



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

上海市船舶及港口 大气污染物排放情况调查

上海市环境监测中心

同济大学

二〇一四年十二月

本报告由能源基金会资助
报告内容不代表能源基金会观点

目录

1. 研究背景	1
1.1 上海港概述	1
1.1.1 地理位置	1
1.1.2 区位优势	1
1.1.3 区域范围	2
1.1.4 航道	2
1.1.5 2013 年港口生产活动情况	3
1.2 国内港口船舶大气污染控制现状	3
1.2.1 港口船舶大气污染排放及其环境影响	3
1.2.2 国内港口大气污染排放控制现状	4
1.3 国外港口船舶大气污染排放控制现状	8
1.3.1 国外港口船舶大气污染排放控制的发展历程	9
1.3.2 港口船舶大气污染排放控制管理	10
1.4 船舶排放测试研究现状	16
参考文献	88
2. 研究内容	17
2.1 研究内容	17
2.1.1 内河及近海船舶瞬态排放特性检测	17
2.1.2 上海港船舶燃料油供应情况调查	17
2.1.3 2013 年上海港船舶大气污染物情况调查	17
2.1.4 上海市船舶大气污染物排放控制对策研究	17
2.2 课题分工	17
3. 内河及近海船舶瞬态排放特性检测	18
3.1 试验船舶及设备	18
3.1.1 试验船舶	18
3.1.2 试验设备	21
3.1.3 气态物排放测试设备	21
3.1.4 颗粒物排放测试设备	22
3.1.5 仪器误差分析	25
3.2 实船排放测试结果及分析	27
3.2.1 小型集装箱船“沪环运货 3010”排放测试结果及分析	27
3.2.2 车客渡船“沪航 18”排放测试结果及分析	36
3.2.3 油污水处理船“沪环货 501”排放测试结果及分析	46
3.3 不同类型船舶排放测试结果综合对比	58
3.3.1 不同船舶基于燃油的排放因子对比	58
3.3.2 不同工况基于燃油的排放因子对比	59
3.3.3 小结	62
3.4 船舶排放实船测试总结	63
4. 上海港船舶燃料油供应情况调查	64
4.1 船舶燃料种类	64
4.2 上海港国际航行船舶燃油供应情况	65
4.3 上海港国内航行船舶燃油供应情况	66

4.4	小结	67
5.	上海港船舶大气污染物排放清单	69
5.1	2013 年上海港船舶航行概况	69
5.2	船舶大气污染物及 PM2.5 排放清单研究方法	70
5.3	船舶大气污染物排放清单计算范围	70
5.4	船舶排放因子和工况设定	74
5.5	上海港船舶 PM2.5 及主要大气污染物排放清单	75
5.5.1	国际航行船舶	75
5.5.2	沿海船	75
5.5.3	外港水域内河船舶	76
5.5.4	内河水域内河船舶	77
5.6	上海港船舶 PM2.5 及大气污染物排放总量	77
5.6.1	排放总量和一级分担率	77
5.6.2	二级分担率	79
	参考文献	错误! 未定义书签。
6.	上海港船舶颗粒物排放控制对策	81
6.1	减排政策概述	81
6.1.1	国内航行船舶	81
6.1.2	国际航行船舶	82
6.2	船舶进港换油	83
6.2.1	船舶进港换油的可行性分析	83
6.2.2	低硫油成本效益	83
6.2.3	油品转换的实例	84
6.3	大型船舶使用岸电	84
6.3.1	岸电使用的优势分析	84
6.3.2	岸电使用的弱势分析	85
6.3.3	岸电措施推行有待解决的几个问题	86

1. 研究背景

1.1 上海港概述

1.1.1 地理位置

上海港位于北纬 31°14′，东经 121°29′，中国大陆海岸线的中部，长江入海口南岸。上海港濒江临海，河川交织，长江三角洲及整个长江流域是上海港的腹地，其资源丰富，经济发达，人口稠密；上海港沿海北起丹东、大连，南迄湛江、防城，溯长江而上，可达长江沿岸各港，是长江沿线地区与南北沿海地区水上运输的交汇点和物流中转的枢纽港，沿黄浦江上溯，经蕴藻浜、苏州河可通内河航运网，接南北大运河；上海港港区内的铁路与沪杭、沪宁两条干线相连，连通全国的铁路网；港区道路与市区公路相连，并经 204、312、318、320 国道连通全国公路网；上海市区有虹桥国际机场和浦东国际机场，国内航线遍及全国，并开辟了通往美国、加拿大、日本、法国、意大利等国家或地区主要城市的固定航班。

1.1.2 区位优势

上海港得益于中国最大的经济中心城市上海雄厚的产业基础和城市综合功能的支持，得益于长江流域大城市群和七个经济圈，以及 28 个开放城市的支持。四通八达的航运干线，通向五大洲四大洋，“一环十射”的内河航道，连着广袤无垠的长江三角洲；铁路经沪杭、沪宁两条干线，通向全国，主要港区道路均与城市干道相通，并经两条国道和两条高速公路连接全国公路网。上海港不仅经济腹地辽阔，港口所在地上海市亦是全国最大的经济、科技、贸易、金融、航运、信息和文化中心。上海市进出口物资有 60%~70%通过港口进行中转，全港进出货物以煤炭、金属矿石、矿建材料、石油、钢铁及杂货等为主。中转腹地包括江、浙、皖、赣、湘、鄂、川 7 个省区，各省区经上海港中转的货物占上海港货物吞吐量的 50%左右。

上海港与世界 200 多个国家或地区的 500 多个港口有贸易运输往来，每天定期班轮直接通往欧洲、北美洲、非洲、大洋洲及东南亚国家或地区的港；先后与美国的西雅图、新奥尔良，日本的大阪、横滨，比利时的安特卫普，荷兰的鹿特丹等港口结成了友好港。近年来，上海港发展速度加快，港口建设日新月异，泊位不断增多，年吞吐量年年翻新。2005 年上海港货物吞吐量达 4.43 亿吨，居世界第一位，其中集装箱吞吐量达 1,809 万 TEU，居世界第三位；2010 年上海港货物吞吐量更是达到了 6.53 亿吨，集装箱吞吐量 2906.9 万 TEU，均居世界第一位。

2013 年，上海港货吞吐量 7.76 亿吨，同比增长 5.5%，全港内贸货物吞吐量

3.99 亿吨，同比增长 5.7%，外贸货物吞吐量 3.77 亿吨，同比增长 5.2%。全港集装箱吞吐量 3361.7 万标准箱，同比增长 3.3%，上海港引领各类中外船舶 67671 艘次，同比下降 0.1%。洋山深水港区共完成集装箱吞吐量 1436.48 万标准箱，同比增长 1.5%。累计靠泊集装箱船舶 12504 艘次，上海港集装箱和货物吞吐量已位居全球第 1 和第 2；宁波-舟山港集装箱和货物吞吐量位居全球的第 7 和第 1。

1.1.3 区域范围

上海港由外港和内河港组成，均分为水域和陆域两部分（见图 1-1）。

水域分为外港水域和内河水域，其中，外港水域为长江口和杭州湾北岸水域、黄浦江水域、闵行西界、崇明岛、洋山港区水域以及长江口外的长江口锚地水域、绿华山锚地水域；内河水域为上海市境内上述水域以外的所有内河航道涉及的水域。

陆域分为外港区陆域以及内河港区陆域，其中，外港区陆域包括长江口南岸港区、杭州湾北岸港区、黄浦江港区、洋山深水港区；内河港区陆域包括上海市境内的通航内河两岸港区。

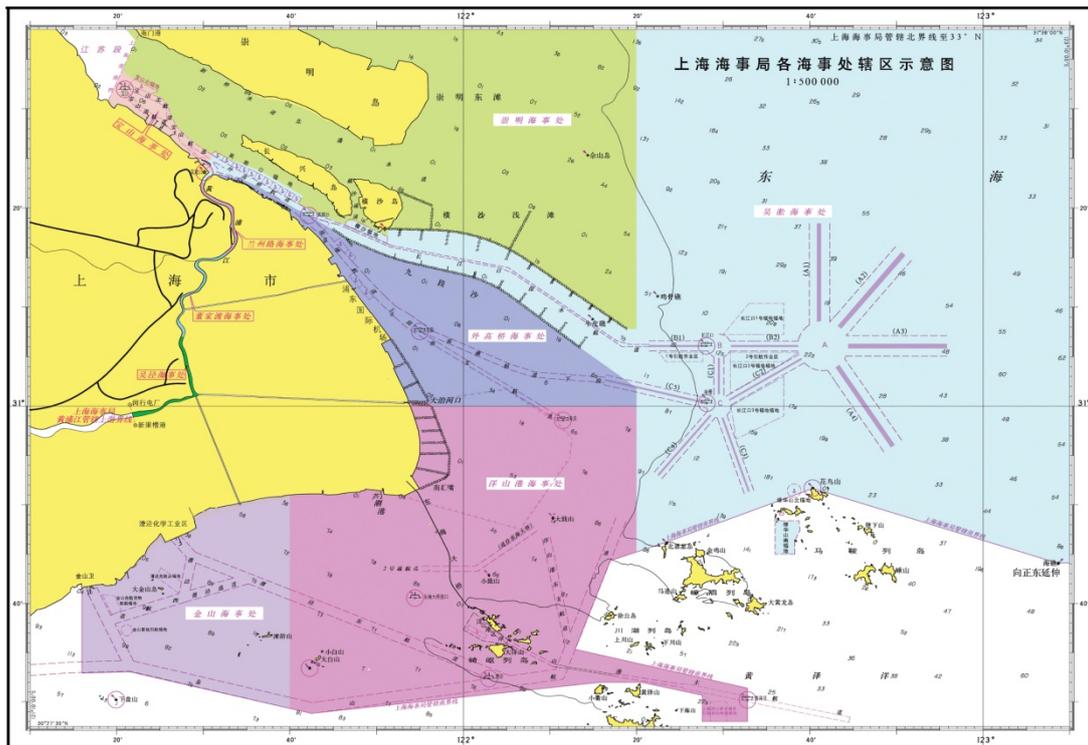


图 1-1 上海港外港与内河水域分布图

1.1.4 航道

上海港外港航道主要由长江口航道、杭州湾航道、黄浦江航道及洋山进出港

航道组成。长江口航道主要包括南港北槽航道、南港南槽航道、南支航道、外高桥内航道、宝山水道航道、宝山北水道航道、宝山支航道；长江口航道长江河口段上自江苏太仓徐六泾，下至海口，长约 170 公里。杭州湾航道北岸自南汇嘴至金丝娘桥通航水域，航道自然水深 7~8 米，航道宽度为 2000 米。黄浦江航道自吴淞口 101 灯浮至闵行电厂西界，全长 67.2 公里，航道水深 10 米以上的占 80%，全线可通航水深为 8 米。洋山进出港航道规划自崎岖列岛白节山灯塔南侧至小岩礁附近，设计通航水深为 15 米以上。

上海市境内内河航道 196 条，航道总里程 2252 公里。主要航道有：黄浦江上游航道，通航里程 23.39 公里；苏申外港线航道，通航里程 35.50 公里；太浦河航道，通航里程 14.36 公里；杭申线航道，通航里程 17.24 公里；平申线航道，通航里程 19.30 公里；吴淞江航道，通航里程 40.22 公里；淀浦河航道，通航里程 49.95 公里；苏申内港线航道，通航里程 46.69 公里；川杨河航道，通航里程 28.62 公里；大治河航道，全长 38.04 公里。

1.1.5 2013 年港口生产活动情况

2013 年，全港货物吞吐量呈现稳定增长的态势，上海市交通港口局 2014 年初公布最新统计数据，2013 年上海客运总量 63.56 亿人次，同比增长 2.1%；上海港货物吞吐量完成 7.76 亿吨，同比增长 5.5%；集装箱吞吐量完成 3361.7 万标准箱，同比增长 3.3%。全港货物吞吐量连创历史新高，集装箱吞吐量继续保持世界第一。

1.2 国内港口船舶大气污染控制现状

1.2.1 港口船舶大气污染排放及其环境影响

港口航运大气污染主要来自船舶航行运输过程的排放和港区码头作业排放。具体而言，包括船舶巡航、靠泊和装卸货过程的柴油机排放，港口集疏运车辆和港口机械设备的尾气排放，散装化学品装卸过程挥发，储罐、管道化学品泄漏挥发和港口加油站挥发等排放。

1.2.1.1 船舶航行运输过程排放

1) 船舶柴油发动机以及锅炉等辅助设备

船舶柴油发动机(包括主机、辅机)以及锅炉等辅助设备燃烧燃料产生废气，随着船舶的航行成为成为港口及通航区域最主要的大气污染物排放源。柴油机问世于 1892 年，如今已有超过 99%的商船以柴油机为动力源^[1]。但是，柴油机排放出的有毒有害污染物会对人类健康和环境造成严重的危害，主要包括 NO_x、

