测量的准确性。Semtech-DS 外观图如见图 2.1。



图 2.1 SEMTECH-DS 外观图

Semtech 对污染物各组分详细测量原理如下：

(1) CO 和 CO₂

CO 的测量是通过不分光红外线分析仪(NDIR, Non-Dispersive Infrared Analyzer)来进行的。它是目前用来试验和评价内燃机排气中有害排放物的一种广泛使用的标准仪器。该仪器利用不同气体对红外波长的电磁波能量具有特殊的吸收特性而进行分析。通过测定取样气中污染物对红外光的吸收能，来测定污染物浓度。这种仪器主要用来

测定 CO 和 CO₂ 浓度。

(2)HC

HC 的测量是使用氢火焰离子化分析仪 FID, (Flame Ionization Detector)。其原理是利用火焰导电性来测量排气中的 HC 浓度。由于火焰导电的强弱和燃料的种类有关。HC 火焰产生比氢火焰高几个数量级的离子, 有较强的导电性。在 FID 把 HC 导入氢火焰中, 在氢火焰的高温作用下, 部分分子和原子就会离子化生成大量的自由离子, 离子化的程度与碳氢化合物分子中碳原子数成正比关系。利用外加的电场, 使自由离子形成离子电流并产生微电流信号, 通过测量离子电流的大小即可确定试样气中碳氢化合物以碳原子计量的浓度。

(3)NO 和 NO₂

Semtech 对于 NO_x 的测量方法为不分光紫外分析仪(NDUV, Non-Dispersive Ultraviolet Analyzer)其原理与不分光红外类似, 利用不同气体对紫外波长的电磁波能量具有特殊的吸收特性而进行分析。

(5)尾气流量计

流量计采用美国 Sensors 公司设计的 SEMTECH-EFM, 是一种坚固、紧凑的汽车尾气流量计, 可以测量车辆的原始尾气流量。实验使用的是 4 英寸流量计, 其测量范围为 0-1100SCFM, 最大值约 31 立方米每分钟, 可用来测量常见内河船只尾气流量。其测量原理为皮托管测速原理。流量计的末端有两个采样口可采集部分排气。测量时, 尾气首先通过流量计。在采样口处, 一部分气体通过加热型采样管进入 SEMTECH-DS, 进行气体污染物的测量分析, 同时另一部分气体被吸入 ELPI 进行颗粒物的测量分析。尾气流量计的核心是一个压差测量设备, 测量原理为皮托管测速原理。它是利用伯努利方程原理, 通过测量流体差压信号来测量气体的流量。流量计实物图 2.2 如下

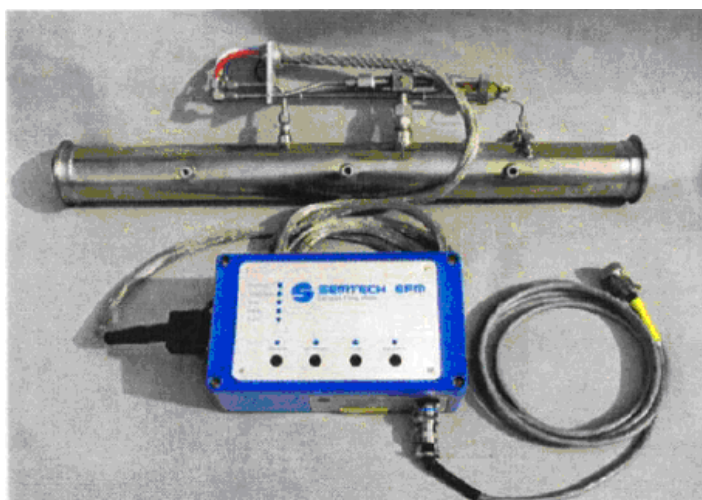


图 2.2 流量计实物图

仪器对各污染物组分的测量精度如下：

表 2.1 SEMTECH 对各污染物组分的测量精度

污染物	测量范围	分辨率	精度
CO ₂	0-20%	0.01%	测量范围为±0.1 或±3%
CO	0-8%	10ppm	±50ppm 或者测量范围±3%
THC	0-100ppm	0.1ppm	±5ppm 或者测量范围±2%
	0-1000ppm	1ppm	±5ppm 或者测量范围±2%
	0-10000ppm	1ppm	±25ppm 或者测量范围±2%
NO	0-2500ppm	1ppm	±15 或者测量范围±3%
NO ₂	0-500ppm	1ppm	±10 或者测量范围±3%

2.1.2 颗粒物排放测试仪器

ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) 即静电低压冲击仪是由芬兰 Dekati 公司生产的一款先进的气溶胶粒子分布和浓度监测仪器。其实物图见图 2.3。它可以实时检测 7nm 到 10 μ m 粒径范围的气溶胶粒子分布和浓度。ELPI 可检测的粒径范围宽广，而且能实时反应样品的改变。所以，ELPI 可用于测量发动机燃烧的颗粒物质量浓度和数量浓度。同时 ELPI 也是一个收集装置，将样品从它的收集器中取出后，可用于后续的化学分析和称重分析。

气体样品通过一个单极的电晕装置，气溶胶颗粒被精确充电后通过一组低压冲击

器后，串级冲击式采样器利用颗粒物的惯性按动力学粒径将颗粒物分成 12 级，分级情况见表 2.2。带电量的多少提供了每级的收集量。ELPI 的分级器设计精确，结构合理，分级后的颗粒被存储在相应的收集盘中，收集粒子的电荷可以通过一个多级静电计实时测出。标准的 RS232 接口可将 ELPI 与外设电脑联机（台式电脑或手提电脑）。仪器相关参数见表 2.3。

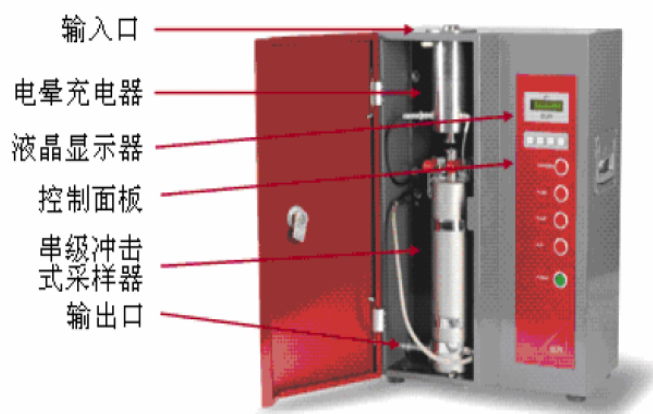


图 2.3 ELPI 实物图

表 2.2 ELPI 测量粒径分级（单位： μm ）

级别	粒径范围 (μm)	级别	粒径范围 (μm)	级别	粒径范围 (μm)
第一级	0.007~0.029	第二级	0.209~0.057	第三级	0.057~0.101
第四级	0.101~0.165	第五级	0.165~0.255	第六级	0.255~0.393
第七级	0.393~0.637	第八级	0.637~0.99	第九级	0.99~1.61
第十级	1.61~2.46	第十一级	2.46~3.97	第十二级	3.97~10.15

设备参数：

表 2.3 ELPI 设备参数

额定采样流量	10Lmin
重量	35 kg
测试粒径范围	0.007-10 μm
外形尺寸	H560xW400xD250 (mm)
测量通道数目	12
撞击器尺寸	$\Phi 65 \times 300(\text{mm})$
时间分辨率	2-3 s
进气口	R 3/8

出气口	R 3/8 (NW16 凸缘)
环境温度要求	5-40℃
样气温度要求	<60℃
电源要求	110/220-240V,50-60Hz,200W
环境湿度要求	0-90, 不除湿
第一级的压力	100 mbar
空泵规格	7m ³ /h
放电器电压	5 kV
放电器电流	1 uA
电保险丝	2xT6.3A

2.2 船舶排放测试方案

2.2.1 测试地点选取

(1) 江苏段京杭运河

江苏省水系丰富、河网密集、湖泊众多，地处长江、太湖及淮河三大流域范围内。拥有大小湖泊 300 多个，省内航行的船舶数量近 5 万艘。包括江苏籍、非江苏籍、农用自备船、渡船、客船和帆船等的数量。另外，在省界周围还有近 12 万艘流动的船舶。省内船舶的特点：各类船舶保有量较大，其中有大量船龄较长，维护保养较差的船舶；江苏公路铁路交通比较发达，客船在省内基本所占比例很少。

京杭大运河全长 1794 千米，是世界上最长的一条人工运河，纵贯南北，是中国重要的一条南北水上干线。背负了南北大量物资的运输交换，也有助于中国的政治、经济和文化的发展。经统计，京杭大运河近十年来货运量年均递增 8% 以上，常年有 13 个省(市)的船舶在其中航行，船舶密度超过欧洲的莱茵河。

(2) 广东省珠江

珠江是中国七大江河之一，珠江河川迳流丰沛，水力资源丰富，有繁忙的水上货运贸易，年货运量仅次于长江而居第二位。同时上有南国特色的旅游项目：珠江夜游。使得珠江上拥有一定数量的内河客船。

2.2.2 被测船只的选取原则

被测船只的选取主要按照船舶的功率分布和船舶的生产日期分布来选取，尽量在

功率-船龄图上分布开来,使得测试船舶能表征出现有船舶的排放水平。部分测试船舶实物图见图 2.4。江苏段和广东段测试船舶信息见表 2.4 和表 2.5。测试船舶全貌和发动机全貌详见附录。



图 2.4 测试船舶实物图

表 2.4 江苏段测试船舶信息

测试船舶序号	船舶类型	发动机生产商	出厂日期	额定功率(kw)	水流情况	标定转速(r/min)	行驶路线	负载
1	货船	上海柴油机厂	2001.11	88.3	逆-顺	1500	镇江-长江-镇江	满载-空载
2	货船	潍坊柴油机厂	2010.3	136	顺	850	镇江-丹阳	空载
3	货船	上海柴油机厂	2001.1	110.3	逆	1500	镇江-施桥	满载
4	货船	上海柴油机厂	2005.11	162	逆	1500	镇江-施桥	满载

5	货船	潍坊柴油机厂	2009.9	300	逆	1000	镇江-施桥	空载
6	货船	淄博柴油机厂	2008.12	260	逆	1200	镇江-施桥	满载
7	货船	上海柴油机厂	1994.11	88.2	逆	1500	镇江-施桥	满载
8	货船	东风柴油机厂	2010.12	145	顺	1500	镇江-丹阳	空载
9	货船	淄博柴油机厂	2009.11	300	顺	1200	镇江-丹阳	满载
10	货船	潍坊柴油机厂	2004.11	136	顺	850	镇江-丹阳	满载
11	货船	潍坊柴油机厂	2004.11	136	逆	850	丹阳-镇江	空载
12	货船	潍坊柴油机厂	2011.11	136	顺	850	镇江-丹阳	满载

表 2.5 广东段测试船舶信息

编号	船舶类型	生产厂商	生产日期	型号	额定功率	额定转速	船舶净重吨	主机数量
1	客船	东风	1982.9	6135Aca	83.35	1500	214	单机
2	客船	东风	1983.11	6136Acaf	83.85	1500	230	单机
3	货船	潍柴	1994.6	6160A	136	1500	480	双机
4	货船	康明斯	2004.12	NTA55-M350	237	1500	524	双机
5	货船	潍柴	2007.05	R6160A-4	184	1000	675	双机
6	货船	潍柴	2007.05	R6160A-5	184	1000	675	双机

2.2.3 船只行驶路线选取

江苏段船舶主要为货船，行驶路线出发点在货船港口，依托海事人员与环保人员协调进行。测试船舶路线基于谏壁海事处趸船，向北经长江之扬州施桥，南至丹阳云阳大桥。具体行驶路线见图 2.5。

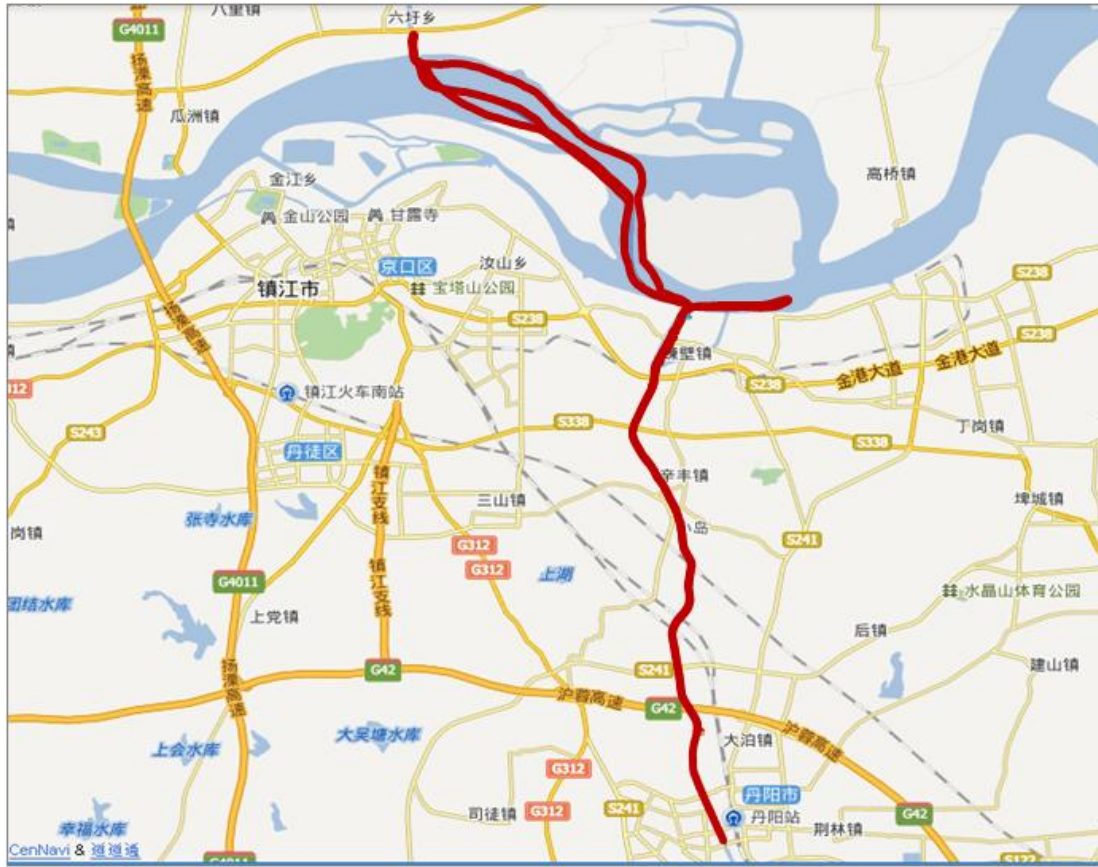


图 2.5 江苏段测试船舶行驶路线

广东段测试船舶包含客船和货船，客船航行在广州市区，基本按照珠江夜游的旅游路线航行，货船按货船码头选取了两条路线。详细地理位置见图 2.6。



图 2.6 广东段测试船舶行驶路线

2.2.4 船只运行工况选取原则

船舶航行工况相比道路车辆工况简单，常见工况有出港、巡航、进港、泊港、进出闸口工况，其中绝大部分时间为巡航工况。泊港工况主要为辅机发电用，而内河货船吨位较小，船上操作人员较少，泊港时使用 12V 电瓶加电源逆变器转交流电供日常生活使用，故本实验不考虑泊港工况。由于行驶路线的不同，并非所有船只都需要通行闸口。故本实验主要针对出港、巡航、进港三个工况进行分析。

2.2.5 测试设备安装

整个测试过程主要使用两类测试设备，分别测试常规气态污染物和颗粒物。测试仪器及备件所需电源由雅马哈发电机提供，同时 SEMTECH 外接 12V 蓄电池进行电源保护。尾气经过连接管通过流量计，由流量计上的采样口进行采样作业。其中一路直接进入气态测量仪器进行分析，另一路经过两级稀释后进入颗粒物测量仪器。在船舶实物上的安装图见图 2.7。



图 2.7 测试设备安装实物图

2.2.6 测试流程

整个试验过程分为三大部分：试验预备，试验准备，测试过程。试验预备过程中，所有设备到位首先进行相应的机械连接，设备固定，以及电源连接；确定采样管位置以及相应管道距离。同时固定所有测试设备防止在实验过程中设备脱落。

试验准备过程中，进行相应的设备预热，已达到相应工作温度。之后进行各项指标标零，确保测试数据真实有效。由于大部分测试时间为早上，预热过程尽量使用外接交流电源避免发电机噪声对船家的干扰，同时最后检查所有系统设备连接情况。

测试过程中需要测试人员实时监控两类设备的运行情况，通过在与设备相连的笔记本电脑上显示的测量数据和相关设备参数，选择适当时机进行更换滤膜等维护操作。同时注意水上安全。

3 内河船舶柴油机实际工况下气态污染物的排放特性

在国内船用柴油机的排放测量只有在新机型生产时才会进行，而且国内尚未有强制法规对所有船用发动机的排放进行限制，仅有的是 37kw 以下的柴油机用于船舶适用于 GB20891-2007《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值测量方法(中国 I、II 阶段)》，而实际内河中航行的绝大多数的货船与客船都不在这个功率范围。由于缺乏强制法规的推进，船舶柴油机的排放特性研究实验鲜有人参与，而对船舶最终实际排到大气中的污染情况了解更少，为了解内河船舶柴油机在实际工况下的排放情况，了解船用柴油机的排放特性进行本实验。

实验共测量了 18 艘船舶，其中京杭大运河江苏段测量 12 艘普通货船，广东段测量 2 艘客船 4 艘货船。

实验所采用的 Semtech 进行气态污染物的测量，其直接测量所得参数有：尾气中部分气体的逐秒体积浓度值（CO₂、CO、HC、NO、NO₂、O₂），测试环境参数（环境温度值、湿度、大气压），GPS 数据（速度、经度、纬度），尾气流量，排气温度。

实验所需随时间的污染物排放质量 $EF_{g/s}$ 可由排气体积浓度、气体密度、排气流量所得。

实验所需油耗数据由尾气中含碳污染物浓度与排气流量依据碳平衡原理进行计算。碳平衡法是根据质量守恒定律，燃料经过发动机燃烧后，排气中 C 含量总和与燃烧前的燃油中 C 质量总和相等，C 原子在排气中主要以 CO₂、CO 和 HC 的形式存在。由于 CO₂ 和 CO 中 C 的质量含量为 0.273 和 0.429，HC 中 C 的计算公式为 $CWF_{HCex}=12/(12+x)$ ，欧盟公式中为 0.866，故可得油耗体积消耗速率公式如下：

$$FC_{(l/s)} = (0.866 \times HC_{(g/s)} + 0.429 \times CO_{(g/s)} + 0.273 \times CO_2_{(g/s)}) / (1000 \times CWF_F \times \rho_{(diesel)}) \quad (式3.1)$$

其中 $FC_{(l/s)}$ 为油耗体积消耗速率， $HC_{(g/s)}$ 、 $CO_{(g/s)}$ 、 $CO_2_{(g/s)}$ 为各气体质量速率， CWF_F 为燃油中 C 质量含量， $\rho_{(diesel)}$ 为柴油密度。

实验所需污染物随燃油消耗量的排放 $EF_{(g/kg \text{ fuel})}$ ，可由各气体质量排放速率 $EF_{g/s}$ 与油耗消耗速率 $FC_{(l/s)}$ 及燃油密度 $\rho_{(diesel)}$ 得到。

3.1 江苏内河船舶排放气态污染物排放特性

3.1.1 船舶实际运行典型工况介绍

所测船舶航行区域为京杭运河中谏壁至丹阳段及谏壁至施桥段。船舶典型工况如图 3.1。

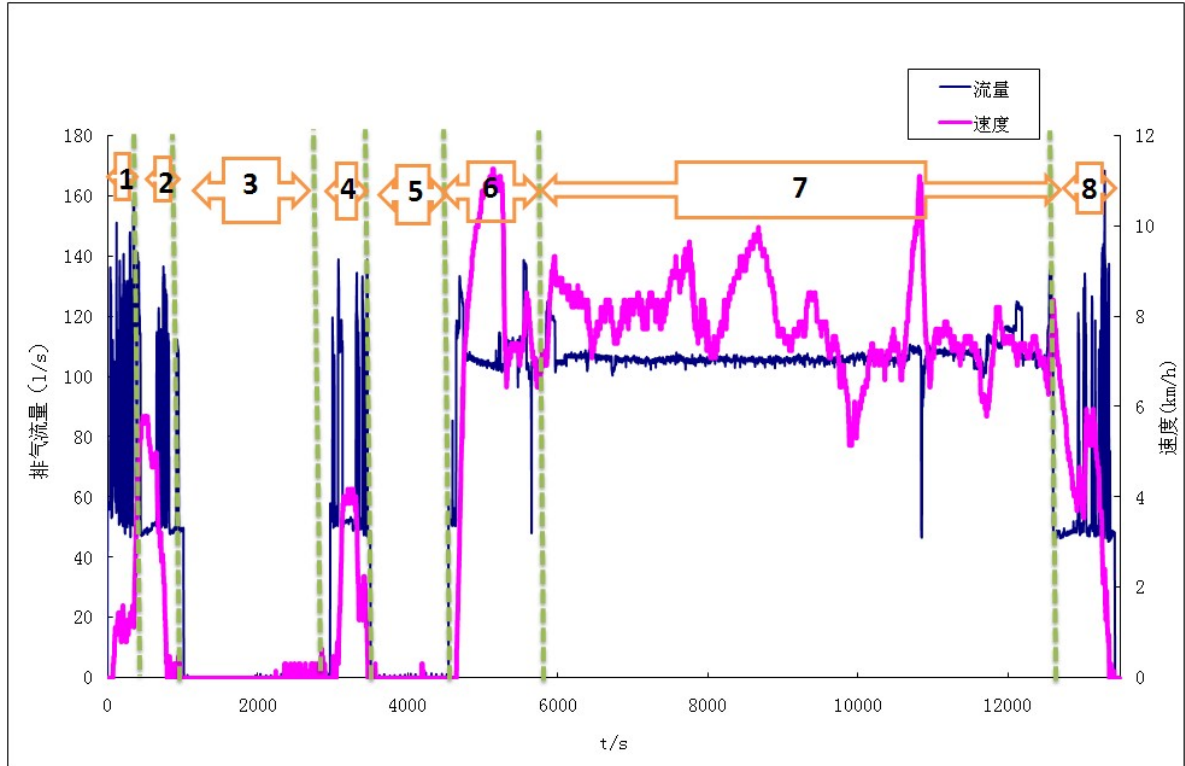


图 3.1 江苏段测试船舶典型工况介绍

工况航行各阶段情况介绍：

航行工况 1：出港工况，船舶启动，航行速度增加至内河正常。

航行工况 2：准备等闸工况，船舶减速调整船舶位置，进入等闸队伍中排队。

航行工况 3：等进闸工况，船舶停机，流量为零，工况后半部分速度零附近微小波动为进闸门缓开，水往下游泄洪，水流具有一定速度。

航行工况 4：进闸工况，进闸门完全开启，船舶依次排队进入闸口。工况终了停机固定船舶位置。

航行工况 5：等出闸工况，船舶停机，进闸门关闭，水快速注入闸口内，水面由下游升至与上游水位持平。

航行工况 6：出闸工况，船舶提速，由谏壁河段转入长江干线。

航行工况 7：巡航工况，发动机运转平稳，排气流量稳定，由于夏季长江水涨水流扰动较大，船舶航行速度会有一定波动。

航行工况 8：进港工况，船舶由长江干线转入六圩一河口，减速调整船舶速度及

位置在施桥海事趸船边停船。

由于每艘船舶的航行路线不同，航行的工况数会有所差别，以下章节会选取其中部分工况进行分析研究。

3.1.2 工况对排放特性影响

船舶行驶过程中工况比较固定，而不同的航行工况对船舶的排放有着较大影响。

图 3.2 为同一艘船在不同的航行工况下 CO、HC、NO_x 排放及排气流量图。

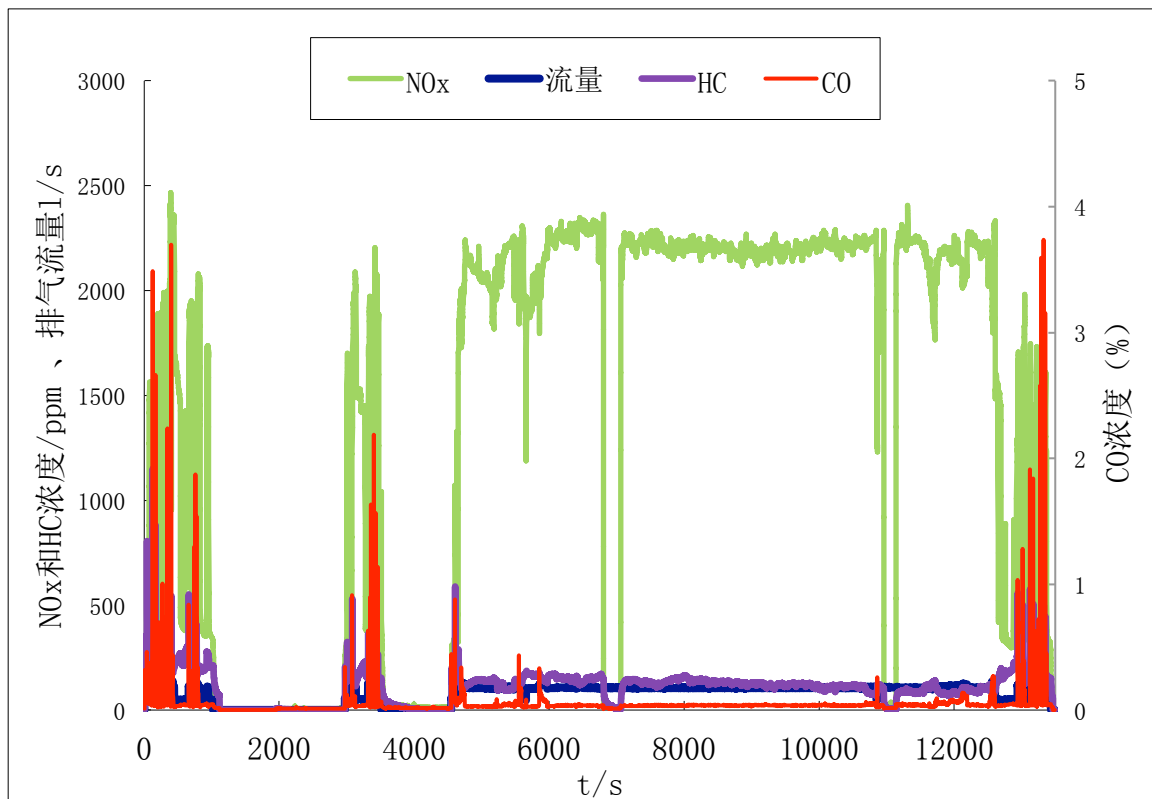


图 3.2 江苏段各污染物随时间变化情况

由图 3.2 中可以看出，各组分污染物都呈现清晰工况分布。

出港工况部分排气流量和各污染物的浓度都较大，而且呈现出大幅度的波动，尤其是 CO 和 HC 波动较大；进出闸口工况出现了大幅度波动，波动幅度略小于出港工况；巡航工况中排气流量和各污染物的排放浓度都较平稳，CO 和 HC 浓度明显小于两端的出港工况和进港工况，NO_x 浓度则大于两端操作工作工况，同时巡航工况中出现两次污染物迅速下降的时段；进港工况情况的各污染物浓度变化与出港工况类似，都出现较大幅度波动。现象原因可以如下分析：

出港工况由于包含冷启动工况所以各污染物的浓度值较大，同时出港工况需要船

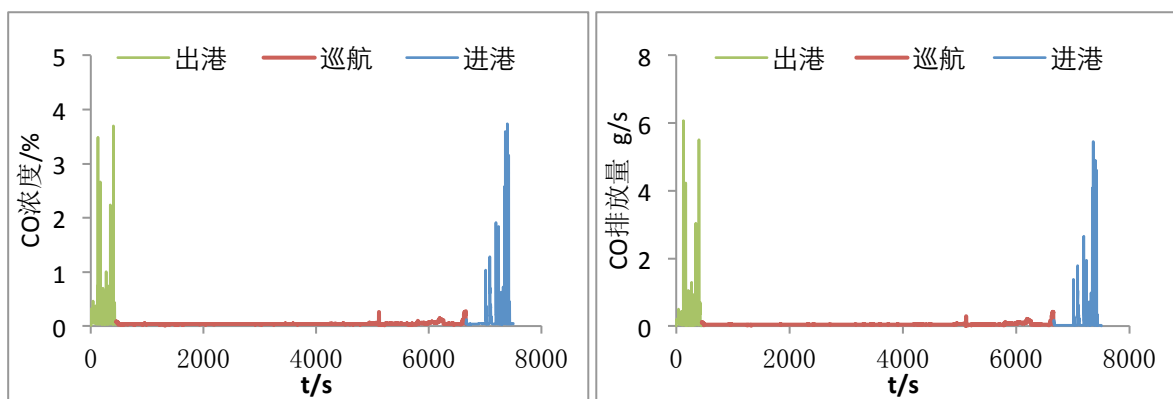
船进行快速的位置调整，船舶需要的正负加速度值较大，发动机负荷突加突减，导致发动机的进气量和喷油量突变，使得气体燃烧组织不够充分，出现 CO 和 HC 排放峰值，同时导致污染物浓度变化较大。

进出闸口工况由于在等进闸门开和等出闸门开的时段，船舶发动机是停机的，所以其排气流量和各污染物值为零，当发动机启动时由于热启动，其排放浓度值较大，并出现波动。

巡航工况时，船舶行驶工况稳定，由图 3.2 中可以看出其排气流量非常稳定，各污染物浓度也较稳定，这是因为发动机负荷几乎固定在某一值，发动机近似运行在点工况上。同时，由于测试时间为夏季，长江上水流湍急，不太稳定的水流冲击船舶使得船舶行驶阻力变化，负荷有一定范围的波动，在各污染物浓度曲线上也可以看出。同时巡航工况中出现了两段各污染物迅速为零而排气量不变的情况，这时测试操作人员正在对气态污染物测量仪器 SEMTECH 进行更换滤膜处理，气态污染物并未测量而流量计仍在工作。排气在进入各分析室前需要滤掉大颗粒，以防止堵塞，仪器的进气压力下降，进气量不足，无法正常分析。在后续的分析中会将此段进行删除。

进港工况开始时船舶速度开始下降，负荷变小 NO_x 等污染物有明显下降，但随后由于要调整船舶速度与位置与船坞对接，需要船舶驾驶人员进行不断操作，与出港工况类似，由于空燃比的变动，呈现污染物浓度大幅度的波动现象。

下面对单一组分的污染物排放情况进行分析，如图 3.3 为 CO 随不同工况时的瞬时排放曲线，工况则选择比较典型的出港工况，巡航工况，进港工况。



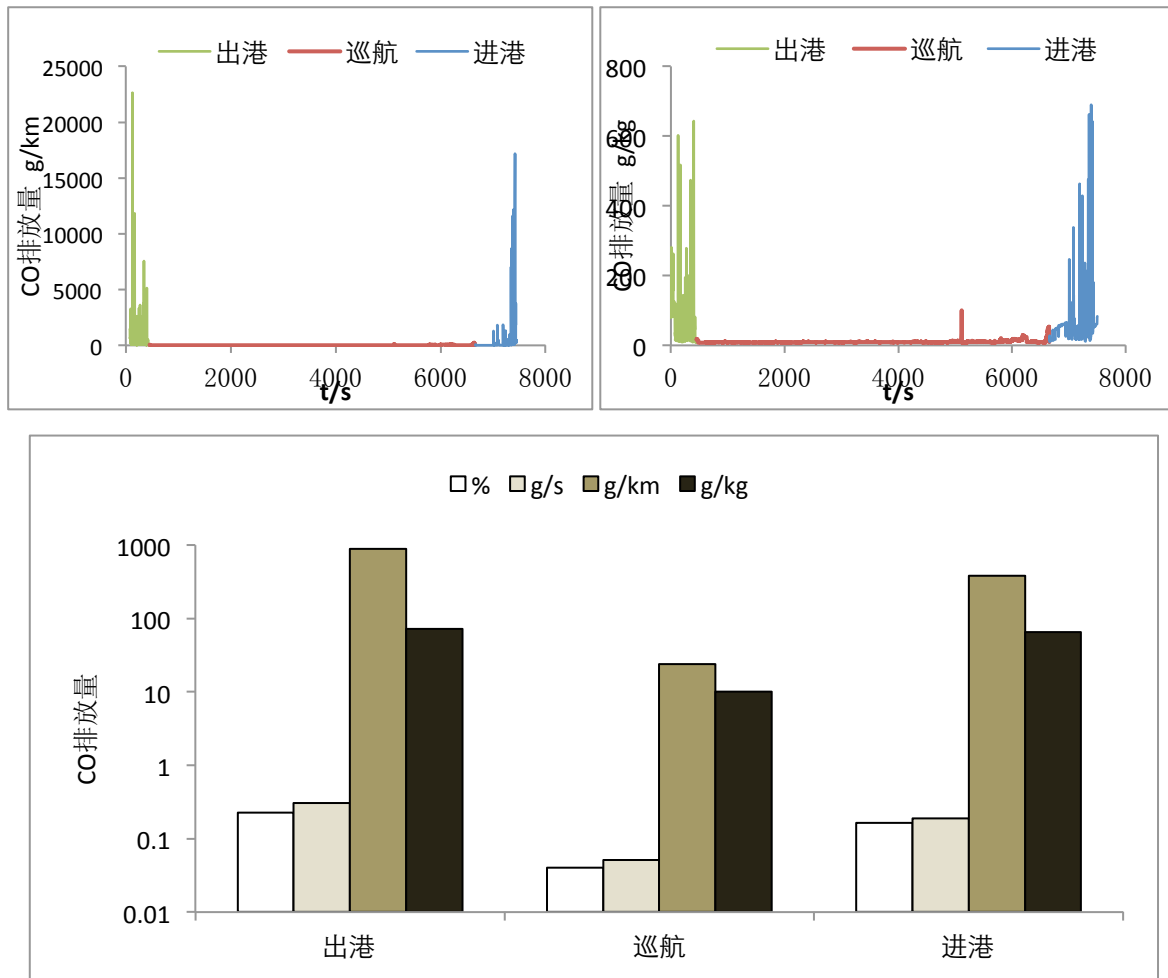


图 3.3 江苏段各工况 CO 排放情况

由图 3.3 可以看出 CO 的排放趋势为两端的出港和进港工况排放值较大且波动非常剧烈，中间的巡航工况排放值相比很小且波动小排放数值较稳定。

CO 是碳氢化合物燃料在燃烧过程中生成的主要中间产物。碳氢化合物经氧化过程最后生成 CO_2 ，而 CO 的生成是此过程的重要中间步骤，即 $\text{RH} \sim \text{R} \sim \text{RO}_2 \sim \text{RCHO} \sim \text{RCO} \sim \text{CO}$ ，式中，R 代表烃基，所生成的 CO 经过 $\text{CO} + \text{OH} \sim \text{CO}_2 + \text{H}$ 氧化成 CO_2 ，燃料的氧化速度取决于可用的氧浓度、反应气的温度以及化学反应所占的时间，后者取决于发动机的转速。柴油机由于压燃，燃料与空气混合不均匀，燃烧空间中总有局部缺氧的地方，有温度低的地方，以及反应物在燃烧区停留时间不足以彻底完成燃烧过程产生最终产物 CO_2 ，造成 CO 排放。

进出港工况由于在船舶密集区域，船舶在出港启动和船队对接过程及进港中与船坞对接过程中都需要船舶快速的调整位置，出现负荷大幅度的突增突减。从而空燃比出现大幅变化，在负荷突加时，喷油量急剧增加，燃气混合不充分，导致局部空间燃

气过浓，燃烧不充分，从而产生大量中间产物。而且出港和进港工况中发动机温度较低，尤其在出港工况需要冷启动温度较低，氧化反应所需活化能不足氧化进程较慢，CO 大幅增加。巡航工况时由于燃烧比较稳定，混合气较均匀，且发动机温度较高，这样 CO 迅速转变成 CO_2 ，减少了中间产物的生成。