HC、CO_x、SO_x和烟尘等。NO_x、HC和O在阳光照射下会发生光化学反应生成臭氧(O₃)，同时产生烟雾，而且HC对人的口鼻和神经系统都有危害；CO₂、CO和HC均会引起温室效应，其中CO₂为最主要的温室气体；SO₂、NO₂则是形成酸雨的主要因素，NO₂对肺和心肌有损害；烟尘的主要组成物为一氧化碳、碳氢化合物和颗粒物(PM)，其中颗粒物带有较多的多环芳烃等致癌物，对港区人员及其周边居民的健康影响突出。在全球排放的CO₂中，虽然船舶排放的比例不大，但对在腹地狭窄的海峡、海滨城市而言其影响显著。随着世界贸易活动的增加，往返各大港口的船舶越来越多，船舶排放的温室气体应引起高度重视。

2) 船用含CFCS及其他卤化物的制冷剂和灭火剂

船舶目前使用的含CFCS及其他卤化物的制冷剂和灭火剂，由于技术性或非故意性泄漏造成污染。

3) 液散货物周转过程

运输散装货物的船舶在港口装卸、转运和运输过程中会产生粉尘；石油、化工品、液化气等有机化学品在转运、运输和存储过程中会挥发和溢出排放出VOCs等。

1.2.1.2 港区码头作业排放

在港口码头的各项作业环节中也会排放出相应的大气污染物，具体如下：

- 港口集装箱运输车——重型柴油货车尾气排放
- 非道路机械设备的动力——柴油机的废气排放
- 装卸操作过程的事故排放——船舶或储罐装卸过程的事故排放如散装液体化学品泄漏、易燃化学品燃爆等等，会造成有毒有害物质对陆域（包括大气）、水域的污染。

综上所述，港口船舶造成的大气污染来源众多、污染物和排放状态复杂。随着广大公众环境意识的提高和环境污染研究和管理工作的深入，港口船舶带来港区及沿岸环境空气污染问题已经引起有关部门的关注。

1.2.2 国内港口大气污染排放控制现状

1.2.2.1 港口分布

国内港口分为沿海港口和内河港口。沿海港口包括东北沿海港口、华北沿海港口、山东沿海港口、苏浙沪沿海港口、福建沿海港口、粤桂沿海港口、海南沿海港口和台湾省及港澳地区沿海港口约60个海港；内河港口包括黑龙江水系港

口、京杭运河水系港口、珠江水系港口、长江水系港口和黑龙江水系港口，涉及十多个省市约 108 个内河港。详见表 1-2 和表 1-3。

表 1-1 国内沿海港口一览

区域	港口名称			
东北沿海港口	丹东港	锦州港	大连港	营口港
华北沿海港口	秦皇岛港	黄骅港	唐山港	天津港
山东沿海港口	龙口港	张家埠港	威海港	日照港
	烟台港	青岛港	石岛港	岚山港
苏、浙、沪沿海港口	连云港港	南京港	张家港港	乍浦港
	南通港	上海港	舟山港	镇江港
	石浦港	宁波港	海门港	温州港
福建沿海港口	赛岐港	厦门港	福州港	东山港
	湄州湾港	泉州港	珠海港	水东港
粤桂沿海港口	汕头港	深圳港	江门港	湛江港
	西堤港	广州港	阳江港	霞海港
	汕尾港	中山港	海安港	北海港
	防城港			
海南沿海港口	海口港	洋浦港	三亚港	马村港
	八所港			
台湾省及港、澳地区沿海港口	高雄港	基隆港	台中港	澳门港
	花莲港	香港港		

表 1-2 国内内河港口一览

港口所属水系	地区	港口					
长江水系 港口	上海	上海县港	嘉定港	宝山港	奉贤港	南汇港	川沙港
		松江港	金山港	青浦港	崇明港	上海市区内河港	
	江苏	南通市港	张家港市港	大中港	东台港	海安港	滨海港
		建湖港	昆山港	兴化港	梧桐港	冉里山港	硤石港
		江阴港	高港港	盐城港	萧山港	雒城港	魏塘港
		常熟港	南京地方港	泰兴港	小浦港	周浦港	泗安港
	安徽	湖州港	平湖港	李家巷港	散兵港	合肥港	淮南港
		马鞍山港	芜湖港	铜陵港	蚌埠港		
	江西	安庆港	荻港港	池州港	武汉港	沙市港	枝城港
		九江港	南昌港	赣州港	宜昌港	襄樊港	利河口港
	湖北	武穴港	田镇港	黄石港	巴河港	兰溪港	鄂州港
	湖南	城陵矶港	岳阳港	常德港	湘潭港	茅草街港	衡阳港
		沅江港	津市港	株洲港	合川港	宜宾港	
	四川	万县港	涪陵港	重庆港	北碚港	奉节港	泸州港
	京杭运河水系 港口	杭州港	苏州港	常州港	吴江港	铜山港	淮安港
		邳州港	淮阴港	宜兴港	徐州港		
珠江水系 港口	三埠港	容奇港	东莞港	市桥港	太平港	梧州港	
	肇庆港	佛山港	石龙港	南宁港	柳州港	贵港港	
黑龙江水系 港口	哈尔滨港	佳木斯港	沙河子港	富锦港	同江港	黑河港	

1.2.2.2 港口大气污染和监管现状

我国港口仍处于不断发展之中，港口的吞吐量已超发达国家水平，港口产业的迅速发展也带了相应的环境问题。但是，由于在国内尚未建立有效的港口大气污染监测体系，国内各大港口城市均缺乏足够的数据来支撑评价港口的大气污染状况，在空气污染监管方面也缺乏相应的管理部门。

1.2.2.3 港口大气污染控制措施

1) 国内船舶污防法律法规

我国关于船舶污染防治法律法规最早为 1974 年 1 月颁布的《防止沿海水域污染暂定规定》，1982 年 8 月《国家环境保护法》颁布，成为第一个综合性保护海洋的基本法。1983-2003 年的二十年间，我国相继出台了一系列船舶污染防治的系列标准、规范、条例和规定，成为我国控制船舶排放污染重要的管理法律依据。详见表 1-4。

表 1-3 我国船舶防污染方面的法律法规

序号	年限	法规法律	备注
1	1974.1	《防止沿海水域污染暂定规定》	规定了船舶排放标准和排污文书格式
2	1982.8	《国家环境保护法》	第一个综合性的保护海洋的基本法
3	1983.4	《船舶污染物排放标准》	——
4	1983.9	《中华人民共和国海上交通安全法》	——
5	1983.12	《防止船舶污染海域管理条例》	废止
6	1986	《海船船舶结构与设备防污染规范》	——
7	1999	《我国人民共和国海洋环境保护法》	——
8	2003	《中华人民共和国海上海事行政处罚规定》	——

2) 我国绿色港口的发展现状^[5]

改革开放以来，我国经济发展和对外贸易取得了重大进步，带动了海洋运输市场和港口经济的迅速发展。港口在我国对外贸易和国民经济发展中发挥着越来越重要的作用。但是由于重发展、轻环保，生态破坏和环境污染日益凸显，反过来影响了港口健康有序发展。进入 21 世纪，港口经营发展的外部环境发生了重大变化，港区环境和生态保护提到管理和建设的议事日程。建设绿色港口逐渐成为改善生态环境，实现可持续发展的落脚点。目前，上海港、天津港、秦皇岛港、深圳港、营口港、青岛港等港口都朝着绿色港口的方向发展，取得了一些初步成效。2005 年初，上海港在我国率先开展绿色港口建设规划研究，积极探索“上海港环境保护管理办法”，及时把如何实践上海地区“生态港”建设列为重要研究课题。

天津港为了改善港区环境质量，采取了消除与限制并举的治理措施，优化港口布局，将港口分成北疆港区和南疆港区，形成“南北疆并举，黑白分家、南散北集两翼腾飞”的战略格局”，积极推进货场设施建设、大规模的港区绿化建设以及“北煤南移”战略的实施。

秦皇岛港制定了《秦皇岛港环境保护管理规定》，并通过制定煤尘、粉尘、污水、噪声等考核指标，将企业的经济利益与环境管理好坏直接联系起来，起到了良好的监督作用。

深圳港在老码头进行节能技术改造、新码头高起点建设的基础上，积极与国际先进港口开展环保合作，争创“环境友好型生态港”。

营口港通过绿化工作扩大规模、提高档次，积极有效的环境保护宣传工作，广泛的公众参与，合理的监督管理机制，树立建设生态型绿色港口的理念。

青岛港通过创新思路、创新方式，坚持科技兴港、人才强港，依靠科技进步和技术创新，走出了一条有青岛港特色的节能减排绿色发展的新路子。青岛港港口生态环境不断改善，空中不见黑烟尘，地上不见沙尘土，水中不见漂浮物。

3) 国内几个主要港口的污染控制措施

● 香港

香港对港口船舶从燃料、行驶工况和排放限值等方面实施了污染物排放控制措施。

(1) 使用低硫油——燃料规格受国际公约 MARPOL 附则 VI 规管，含硫量上限为 4.5% (2012 年收紧至 3.5%)，应用于所有在香港水域内操作的船只 (包括远洋、区域及香港本地船只)，这些含硫量要求并不严格 (重油含硫量上限平均等于 2.8%)，香港境内船用轻柴油含硫量 $\leq 0.5\%$ ；7 家远洋船公司签署了《乘风约章》，于 2001 年至 2014 年期间在香港“泊岸转油”，即使用低硫燃油 (含硫量 $\leq 0.5\%$)。

(2) 黑烟管制——包括船只排放过量黑烟检举员机制，船只排放过量黑烟造成滋扰属违法行为，检举员用“力高文图表”评估黑烟排放，如不符合规定会通报海事处。依据：远洋轮船适用《船舶及港口管制条例》香港法例第 313 章；本地船只适用《商船 (本地船只) 条例》香港法例第 548 章。

(3) 航速管制——维多利亚港+港外部分水域船只限速行驶。当船只低速航行，其引擎载荷会比高速时大幅下降，尽管航行时间延长，但整体燃油消耗和排

放皆下降。

(4) 改用电能——货柜码头绝大部分岸边吊机已用电力操作，柴油龙门式起重机正在改用电力或混合动力操作

(5) 清洁燃料——非道路流动机械及非道路车辆（例如：货车）必须使用超低硫柴油（含硫量 $\leq 10\text{ppm}$ 的柴油）

2001年，政府港务柴油船只使用超低硫柴油（含硫量 $\leq 50\text{ppm}$ ），2008年转用含硫量小于等于 10ppm 柴油，降低二氧化硫99%、可吸入悬浮粒子30%。

● 深圳

深圳港位于广东省珠江三角洲南部，珠江入海口伶仃洋东岸，毗邻香港。全市260公里的海岸线被九龙半岛分割为东西两大部分，分为西部港区和东部港区，西部港区位于珠江口东岸入海前缘，主要包括蛇口、赤湾、妈湾、东角头和福永等港区；东部港区位于南海大鹏湾西北部，主要包括盐田和沙渔涌、下洞等港区。

(1) 盐田国际集装箱码头污染控制和节能减排策略

盐田国际集装箱码头主要采用和推行了节能改造、电容改造、龙门吊混合动力、拓展绿色运输、海洋环境管理、混合动力吊车改造等措施。节能改造主要为龙门吊“油改电”，废气下降95%，噪声降低30%；目前厂区内有200台龙门吊，其中108台改成了电容，每年减少1600吨 NO_x ，35000吨 CO_2 ；龙门吊混合动力技术指将下降的势能转化成为电能，废气减少30%-50%；利用龙门吊能节省费用80%，黑烟状况明显改善；目前使用的33辆液化天然气车（LNG）车，降低99%CO排放、83.3%HC排放、80%-90%PM排放。

(2) 蛇口集装箱码头污染控制和节能减排策略

蛇口集装箱码头(SCT)年设计吞吐量600万箱，积极投入轮胎式龙门吊(RTG)“油改电”项目，已经实现RTG“油改电”达到100%，该项目每年可减少柴油消耗760万升，节约4000吨标准煤，减少二氧化碳排量8000吨，节约成本2500万元。SCT“油改电”项目顺利通过了国家财政部节能审查，获得国家发改委及财政部2010年度节能奖励资金；蛇口集装箱码头建设绿色港口的三大措施：①2007年开始实施油改电，节约成本；②船舶岸电工程与美国洛杉矶长滩港合作，投入1000万，为高低压船舶供电。¹③龙门吊，公司拥有85台“油改电”龙门吊，9000多万的总投资，5年内得到回报。