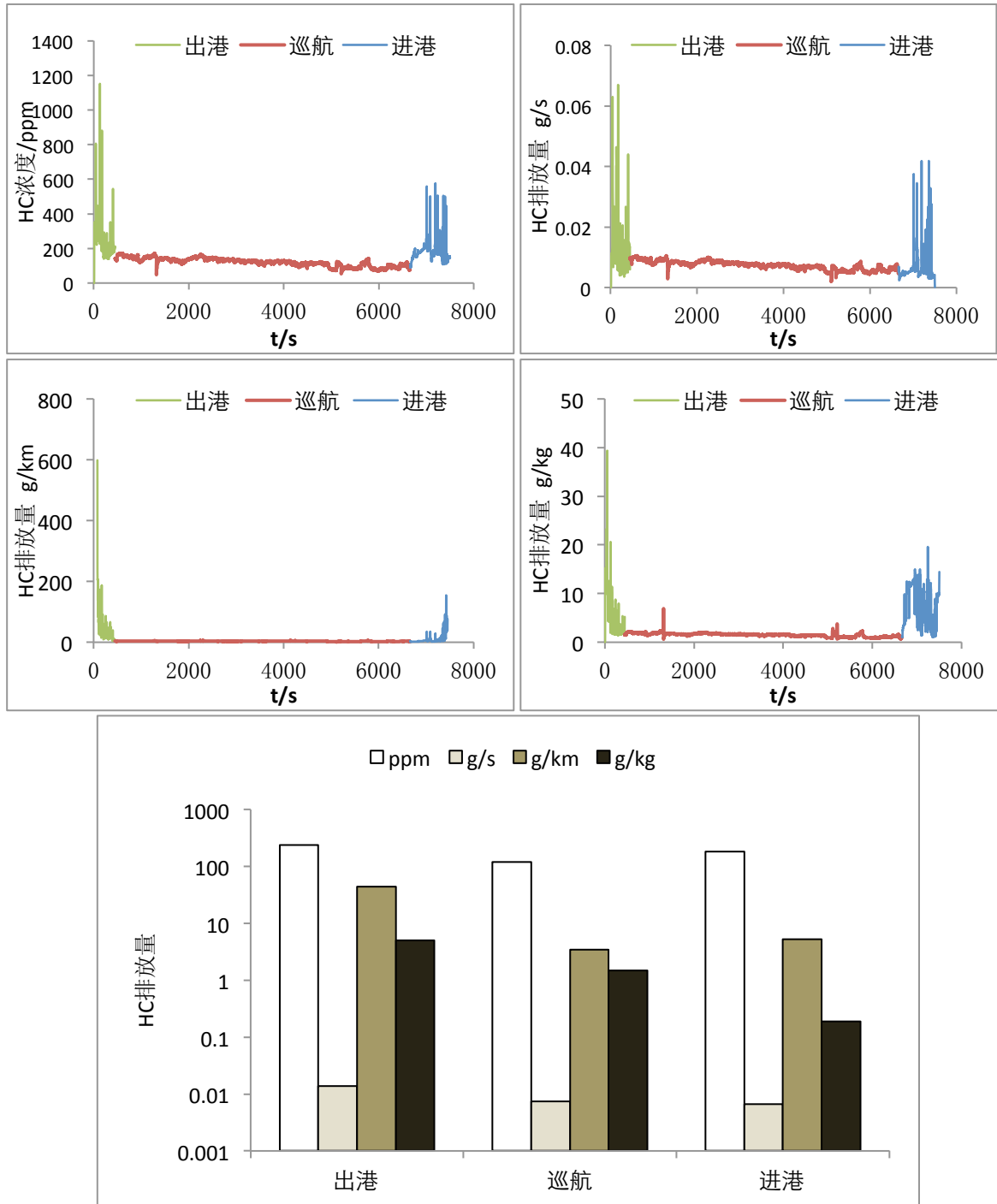


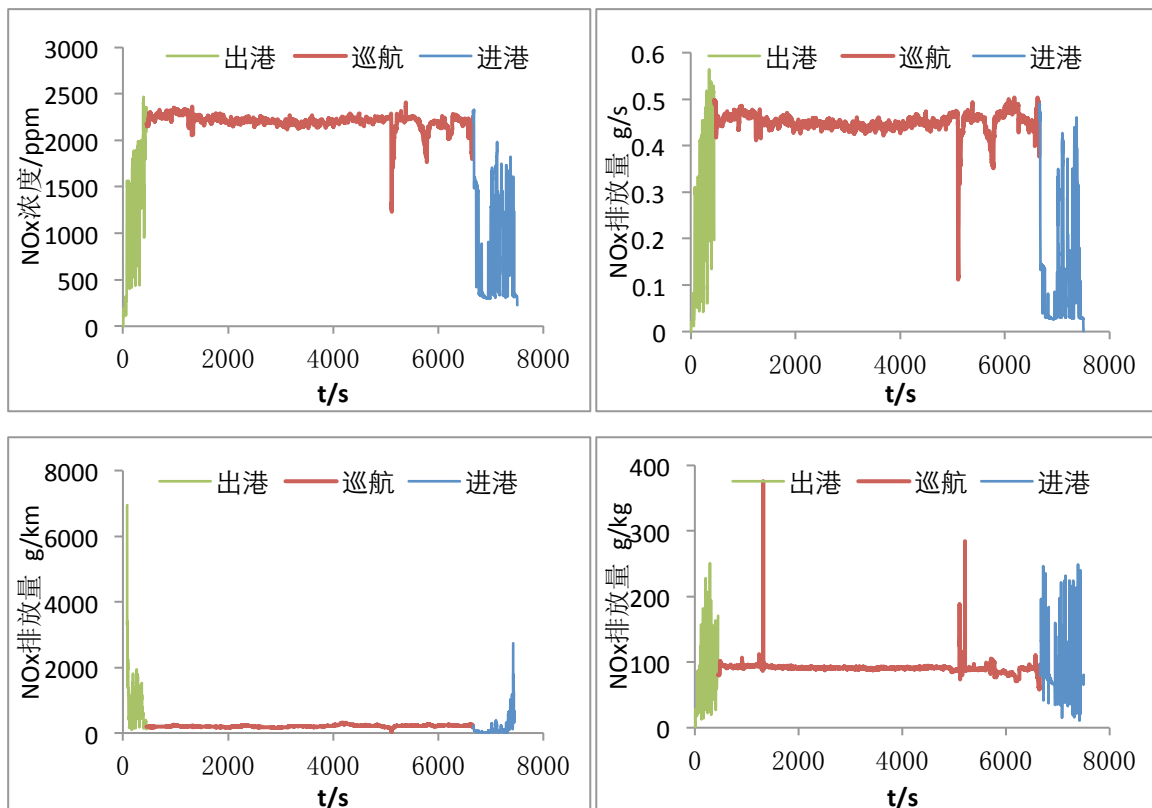
图 3.4 江苏段各工况 HC 排放情况

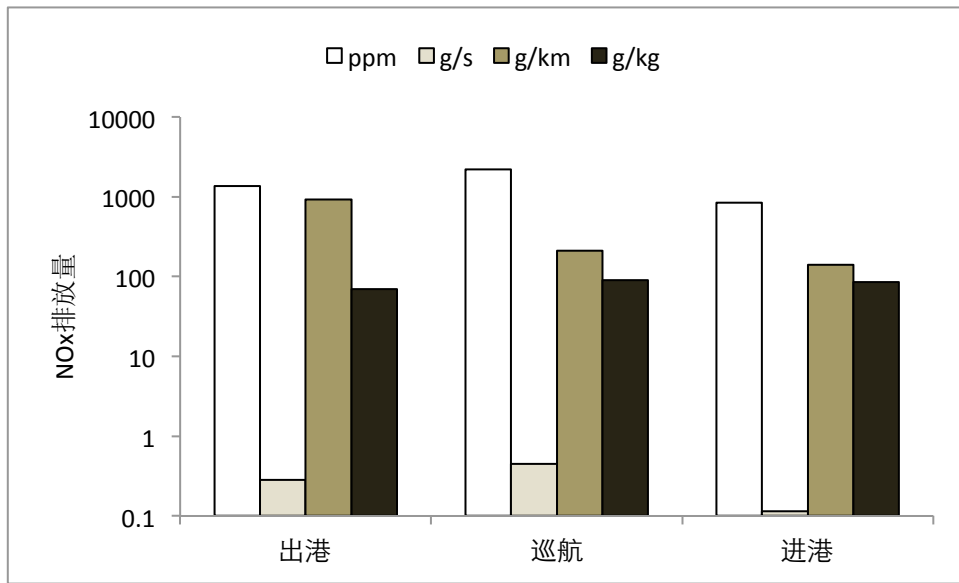
由图 3.4 可以看出，船舶柴油机 HC 的排放峰值集中在出港工况，且排放数值波

动幅度大，之后排放量持续减少，在进港工况出现回升，但明显小于出港峰值。

压燃式内燃机未燃 HC 都是在缸内的燃烧过程中产生的，包括燃料的不完全燃烧产物和未燃烧的燃料。柴油机在接近压缩终了时才喷射燃油，燃油空气混合物分布不均匀，因此，缝隙容积内和缸壁附近多为新鲜空气，缝隙容积和激冷层对柴油机未燃碳氢排放的影响相对汽油机来说小得多。引起柴油机 HC 排放的主要原因：温度或压力过低；混合气浓度过富或过贫；超出了富燃极限或稀燃极限。

出港工况时发动机温度低，冷却水温度低，燃烧的混合气在气流突变的情况下易于缸壁接触导致骤冷，发生不完全燃烧。同时由于温差大，机内向冷却系统传热快，燃烧热量损失较大，使得燃烧压力下降。启动时燃油温度低粘度和表面张力过大，喷雾不良扩散差，而启动时的加浓混合气进一步加剧了局部浓度过高情况，直接导致 HC 大幅增大。进港工况虽然也有混合气流大幅突变但此时发动机温度已经较高，HC 虽然增多，但明显比出港小。巡航工况 HC 较低，但由于没有排放限制，其排放值比普通车用柴油车要高。



图 3.5 江苏段各工况 NO_x 排放情况

由图 3.5 可以看出，NO_x 的排放情况与 CO 和 HC 的排放情况有很大变化，在巡航工况的 NO_x 浓度和质量速率明显高于出港和进港工况，但基于距离的排放量低于出港，这是因为在出港和进港工况时船舶航行速度远小于巡航工况。氮氧化物详细排放情况在后续章节进一步阐述。

3.1.3 负荷对排放的影响

按照螺旋桨特性，功率正比于螺旋桨转速的三次方，当发动机与螺旋桨间的传动比一定时，发动机转速变化直接体现功率和负荷情况。当船舶航行在巡航工况时发动机参数及各污染物排放情况表较稳定，改变船舶发动机转速，得到负荷对排放特性影响。在此时间段内船舶的负载情况一致，水流一致风速一致，最大程度上减小外部参数影响。

江苏段货船测试中选取其中四艘船舶在巡航工况进行了负荷变化测试，其各污染物情况如下由于各污染物数据差别较大采用对数坐标进行表示：

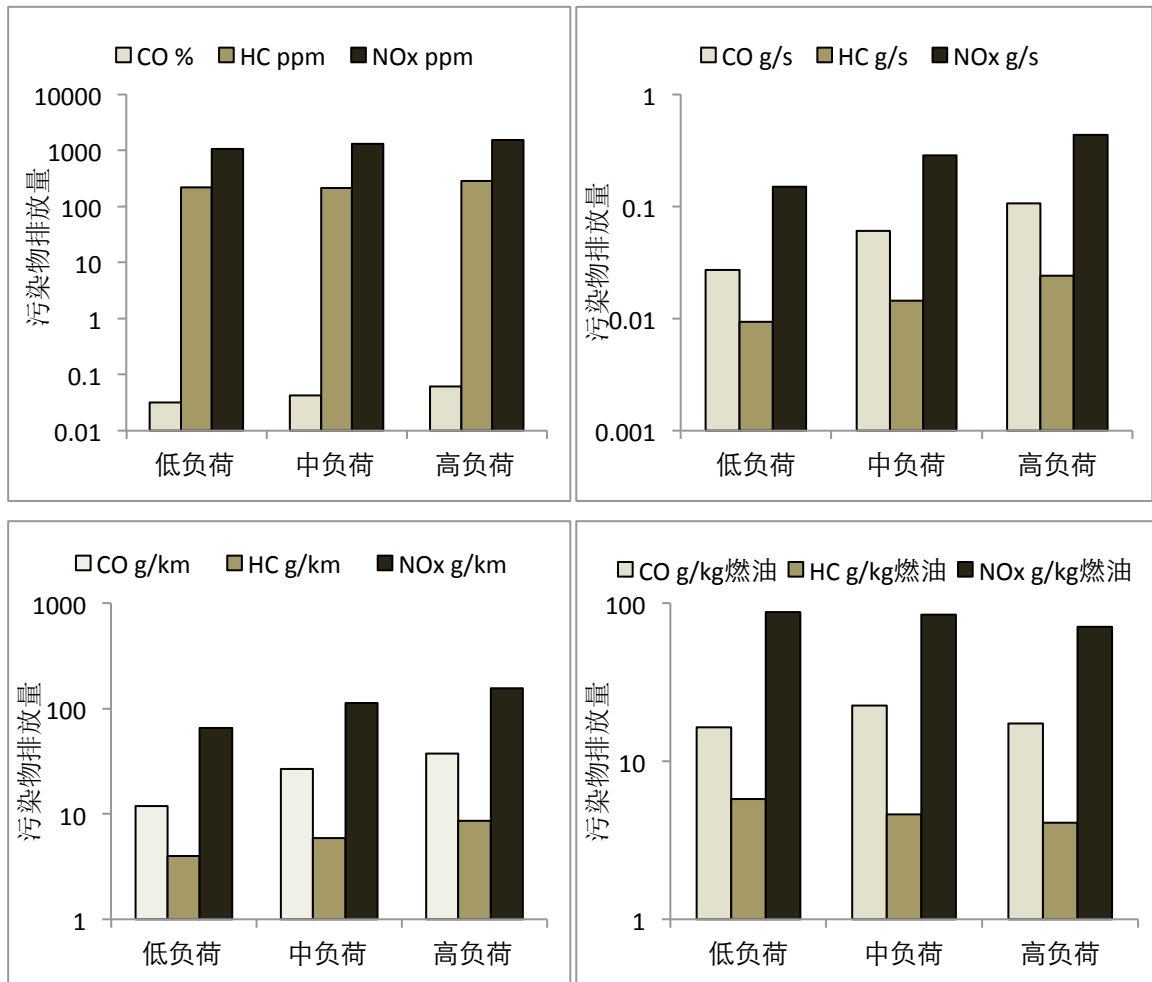


图 3.6 不同负荷下各污染物排放情况

由图 3.6 中可以看出，不同污染物的浓度值随负荷增大而增大，单位时间排放量随负荷增大而增大，单位行驶距离排放量值随负荷增大而增大，而单位燃油消耗量排放量随负荷增加没有体现出明显的变化趋势。

污染物浓度值为体积浓度，当负荷增加时发动机循环喷油量增加，同时进气量也增加，但是柴油机属于富氧燃烧，进气量的变化不如喷油量变化剧烈，混合气体变浓进行质调节。从而导致个污染物体积浓度增大。

发动机负荷增加，转速提高，单位时间内喷油量增加，在燃烧情况不出现剧烈变化情况下，各污染物随时间的质量会随之增加。

由于船舶柴油机按照螺旋桨特性工作，在正常定速航行时，发动机功率与发动机转速的三次方成正比。当发动机转速提升时需要大幅的功率支持，因而需要消耗更多的燃油以满足功率需求，从而出现单位时间的污染排放量增加大于速度的增幅，于是基于单位行驶距离的污染物排放量随负荷的增加的增大。

负荷增加时各污染物排放量增加，但同时燃油消耗量也增加，单位燃油消耗量下的排放情况没有明显的变化。

下图 3.7 分别为 CO、HC、NO_x 随负荷变化的趋势图。

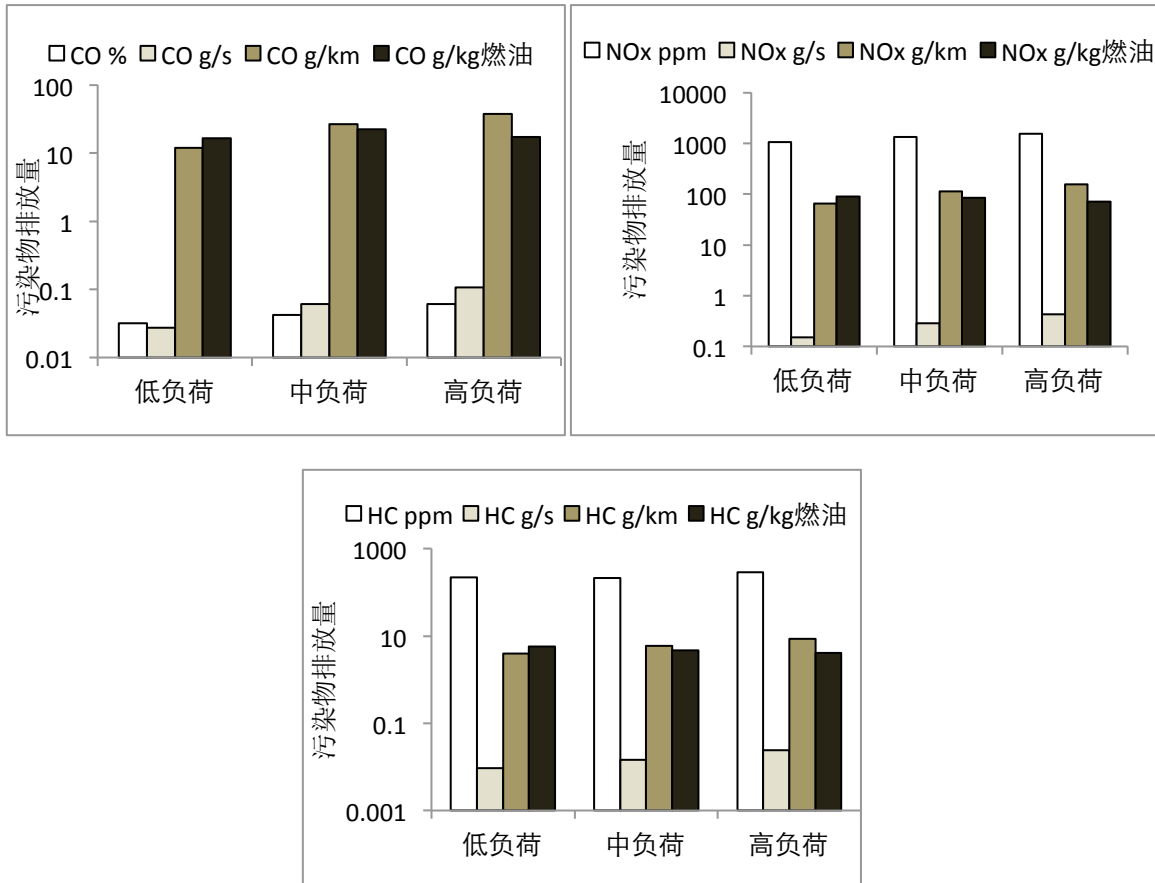


图 3.7 不同负荷下各污染物排放变化趋势

由图 3.7 中可以看出随负荷增加，CO、HC、NO_x 排放的体积浓度、单位时间和单位距离的排放量增大，单位燃油排放变化不明显。

CO 的排放速率主要取决于可燃混合气的过量空气系数，当负荷增大时，发动机空燃比减小，过量空气系数减小，局部缺氧情况增加，CO 排放速率增加。

负荷增大，发动机内压力增大，压入间隙内的混合气体增多，且局部缺氧未燃燃油增多，导致 HC 增大。

负荷增加时，发动机内温度升高，发动机稳定在较高负荷时，高温持续时间较长，热 NO 生成量较大，NO_x 排放总量增加。

3.1.4 氮氧化物排放特性

氮氧化物是船舶排放污染物中主要成分，同时人们对 NO_x 的排放控制也越来越

重视，国际海事及部分地区对船舶的 NO_x 排放都各自有一定的限制，具体限值见绪论章节相关介绍。图 3.8 是本次测试中不同船舶在不同工况下的 NO_x 基于时间的排放情况。

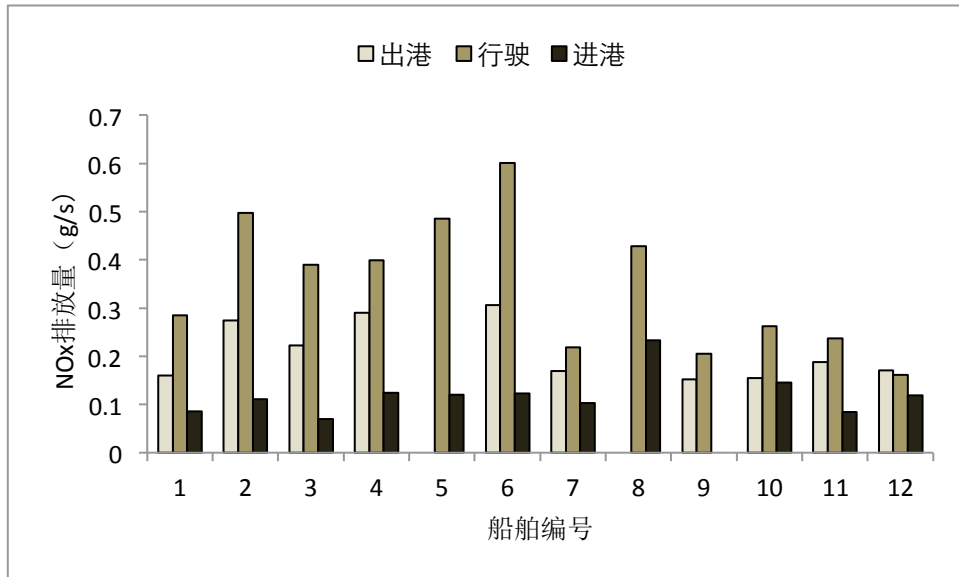


图 3.8 江苏段各船舶 NO_x 排放情况

由图 3.8 可以看出，各船舶排放的 NO_x 排放量变化较大，其变化范围为[0.600, 0.07]g/s，其中红色代表的巡航工况下的 NO_x 排放量明显高于出港工况和进港工况。从 12 艘船舶各工况的总平均图可以更清晰的看出。

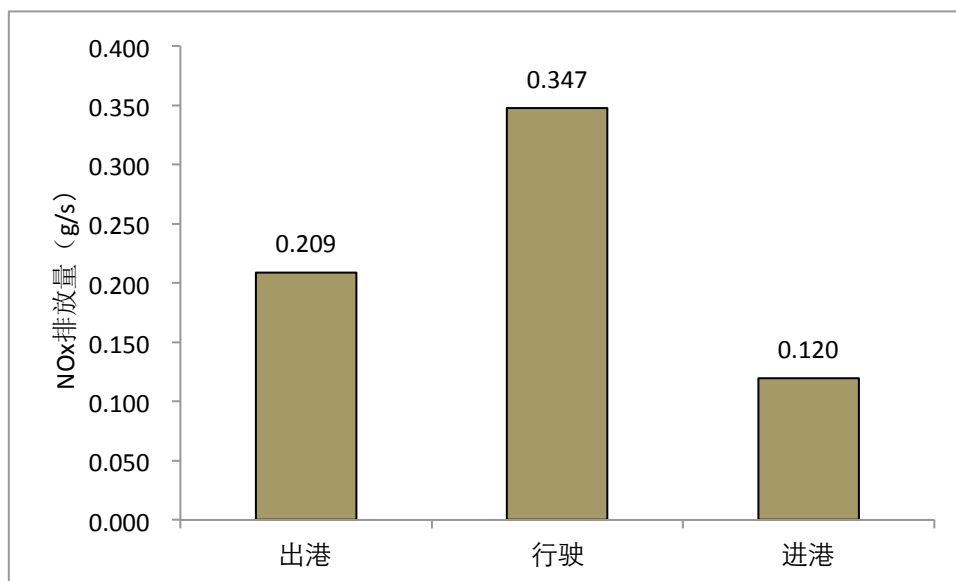


图 3.9 江苏段 NO_x 排放平均值

由图 3.9 可以很清楚的看出船舶 NO_x 排放量在出港工况下约 0.209g/s 在巡航工

况下约0.347g/s在进港工况下约为0.120g/s,巡航工况NO_x排放量约为出港工况的1.66倍,进港工况的2.90倍。

内燃机的氮氧化物主要包括NO和NO₂,而NO占主要地位,而NO的形成分为热NO、快速型NO、燃料型NO,其中热NO是空气中的O₂与N₂反应生成是实际排放NO的主要来源。NO_x形成主要取决于三个因素:(a)发动机最高温度;(b)富氧;(c)燃烧产物在高温区的停留时间。要解释NO_x的排放情况需了解各工况的排气温度情况,实验测试时所测得的排气温度为流量计处的温度,流量计安装在船舶排气管尾端,而排气管出口在发动机舱顶部,与发动机排气口有一定距离,温度有所下降,但温度的变化趋势不变。详细数据见图3.10

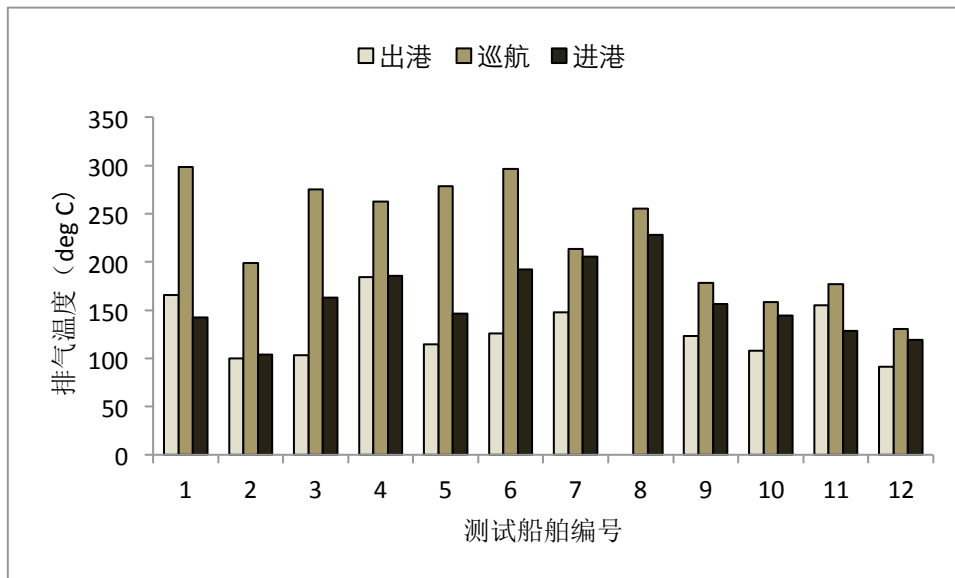


图3.10 江苏段各船舶不同工况温度情况

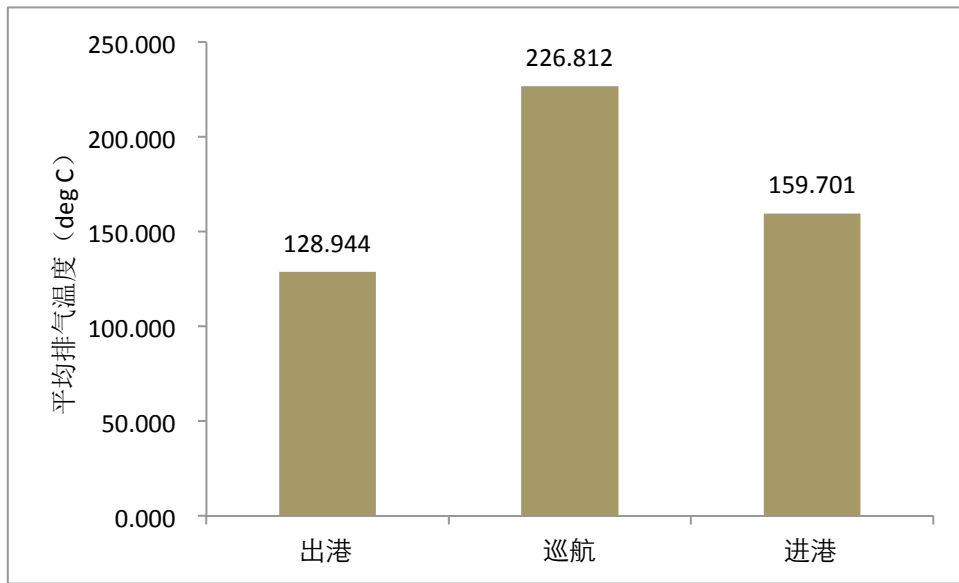


图 3.11 江苏段货船分工况温度平均

由图 3.11 可以看出排气温度在 $[91,298]^{\circ}\text{C}$ 范围内，巡航、出港、进港工况的平均排温分别为 129°C 、 227°C 、 160°C ，其中巡航工况排温分别为出港 1.76 倍为进港 1.42 倍，明显高于出港和进港工况。

巡航工况船舶的排气温度高，反映出发动机燃烧温度高，而 NO_x 的主要来源即热 NO 的主要生成条件为反应温度和氧原子浓度。巡航工况下发动机各参数稳定，空燃比几乎不变，进气与燃油混合比较充分，而且柴油发动机为稀燃模式，氧原子浓度较高，在高温环境下燃烧后期为热 NO 生成反应提供大量活化能，促使热 NO 的大量生成。而船舶实际航行中绝大多数时间都处于巡航工况，其对沿航道的大气及人们身体健康的危害都不容忽视。

出港工况温度明显低于巡航工况，但同时出港工况发动机转速也明显低于巡航工况，这可以由各工况的航行速度体现出来，从航行速度图 3.12 可以看出出港工况的速度在三个典型工况中最低，发动机转速低时，发动机每循环时间较长，这为 NO 的生成反应提供了大量时间，从而使得出港工况 NO_x 仅次于巡航工况。

进港工况时发动机的温度由于经过长时间的巡航工况使其高于出港工况，利于 NO_x 生成，但进港工况中较长时间为减速工况，发动机负荷小，使得其基于时间的 NO_x 排放量较少。同时需要注意的是进港工况和出港工况的地理位置都及集中在内河码头，密集的船舶贸易对港口附近的空气质量影响较大。

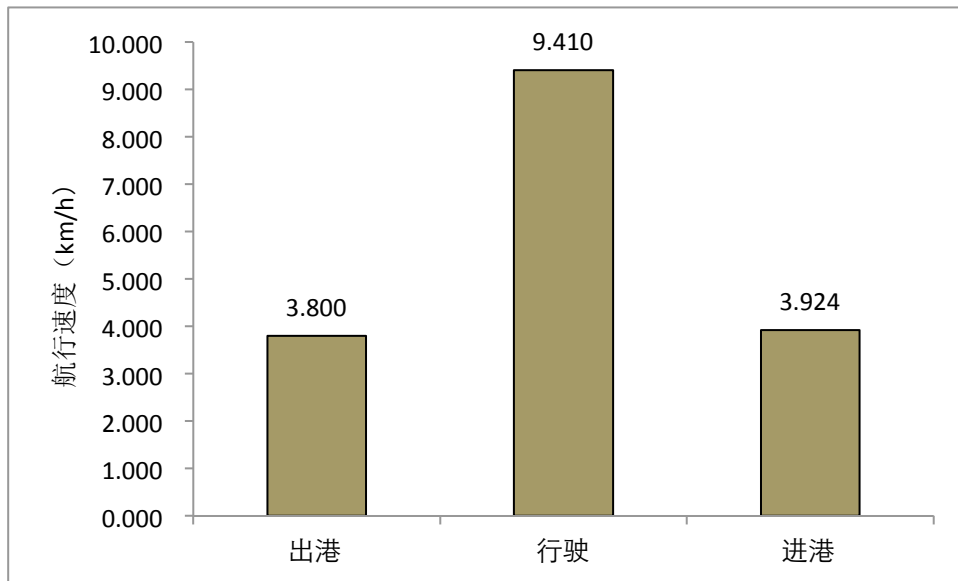
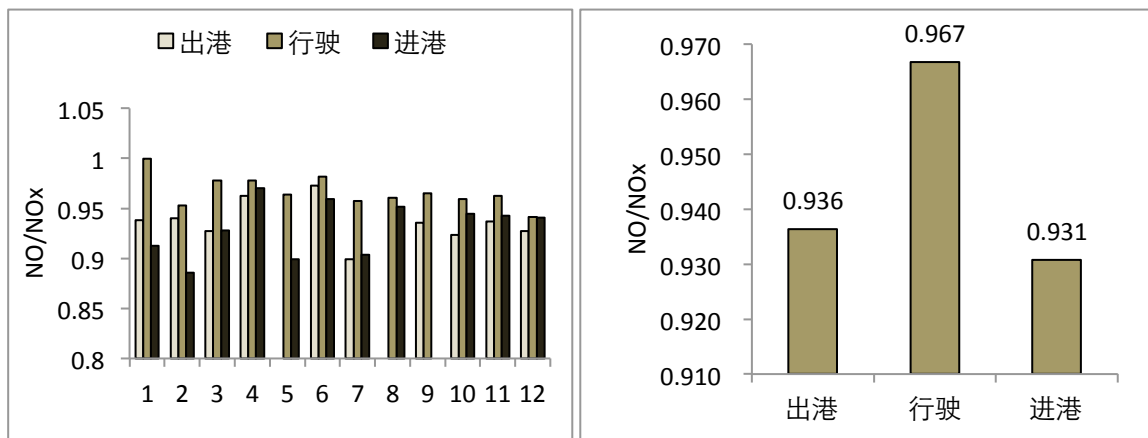


图 3.12 不同工况船舶速度平均

船舶发动机中 NO_x 主要为 NO，占据了 93% 以上，详见图 3.13，且各工况下 NO 与 NO_x 的比值也不断变化，其中巡航工况 NO 比例最大达到 96.7%，出港和进港分别为 93.6% 和 93.1%，出港工况和进港工况由于温度相对较低，抑制了 NO₂ 向 NO 的转变，故 NO 所占比例较低。

图 3.13 江苏段货船 NO/NO_x 情况

3.1.5 燃油消耗特性

燃油消耗特性是发动机重要特性之一，也是实际操作人员最关心的特性之一，燃油消耗对排放的影响非常明显。不同工况对燃油消耗量也不同，图 3.14 是江苏段所测 12 艘船舶在出港、巡航、进港工况下的平均燃油消耗量所计算得出的百公里油耗量，和 12 艘船舶总体的燃油消耗随工况的分布情况。

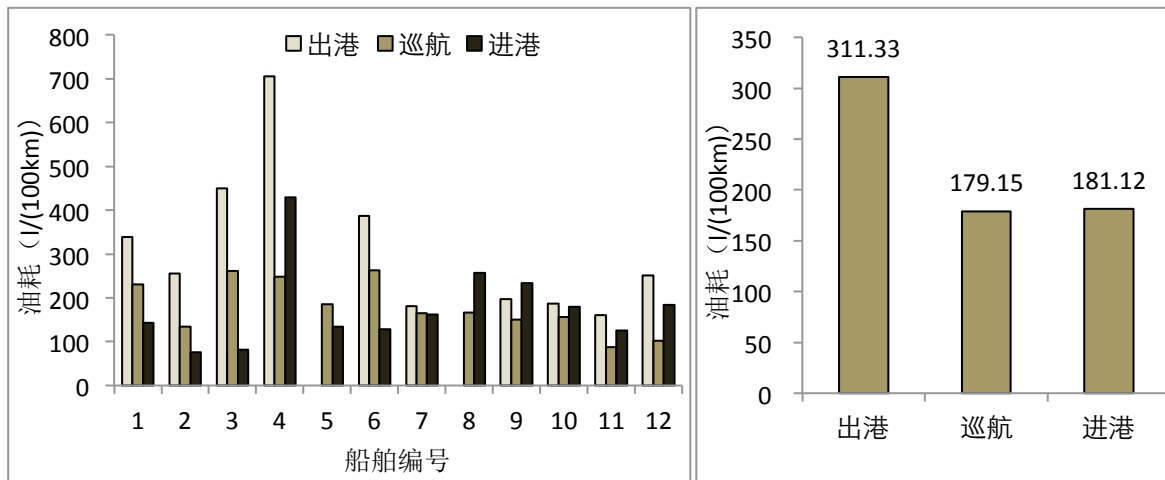


图 3.14 江苏段货船分工况油耗情况

由图 3.14 可以看出 12 艘船舶中虽然每艘船只不同工况的平均百公里燃油消耗数值在 $[80,700]$ 之间变动,变动幅度较大,这是由于不同的船舶所处的负载情况(满载、空载),水流情况(顺流、逆流),船舶本身燃烧情况不同等因素影响。从不同工况的燃油消耗分布可以看出出港工况明显高于巡航和进港工况,而巡航工况和进港工况油耗量数值接近,且进港工况略高。

出港工况包含了冷启动,冷启动时发动机冷却水温度较低,温差大使得汽缸壁传热增大,同时由于启动时转速较低而引起漏气量增加,从而使得压缩终了温度压力下降,而且低温时燃油蒸发速度较慢,导致燃烧不充分,输出动力性不佳。为保证启动性能需要增加喷油量,从而导致燃油消耗量的增加。出港工况的另一特点是船舶的航行速度较低,这也直接导致基于距离的燃油消耗量大幅增加。

巡航工况,发动机各项参数比较稳定,发动机温度较高,燃烧比较充分,燃烧热效率高。同时巡航工况时船舶发动机多为中高负荷,该工况处于常见柴油机特性的燃油经济性区域。所以巡航工况燃油消耗低于出港和进港工况。

进港工况前期,船舶由巡航速度下降以便与船坞对接,减速工况下发动机输出功率下降,同时经过较长时间的巡航发动机温度较高,燃烧较好,燃油消耗下降。但是进港工况与出港工况一样,需要船舶操作人员不断进行操作以调整船舶位置,这使得发动机的负荷、速度不断变化,空燃比波动幅度较大,使得燃烧循环变动大,燃烧不充分,从而进港工况中期和后期燃油消耗会大幅增加。综合结果导致进港工况燃油消耗大幅小于出港工况而略大于巡航工况。

所测 12 艘船舶航行测试中有 4 艘空载,7 艘满载,另外一艘为挖泥船,为满载出

港、中途卸货、空载进港，并没有完整的满载或空载的三个工况数据，除此船舶的另 11 艘船舶按空载、满载的三个典型工况燃油消耗平均数据如下。

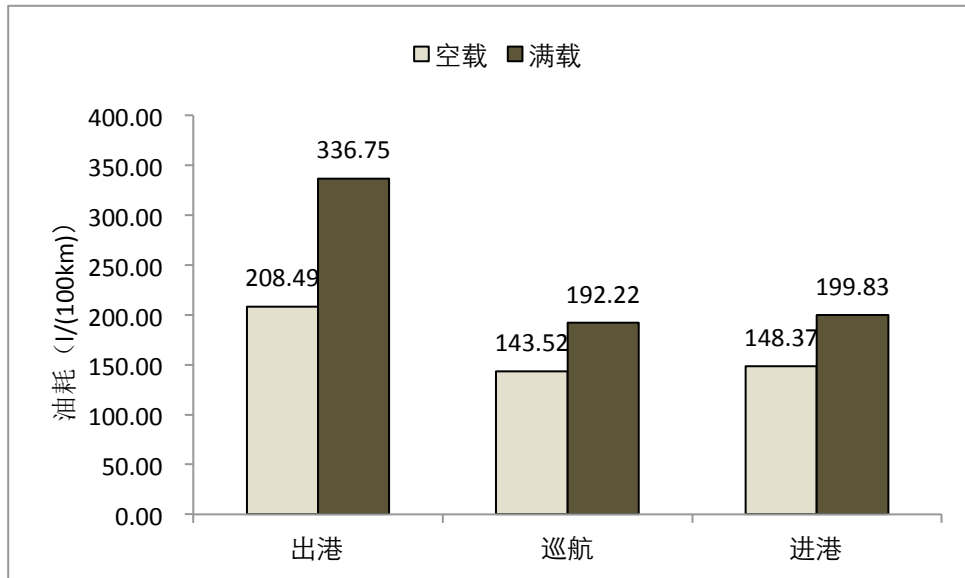


图 3.15 不同载荷下百公里油耗分布

由图 3.15 可以看出各工况中，满载船舶燃油消耗量都要高于空载航行油耗。满载时水流对船舶的阻力增大，为满足船舶的动力要求，发动机运行在高速高负荷工况下，喷油量增加，燃油消耗量增加。同时由于满载时船舶航行速度普遍小于空载航行速度，所以基于里程的燃油消耗量满载时会较高。

船舶航行于内河中，发动机输出功率全部由螺旋桨吸收，发动机的功率与螺旋桨转速的三次方成正比，船舶发动机按螺旋桨特性运行。图 3.16 选取四艘船舶在巡航工况下不同负荷情况下百公里油耗数据图表。

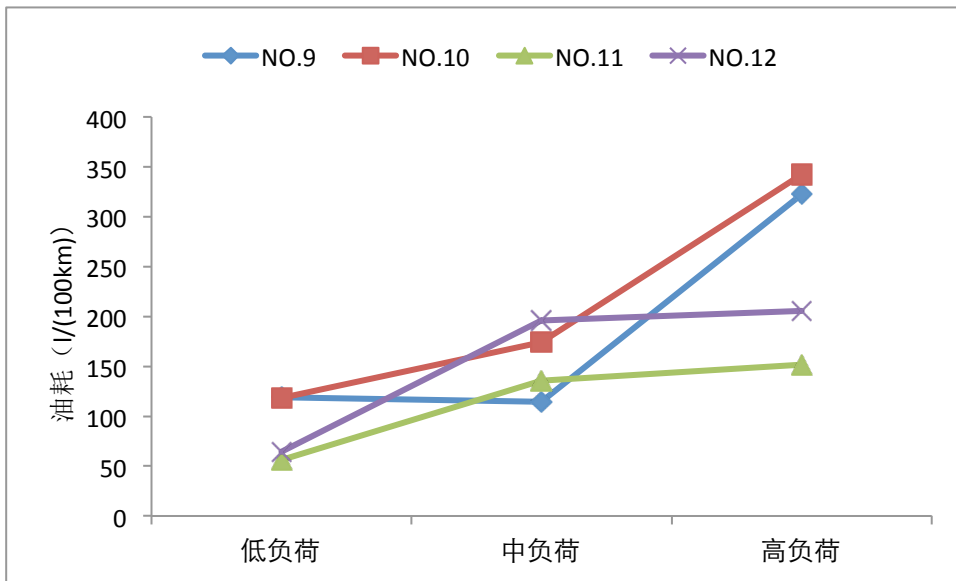


图 3.16 不同负荷下百公里油耗情况

由图 3.16 可以看出随着负荷增加,各船舶的燃油消耗量增大。按照螺旋桨特性,负荷增大,螺旋桨转速增大,同传动比档位上发动机转速增大,船舶速度与发动机单位时间喷油量同比增加,但是船舶速度增加时水流对船舶的阻力增加,同时螺旋桨转速增加其噪声和空化效果加剧,使得额外功率消耗增加,单位距离的燃油消耗量增加。

3.2 广东内河船舶柴油机气态污染物排放特性

3.2.1 广东内河客船气态污染物排放特性

(1) 广东内河客船典型工况

客船测量路线主要沿珠江夜游观光路线,典型的航行工况分布图如图 3.17。

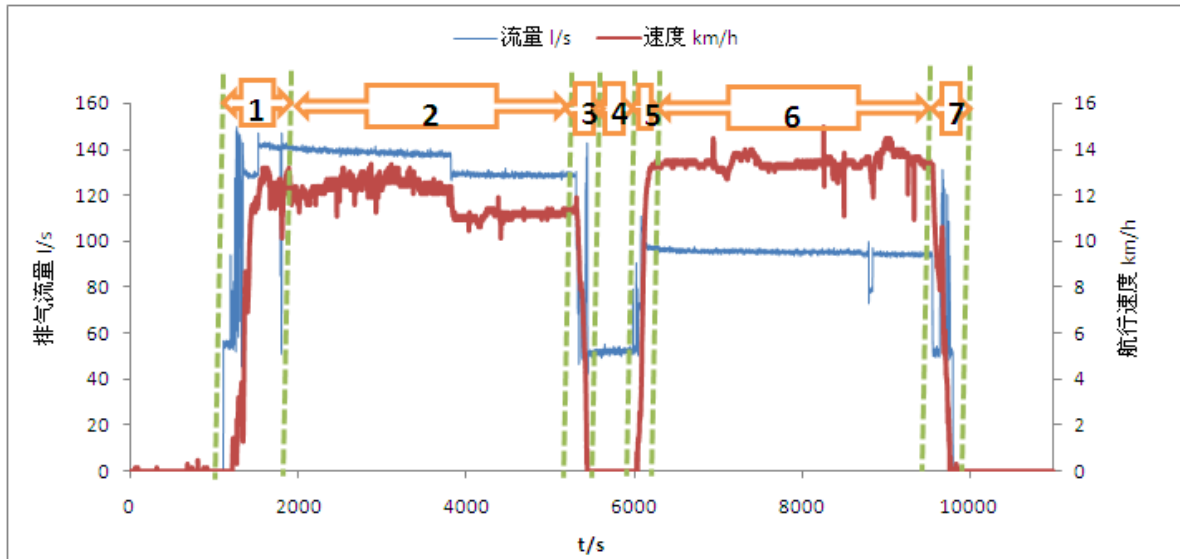


图 3.17 广东客船实际行驶情况

各工况下船舶航行情况如下：

航行工况 1：出港工况，发动机启动，船舶开始出港。船舶速度和排气流量开始增加并达到一个较高的稳定值。

航行工况 2：逆流巡航工况，发动机运转平稳，排气流量和传播速度较稳定，可以看出该船舶在中间进行了一次速度调整。且排气量较大而速度较低。

航行工况 3：怠速进港工况，发动机减速至怠速状态。

航行工况 4：怠速工况，船舶停留在码头，发动机保持怠速。

航行工况 5：怠速出港工况，发动机由怠速开始加速，船舶从码头出港。

航行工况 6：顺流巡航工况，发动机排气量稳定，排气量较小但速度较高。

航行工况 7：进港工况，船舶进港，回到出发码头。

客船由于其航行路线较为固定，航行过程中多包含顺流和逆流的航行情况，本测试中以出港巡航并返航至原码头为一个测试循环。

(2) 工况对排放特性影响

各污染物随时间的变化情况如图 3.18

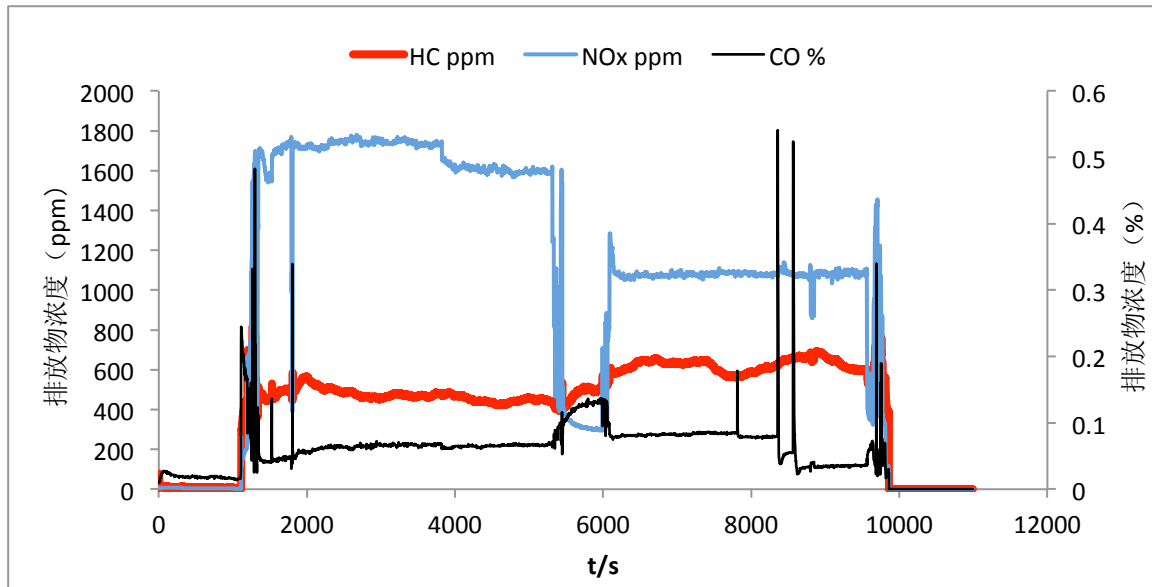


图 3.18 广东段客船瞬时排放情况

由图 3.18 可以看出 CO 和 HC 的浓度峰值在顺水巡航工况和顺水进港工况, NO_x 的浓度峰值在逆水巡航工况。浓度波动情况在进港和出港处较大, 巡航阶段波动小, 怠速进出港工况波动介于两者之间。