1.3 国外港口船舶大气污染排放控制现状

¹一次性投入有政府补助，运营过程中无补助，电费远远高于燃油，但是船舶使用岸电积极性不高，投入基本没有回报，需要靠政策法规来支持此项工程

1.3.1 国外港口船舶大气污染排放控制的发展历程

(1) 外港船舶

美国等发达国家的船舶大气污染排放控制的主要发展历程如下：

- 1996 年美国联邦环保署颁布了第一个船舶发动机规定；
- 1997 年，国际海事组织(IMO)《国际防止船舶造成污染公约附则六(MARPOL Annex VI)》获得通过，并在 2005 年 5 月 19 日生效。
- 1999 年，欧盟颁布了硫化物指令 (EU Directive 1999/32/EC – EU Sulfur Directive)，在北海和波罗的海建立硫氧化物控制区。
- 2003 年美国环保署制定了海洋船舶污染标准；洛杉矶港开始采用岸电技术，并向中海集团集装箱公司船舶提供岸电，2005 年对日本邮船公司提供岸电。
- 2004 年欧盟委员会指令对船舶发动机提出了标准 (2004/26/EC)，第二年又对油品提出了修订后的标准 (2005/32/EC，欧盟低燃油指令的修订，表 1-5)。
- 2005 年 7 月，国际海事组织 (IMO) 海洋环境保护委员会 (MEPC) 第 53 次会议对国际防止船舶造成污染公约附则六进行了修订。提出了北海硫氧化物排放控制区、硫氧化物清理设备导则、自愿性临时性船舶二氧化碳指标 (船舶效能设计指数的前身) 导则等。

表 1-4 欧盟关于船用燃料油含硫量限值规定及其实施日期

船舶位置	从下列日期开始，船上使用的各种船用燃料油的含硫量限值			
	2010年 1月 1日	2010年 7月 1日	2012年 1月 1日	2015年 1月 1日
在欧盟国家及已执行 2005/33/EC号指令的非欧盟国家的港口停泊的船舶	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
在排放控制区内，但没有停泊	1.50%	1.00%	1.00%	0.10%
在排放控制区外，但没有停泊	4.50%	4.50%	3.50%	3.50%

- 2006 年，洛杉矶港和长滩港与加州空气资源局，美国环保署等合作提出了第一个多港口全面的大气污染物减排计划，专注于健康风险和有害气体减排。同年，第一次泛太平洋港口清洁大气合作会议在洛杉矶召开。
- 2007 年，挪威建立了氮氧化物基金，对每公斤氮氧化物征税以成立基金鼓励降低氮氧化物的技术。
- 2007 年，加州空气资源局批准岸电标准，并提出至 2014 年 50% 的到港船舶

使用岸电。

- 2008 年，IMO 海洋环境保护委员 57 次会议对国际防止船舶造成污染公约附则 VI 再次进行了修正，允许设立 NO_x、SO_x 和 PM 或者同时包括上述三种污染物的排放控制区，提出加快二氧化碳指数的排放基准研究，并对氮氧化物的技术标准进行了修改。还提出了新造船舶发动机氮氧化物的三层控制标准，以及在用船舶的氮氧化物发动机标准。
- 2008 年国际港口协会（IAPH）提出世界港口气候倡议，共有 55 个港口在该倡议上签字。该倡议具体提出了加强信息共享，建立对碳足迹统计管理的框架，建立船舶环保指数并加强对这个指数的支持目标。
- 2010 年，第 60 次海洋环境保护委员会提出建立北美排放控制区。同时，世界许多主要港口实施了低硫油项目，包括纽约新泽西低硫油项目、纽约港低硫油和船减速计划以及中国香港的乘风约章（鼓励到港船舶采用 0.1% 低硫油）等。瑞典提出 2010 年减少港口 75% 氮氧化物排放，并对于采用先进技术的船舶给予港口费减免。
- 2011 年，费城提出了港口清洁空气战略，欧盟提出了港口区域船舶减排路线图，要求到 2050 年，欧盟各国港口区域内船舶减排 40%。2011 年第 62 次海洋环境保护委员会通过了有约束力的船舶效能设计指数。

（2）内河船舶

发达国家对内河船舶的大气污染防治同样重视。美国和欧盟自上世纪九十年代陆续推出了内河船舶柴油机排放限制标准。目前，欧盟已执行的标准包括适用于欧盟境内所有内河的《商用内河船舶发动机排放控制标准》（2004/26/EC），有分别适用于特定河流的排放限制法规，例如《莱茵河条例》（CCNR）、《博登湖条例》（BR）和《勃兰登堡航运条例》（BSO）。这些标准普遍比国际海事组织制定的远洋船舶排放控制标准更严格，且限制排放的有害物种类更多，例如：除了 NO_x 以外，还包括 CO、HC 和颗粒物等。

1.3.2 港口船舶大气污染排放控制管理

1.3.2.1 国际《MARPOL73/78》公约及修正案

1997 年 9 月，国际海事组织（International Maritime Organization，缩写 IMO）在伦敦通过了《MARPOL73/78 公约 1997 年议定书》，新增了 MARPOL73/78 附则 VI《防止船舶造成大气污染规则》，并于 2005 年 5 月 19 日起正式生效（我国于 2006 年 5 月 23 日加入，同年 8 月 23 日对我国生效）。2008 年 IMO 的海洋环

境保护委员会（Marine Environment Protection Committee, 缩写 MEPC）召开第 58 次会议，通过了《MARPOL73/78 防污公约附则 VI 修正案》（MEPC.176（58）决议修订），该附则 VI 修正案按照默认程序于 2010 年 7 月 1 日起生效。新修订的附则 VI 提出，将通过成员国递交提案至 IMO，对 SO_x、PM、NO_x 这三种船舶排放物分别或一并设置排放控制区来防止、减少并控制这三类污染物的排放。2009 年 7 月 17 日 IMO 的海洋环境保护委员会（MEPC, The Marine Environment Protection Committee）还通过了《MARPOL73/78 防污公约附则 VI 的 2009 港口国监督指南》（MEPC.181（59）决议）。

该附则及其修正案对于船舶废气中的硫氧化物和氮氧化物的排放含量作了限制，同时，禁止故意排放消耗臭氧层的物质，具体标准如下：

1) SO_x 的排放控制

根据 SO_x 的产生，《MARPOL73/78》公约附则 VI 规定船舶上使用的任何燃料油中硫含量的上限为 4.5%，在排放控制区（SO_x Emission Control Areas, 缩写 SECA）这样的特殊地区（如地中海），燃油含硫量不得大于 1.5%^[6]。欧美、日本一些经济高度发达的国家对柴油机排放物的限制更为苛刻，其处罚也尤为严厉。船舶必须选择安装废气净化系统或者采用其他的技术方法来限制硫氧化物的排放。

附则 VI 2008 年修正案的主要变化是渐进地减少船舶废气的含硫量。在硫氧化物排放控制方面，《MARPOL 73/78 公约》附则 VI 修正后的变化主要是：全球任何燃料油中硫含量的上限从现在的 4.5%降低到 2012 年的 3.50%；然后，到 2020 年逐步降到 0.50%，视 2018 年完成的科学性评估而定。到 2010 年 7 月 1 日，硫排放控制区域的限制将从现在的 1.50%降到 1.00%，并于 2015 年降到 0.10%^[7]。如表 1-6。

表 1-5 任何燃料油中硫含量的限值^[8]

限制值		目前规定	修正案规定	生效日期
地	排放	15,000 ppm	10,000 ppm	2010 年 3 月 1 日
区	控制区	15,000 ppm	1,000 ppm	2015 年 1 月 1 日
地	全球	45,000 ppm	35,000 ppm	2012 年 1 月 1 日
区		45,000 ppm	5,000 ppm	2020 年 1 月 1 日

2) NO_x 的排放控制

《MARPOL 73/78 公约》附则 VI 修正案定义了包括三个级别在内的 IMO 船用柴油机排放标准体系。正在执行的附则 VI 的相关内容被作为 Tier I 标准纳入其中，新增加了更加严格的 Tier II/III 标准，同意通过两阶段实现减排目标：即 2011

年达到 Tier II 要求，2016 年在排放控制区域达到更严格的 Tier III 要求（表 1-7）^[9]。

公约附则 VI 还包括对柴油机进行必要改进或安装降低 NO_x 排放的装置的要求，并于第一次换新检验 12 个月后或改进方法经认可后的日期之前完成。为确保柴油机制造商、船东和主管机关遵守修订的标准，公约附则 VI 还规定了船用柴油机试验、检验和发证强制程序。

表 1-6 MARPOL 73/78 附则 VI 中 NO_x 限值^[9]

	$n_N/(r/min)$	NO _x /g/(kW·h)
Tier I	< 130	17.0
(2005年5月19日生效,全球 实施)	130~2 000	$45.0 \cdot n_N^{-0.2}$
	> 2 000	9.8
Tier II	< 130	14.4
(2011年全球实施)	130~2 000	$44.0 \cdot n_N^{-0.23}$
	> 2 000	7.7
Tier III	< 130	3.4
(2016年排放控制区域 (ECAs)实施)	130~2 000	$9.0 \cdot n_N^{-0.2}$
	> 2 000	1.96

3) 损耗臭氧物质的排放控制

附则 VI 还禁止故意排放损耗臭氧层物质，包括卤烃和氟氯烃的排放。禁止所有船舶安装含有损耗臭氧层物质的新设备。但是，在 2020 年以前，允许安装含有氢化氯氟烃的新设备。

4) 油船、油码头的油气回收控制

在《MARPOL73/78 公约附则 VI》生效时，IMO 海洋安全委员会（MSC）制定了安全标准：《关于油气排放控制系统标准》（MSC/Circ.585 号通函），供各缔约国遵照执行。公约附则 VI 第 15 条（3）规定：“当事国的政府，应确保根据本组织制定的安全标准（即指上述标准）批准的油气回收系统被配备在指定港口和码头中，其运行是安全的，并能避免造成对船舶的不当迟延。”公约附则 VI 第 15 条（5）对缔约国船舶提出了要求，规定：“按本条规定接受油气排放控制的所有液货船，应配备由主管机关根据本组织制定的安全标准批准的油气回收系统，并在装此种货物期间使用此系统。”

除此之外，根据《MARPOL73/78 公约》附则 VI 的要求，所有 400 总吨及以上国际航行的船舶、固定式和移动式钻井及平台到时应取得《国际防止大气污染证书或国际防止空气污染符合证明》（简称 IAPP 证书）。海事部门将检查船舶是否配有 IAPP 证书，对未持有 IAPP 证书的国际航行船舶，将作为港口国进一步监督检查的依据，或进行滞留。证书自签发日期起有效期五年，需进行一年一

次的年度检验和二年半一次的中间检验以及五年到期的换证检验。

对于初次检验的 2000 年 1 月 1 日之前建造的船舶，检验的内容主要是对消耗臭氧层物质和硫氧化物的控制。对于 2000 年 1 月 1 日之后建造的船舶，主要检验的内容除了对消耗臭氧层物质和硫氧化物的控制外，还应检验是否具备柴油机 EIAPP 证书（Engine International Air Pollution Prevention Certificate）和按照 MEPC.76(40)要求进行检验的船用焚烧炉型式认可证书。要取得 EIAPP 证书，必须进行 NO_x 排放量测定。对于 2005 年 5 月 19 日之后加装的燃料油，船舶必须保存所有的加油记录单，并且必须符合附则 VI 规定的要求^[10]。

可以发现，MARPOL 附则 VI 及其修正案为充分减少船上空气污染物排放，解决地方性、国家性、全球性环境问题迈出了重要的一步，国际组织 IMO 等对于防止船舶大气污染是非常重要的。

1.3.2.2 国外港口船舶大气污染控制计划

(1) 国际港口协会清洁空气计划

国际港口协会（IAPH, the International Association of Ports and Harbors）编制了《IAPH 清洁空气计划（Tool Box for Port Clean Air Programs）》。该计划指出了港口区域应该优先控制的主要大气污染物，并从航运和港口集疏运（包括卡车和公路运输；铁路）等方面提出了控制对策。具体措施包括：对于远洋船只，主要是船只减速、操作技术提升、使用清洁燃料、排放控制技术、岸边电力；对于港口船只：主要是发动机置换为达到清洁燃料标准的产品、使用清洁燃料、排放控制技术；电气化（包括岸边电力和混合）；对于货物装卸设备、重型和轻型车辆、铁路机车，主要是设备更换至达到清洁标准、操作技术提升、使用清洁能源、排放控制技术、空闲减量化技术^[11]。