逆水巡航工况下发动机负荷较大, 燃烧温度较高, 故 NO_x 排放量较高, 故此工况下 NO_x 平稳且值较大。顺水巡航时发动机转速低而船速高, 加之客船的本身负载较少, 发动机负荷低, 从而燃烧不太充分, 使得 HC 值较高。在顺流巡航中途经交叉口船舶转弯处, 发动机转速突变, 致使 CO 在顺水巡航工况中出现峰值。

广东所测客船码头船舶密集程度比江苏货船码头低, 可以看出船舶的起航过程持续时间较短, 出港工况污染物浓度波动情况也不及江苏货船剧烈, 但相对本身客船其他工况而言较大。同时在图 3.18 中也可以看出怠速出港工况相比于启动出港工况, 怠速进港工况相比于进港停机工况, 各污染物浓度变化幅度明显较小, 这也是由于发动机的负荷变化幅度较小造成的。

怠速情况下由于输出功率为零, 没有负荷情况下, 喷油量少各污染物排放较小, 具体数据可以参见图 3.19。

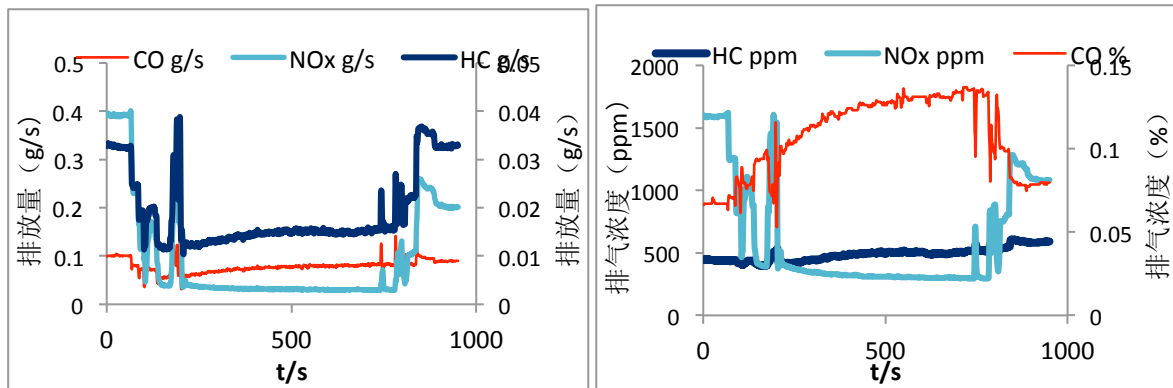


图 3.19 广东货船基于时间和浓度的瞬时排放情况

由图 3.19 中可以看出从逆流巡航工况转变至怠速工况时，基于时间的各污染物排放量都减少了，这是由于怠速时喷油量的大幅减少导致的，但是从浓度值可以看出 CO 和 HC 在进入怠速工况时由于负荷急剧减小，燃烧不充分，值有所增大。同时从图 3.19 中可以看到当发动机处于稳定的怠速工况时，三种污染物随时间的排放稳定量 CO 为 0.08g/s、HC 0.015g/s，NOx 为 0.03g/s，浓度值 CO 为 0.13%、HC 为 490ppm、NOx 为 300ppm。

(4) 转速对排放特性影响

为了解转速不同对污染物的影响，在客船逆流巡航工况过程中改变发动机转速得到污染物排放情况。整个过程中船舶行驶在同一条河流中，中途无河道交汇口，可以认为水流情况在整个过程中是稳定的，在图 3.20 中左部分的发动机转速稳定在 1410r/min，而图 3.20 中右部分的发动机转速稳定在 750r/min，而船舶的额定转速为 1500r/min。

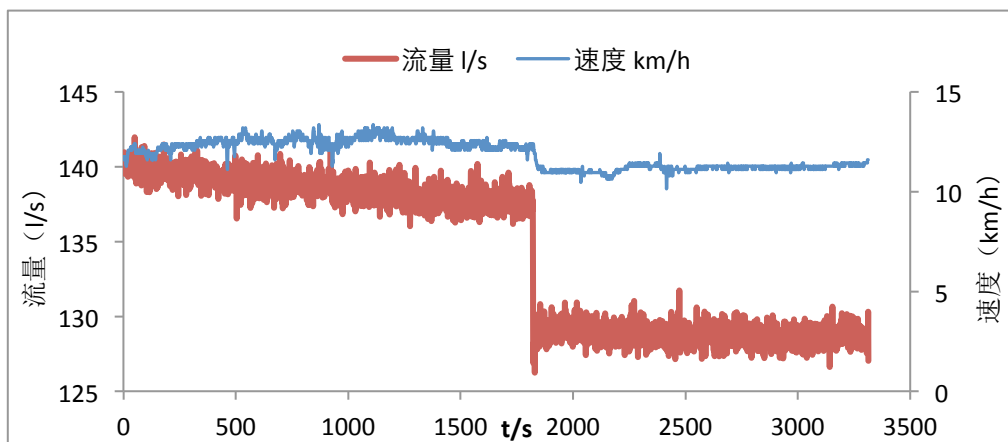


图 3.20 船舶速度与排气流量情况

由图 3.20 可以看出随着发动机转速降低船舶速度明显降低，而排气流量也相应

降低。

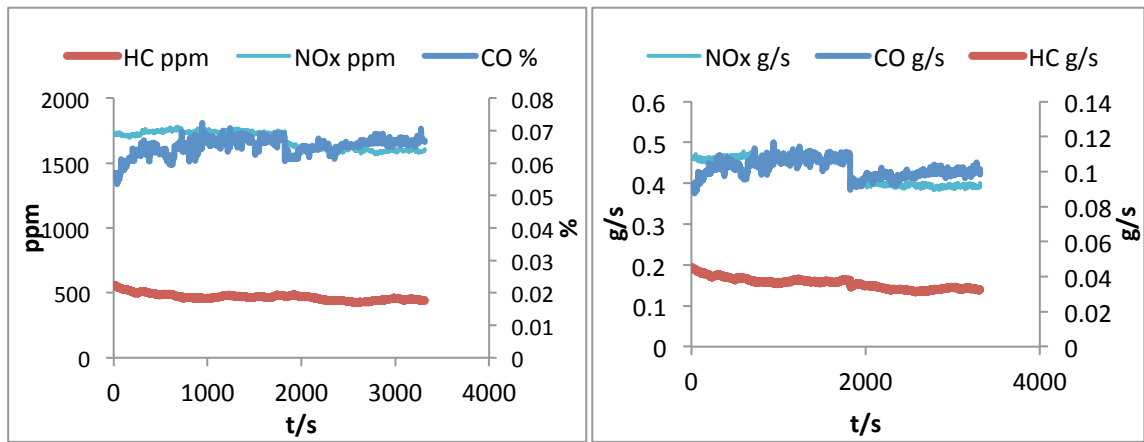


图 3.21 不同转速下各污染物瞬时排放情况

由图 3.21 可以看出 CO、HC 和 NO_x 的浓度值和排放速率都有一定的下降，这是因为在高速高负荷时发动机温度高 NO_x 高，而且高速高负荷时空燃比较小，局部燃烧不充分增加，从而导致 CO 和 HC 较高；当发动机从高速高负荷降至中高负荷时各污染物排放量出现下降。

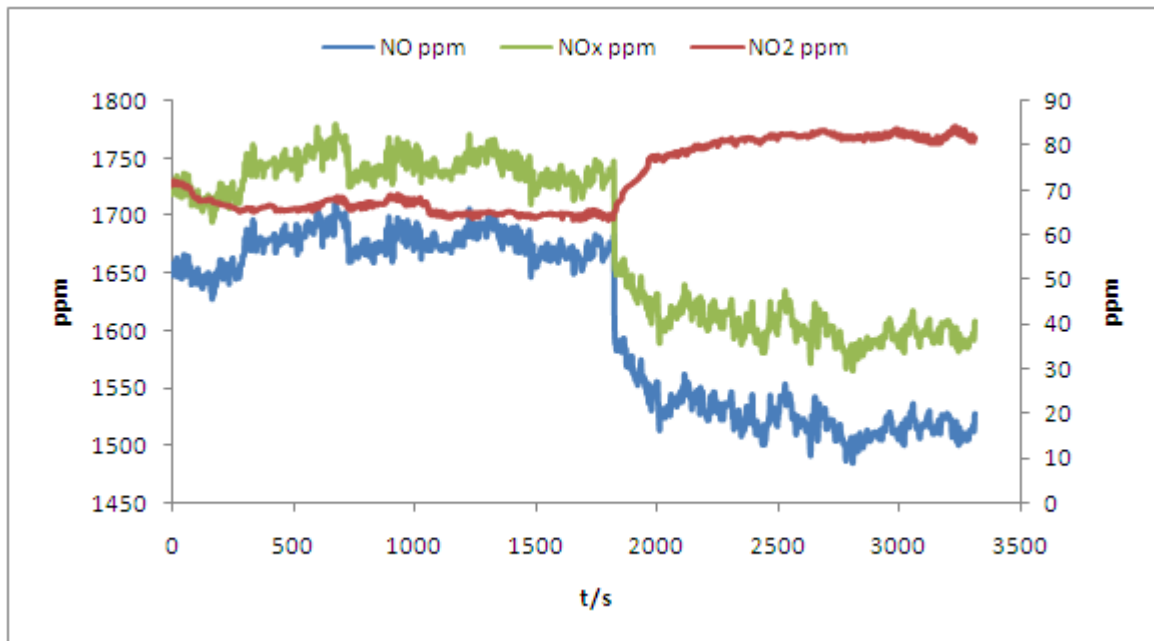


图 3.22 不同速度下 NO_x 各成分瞬时排放情况

由图 3.22 可以看出，转速减小的情况下，船舶排放的氮氧化物总量明显下降，其中 NO 降低而 NO₂ 浓度增大。这是由于减小负荷时发动机的温度降低，在火焰中由 NO 生成的 NO₂ 通过与较冷的气体混合而容易被“冻结”，即从而抑制了 NO₂ 向 NO 的

转变, 使得 NO_2 的浓度增大, 但由于 NO_2 浓度远小于 NO , 故总的氮氧化物浓度随 NO 减少而减少。

3.2.2 广东内河货船气态污染物排放特性

(1) 航行工况分布情况

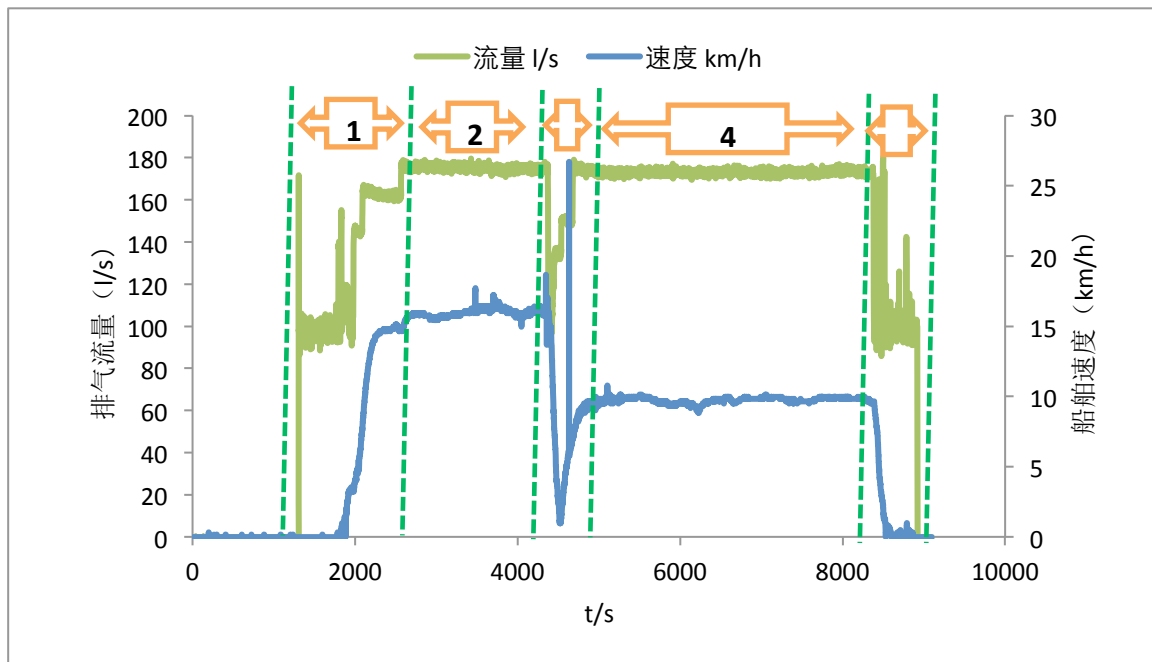


图 3.23 广东货船行驶情况

由图 3.23 可以看出, 所测广东省货船的行驶工况较为简单, 具体航行情况分布如下:

航行工况 1: 出港工况, 发动机启动, 可以看出有一段怠速阶段, 待发动机温度上升后开始航行, 航行较为稳定。

航行工况 2: 顺流巡航工况, 发动机排气流量稳定, 船舶航行速度较高。

航行工况 3: 转向工况, 船舶改变航行路线, 船舶减速掉头返航。

航行工况 4: 逆水巡航工况, 排气量稳定, 船速较低。

航行工况 5: 进港工况, 波动较大。

(2) 水流对排放特性影响

水流的变化是船舶实际航行中常见的外部因素, 水流的变化对船舶的排放特性有一定影响。选取同一艘船舶测量其在稳定转速下行驶于不同水流情况下的排放量, 基于时间的瞬时排放情况见图 3.24。

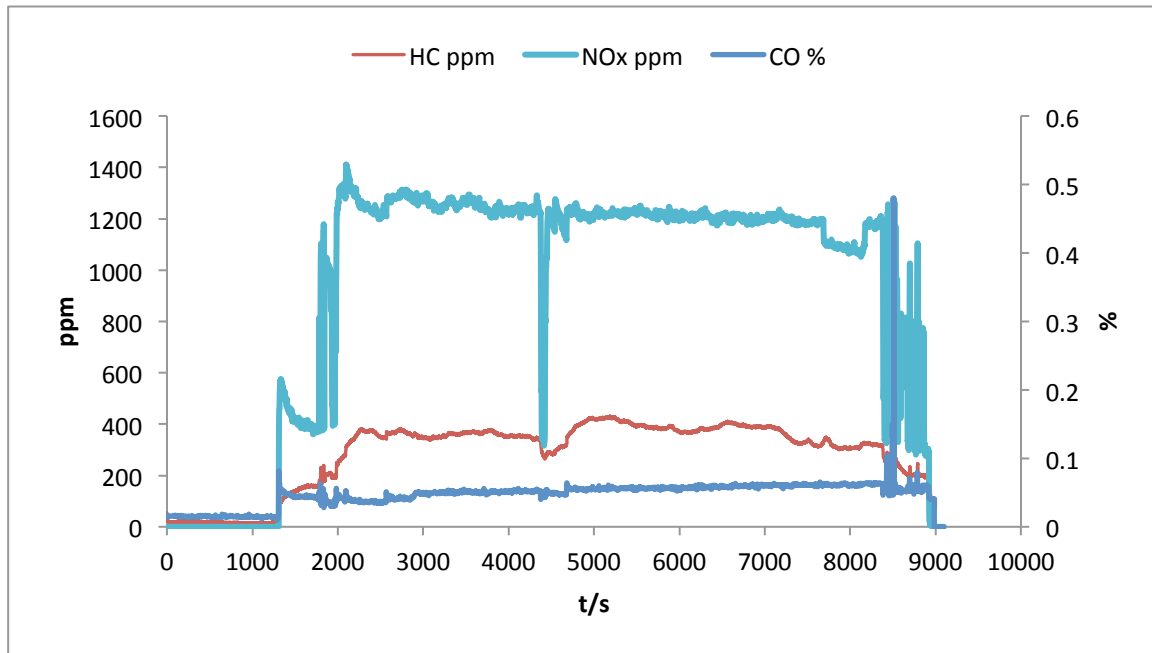


图 3.24 不同水流情况下各污染物排放情况

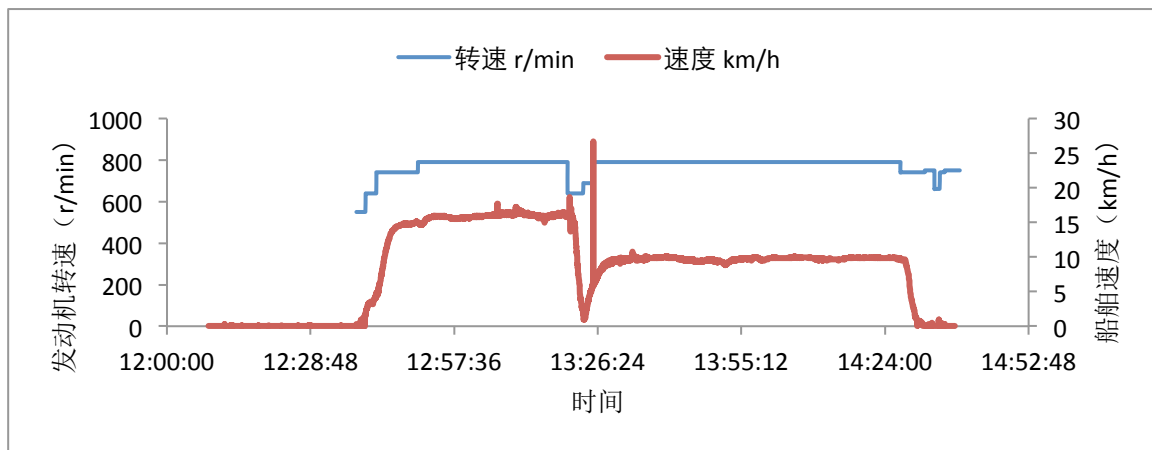


图 3.25 不同水流情况下发动机转速与船舶速度情况

由图 3.25 可以看出船舶在顺流和逆流的巡航工况下发动机转速基本持平，但船舶的航行速度由于水流速度的叠加明显不同。船舶操作人员在驾驶船舶时只对发动机速度和船舵进行调节在操作习惯上将发动机稳定在较经济的转速上。由于在顺水与逆水航行中船舶螺旋桨的进程比不同，逆水时进程比较小，由常见定距桨工作性能曲线图可以看出其推力系数和扭矩系数较大，见图 3.26，从而同发动机转速下螺旋桨的推力和扭矩较大。即逆水巡航工况发动机负荷较大。由于负荷变化幅度较小，各污染物变化情况不是太明显，需要将所测不同船舶顺流巡航和逆流巡航下各参数进行平均，分析变化特性。

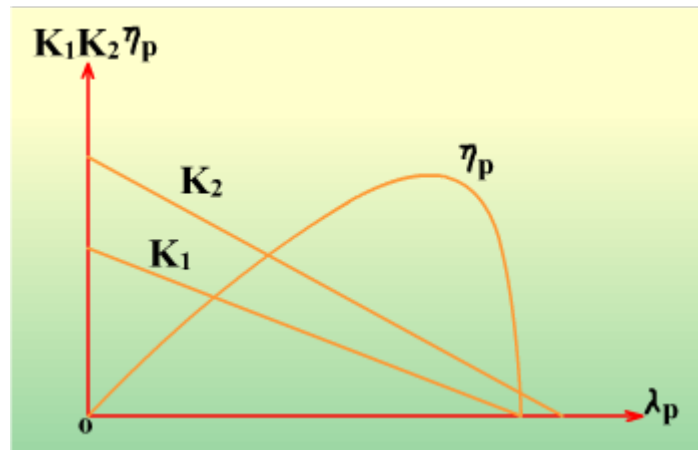
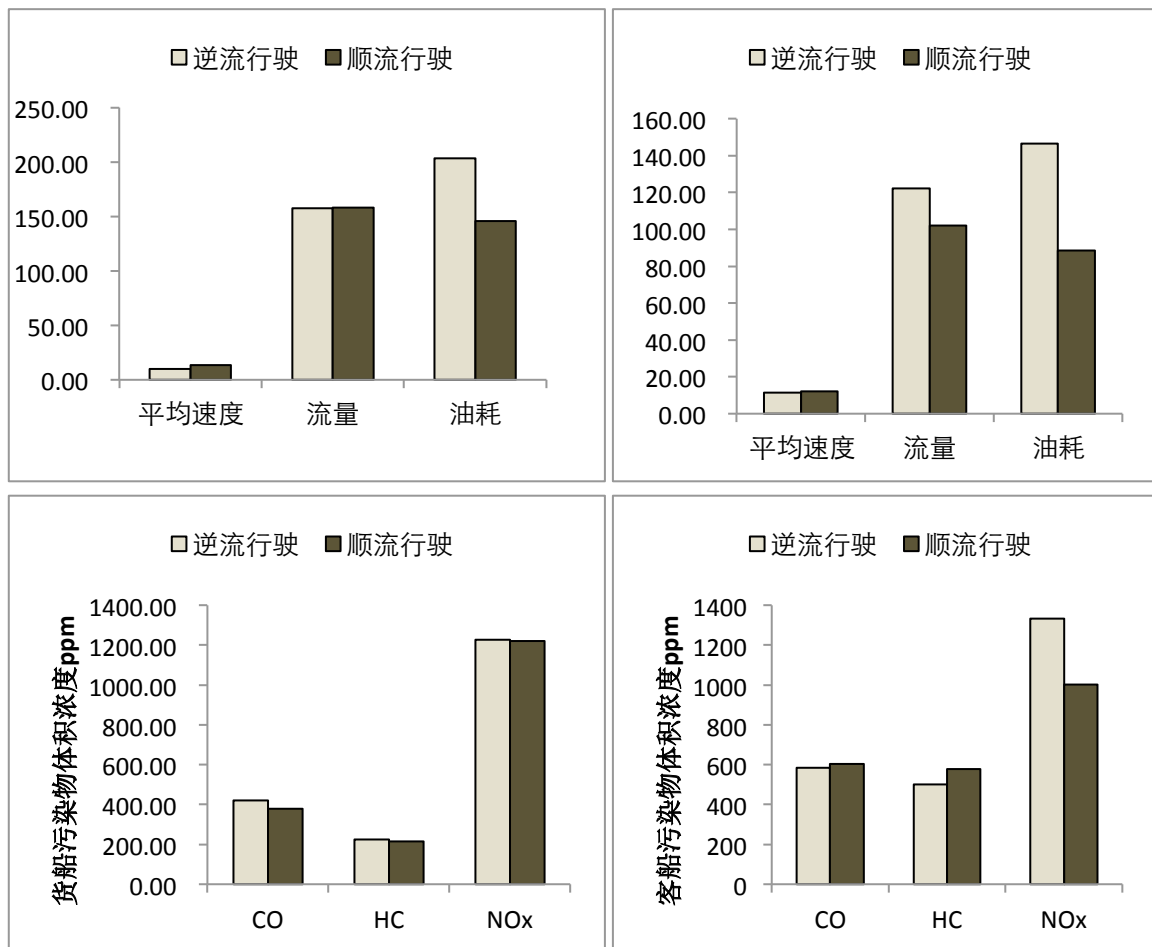


图 3.26 定距桨工作性能曲线示意图

广东段所测货船与客船在顺水巡航工况和逆水巡航工况时各参数值的变化情况如图 3.27。图片左侧为所测货船的参数平均值，右侧为客船的参数平均值。



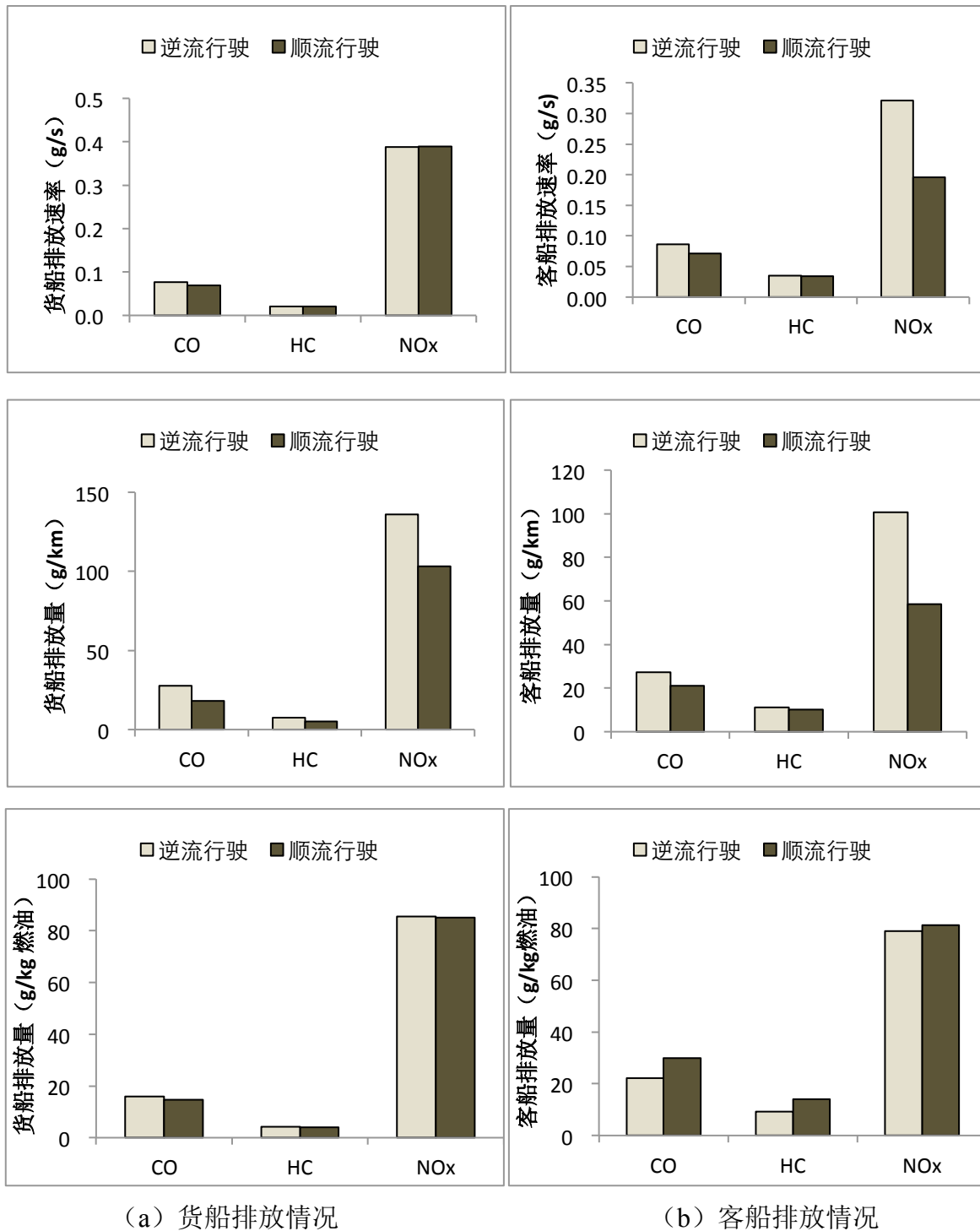


图 3.27 不同水流情况下客船与货船各污染物排放情况

由图 3.27 可以看出，货船与客船在顺水巡航工况和逆水巡航工况时各参数值的变化情况基本一致。

在逆水巡航工况中船舶速度较低，排气量略高，百公里油耗较高，各污染物基于

浓度、基于时间和基于距离的排放量增大。这是因为，在逆水巡航工况下船舶负荷相对较大，空燃比减小，局部燃烧不充分趋势增加，从而 CO 和 HC 排放量增大，同时温度相对较高，NO_x 增加；逆水巡航船舶速度低，故基于距离各污染物增加。

3.3 小结

通过测量得到了江苏段货船和广东段客船及货船的气态污染物排放情况，并分析了不同因素下排放特性。

各污染物在出港工况波动较大，且峰值较高；在巡航工况污染物排放温度，NO_x 较高；进港工况，波动较大，峰值较高，略小于进港工况。

负荷对排放特性影响，负荷增大，各污染物浓度和基于时间、基于距离的排放量增大，但基于燃油消耗的变化不明显。

氮氧化物在巡航工况较高，且氮氧化物中 NO₂ 的占比较小约 4%，在进出港工况下 NO₂ 占比相对较高约 7%，NO 在 NO_x 始终占绝大部分。

船舶在进港工况油耗较高，占航行绝大部分时间的巡航工况平均百公里油耗为 179.15L/(100km)；负荷增大时百公里油耗增大。

广东段污染物排放特性与江苏基本相似，同时广东段测试数据表明船舶在逆水巡航工况下各污染物排放量增大，百公里油耗增大。

4 船用柴油机实际工况下颗粒物排放特性研究

4.1 工况对颗粒物排放特性影响

4.1.1 船舶实际航行工况下颗粒物排放分布情况

(1) 图 4.1 为江苏段某货船基于时间的颗粒物质量排放量图

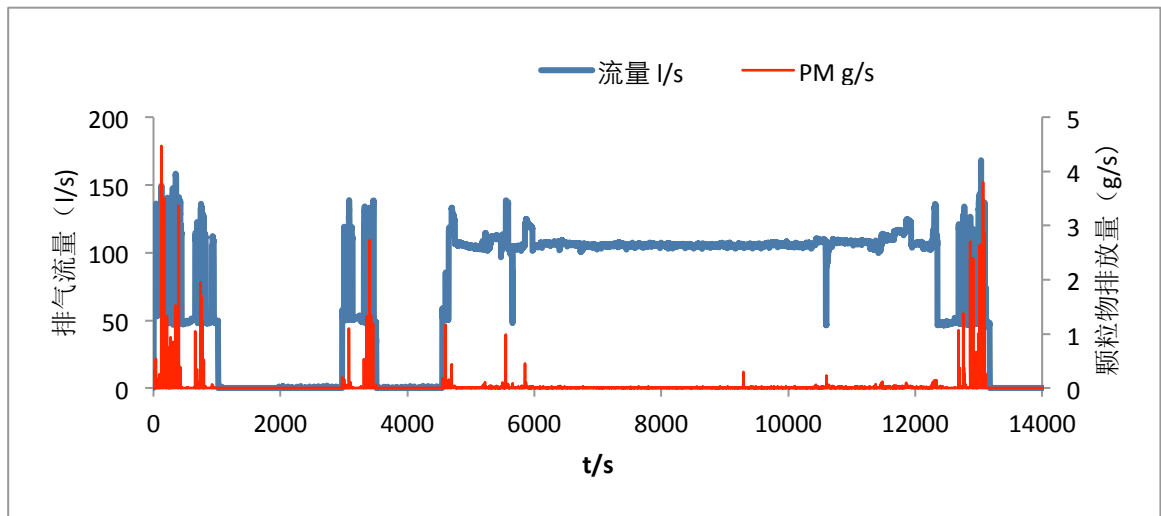


图 4.1 货船颗粒物瞬时排放情况

从上图 4.1 可以看出,颗粒物在手动操作工况下颗粒物的质量浓度发生大的变化,颗粒物的峰值出现在出港工况,此时温度较低,燃烧不充分,一部分烃类未参与燃烧或未完全燃烧成终产物,而成为含氧的燃烧中间产物,或聚合成大分子量的碳氢,然后成为碳基颗粒,或附聚在碳基颗粒上。

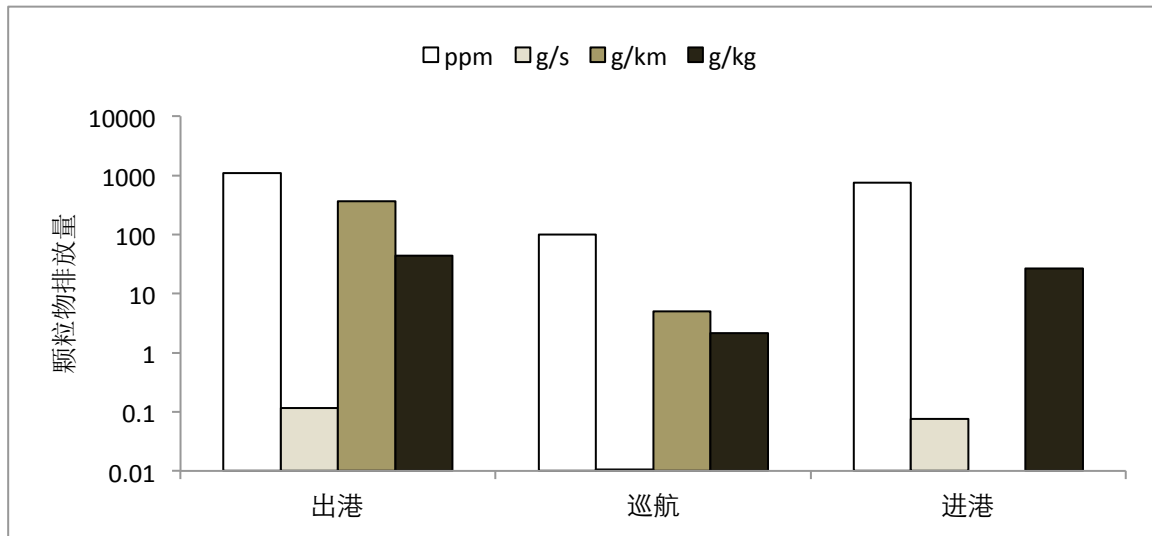


图 4.2 单船各工况颗粒物排放情况

图 4.2 是在三个工况下颗粒物基于体积浓度、时间、距离、燃油消耗的排放量，可以清晰的看出在巡航工况下，PM 远少于出港和进港工况。这是因为巡航工况时，发动机燃烧稳定，燃烧室气流组织较好。

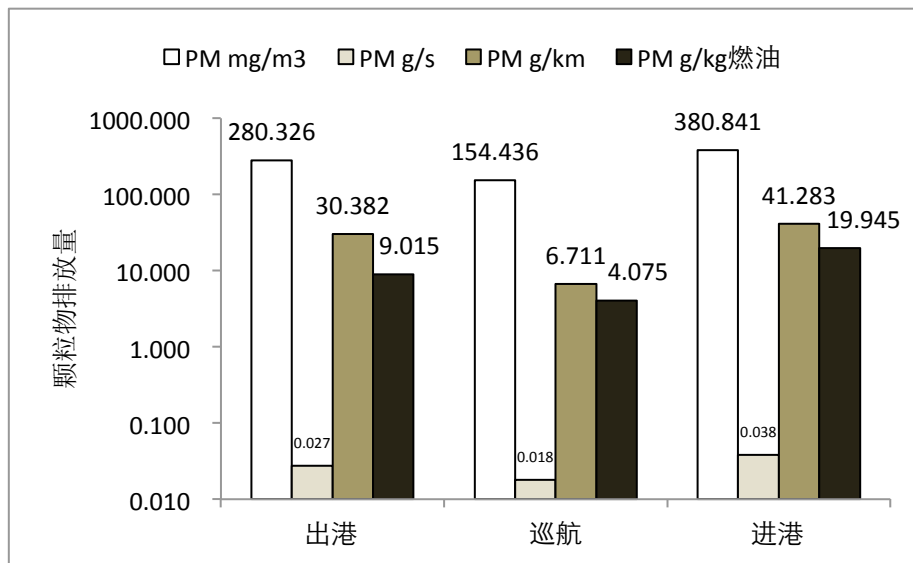


图 4.3 江苏段所测船舶不同工况下颗粒物排放情况

图 4.3 为江苏段测量的 12 艘船舶在不同工况下的颗粒物排放量情况，其中巡航下，颗粒物排放平均值为 154.436mg/m³、0.018g/s 即 64.8g/h、6.71g/km、4.07g/kg 燃油。进港工况下颗粒物排放量较高，这主要是由于进港工况下，发动机负荷急剧变化，燃烧室内温度的变化滞后于喷油量的变化，导致大量可溶性有机成分颗粒（SOF）生成。

4.1.2 负荷变化对颗粒物排放特性影响

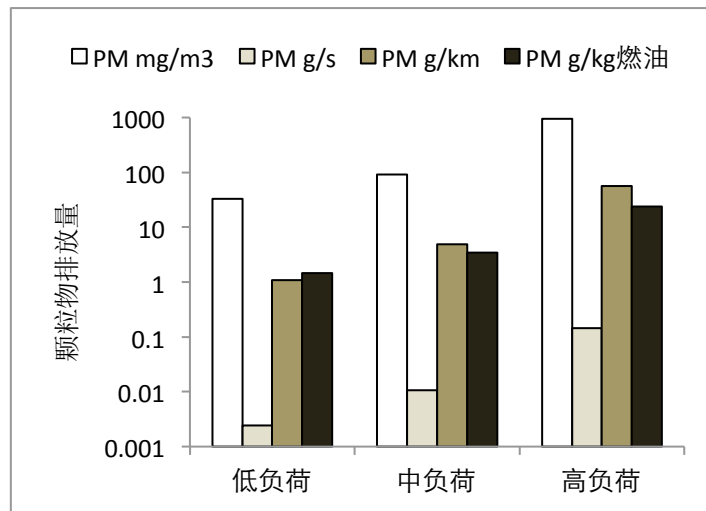


图 4.4 不同负荷下颗粒物排放情况

由图 4.4 可以看出，随着负荷增加颗粒物基于体积、时间、距离和燃油的排放值都同比增大，这主要是因为负荷增大后，喷油量增加，发动机的过量空气系数减小，导致局部燃烧不成分情况增加，导致颗粒增多。