(2) 美国圣佩德罗港口清洁行动计划

洛杉矶港于 1972 年在全美港口最早建立港务环保部门——环保处，它是港口发展规划管理的重要部门之一，其主要职责是对建设项目开展环境影响评估。洛杉矶—长滩港曾经是美国空气质量最差的地区。加州空气资源局（California Air Resources Board，缩写 CARB）预测 70%潜在的癌症风险来源于柴油颗粒（Diesel Particulate Matter，缩写 DPM）^[12]。2006 年 3 月，洛杉矶港和长滩港达成重要的合作关系，同时联合南海岸空气资源管理部门，加州空气资源局和美国环保署第 9 区共同合作来改善区域环境空气和南加州居民生活质量。这一个合作计划形成了圣佩德罗港口清洁行动计划。港口清洁行动计划（Clean Air Action

Plan, 缩写 CAAP) 的目的在于减少港口操作带来的健康风险, 加速已有减排手段的实施, 分别建立项目标准和来源标准。在标准制定上又分成三个层次, 分别为源头特定表现标准 (Source Specific Performance Standards), 项目特定标准 (Project Specific Standards) 和圣佩德罗港标准 (San Pedro Bay Standard)。

圣佩德罗标准对健康风险降低提出了确切的要求: 到 2020 年, 在位于港口排放源和港区内的社区, 降低 85% 由于港口 DPM 排放引起的居民癌症风险。并设定了 2014 年、2023 年需达到的 DPM、NO_x 和 SO_x 的减排量^[12]。项目特定标准对港口每个独立的项目给出了特别的要求, 特别针对健康风险提出了法规评估和缓解措施。源头特定表现标准里, CAAP 又从以下的分类制定了更细则的要求: 重型车辆, 远洋船, 货物操作设备, 港口操作船, 铁路机车。每一项精细到具体时间和具体数值, 提供了可靠而详实的减排计划。

从实施手段上来看, 主要的方法是将控制措施写入租赁条约²并使用减轻影响的方法, 这在加州环境影响评估 (California Environmental Quality Act, 简称 CEQA) 过程中也是不可或缺的。除此以外, 税收优惠, 资金激励, 自愿行动, 额度贸易, 政府贷款保证等也是常见的实施手段。经证明, 其中租赁规定、税收优惠、CEQA 减轻和资金激励是最有效的方式。同时, 港口还建立了科技提高小组来评估具有潜力的项目和能够被证明有效减排的技术。同时还包括基础设施和操作效率的评估。2007 年起, 港口将与租户和铁路合作来发展他们的计划从而达到 CAAP 标准。为了大幅减少货车的柴油排放, 港口计划五年内从港口站点清空“肮脏”货车。同时, 港口也积极建立新的伙伴关系来保障资金来源。

(3) 西北港空气战略

位于美国西北角的西雅图与塔科马港和加拿大英属哥伦比亚省的温哥华港目前满足联邦、州和地方政府的环境标准。随着海上作业的增加, 美国西北港通过自愿和合作方式来降低空气污染物排放。通过普捷海洋论坛 (Puget Sound Maritime Air Forum), 西北港主动降低柴油燃烧污染物的排放, 降低海洋相关排放的负面影响从而保护环境和公共健康。三个港联合开展西北港清洁空气战略, 这个合作计划目的在于大幅降低柴油颗粒物和温室气体排放。该计划以完整而全面的普捷海洋空气排放清单为基本, 目标在 2010 年前降低船舶排放的 70% 颗粒物和运输操控仪器的 30% 颗粒物并着手控制港口相关的货车、机动车和其他船只的排放。

²地主港模式中最主要的控制措施之一, 是指将排放量要求写入租赁规定的方法, 令其具有法律效力。

到 2010 年，常驻这三个港口的运输船和邮轮需达到的颗粒物减排量要等同使用清洁蒸馏燃料。到 2015 年，远洋船需符合国际海洋组织规定。西北港完全支持美国对 IMO 的提案，该提案正策划将远洋船在美国或加拿大沿岸操作时的燃料硫含量减至 0.1%或更少。如果新标准未被采纳，港口将继续为这些目标而努力，并同时考虑到科技和燃料可用量在过程中会影响运输能力。对于货物操作设备（Cargo Handling Equipment，缩写 CHE），主要通过使用超低含硫燃料、生物柴油混合的控制技术来降低尾气排放。

（4）纽约新泽西港清洁空气创新计划和港口空气管理计划

纽约新泽西港是北美东海岸最大的港口，坐落于美国的东北部，是美国环保署设立的无 NO_x 排放地区之一。纽约新泽西港商务部是六个海洋货物装卸码头的地主。该港口承担了美国最大的货物运输消费需求，商务部致力于贸易目标中的环境责任，努力提高空气质量。纽约新泽西港采取的提高空气质量的战略包括遵守法规和自愿主动方式并开展环境管理系统来监督法规的执行情况。

为了满足日益增长的货运需求，港口商务部计划在未来的十年投资近 20 亿重新配置现有码头，深化港口通道，改善内河泊位。这项投资将创造一个有效率和具有成本效益的港口，同时也能提高空气质量，节约能源。这些改进还包括安装基础设施，支持电动再生起重机，增强区域铁路能力。此外，租户还大力投资电动起重机、港口现代化设备和更清洁燃料来改善空气质量。商务部以及租户、公共机构和私人伙伴合作开发新的清洁设备，如柴油颗粒物过滤器和混合拖拉机。

（5）鹿特丹港 Rijnmond 区域空气质量管理行动计划

荷兰 Rijnmond 地区的空气质量在过去 30 年内有所改善，然而根据最新数据，其排放量的增加超过了限定值。预测显示，如果不采取行动，可吸入颗粒(PM)和 Rijnmond 地区的 NO_x 排放量将超过欧洲空气质量标准。为此，Rijnmond 执行理事会与政府当局合作，制定出配套措施以减轻在 Rijnmond 地区的空气污染，即 Rijnmond 区域空气质量行动计划。该方案包括：鹿特丹空气质量办法，理事会制定的空气质量管理计划，鹿特丹都市区制定的空气质量方法和鹿特丹港务局空气计划。

通过高层管理指导委员会，由来自所有与会各方领导组成一个委员会委托 Rijnmond 环保署开发 Rijnmond 区域空气质量管理行动计划。该项目与行政当局和其他各方，如商界人士，密切协调。为建立控制措施，最高管理层指导委员会组织了五个任务组，具体为道路交通，航运，铁路，工业和家庭。战略的目的在于用当地和区域的办法来改善空气质量。其中当地策略包括为远洋船提供海岸电

力，城市中心设立低排放区。区域策略包括推动欧盟制定更严格的标准。

(6) 悉尼港绿色港口规划

澳大利亚联邦政府下设环境保护管理局，制定各种环保条例的法令，必须执行联合国海洋法和伦敦法，从某种程度上讲，环境部门对港口规划和建设具有“一票否决权”^[13]。在对于能源的使用上，悉尼港特别限制柴油使用，采取当地能源供应（混合热和电），使用减少温室气体排放的燃料用于港区货物操作设备、车辆和其他运作需求（比如液化丙烷气体，液化天然气，压缩天然气，燃料电池和生物燃料），提供从岸到船的电力连接。从交通方式上，悉尼港鼓励港区内员工减少私家车使用，提供自行车便利来降低温室气体排放。对于操作车辆，选择混合动力燃料或能源高效型车辆，合理安排货车进出港防止由于停滞带来的温室气体排放，并通过铁路或水路加大货物运输^[14]。港务局在港口规划、建设中非常重视环境管理，鼓励创新，制定切实可行的措施保障环境利益最大化，在取得经济利益的同时，取得最好的环境效益。

以上对于国际上五大著名港口/区在绿色规划上，特别是在船舶大气污染物排放的控制上都采取了针对自己排放特点的措施和标准。他们的共同点有都成立了专门的研究小组协助当地政府制订大气污染清洁计划，具体有使用清洁燃料，制订严格标准和实施指南等。这些对我国开展港口船舶大气污染控制有很重要的借鉴意义。

1.4 船舶排放测试研究现状

实船测试是研究船舶发动机瞬态排放，获得船舶及港口排放清单的重要途径。目前针对船舶发动机排放测试的限制标准主要是 ISO8178 以及《MARPOL 73/78 公约》附则VI，以上两者中的排放标准和测试方法均是针对新造船舶柴油机的台架试验而言的。然而船舶在实际航行中发动机污染物的排放还受到船龄、航行环境、航行速度、载重量等诸多因素的影响，因此为了得到船舶实际运行过程中的污染物排放量及排放因子，要对船舶进行实船排放测试。

综合国内外实船测试研究现状，所测船舶类型从客轮到轮渡以及远洋船舶均有涉及，发动机包括主机、辅机以及锅炉等。测试工况基本上分为两大类，一类为船舶实际航行工况，包括机动、巡航和进离港；另一类为按照国际标准 ISO8178 及《MARPOL 73/78 公约》附则VI中对于台架试验规定的测试循环来选定实船测试工况，对于某些工况点按实际情况进行了调整。

2. 研究内容

2.1 研究内容

2.1.1 内河及近海船舶瞬态排放特性检测

以上海市内河及近海船舶为主要研究对象，主要研究：

1) 通过对国际及国家标准的研究，结合上海市内河及外港的实际条件，探讨实船排放测试方案；

2) 进行不同用途、不同航行特征船舶在特定水域的瞬态尾气（包括气态排放物和颗粒物）排放特性试验，分析内河及近海船舶在不同活动水域（内河及近海）、使用不同品质的燃料、不同运行工况（进离港、巡航、停泊、装卸货等工况）的瞬态排放特性。

2.1.2 上海港船舶燃料油供应情况调查

开展上海港水域船舶燃油供应情况调查，梳理上海港船舶供油体系，抽取上海港内河航行船舶燃油并进行含硫量分析。

2.1.3 2013 年上海港船舶大气污染物情况调查

以 2013 年为基准年，在 2011 年上海港大气污染物排放清单研究的基础上，调查上海港船舶大气污染物排放情况。

2.1.4 上海市船舶大气污染物排放控制对策研究

针对上海港排放现状结合上海市清洁空气行动计划、上海市大气污染防治条例，提出适应上海港的船舶大气污染物控制对策

2.2 课题分工

本课题内河及近海船舶瞬态排放特性检测部分由同济大学负责；

上海港船舶燃料油供应情况调查、2013 年上海港船舶大气污染物情况调查及上海市船舶大气污染物排放控制对策研究由上海市环境监测中心负责。

上海港港政管理中心、上海海事局和上海市地方海事局作为外协单位，配合课题开展船舶污染物调查以及对策可行性分析等工作。

3. 内河及近海船舶瞬态排放特性检测

3.1 试验船舶及设备

3.1.1 试验船舶

本报告于 2014 年 1 月 26 日、5 月 29 日、8 月 7 日分别测试了一艘小型集装箱船“沪环运货 3010”、一艘车客渡船“沪航 18”，以及一艘油污水处理船“沪环货 501”，船舶全貌如图 3-1 至 3-3 所示。测试对象均为船舶的单个主机。其中，小型集装箱船“沪环运货 3010”建造于 2007 年，总吨位为 409 吨；车客渡船“沪航 18”和油污水处理船“沪环货 501”建造于 2005 年，总吨位分别为 1326 吨和 497 吨。测试时船舶均为满载。其余测试船舶的基本信息如表 3-1 至表 3-3 所示。



图 3-1 小型集装箱船“沪环运货 3010”



图 3-2 车客渡船“沪航 18”



图 3-3 油污水处理船“沪环货 501”

表 3-1 小型集装箱船“沪环运货 3010”主要参数

参数	值
船舶建造日期	2007 年 5 月 22 日
主机型号	斯太尔 WD615.61C02K
主机制造日期	2007 年 1 月 15 日
主机排量	9.7L
主机额定功率	120kW×2
主机额定转速	1500r/min
主机燃油	0 号普通柴油
净吨位/总吨位	229/409t

运行工况	离港、巡航、进港
航行路线	虎林路综合码头至老港码头
巡航航速	不高于 8 节（约合 14.8 km/h）

表 3-2 车客渡船“沪航 18”主要参数

参数	值
船舶建造日期	2005 年 12 月 6 日
主机型号	MAN 6L20/27
主机制造日期	2005 年 6 月 1 日
主机排量	51L
主机额定功率	600kW×2
主机额定转速	1000r/min
主机燃油	0 号普通柴油
净吨位/总吨位	795 吨/1326 吨
运行工况	离港，巡航，进港
航行路线	往返长兴岛与横沙岛
巡航航速	不高于 12 节（约合 22.2km/h）

表 3-3 油污水处理船“沪环货 501”主要参数

参数	值
船舶建造日期	2005 年 5 月 20 日
主机型号	康明斯 KTA19-M500
主机制造日期	2004 年 12 月 1 日
主机排量	19L
主机额定功率	339kW×2
主机额定转速	1744r/min
主机燃油	0 号普通柴油
净吨位/总吨位	278 吨/497 吨
运行工况	离港、巡航、进港
航行路线	往返军工路水产三批环卫码头和洋山港码头