4.1.3 水流变化对颗粒物排放特性影响

顺水巡航和逆水巡航是货船行驶时间比例最大的工况，广东段四艘货船在顺逆流时颗粒物进行对比得到水流对颗粒物的影响。

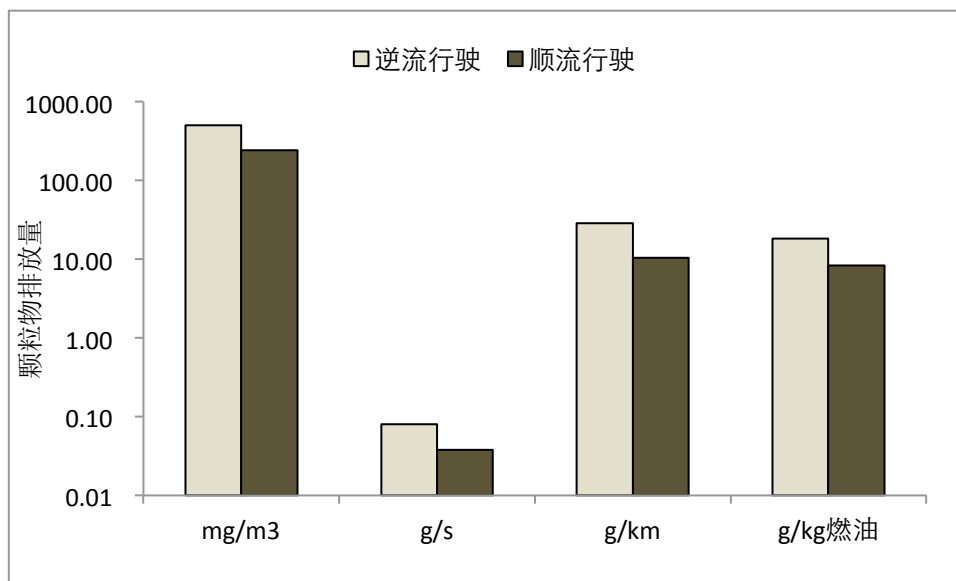


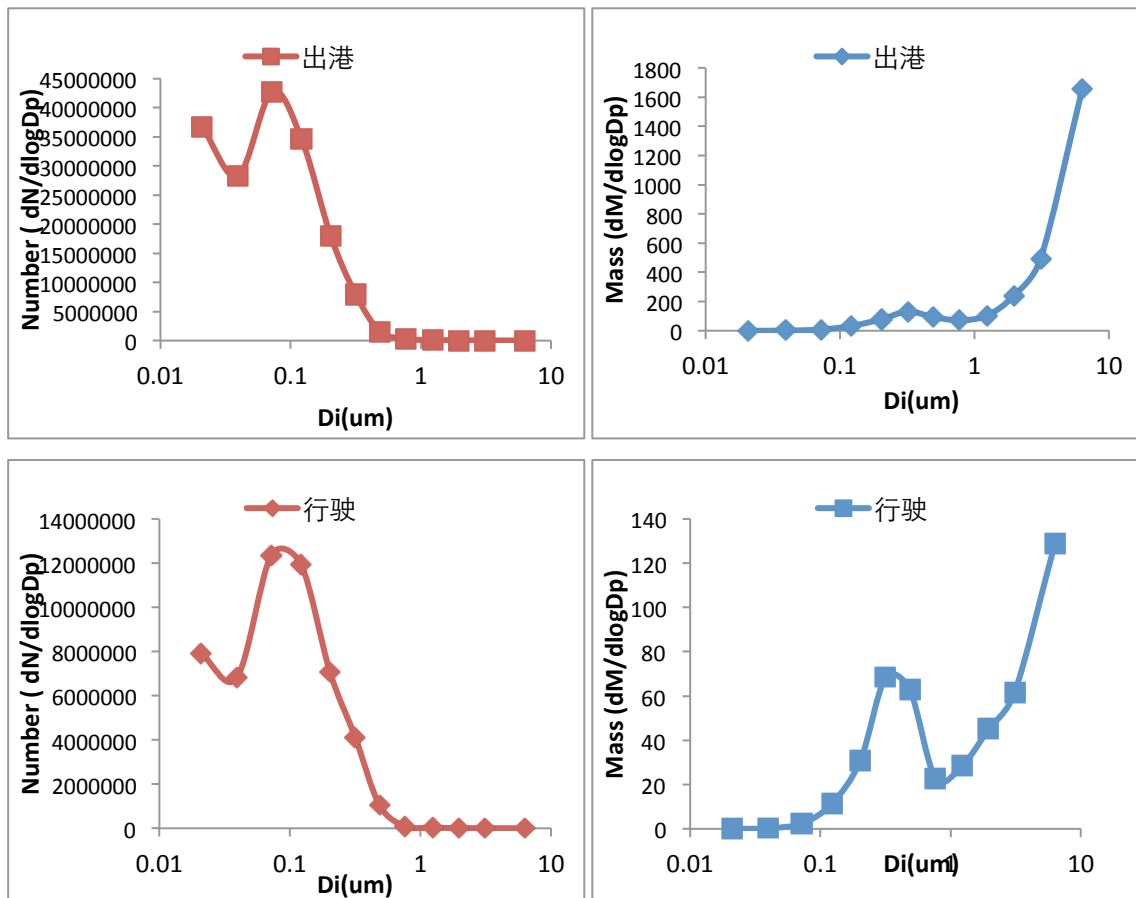
图 4.5 不同水流情况下颗粒物排放情况

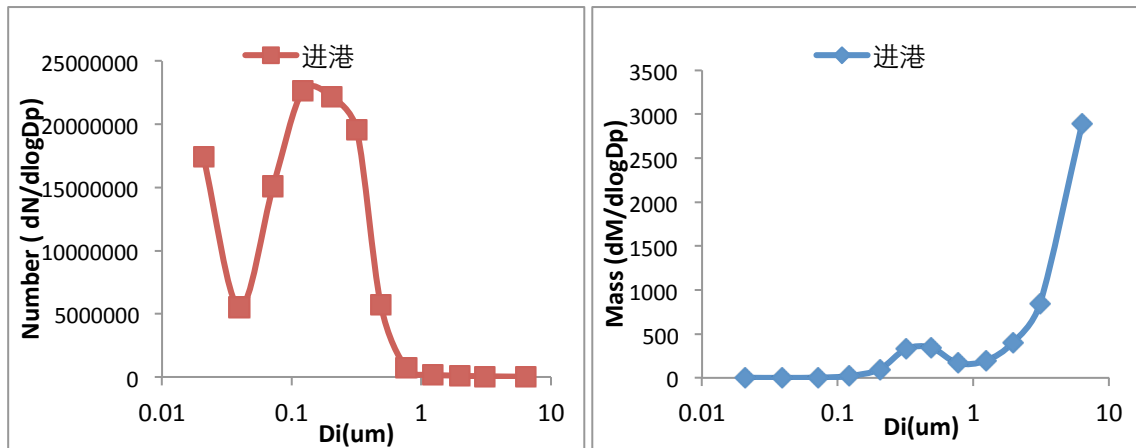
由图 4.5 船舶发动机在顺水和逆水时转速变化不大，但是由于水流情况不一样，

螺旋桨进程比不同导致逆水巡航时扭矩和功率系数较大，负荷相对较大。颗粒物排放增多。

4.2 粒径分布特性

颗粒物随粒径的分布情况是颗粒物的重要排放特性，图 4.6 为江苏段某货船在常见的三个工况下的颗粒物粒径分布情况。图中左部分为数量浓度的排放情况，右部分为质量浓度排放情况。





(a) 数量浓度粒径分布

(b) 质量浓度粒径分布

图 4.6 不同工况下颗粒物数量与质量粒径分布

由图 4.6 中 (a) 可以看出颗粒物的数量浓度在 $0.1\mu\text{m}$ 左右形成一个峰值, 这时大量的颗粒物主要是由于积聚模态下生成, 该模态下颗粒主要由无定形碳及吸附在其表面的碳氢化合物和少量无机化合物构成, 并以凝聚体的形式存在。且在最小粒径处有另外一个峰值, 该粒径范围内颗粒以核模态形式存在, 该模态下主要由挥发性物质组成, 同时由于设备限制无法测量到更小粒径下峰值的大小。由图 4.6 中 (b) 可以看出颗粒物的质量浓度在 $0.35\mu\text{m}$ 左右形成一个峰值, 这主要是由于该粒径范围内积聚模态颗粒物较多, 同时可以看出同是积聚模态形成的峰值, 基于质量的峰值处颗粒物直径较基于数量峰值处粒径大。在粒径进一步增大范围内颗粒物质量急剧增大, 该范围内颗粒物主要以粗模态形式存在, 同时在测量的时间段偶然的大颗粒脱落情况也会造成该处基于质量的突增。同时从图 4.6 (a) (b) 可以看出在巡航工况下基于数量和质量浓度在积聚模态下出现峰值的颗粒物直径较进出港工况的小, 这是因为巡航工况稳定, 燃烧较充分, 大颗粒减少。

4.3 船舶柴油机 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 排放特性

根据环境空气中微粒的空气动力学直径, 人们普遍能接受的环境空气中的微粒的定义为: PM_{10} 空气动力学直径小于 $10\mu\text{m}$; $\text{PM}_{2.5}$ 细微粒, 空气动力学直径小于 $2.5\mu\text{m}$; 超细颗粒-空气动力学直径小于 100nm 。粒径小于 $10\mu\text{m}$ 属于可吸入颗粒物, 颗粒可随人的呼吸沉积肺部, 甚至可以进入肺泡、血液。 $\text{PM}_{2.5}$ 粒径小, 富含大量的有毒、有害物质且在大气中的停留时间长、输送距离远, 因而对人体健康和大气环境质量的影响更大。在肺部沉积率最高的是粒径为 1 微米左右的颗粒物, 这些颗粒物在肺泡上沉

积下来，损伤肺泡和粘膜，引起肺组织的慢性纤维化，导致肺心病，加重哮喘病，引起慢性鼻咽炎、慢性支气管炎等一系列病变。而柴油机排放的主要颗粒物也在这个范围，因而发动机的 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 备受人们关注。

图 4.7 和图 4.8 为江苏段某货船在不同工况下 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的数量及质量浓度情况。

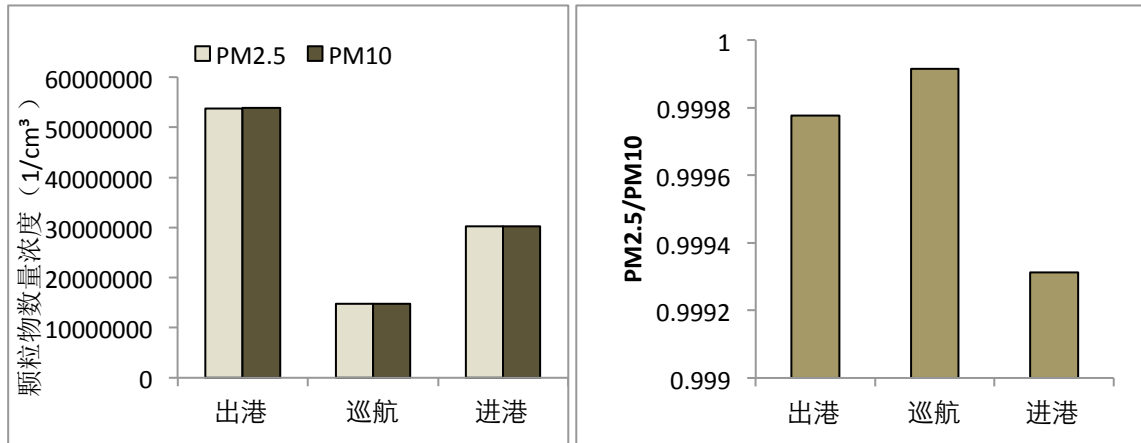


图 4.7 不同工况下 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 数量浓度情况

可以看出基于数量的颗粒物浓度中，巡航工况明显低于出港和进港工况，且 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 数值基本持平，这主要是由于 PM_{10} 的微粒中数量上绝大部分都是 $PM_{2.5}$ 的颗粒，从图 4.7 也可以清晰看出， $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 比重达到 99.9% 以上。

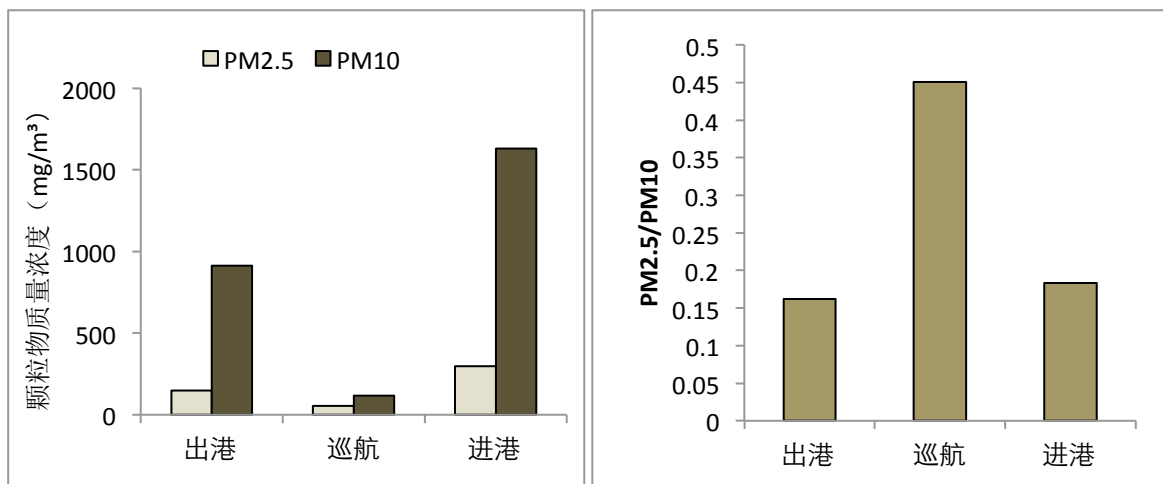


图 4.8 不同工况下 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 质量浓度情况

由图 4.8 可以看出，基于质量的颗粒物浓度在巡航工况同样小于进出港工况，且 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比重明显小于数量比重，这表明柴油机排气中含有大量的细小颗粒，这部分颗粒虽然在质量上不重不大但数量巨多，而这部分颗粒对人体的健康危害影响

最大。

4.4 小结

船舶柴油机颗粒物排放量较大，其中巡航工况下颗粒的排放量为 154.436mg/m³、0.018g/s 即 64.8g/h、6.71g/km、4.07g/kg。颗粒物排放量随负荷的增加而增加，逆水巡航的颗粒物平均排放量大于顺水巡航工况。船舶柴油机颗粒数量浓度峰值在 0.1um 左右，质量浓度峰值在 0.35um 左右。船舶柴油机颗粒物中 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 数量比例超过 99.9%，质量比例小于 50%。

5 内河船舶排放因子及清单研究

5.1 我国内河船舶分布情况

5.1.1 我国船舶的保有量及燃油消耗量

历年来我国机动船拥有量和牵引功率如表 5.1 所示, 根据统计数据, 2000 年以来我国机动车船的总数量呈缓慢下降的趋势, 总功率基本没有明显变化。

表 5.1 2000 -2010 年我国机动船拥有量和牵引功率

年 份	机 动 船			
	艘 数 (艘)	净载重量 (吨位)	载 客 量 (客位)	牵引功率 (千瓦)
2000	185018	42640605	1014013	1439743
2001	169329	45526726	1048915	1370221
2002	165936	48372587	945387	1433547
2003	163813	60745234	971514	1269607
2004	166854	75114059	961562	1197191
2005	165900	90756392	977846	1480381
2006	157805	98241489	1025861	1538957
2007	157544	106441173	1004546	1520924
2008	152247	111047702	994495	1564439
2009	149367	133384848	979384	1120381
2010	155624	168985654	1001395	1410719

另 2011 年全国水上运输船舶按内河船舶、沿海船舶、远洋船舶类型不同的构成情况见表 5.2

表 5.2 2011 年中国水上运输船舶构成 (按航行区域划分)

指标	计算单位	2011 年实绩
内河运输船舶		
运输船舶数量	万艘	16.58
净载重量	万吨	8779.99
平均净载重量	吨/艘	529
载客量	万客位	81.89
集装箱箱位	万 TEU	16.07
船舶功率	万千瓦	2771.27
沿海运输船舶		

运输船舶数量	艘	10902
净载重量	万吨	5780.47
平均净载重量	吨/艘	5302
载客量	万客位	16.9
集装箱箱位	万 TEU	20.32
船舶功率	万千瓦	1534.39
远洋运输船舶		
运输船舶数量	艘	2494
净载重量	万吨	6703.86
平均净载重量	吨/艘	26880
载客量	万客位	2.05
集装箱箱位	万 TEU	111.14
船舶功率	万千瓦	1644

表 5.3 是 2000 年以来，我国内河和近海船舶的柴油消耗量。

表 5.3 2000-2010 年中国机动船舶燃料消耗量

年份	总油耗（万吨）	年份	总油耗（万吨）
2001	1253	2006	1246
2002	1009	2007	1231
2003	1022	2008	1267
2004	969	2009	907
2005	1199	2010	1147

5.1.2 江苏省船舶情况

江苏省东濒黄海，长江和京杭大运河呈十字形贯穿全省，太湖平原和里下河平原水网密布，水运历来在江苏省的交通体系中占有重要地位，江苏省绝大部分城市历史上均是依托水运优势得以发展繁荣。南京港是全省最大的港口，亦为中国内河航运第一大港。水运是江苏省重要的货物运输方式。2011 年江苏省水路客货船运输量及燃油消耗量数据详见表 5.4、表 5.5、表 5.6。

表 5.4 2011 年江苏省水路客货运输量

指标	计算单位	总计	内河	沿海	远洋
一、客运量	万人	590	493	97	
1.机动船	万人	590	493	97	
2.驳船	万人				
二、旅客周转量	万人公里	15108	5497	9610	

1.机动船	万人公里	15108	5497	9610	
2.驳船	万人公里				
三、货运量	万吨	48702	35713	8911	4077
1.机动船	万吨	34792	21803	8911	4077
2.驳船	万吨	13910	13910	0	0
四、货物周转量	万吨公里	40957000	6941066	8846984	25168950
1.机动船	万吨公里	37785168	3769234	8846984	25168950
2.驳船	万吨公里	3171832	3171832	0	0

表 5.5 2011 年江苏省各市营业性水路客货运输量

	客运量 (万人)	旅客周转量 (万人公里)	货运量 (万吨)			货物周转量 (万吨公里)		
			合计	机动船	驳船	合计	机动船	驳船
合计	590	15108	48702	1828	2659	40957000	40569012	2967366
南京市	4	27	11292	10975	317	32220780	31940662	280118
无锡市	426	1519	121	121	0	238050	238050	0
徐州市	0	0	2548	470	2078	781570	144021	637549
常州市	80	328	1290	737	553	199800	127742	72058
苏州市	83	925	649	621	28	199596	186621	12975
南通市	0	0	4817	4607	210	3117663	3078813	38850
连云港市	22	8925	1398	1285	113	978611	943468	35143
淮安市	15	442	3438	2476	962	830146	598755	231391
盐城市	0	0	7707	4659	3048	1539503	1104270	435233
扬州市	39	125	3426	2231	1195	1135557	862313	273244
镇江市	0	0	742	182	560	184759	54129	130630
泰州市	0	0	8649	7004	1645	1664029	1290168	373861
宿迁市	0	0	1856	0	1856	446314	0	446314

表 5.6 2011 年江苏省营业性运输船舶燃料消耗情况

指标	计算单位	合计	客船	客货船	货船
船舶数	艘	49091	257	57	48777
船舶主机功率	吨	28847733	20929	25268	28801536
燃料消耗合计	千瓦	1789752	1544	12712	1775496

1.燃料油	吨	223149			223149
2.柴油	吨	1536036	1514	12464	1522058
3.汽油	吨	0	0	0	0
4.柴油	吨	0	0	0	0
其中：境外加油量	吨	883182	0	0	883182
1.燃料油	吨	192465	0	0	192465
2.柴油	吨	677240	0	0	677240
3.汽油	吨	0	0	0	0
4.柴油	吨	0	0	0	0
航行千瓦小时	千千瓦小时	11105651	9691	65980	11029980
换算周转量	千吨公里	4.1E+08	44246	475663	4.09E+08
平均每千千瓦小时消耗量	公斤	161.6	159.32	192.66	160.97
平均每千吨公里消耗量	公斤	4.37	34.9	26.72	4.34

5.1.3 广东省船舶情况

广东省截至 2011 年底，全省内河航道通航里程为 11849 公里，其中一级航道 64 公里，三级航道 761 公里、四级航道 279 公里、五级航道 323 公里、六级航道 614 公里、七级航道 2270 公里。全省拥有水上运输船舶 8657 艘，船舶功率 479.9 千瓦。截止 2011 年底，全省拥有船舶运力 8096 艘，1311 万载重吨，其中沿海及近远洋船舶 606 艘，运力 589 万载重吨，船舶平均吨位为 9720 载重吨，内河水路运输（含港澳航线船舶）船舶为 7490 艘，运力 722 万载重吨，船舶平均吨位为 964 载重吨。2011 年广东省交通运输生产情况、客货运输量及燃油消耗量数据详见表 5.7、

表 5.8、表 5.9。

表 5.7 2011 年广东省交通运输生产完成情况

指标名称	计算单位	2011 年实绩
一、货运量	万吨	21543
公路	万吨	166567
水路	万吨	48856
二、货物周转量	万吨公里	65776748
公路	万吨公里	21500355
水路	万吨公里	44276393
三、客运量	万人	496212
公路	万人	493618
水路	万人	2594
四、旅客周转量	万人公里	20923088
公路	万人公里	20826756
水路	万人公里	96332

表 5.8 2011 年广东省各市水路旅客周转量、货物周转量

	旅客周转量/万人公里	货物周转量/万吨公里
合计	96332	44276393
珠江三角洲地区小计	73581	24633366
广州市	7857	4225416
深圳市	12701	15539334
珠海市	20238	676867
佛山市	1919	425812
惠州市	1780	1490033
东莞市	2029	1343498
中山市	12496	242927
江门市	5384	490643
肇庆市	22	143379
顺德区	9155	55457
粤东地区小计	34	2030933
汕头市		1025435
汕尾市		
潮州市	34	990183
揭阳市		15315
粤西地区小计	18401	1731200
阳江市	8	346349
湛江市	17396	1039306
茂名市	997	345545
粤北地区小计	4316	813644
韶关市		436447
河源市	915	2210
梅州市	228	12320
清远市	3173	203373
云浮市		159294
不分地区小计		15067250

表 5.9 2011 年广东省各市运输船舶燃料消耗

	客船燃油消耗量/吨	货船燃油消耗量/吨
合计	37389	1491330
珠江三角洲地区小计	34422	632364
广州市	4796	226127
深圳市		
珠海市	15670	4960
佛山市	491	83794
惠州市	907	242516

东莞市		220
中山市	6372	47075
江门市	4051	15764
肇庆市	3	333
顺德区	2132	11575
粤东地区小计	9	173468
汕头市		129930
汕尾市		
潮州市	9	41820
揭阳市		1718
粤西地区小计	2701	68611
阳江市	10	10503
湛江市	2374	40372
茂名市	317	17736
粤北地区小计	257	100803
韶关市		97172
河源市	131	211
梅州市	7	2648
清远市	119	
云浮市		772
不分地区小计		516084

5.2 江苏段内河货运船舶排放因子及清单计算

假设：船舶每日行驶 12 小时，每日停靠岸一次，每次停靠岸耗时 10 分钟。

5.2.1 根据货物周转量计算排放清单

(1) 测试综合排放因子确定

综合排放因子的确定需先根据测试计算得到不同功率段的单船平均排放因子，结合调研数据得到江苏省船舶功率分布情况得到的功率分布因子，得到综合单位货物周转量污染物排放因子。

测试船舶单船排放因子计算公式：

$$EF(i) = \frac{\sum[EF(i, m) \times v(m) \times t(m)]}{\sum[v(m) \times t(m)]}$$

其中：EF 为污染物排放因子(g/km t)；i 为某种污染物，m 为操作工况(包括进港，出港，巡航)；v 为船舶行驶平均速度(km/h)；t 为某操作工况运行时间(h)。将排放因子除以船舶的实际载货量可计算得到各船舶单位货物周转量的排放数据。将所测试船舶按其额定功率进行分类平均得到如

表 5.10 所示的各功率段船舶单位周转量污染物排放量。

表 5.10 江苏段各功率段船舶单位周转量污染物排放量

功率段(kw)	CO (g/km t)	HC (g/km t)	NOx (g/km t)	PM (g/km t)
<100	0.083	0.057	0.346	0.012
100-150	0.043	0.015	0.227	0.009
150-200	0.043	0.005	0.274	0.011
>200	0.042	0.010	0.205	0.008

(2) 江苏省现有船舶功率分布

为了解内河中实际航行的功率分布，对船舶参数进行了调研，实地调研结合测试主要地点谏壁趸船通行船舶登记信息得到了共 612 艘船舶的功率参数信息，按照功率段的分布情况见图 5.1

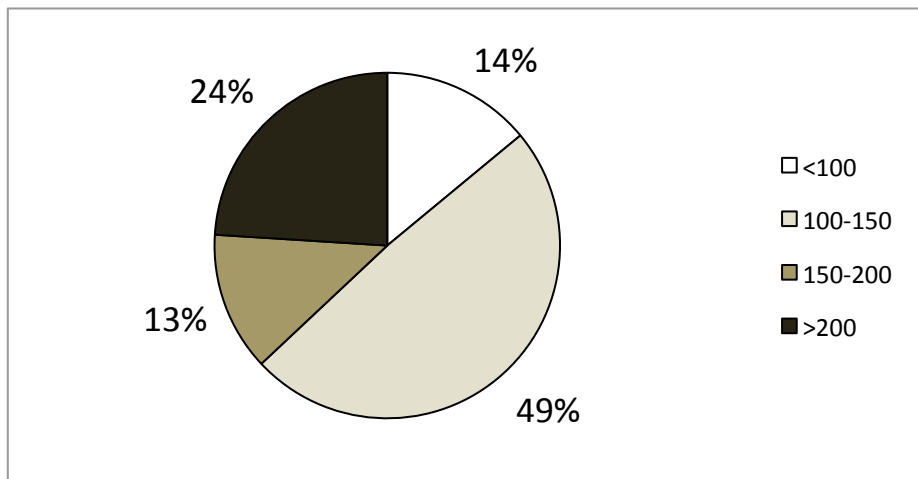


图 5.1 谏壁趸船实际调研功率分布

(3) 综合单位货物周转量污染物排放量

根据实际测试结果乘以功率分布因子得到综合单位货物周转量污染物排放量，详细数据见表 5.11。

表 5.11 江苏段平均单位货物周转量污染物排放量

CO(g/ km·t)	HC(g/km·t)	NOx(g/km·t)	PM(g/km·t)
0.049	0.018	0.245	0.009

根据江苏省各市营业性水路机动船货物运输量可得到江苏省 2010 年船舶污染物排放量。如表 5.12 所示

表 5.12 江苏省 2010 年基于周转量船舶排放清单

CO (t)	HC (t)	NOx (t)	PM (t)
--------	--------	---------	--------

合计	19698.694	7490.602	99269.496	3821.455
南京市	15509.112	5897.477	78156.535	3008.695
无锡市	115.588	43.953	582.491	22.423
徐州市	69.931	26.592	352.409	13.566
常州市	62.026	23.586	312.576	12.033
苏州市	90.616	34.457	456.648	17.579
南通市	1494.949	568.467	7533.637	290.013
连云港市	458.110	174.201	2308.599	88.871
淮安市	290.732	110.553	1465.111	56.401
盐城市	536.189	203.891	2702.070	104.018
扬州市	418.705	159.216	2110.019	81.227
镇江市	26.283	9.994	132.450	5.099
台州市	626.454	238.215	3156.950	121.529

5.2.2 根据燃油消耗计算排放清单

(1) 测试综合排放因子确定

测试船舶单船排放因子计算公式：

$$EF(i) = \Sigma[EF(i, m) \times FC(m) \times t(m)] / \Sigma[FC(m) \times t(m)]$$

其中：EF 为污染物排放因子 (g/kg 燃油)；i 为某种污染物，m 为操作工况 (包括进港，出港，巡航)；FC(m) 为某工况的燃油消耗量 (kg/h)；t 为某操作工况运行时间(h)。

表 5.13 江苏段测试船舶实际排放因子

功率段(kw)	CO (g/kg)	HC (g/kg)	NOx (g/kg)	PM (g/kg)
<100	27.271	4.913	40.997	5.032
100-150	11.251	3.577	62.92	2.198
150-200	8.9805	1.047	57.935	2.342
>200	12.356	3.097	60.979	2.514

(2) 功率分布

根据谏壁趸船实际调研数据可得功率分布图，见图 5.1。

(3) 由各功率段的排放因子及个功率段船舶比例可以得到最终排放因子

表 5.14 江苏段基于燃油消耗排放因子

CO(g/kg)	HC(g/kg)	NOx(g/kg)	PM(g/kg)
13.482	3.319	58.701	2.693

(4) 排放总量

根据江苏省年鉴提供的江苏省全省营业性运输船舶燃料消耗情况，及排放因子，

可以得到江苏省 2010 年基于燃油消耗的船舶排放总量，如

表 5.15

表 5.15 江苏省 2010 年基于燃油消耗的船舶排放总量

CO(t)	HC(t)	NO _x (t)	PM(t)
20521	5052	89347	4099

5.3 广东内河船舶排放清单计算

广东内河船舶排放清单计算

假设：(a) 货船每日行驶 12 小时，每日停靠岸一次，每次停靠岸耗时 10 分钟。

(b) 客船每日行驶 10 小时，每日停靠岸五次，每次停靠岸耗时 10 分钟。

由于没有广东省内河的燃油数据，故广东段的船舶排放总量只用基于活动量的方法进行估算。

5.3.1 根据货物周转量计算排放清单

(1) 测试综合排放因子确定

测试船舶单船排放因子计算公式：

$$EF(i) = \frac{\sum[EF(i, m) \times v(m) \times t(m)]}{\sum[v(m) \times t(m)]}$$

其中：EF 为污染物排放因子；i 为某种污染物；m 为操作工况（包括出港，逆流巡航，顺流巡航，进港）；v 为船舶行驶平均速度（km/h）；t 为某操作工况运行时间。将排放因子除以船舶的实际载货量可计算得到所测各船舶的单位货物周转量的排放数据。

表 5.16 广东段测试船舶单位周转量污染物排放量

测试船号	CO (g/人公里)	HC (g/人公里)	NO _x (g/人公里)	PM (g/人公里)
1	0.119	0.056	0.334	0.030
2	0.112	0.046	0.401	0.008
	CO (g/(km t))	HC (g/(km t))	NO _x (g/(km t))	PM (g/(km t))
3	0.064	0.021	0.239	0.016
4	0.037	0.006	0.063	0.004
5	0.031	0.008	0.232	0.009
6	0.030	0.008	0.247	0.00720

(2) 不同类型船舶单位周转量污染物排放量

将测试船舶单位周转量污染物排放因子按客船和货船进行分类平均得到客船和货船的单位周转量的排放因子

表 5.17 广东段基于活动量的排放因子

	CO (g/人公里)	HC (g/人公里)	NO _x (g/人公里)	PM (g/人公里)
客船	0.116	0.051	0.368	0.019
	CO (g/(km t))	HC (g/(km t))	NO _x (g/(km t))	PM (g/(km t))
货船	0.040	0.011	0.195	0.009

(3) 根据《广东省 2011 年公路水路交通统计分析报告》可得到 2011 年各市全社会水路货物周转量的万吨公里数据, 和 2011 年各市全社会水路旅客周转量的万人公里数据, 计算可得到广东省 2011 年客船和货船的总污染物排放量。

表 5.18 广东省 2011 年基于活动量的船舶排放总量

	CO (t)	HC (t)	NO _x (t)	PM (t)
客船	111.568	48.838	354.142	18.506
货船	17890.395	4854.659	86438.145	4076.855

5.3.2 根据燃油消耗计算排放清单

(1) 测试综合排放因子确定

测试船舶单船排放因子计算公式:

$$EF(i)=\Sigma [EF(i, m)\times FC(m)\times t(m)]/\Sigma [FC(m)\times t(m)]$$

其中: EF 为污染物排放因子 (g/kg); i 为某种污染物, m 为操作工况 (包括出港, 逆流巡航, 顺流巡航, 进港); FC(m)为某工况的燃油消耗量 (kg/h); t 为某操作工况运行时间(h)。所测船舶基于油耗排放因子数据见表 5.19:

表 5.19 广州段测试船舶实际排放因子

测试船号	CO (g/kg)	HC (g/kg)	NO _x (g/kg)	PM (g/kg)
1	23.317	10.867	65.367	5.936
2	25.023	10.201	89.284	1.793
3	17.378	5.869	65.368	4.465
4	12.647	2.024	21.396	1.512
5	15.217	4.108	114.998	4.406
6	15.994	4.315	130.338	3.791

(2) 不同船舶类型基于燃油消耗排放因子

将所测船舶排放因子按船舶类型进行平均, 得到不同类型船舶排放因子。

表 5.20 广东省客船货船基于燃油消耗排放因子

	CO (g/kg)	HC (g/kg)	NOx (g/kg)	PM (g/kg)
客船	24.170	10.534	77.325	3.865
货船	15.309	4.079	83.025	3.544

(3) 排放总量

根据《广东省 2011 年公路水路交通统计分析报告》得到广东省全省客船燃油消耗量、货船燃油消耗量。根据计算所得排放因子及燃油消耗量，可以得到广东省 2011 年基于燃油消耗的船舶排放总量。

表 5.21 广东省基于燃油消耗的船舶排放总量

	CO (t)	HC (t)	NOx (t)	PM (t)
客船	903.692	393.861	2891.109	144.495
货船	22830.660	6083.253	123818.270	5284.702

由于统计数据的局限，该客船与货船的燃油消耗量为广东省内河、沿海、远洋的消耗总量，且包含锚机、起货机、舵机、锅炉等一系列辅助机器燃油，故基于燃油消耗量的排放清单要远大于基于活动量的排放清单。

5.3 全国排放总量估算

5.3.1 排放因子确定

排放综合因子由江苏和广东所测共 18 艘船舶确定，所求排放因子（EF）由下式表示：

$$EF(i) = \sum[EF(i, j) \times B(j)] / \sum[B(j)]$$

EF 为污染物排放因子；i 为某种污染物；j 为测量船舶类型（包括广东货船、广东客船、江苏货船）；B 为燃油消耗量。

其中，各类型船舶排放因子如：

表 5.22 各类船舶排放因子

	CO (g/kg)	HC (g/kg)	NOx (g/kg)	PM (g/kg)
广东客船	24.170	10.534	77.325	3.865
广东货船	15.309	4.079	83.025	3.544
江苏货船	13.482	3.319	58.701	2.693

各类型船舶燃油消耗量如下：根据《广东省 2011 年公路水路交通统计分析报告》可得到广东省全省客船燃油消耗量为 37389t、货船燃油消耗量为 1491330t。根据《2011 江苏交通年鉴》可得到江苏省全省货船燃油消耗量为 1522058t。

由此可得到所测船舶的综合排放因子为：

表 5.23 全国综合排放因子

CO(g/kg)	HC(g/kg)	NOx(g/kg)	PM(g/kg)
14.506	3.779	70.820	3.123

5.3.2 历年内河船舶燃料消耗

由于内河船舶燃料为柴油，取用于船舶的柴油消耗量为内河船舶燃料消耗量。2000 年以来，我国内河和近海船舶的柴油消耗量详情见 5.1.1 节表 5.3。

5.3.3 历年排放总量

结合燃油消耗与排放因子得到历年的排放总量。

表 5.24 历年排放总量

年份	CO(万吨)	HC(万吨)	NOx(万吨)	PM(万吨)
2001	18.176	4.735	88.737	3.914
2002	14.637	3.813	71.457	3.151
2003	14.825	3.862	72.378	3.192
2004	14.056	3.662	68.624	3.027
2005	17.393	4.531	84.913	3.745
2006	18.075	4.709	88.241	3.892
2007	17.857	4.652	87.179	3.845
2008	18.379	4.788	89.729	3.957
2009	13.157	3.427	64.233	2.833
2010	16.638	4.334	81.230	3.582

6. 研究结论和政策建议

6.1 研究结论

随着环保部门减排力度的加大，船用柴油机的减排工作进入日程。我国对船用柴油机的污染总量以及实际工况下的排放特征的研究还处于起步阶段，本研究基于对江苏、广东省典型船舶排放特征，进行全国内河柴油船舶污染总量研究。

由于船用柴油机保有数量大，设备种类多，较难着手，研究困难，本课题结合实际数量，以及活动水平的调研，使用 PEMS 对江苏段 12 艘货船和广州段 2 艘客船及 4 艘货船进行实际工况下的排放特征研究，采用 SEMTECH 获得气态污染，以及地理位置信息，同时根据碳平衡法获得船用设备实际工况下油耗特征；由基于分级采样技术的电子低压粒子冲击器（ELPI）进行颗粒物采样测量，获得尾气中颗粒物的质量，粒径，以及数量的排放特征。

本课题研究得到的主要结论如下：

1) 船舶运行工况对排放影响较大，各类污染物在出港工况波动较大，CO、HC 和 PM 瞬时排放峰值都在进出港工况；巡航工况下基于时间的 CO、HC 和 PM 排放因子低于出港和进港工况，而 NO_x 排放因子则相反，且 NO/NO_x 比值也相对高于进出港工况；逆水巡航工况下基于浓度、时间和距离的 CO、HC 和 PM 排放因子相对较高，同时百公里油耗也较高。当负荷增加时基于时间、距离的 CO、HC 和 PM 排放因子增大；

2) 本研究得到基于燃油排放因子 CO 在出港、巡航、进港工况下分别为 30.9g/kgfuel、19.1g/kgfuel、57.3g/kgfuel；HC 为 6.3g/kgfuel、4.8g/kgfuel、8.6g/kgfuel；NO_x 为 76.9g/kgfuel、88.1g/kgfuel、75.4g/kgfuel；PM 为 9.8g/kgfuel、8.0g/kgfuel、20.4g/kgfuel。

3) 课题使用 ELPI 研究了船舶柴油机颗粒物的质量浓度和粒径分布特征。研究结果表明：颗粒物质量浓度粒径分布呈双峰分布，分别对应积聚模态和粗粒子模态；数量呈双峰分布，分别对应核模态和积聚模态；且颗粒物中 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 比例在数量上约 99%，而质量比例小于 50%。

4) 研究分别得到江苏省和广东省 2011 年的船舶排放总量。其中江苏省货船排放总量约 CO 为 2.0×10^4 吨、HC 为 7.5×10^3 吨、NO_x 为 9.9×10^4 吨、PM 为 3.8×10^3 吨，广东段货船排放总量为 CO 为 1.8×10^4 吨、HC 为 4.9×10^3 吨、NO_x 为 8.6×10^4 吨、PM

为 4.1×10^3 吨, 客船 CO 为 111.6 吨、HC 为 48.8 吨、NO_x 为 354.1 吨、PM 为 18.5 吨。

5) 研究得到全国 2010 年内河船舶排放总量 CO 为 1.7×10^5 吨、HC 为 4.3×10^4 吨、NO_x 为 8.1×10^5 吨、PM 为 3.6×10^4 吨, 2011 年的排放总量与 2010 年基本相当。

6.2 船舶柴油机排放管理政策建议

我国近海和内河船舶柴油机领域一直缺乏有效的排放法规控制, 实际船舶排放长期以来处于无监管的状态, 导致实际船舶排放严重, 特别是颗粒物排放严重, 为有效控制船舶柴油机的污染排放, 提出以下政策建议:

1) 加快我国新生产船舶柴油机排放标准的制定和升级工作, 尽快颁布实施船舶柴油机排放标准, 有效控制船舶柴油机的排放;

2) 建议建立船舶柴油机排放年检制度, 制定相关标准, 重点加强对在用船舶柴油机烟度排放的日常监督管理;

3) 船舶进出港工况相比巡航工况, 颗粒物排放尤其严重, 对港口区域的影响尤其严重, 因此应加强船舶在港口区域的排放控制;

4) 船舶柴油供应渠道复杂, 油品质量参差不齐, 硫含量高, 除直接影响颗粒物排放以外, 也影响到船舶柴油机排放控制技术进步, 应采取有效措施, 加强对船舶柴油机油品质量的监督管理, 建立有效的船用柴油监督管理机制;

5) 在有条件的地区, 考虑使用天然气(NG)燃料替代柴油后的技术政策, 在试点研究的基础上, 适当推广;

6) 内河和近海船舶主要用于经营, 船舶造价高, 使用寿命长, 建议对在用船舶柴油机, 进行 DPF 改造的可行性研究。

附录 实验测试船舶

江苏段：20120716



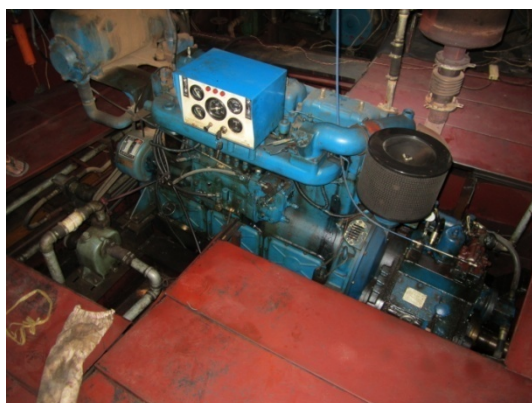
20120717



20120718



20120719-1



20120719-2



20120721



20120723



20120723-2



20120725



20120726-1



20120726-2



20120727



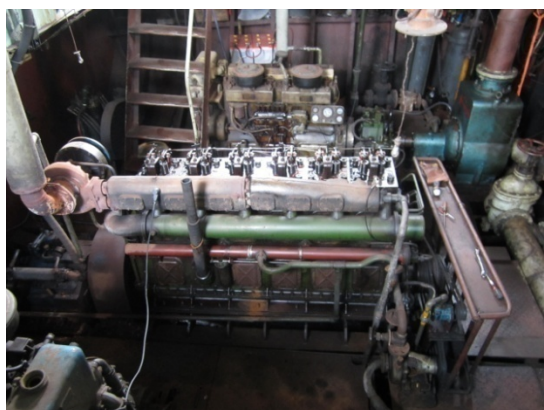
广东段：20121018



20121019



20121024



20121026



20121101-1



20121101-2