3.1.2 试验设备

实船排放测试系统主要包括：气态物测试设备、颗粒物测试设备、GPS、排气流量计、附属传感器等。主要测试仪器和测试参数如表 3-4 所示。

表 3-4 试验用主要设备和测试参数

试验设备	测试参数	
OBS-2200 气态物排放测试仪	常规气态物排放	NO _x
		THC
		CO
		CO ₂
EEPS-3090 粒径仪和 379020 型旋转盘稀释器	颗粒浓度和粒径分布	
ELPI 静电低压撞击器和 DI-2000 射流稀释器	颗粒浓度和粒径分布	
GPS	船舶位置及速度	
排气压力传感器	排气压力 (kPa)	
排气温度传感器	排气温度 (k)	
环境压力传感器	环境压力 (kPa)	
环境温度传感器	环境温度 (k)	
环境湿度传感器	环境湿度 (%RH)	
皮托管流量计	排气流量 (m ³ /min)	

3.1.3 气态物排放测试设备

气态物测试设备为日本 HORIBA 公司的 OBS-2200 气态物排放测试仪，该测试仪主要由主机、电源控制单元 (PCU)、外部信号输入单元 (EIU)、皮托管流量计、附属传感器和控制电脑等组成，实船测试时的仪器布置如图 3-4 所示。



图 3-4 OBS-2200 气态物测试仪

OBS-2200 能够测试船舶尾气排放中的 CO、CO₂、THC、NO_x 四种气态排放物，其测试单元由测量 CO、CO₂ 排放的 NDIR 分析仪，测量 THC 排放的 FID 分析仪和测量 NO_x 排放的 CLD 分析仪组成。分析仪的测量数据和传感器的数据通过控制软件储存在控制计算机中，软件根据 GPS 传感器测量的速度和经纬度信号绘制出船舶的航行路线，内置的程序可以通过气态排放物的体积排放浓度和流量计算出污染物的质量排放和燃油消耗量，结合航速数据可以进一步得到船舶各气态污染物的单位里程排放量。OBS-2200 气态物测试仪的连接示意图如图 3-5 所示。

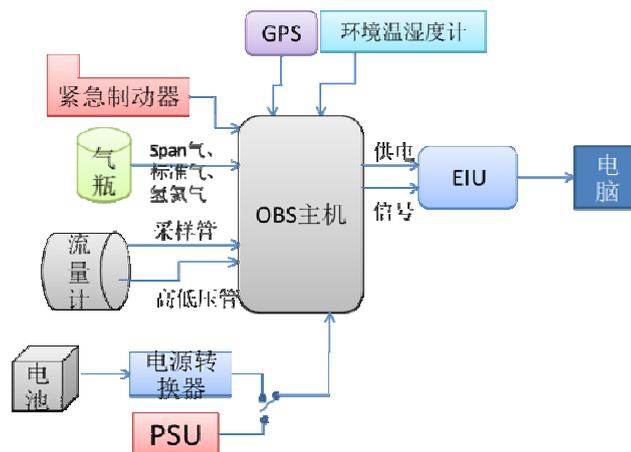


图 3-5 OBS-2200 气态物测试仪的连接示意图

3.1.4 颗粒物排放测试设备

颗粒物排放测试设备由美国 TSI 公司的 EEPS-3090 排气颗粒数量及粒径分析

仪和 379020 型旋转盘稀释器，以及芬兰 Dekati 公司的 ELPI 静电低压撞击器和 DI-2000 稀释器组成，实船测试时，两套设备的布置分别如图 3-6、3-7 所示。

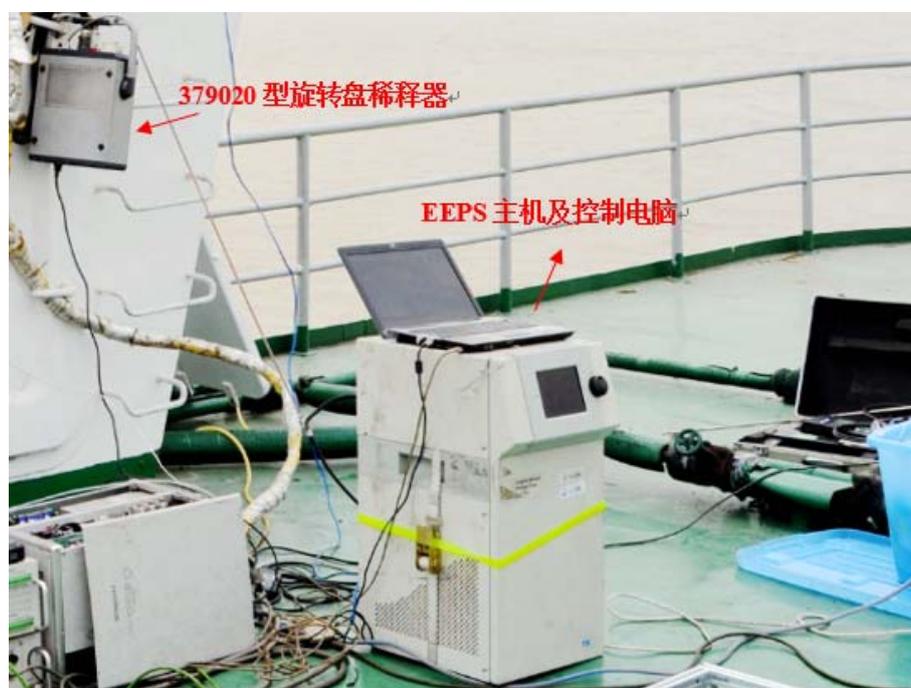


图 3-6 EEPS 3090 粒径仪及其稀释盘



图 3-7 ELPI 静电低压撞击器和 DI-2000 稀释器

EEPS-3090 粒径分析仪可快速测取尾气中颗粒数量浓度及粒径分布，测量粒径范围为 5.6~560nm，在 0.1s 内可测取一个完整的颗粒粒径分布图谱，并同步输出 32 个粒径通道的颗粒数量和粒径分布数据，此设备完全满足瞬态排放测试要求。尾气进入颗粒测试设备之前要进行稀释，为更加真实地模拟排气在实际环

境中的稀释过程，采用了两级稀释，总稀释比为 500:1。第一级稀释系统采用 TSI 公司的专用旋转盘稀释器，对排气进行稀释，控制初级稀释系统的加热温度为 80℃，稀释比为 200:1；第二级稀释采用一个玻璃转子流量计对进气流量进行补偿，并同时稀释，稀释比为 2.5:1。该粒径分析仪测试连接示意图，如图 3-8 所示。

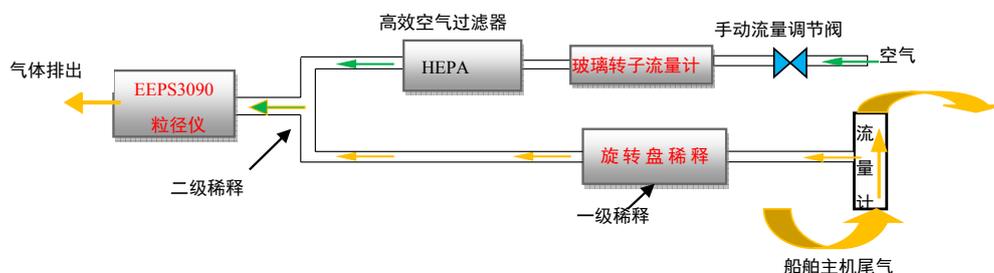


图 3-8 EEPS-3090 粒径分析仪连接示意图

静电低压撞击器(electrical low-pressure impactor, 简称 ELPI)是芬兰坦佩雷大学开发的用于实时测量气溶胶粒径分布的仪器，与 EEPS 不同的是，其测量粒径范围为 7nm~10μm，测试范围更广，通道数为 12 个。ELPI 连接示意图，如图 3-9 所示。其主要部件有电晕放电器、低压级联撞击器和多通道静电计等。ELPI 将冲击仪粒子分级的精确性和电子测量的快速反应性有效地结合在同一套装置上。由于 ELPI 是一个收集装置，所以随后可以对收集到的分级粒子样品进行化学分析或者比重分析。

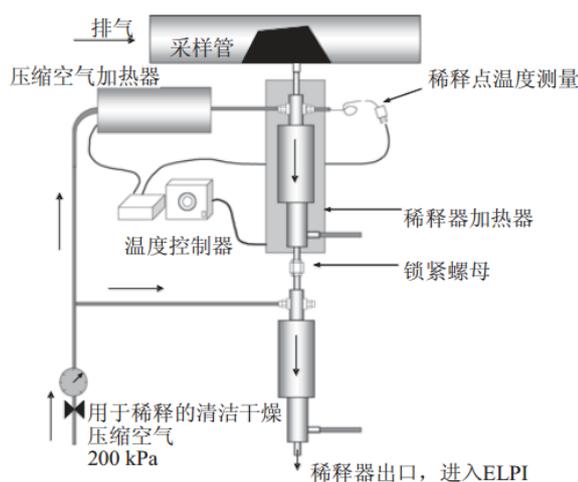


图 3-9 ELPI 粒径分析仪及稀释器连接示意图

ELPI 搭配的稀释器为 DI-2000 射流稀释器，其中第一级稀释比为 8.21，第二级稀释比为 8.23，总稀释比为 67.57。由于稀释比会随着排气压力以及大气压力的改变而改变，数据处理时对稀释比进行了相应的修正。

3.1.5 仪器误差分析

OBS 气体测试单元及流量测试的线性度，精度，噪声和重复性按照 CFR 1065.602 规定试验流程进行，详细测量精度见表 3-5。其中 FS 为上限量程（full scale），RD 为测量读数（read data）

表 3-5 OBS 测量精度

OBS 测试单元		测量精度
气体分 析单元	NDIR (CO 浓度测量)	Zero: $\leq \pm 2.5\% \text{FS}$ Span: $\leq \pm 2.5\% \text{FS}$
	NDIR (CO ₂ 浓度测量)	Zero: $\leq \pm 2.5\% \text{FS}$ Span: $\leq \pm 2.5\% \text{RD}$
	FID (THC 浓度测量)	Zero: $\leq \pm 2.5\% \text{FS}$ Span: $\leq \pm 2.5\% \text{RD}$
	CLD (NO _x 浓度测量)	Zero: $\leq \pm 2.5\% \text{FS}$ Span: $\leq \pm 2.5\% \text{RD}$
Pitot 流量计(排气流量测量)		$\leq \pm 1.5\% \text{FS}$ 或 $\leq \pm 2.5\% \text{RD}$ (选大者)
附属传 感器	排气压力传感器	$\pm 0.5\% \text{FS}$
	排气温度传感器	$\leq \pm 1\% \text{FS}$
	环境压力传感器	$\pm 1.5\% \text{FS}$
	环境温度传感器	$\pm 0.3^\circ \text{C}$ at 23 $^\circ \text{C}$
	环境湿度传感器	$\pm 1.5\%$ 相对湿度 at 23 $^\circ \text{C}$

ELPI 的测试精度与粒径大小和颗粒种类有关，根据 ELPI 的测试原理，颗粒物浓度的测量精度即为电流强度的测量精度。对于颗粒物数量浓度来说，粒径较大的颗粒物更加灵敏，然而对于质量浓度来说，粒径较小的颗粒物更加灵敏，具体的精度值如图 3-10 所示。

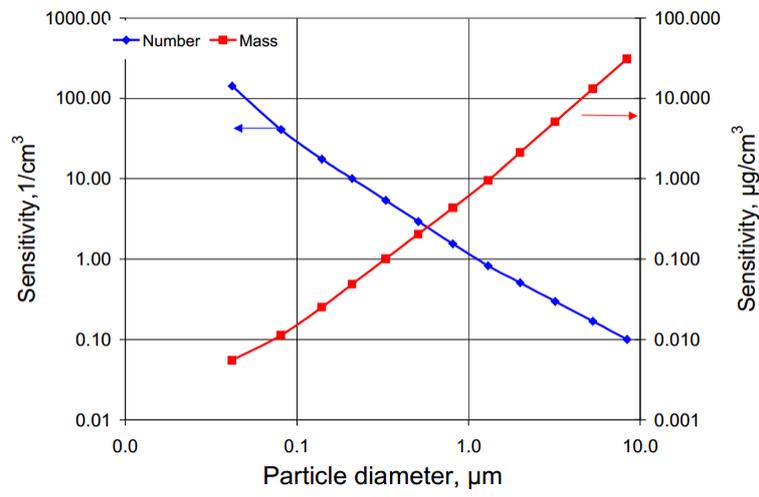


图 3-10 ELPI 灵敏度

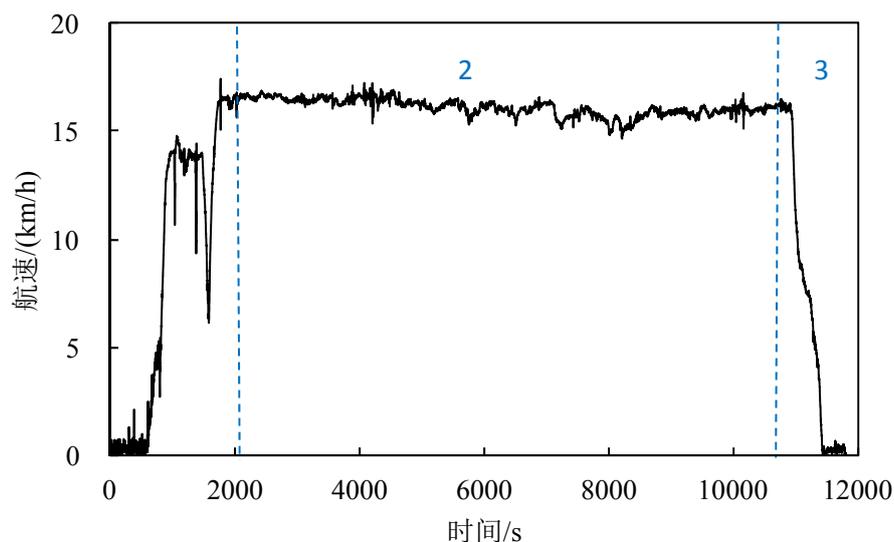
3.2 实船排放测试结果及分析

3.2.1 小型集装箱船“沪环运货 3010”排放测试结果及分析

3.2.1.1 测试路线及工况

船舶测试路线为由上海市虎林路综合码头航行至上海市老港码头，即其日常航行路线。该船舶主要负责生活垃圾的运送。

测试工况包括离港、巡航、进港工况。本报告中离港工况指船舶启动后速度增至正常航行速度，巡航工况指船舶保持稳定速度航行，进港工况指船舶由正常航行减速至停止。测试时船舶为满载。图 3-11 为船舶工况分布示意图。该船舶最常见的工况为离港工况、巡航工况和进港工况，本报告也基于这三种典型工况进行分析。



1-离港工况；2-巡航工况；3-进港工况.

图 3-11 工况分布示意图

3.2.1.2 实际航行排放特征

3.2.1.2.1 不同工况下瞬态排放

图 3-12 至 3-17 为不同工况下各气态物和颗粒物的瞬态排放。由于数据较多，每个工况只选取了具有代表性的 500s 来进行比较。图 3-12 至 3-17 中，1、2、3 分别指代含义如下：1—离港工况，2—巡航工况，3—进港工况。

图 3-12 为不同工况下 CO 瞬态排放。由图 3-12 可以看出，离港和进港工况

下 CO 排放速率波动较大，并且最大值出现在进港工况，达到 0.19g/s。巡航工况下 CO 的排放速率变化不大，稳定在 0.05g/s 左右。

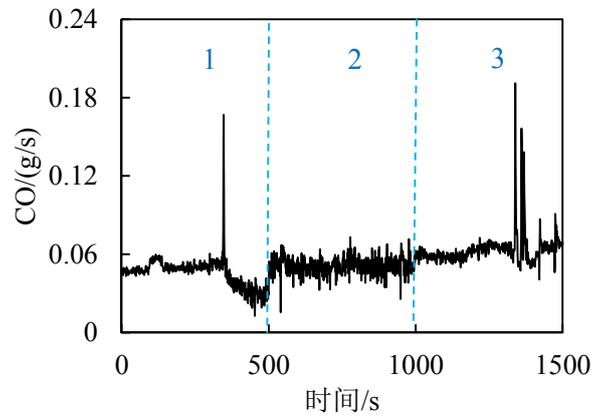


图 3-12 不同工况下 CO 瞬态排放

图 3-13 为不同工况下 CO₂ 瞬态排放。由图 3-13 可以看出，离港和进港工况下 CO₂ 排放速率波动较大，且最大值出现在进港工况，达到 20.61g/s。巡航工况下 CO₂ 的排放速率变化不大，稳定在 19.16g/s 左右。

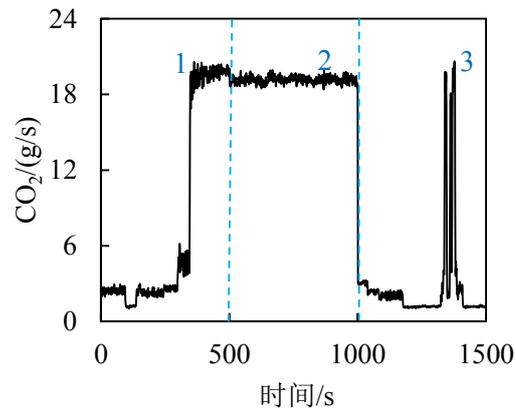


图 3-2 不同工况下 CO₂ 瞬态排放

图 3-14 为不同工况下 THC 瞬态排放。由图 3-14 可以看出，离港和进港工况下 THC 排放速率波动较大，且最大值出现在离港工况，达到 0.057g/s。巡航工况下 THC 的排放速率变化不大，稳定在 0.009g/s 左右。

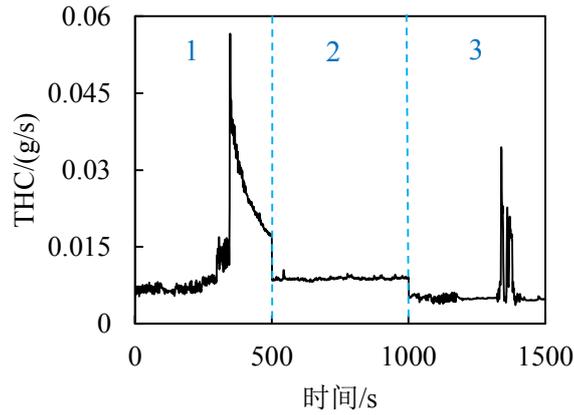


图 3-3 不同工况下 THC 瞬态排放

图 3-15 为不同工况下 NO_x 瞬态排放。由图 3-15 可以看出，离港和进港工况下 NO_x 排放速率波动较大，巡航工况下 NO_x 的排放速率变化不大，且大于离港和进港工况，稳定在 0.33g/s 左右。

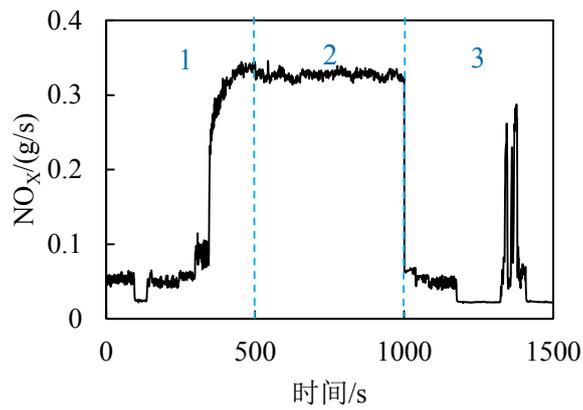


图 3-4 不同工况下 NO_x 瞬态排放

图 3-16 为不同工况下 PN 瞬态排放。由图 3-16 可以看出，离港和进港工况下 PN 浓度波动较大，且最大值出现在进港工况，达到 $2.48 \times 10^{13} \text{#/s}$ 。巡航工况下 PN 浓度变化不大，稳定在 $1.55 \times 10^{13} \text{#/s}$ 左右。

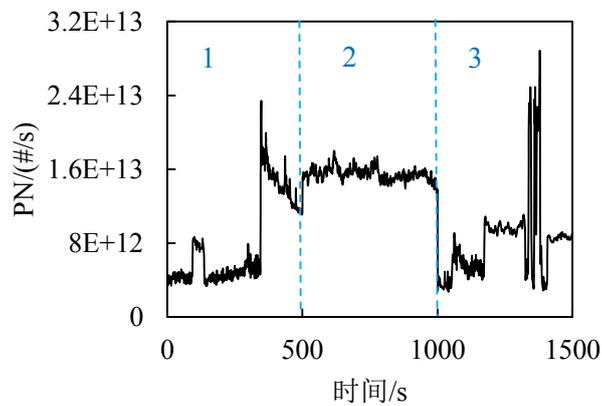


图 3-5 不同工况下 PN 瞬态排放

图 3-17 为不同工况下 PM 瞬态排放。由图 3-17 可以看出，离港和进港工况下 PM 浓度波动较大，且最大值出现在离港工况，达到 0.03g/s。巡航工况下 PM 浓度变化不大，稳定在 0.01g/s 左右。

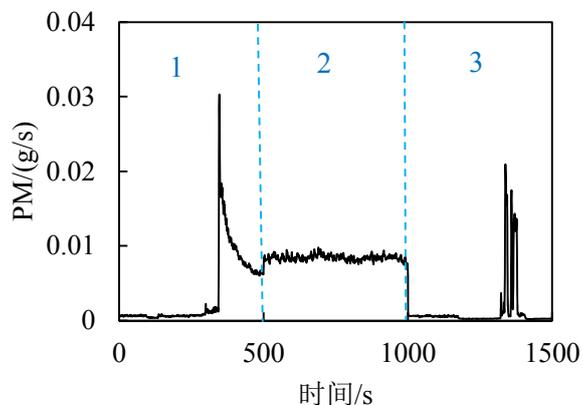


图 3-6 不同工况下 PM 瞬态排放

3.2.1.2.2 不同工况下排放因子

表 3-6 所示为不同工况下 CO、CO₂、THC、NO_x、PM 的单位时间排放因子。由表 3-6 可以看出，各工况 CO 单位时间排放因子按照大小顺序依次为巡航、进港和离港，而且进港工况下 CO 单位时间排放因子显著高于其他工况。离港、巡航相对于进港工况分别降低了 12.7%、11.3%。

表 3-6 不同工况下各排气成分单位时间排放因子

单位时间排放因子(g/h)	离港	巡航	进港	全程
CO	503.98	512.18	577.28	516.80
CO ₂	34163.90	66595.18	14572.72	57378.91
THC	33.82	30.11	20.76	29.96
NO _x	590.17	1121.32	259.84	969.64
PM	13.64	28.77	5.88	24.58

各工况 CO₂ 单位时间排放因子按照大小顺序依次为巡航、离港、和进港，而且进港工况下 CO₂ 单位时间排放因子显著低于其他工况。巡航、离港相对于进港工况分别增加了 357.0%、134.4%。

各工况 THC 单位时间排放因子按照大小顺序依次为离港、巡航和进港。巡

航、进港相对于离港工况分别降低了 11.0%、38.6%。

各工况 NO_x 单位时间排放因子按照大小顺序依次为巡航、离港和进港，而且进港工况下 NO_x 单位时间排放因子显著低于其他工况。巡航、离港相对于进港工况分别增加了 88.8%、127.1%。

各工况 PM 单位时间排放因子按照大小顺序依次为巡航、离港和进港，而且进港工况下 PM 单位时间排放因子显著低于其他工况。巡航、离港相对于进港工况分别增加了 389.7%、132.1%。

表 3-7 所示为不同工况下 CO 、 CO_2 、 THC 、 NO_x 、 PM 的单位里程排放因子。由表 3-7 可以看出，各工况 CO 单位里程排放因子按照大小顺序依次为进港、离港和巡航，而且进港工况下 CO 单位里程排放因子显著高于其他工况。离港、巡航相对于进港工况分别降低了 43.7%、72.0%。

表 3-7 不同工况下各排气成分单位里程排放因子

单位里程排放因子(g/km)	离港	巡航	进港	全程
CO	63.92	31.77	113.53	37.02
CO_2	4332.70	4130.34	2865.83	4110.79
THC	4.29	1.87	4.08	2.15
NO_x	74.85	69.55	51.10	69.47
PM	1.73	1.78	1.16	1.76

各工况 CO_2 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、巡航和进港。巡航、进港相对于离港工况分别降低了 4.7%、33.9%。

各工况 THC 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、进港、巡航。进港、巡航相对于离港工况分别降低了 4.8%、56.5%。

各工况 NO_x 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、巡航、进港。巡航、进港相对于离港工况分别降低了 7.1%、31.7%。

各工况 PM 单位里程排放因子按照大小顺序依次为巡航、离港、进港。离港、

进港相对于巡航工况分别降低了 3.1%、35.2%。

表 3-8 所示为不同工况下 CO、CO₂、THC、NO_x、PM 的单位千克燃油排放因子。由表 3-8 可以看出，各工况 CO 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、离港、巡航，而且进离港工况下 CO 单位千克燃油排放因子显著高于巡航工况。离港、巡航相对于进港工况分别降低了 62.4%、80.4%。

表 3-8 不同工况下各排气成分单位千克燃油排放因子

单位千克燃油排放因子(g/kg 燃油)	离港	巡航	进港	全程
CO	46.29	24.17	123.04	28.29
CO ₂	3137.87	3142.69	3105.90	3141.47
THC	3.11	1.42	4.43	1.64
NO _x	54.21	52.92	55.38	53.09
PM	1.25	1.36	1.25	1.35

各工况 CO₂ 单位千克燃油排放因子变化不大。排放因子最小的进港工况相对于最大的巡航工况仅降低 1.2%。

各工况 THC 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、离港、巡航。离港、巡航相对于进港工况分别降低了 29.8%、67.9%。

各工况 NO_x 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、离港、巡航。离港、巡航相对于进港工况分别降低了 2.1%、4.4%。

各工况 PM 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为巡航、进港、离港。进港、离港相对于巡航工况降低了 7.8%。

3.2.1.2.3 不同工况下粒径分布规律

图 3-18 所示为不同工况下粒径分布规律。离港、巡航、进港工况下颗粒数量浓度峰值分别为 $1.05 \times 10^7 \#/\text{cm}^3$ 、 $1.02 \times 10^7 \#/\text{cm}^3$ 、 $1.62 \times 10^7 \#/\text{cm}^3$ ，对应的粒径分别为 34nm、93.1nm、29.4nm。离港、进港工况下颗粒数量浓度峰值高于巡航工况，分别高出 2.6%、58.64%。

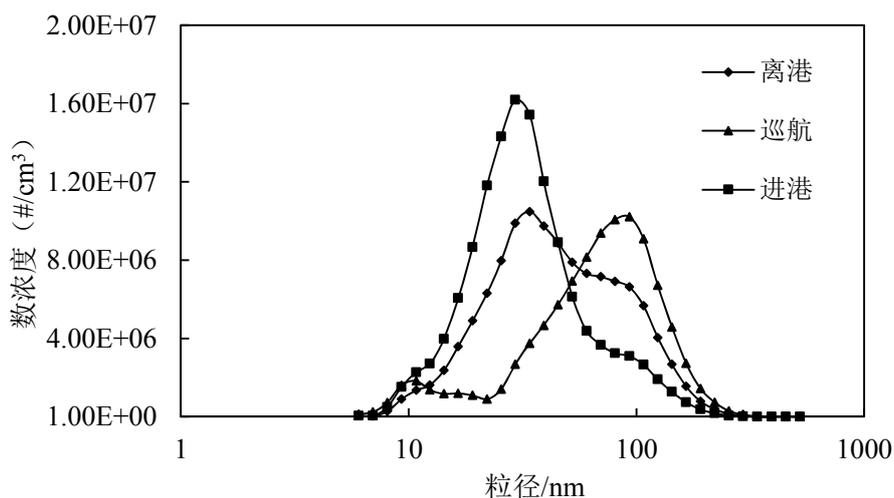


图 3-7 不同工况下粒径分布规律

3.2.1.3 不同航速下排放特征

图 3-19 所示为不同航速下 CO 平均排放率。从图 3-19 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, CO 平均排放率总体变化不大。另外由图中可以看出速度为 12km/h 和 0km/h 时, CO 平均排放率达到最小值和最大值, 分别为 0.13g/s、0.16g/s。

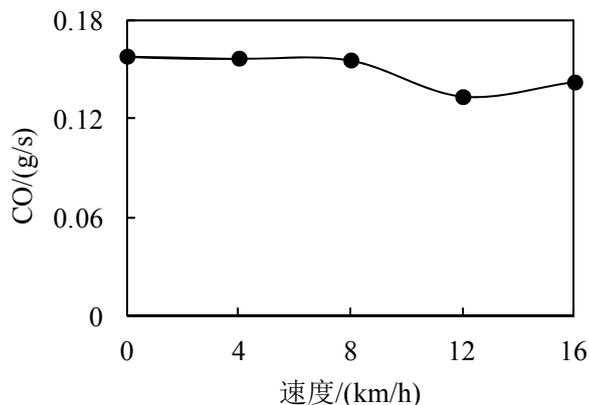


图 3-8 不同航速下 CO 平均排放率

图 3-20 所示为不同航速下 CO₂ 平均排放率。从图 3-20 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, CO₂ 平均排放率总体呈上升趋势。由图中可以看出速度为 0km/h 和 16km/h 时, CO₂ 平均排放率达到最小值和最大值, 分别为 2.13g/s 和 18.50g/s。

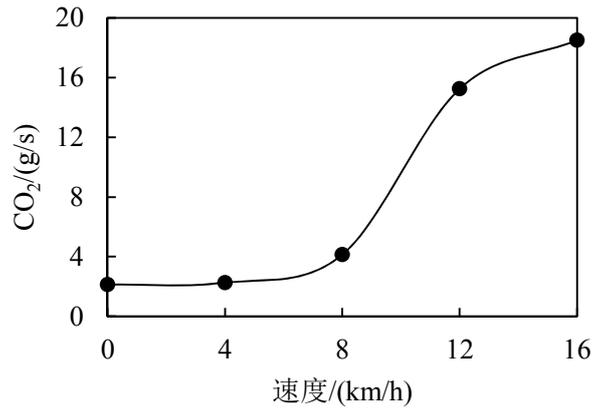


图 3-20 不同航速下 CO₂ 平均排放率

图 3-21 所示为不同航速下 THC 平均排放率。从图 3-21 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, THC 平均排放率呈现先升高后降低的趋势。由图中可以看出速度 0km/h 和 12km/h 时, THC 平均排放率达到最小值和最大值, 分别为 0.006g/s 和 0.011g/s。

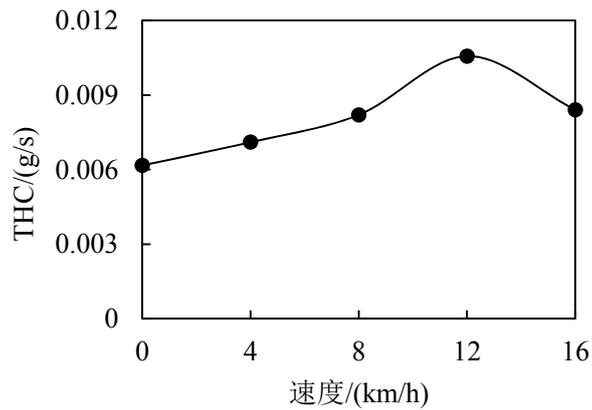


图 3-21 不同航速下 THC 平均排放率

图 3-22 所示为不同航速下 NO_x 平均排放率。从图 3-22 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, NO_x 平均排放率总体呈上升趋势, 在速度为 0km/h 和 16km/h 时 NO_x 平均排放率达到最小值和最大值, 分别为 0.04g/s 和 0.31g/s。

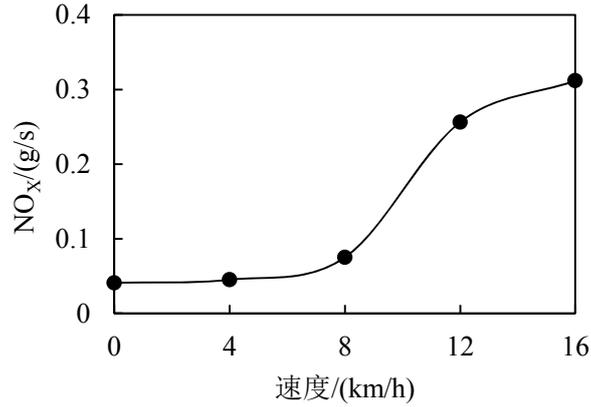


图 3-22 不同航速下 NO_x 平均排放率

图 3-23 所示为不同航速下 PN 平均排放率。从图 3-23 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, PN 平均排放率总体呈上升趋势。由图中可以看出速度为 0km/h 和 16km/h 时 PN 平均排放率达到最小值和最大值, 分别为 $6.64 \times 10^{12} \#/\text{s}$ 和 $1.60 \times 10^{13} \#/\text{s}$ 。

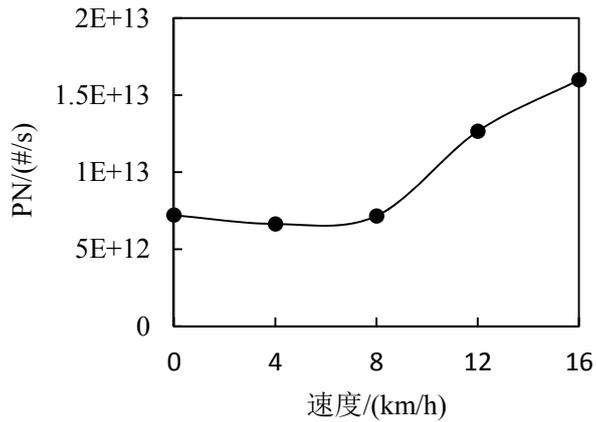


图 3-9 不同航速下 PN 平均排放率

图 3.24 所示为不同航速下 PM 平均排放率。从图 3.24 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, PM 平均排放率总体呈上升趋势。由图中可以看出速度为 0km/h 和 16km/h 时 PM 平均排放率达到最小和最大值, 分别为 0.80mg/s 和 8.00mg/s。

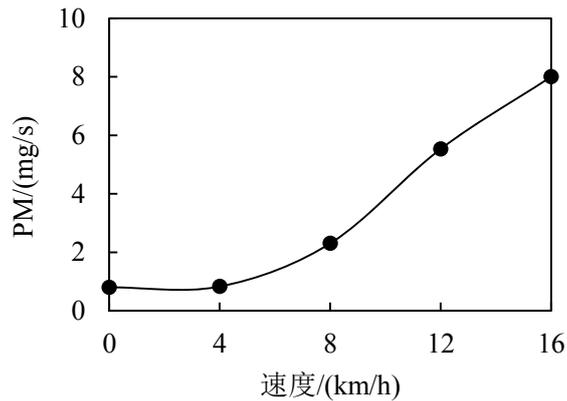


图 3-10 不同航速下 PM 平均排放率

3.2.1.4 小结

本章分析了船舶“沪环货 3010”在实际航行过程中，气态物和颗粒物的瞬态排放特征、排放因子和粒径分布。然后统计了不同航速下各排放物的排放特征。结果如下。

(1) 进港工况下 CO 单位时间排放因子显著高于其他工况。而进港工况下 THC、CO₂、NO_x 和 PM 单位时间排放因子显著低于其他工况。

(2) 离港工况下 CO₂、THC、NO_x 单位里程排放因子显著高于其他工况。进港工况下 CO 单位里程排放因子显著高于其他工况。巡航工况下 PM 单位里程排放因子高于其他工况。

(3) 进离港工况下 CO、THC 单位千克燃油排放因子显著高于巡航工况。各工况下 CO₂、NO_x 单位千克燃油排放因子变化不大。巡航工况下 PM 单位千克燃油排放因子高于其他工况。

(4) 各工况下的颗粒数量浓度峰值对应粒径均小于 100nm。离港、进港工况下颗粒数量浓度峰值显著高于巡航工况。

(5) 随着速度的上升，各排放物平均排放率总体均呈上升的趋势。

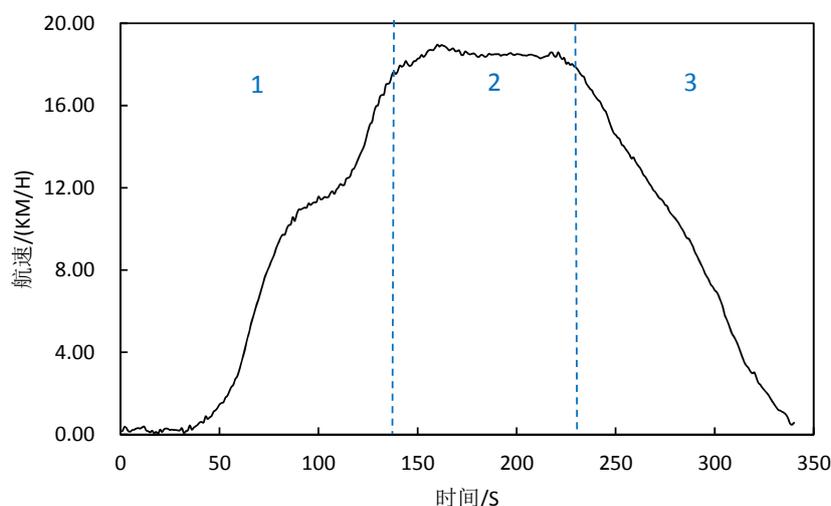
3.2.2 车客渡船“沪航 18”排放测试结果及分析

3.2.2.1 测试路线及工况

由于该船舶为车客渡船舶，日常航行路线为长兴岛往返横沙岛，因此船舶测试路线定为长兴岛出发至横沙岛，单次航行时间约为 6min。

测试工况包括离港、巡航、进港工况。本报告中离港工况指船舶启动后速度增至正常航行速度，巡航工况指船舶保持稳定速度航行，进港工况指船舶由正常

航行减速至停止。测试时船舶为满载。图 3-25 为船舶工况分布示意图。考虑到该船舶最常见的工况为离港工况、巡航工况、进港工况，本报告也基于这三种典型工况进行分析。



1-离港工况；2-巡航工况；3-进港工况.

图 3-11 工况分布示意图

3.2.2.2 实际航行排放特征

3.2.2.2.1 不同工况下瞬态排放

图 3-26 至图 3-31 为不同工况下各气态物和颗粒物的瞬态排放。图 3-26 至图 3-31 中，1、2、3 分别指代含义如下：1—离港工况，2—巡航工况，3—进港工况。

图 3-26 为不同工况下 CO 瞬态排放。由图 3-26 可以看出，离港和进港工况下 CO 排放速率波动较大，并且最大值出现在离港工况，达到 0.97g/s。巡航工况下 CO 的排放速率较稳定，均在 0.05g/s 左右波动。

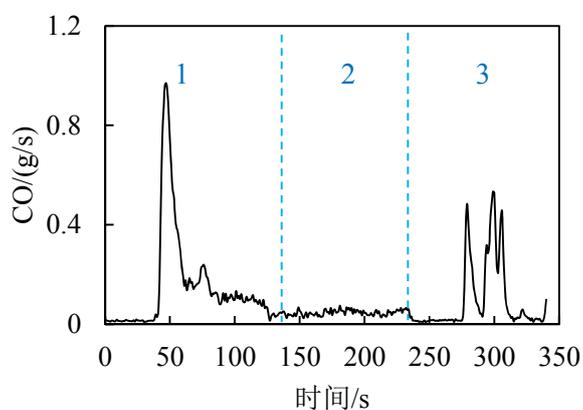


图 3-12 不同工况下 CO 瞬态排放

图 3-27 为不同工况下 CO_2 瞬态排放。由图 3-27 可以看出，离港和进港工况下 CO_2 排放速率波动较大，且最大值出现在离港工况，达到 38.33g/s 。巡航工况下 CO_2 的排放速率稳定在 19.71g/s 左右。

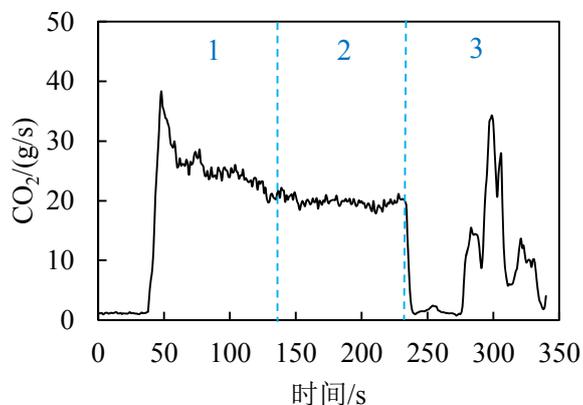


图 3-13 不同工况下 CO_2 瞬态排放

图 3-28 为不同工况下 THC 瞬态排放。由图 3-28 可以看出，离港和进港工况下 THC 排放速率波动较大，且最大值出现在离港工况，达到 0.036g/s 。巡航工况下 THC 的排放速率稳定在 0.019g/s 左右。

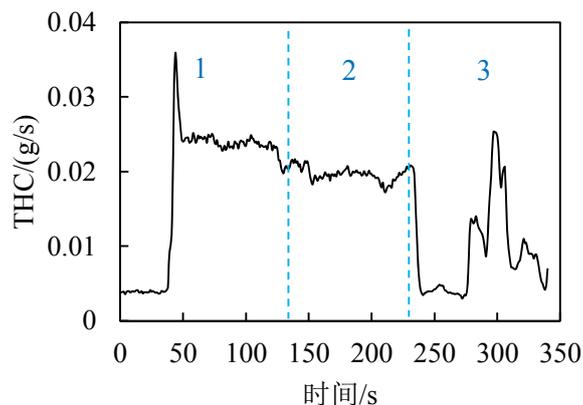


图 3-14 不同工况下 THC 瞬态排放

图 3-29 为不同工况下 NO_x 瞬态排放。由图 3-29 可以看出，离港和进港工况下 NO_x 排放速率均有较大波动，且进港工况波动更为显著， NO_x 排放速率最大值出现在进港工况，达到 0.37g/s 。巡航工况下 NO_x 的排放速率稳定在 0.24g/s 左右。

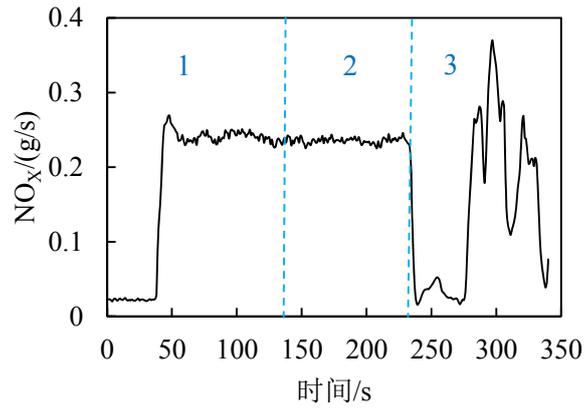


图 3-15 不同工况下 NO_x瞬态排放

图 3-30 为不同工况下 PN 瞬态排放。由图 3-30 可以看出，离港和进港工况下 PN 浓度波动较大，且最大值出现在进港工况，达到 $6.78 \times 10^{12} \#/\text{s}$ 。巡航工况下 PN 浓度相差不大，均稳定在 $2.16 \times 10^{12} \#/\text{s}$ 左右。

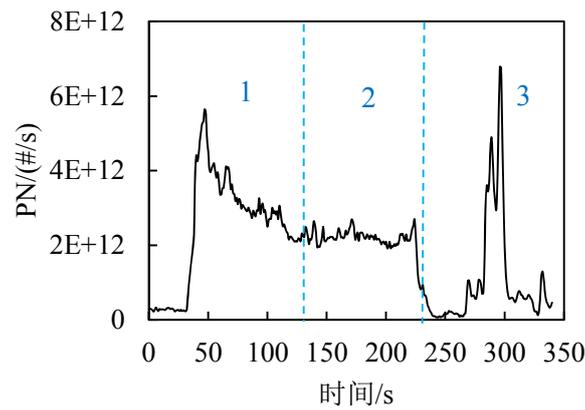


图 3-30 不同工况下 PN 瞬态排放

图 3-31 为不同工况下 PM 瞬态排放。由图 3-31 可以看出，离港和进港工况下 PM 浓度波动较大，且最大值出现在进港工况，达到 $0.12 \text{g}/\text{s}$ 。巡航工况下 PM 浓度变化不大，均稳定在 $0.018 \text{g}/\text{s}$ 左右。

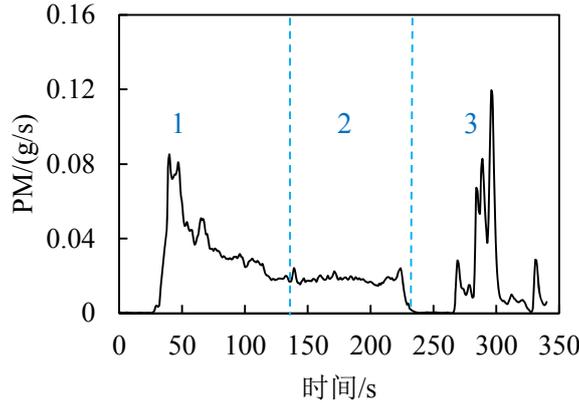


图 3-16 不同工况下 PM 瞬态排放

3.2.2.2.2 不同工况下排放因子

表 3-9 所示为不同工况下 CO、CO₂、THC、NO_x、PM 的单位时间排放因子。由表 3-9 可以看出，各工况 CO 单位时间排放因子按照大小顺序依次为离港、进港、巡航。巡航以及进港工况相对于离港工况分别降低了 67.0%、32.6%。

表 3-9 不同工况下各排气成分单位时间排放因子

单位时间排放因子(g/h)	离港	巡航	进港	全程
CO	504.84	166.77	340.17	367.21
CO ₂	65862.30	70964.39	33540.01	56463.96
THC	65.49	70.10	34.38	56.37
NO _x	650.43	847.51	513.48	654.00
PM	10.35	6.84	6.04	8.08

各工况 CO₂ 单位时间排放因子按照大小顺序依次为巡航、离港、进港，而且进港工况下 CO₂ 单位时间排放因子显著低于其他工况。巡航、离港相对于进港工况分别增加了 111.6%、96.4%。

各工况 THC 单位时间排放因子按照大小顺序依次为巡航、离港、进港，且进港工况下 THC 单位时间排放因子显著低于其他工况。巡航、离港相对于进港工况分别增加了 103.9%、90.5%。

各工况 NO_x 单位时间排放因子按照大小顺序依次为巡航、离港、进港。巡航、离港相对于进港工况分别增加了 65.1%、26.7%。

各工况 PM 单位时间排放因子按照大小顺序依次为离港、巡航、进港，而且离港工况下 PM 单位时间排放因子显著高于其他工况。巡航、进港相对于离港工况分别降低了 33.9%、41.6%。

表 3-10 所示为不同工况下 CO、CO₂、THC、NO_x、PM 的单位里程排放因子。由表 3-10 可以看出，各工况 CO 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、进港、巡航，而且进离港工况下 CO 单位里程排放因子显著高于巡航工况。离港、进港相对于巡航工况分别增加了 685.4%、308.0%。

表 3-10 不同工况下各排气成分单位里程排放因子

单位里程排放因子(g/km)	离港	巡航	进港	全程
CO	70.95	9.03	36.85	34.58
CO ₂	9255.62	3843.79	3633.52	5317.65
THC	9.20	3.80	3.73	5.31
NO _x	91.40	45.91	55.63	61.59
PM	1.45	0.37	0.65	0.76

各工况 CO₂ 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、巡航、进港，而且离港工况下 CO₂ 单位里程排放因子显著高于其他工况。巡航、进港相对于离港工况分别降低了 58.5%、60.7%。

各工况 THC 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、巡航、进港。而且离港工况下 THC 单位里程排放因子显著高于其他工况。巡航、进港相对于离港工况分别降低了 58.7%、59.5%。

各工况 NO_x 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、进港、巡航。而且离港工况下 NO_x 单位里程排放因子显著高于其他工况。进港、巡航相对于离港工况分别降低了 39.1%、49.8%。

各工况 PM 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、进港、巡航，而且离港工况下 PM 单位时间排放因子显著高于其他工况。进港、巡航相对于离港工况分别降低了 55.0%、74.5%。

表 3-11 所示为不同工况下 CO、CO₂、THC、NO_x、PM 的单位千克燃油排放因子。由表 3-11 可以看出，各工况 CO 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、离港、巡航，而且进离港工况下 CO 单位里程排放因子显著高于巡航工况。进港、离港相对于巡航工况分别增加了 326.3%、223.5%。

表 3-11 不同工况下各排气成分单位千克燃油排放因子

单位千克燃油排放因子(g/kg 燃油)	离港	巡航	进港	全程
CO	23.86	7.38	31.45	20.28
CO ₂	3112.96	3138.84	3100.77	3118.53
THC	3.10	3.10	3.18	3.11
NO _x	30.74	37.49	47.47	36.12
PM	0.49	0.30	0.56	0.45

各工况 CO₂ 单位千克燃油排放因子变化不大。排放因子最小的进港工况相对于最大的巡航工况仅降低 1.2%。

各工况 THC 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、巡航、离港。进港、巡航相对于离港工况分别增加了 2.7%、0.2%。

各工况 NO_x 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、巡航、离港。进港、巡航相对于离港工况分别增加了 54.4%、21.9%。

各工况 PM 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、离港、巡航。进港、离港相对于巡航工况分别增加了 84.7%、61.8%。

3.2.2.2.3 不同工况下粒径分布规律

图 3-32 所示为不同工况下粒径分布规律。离港、巡航、进港工况下颗粒数量浓度峰值分别为 $2.03 \times 10^6 \#/\text{cm}^3$ 、 $1.76 \times 10^6 \#/\text{cm}^3$ 、 $1.26 \times 10^6 \#/\text{cm}^3$ ，对应的粒径分别为 107.5nm、93.1nm、124.1nm。离港、巡航工况下颗粒数量浓度峰值显著高于进港工况，分别高出 87.1%、61.5%。

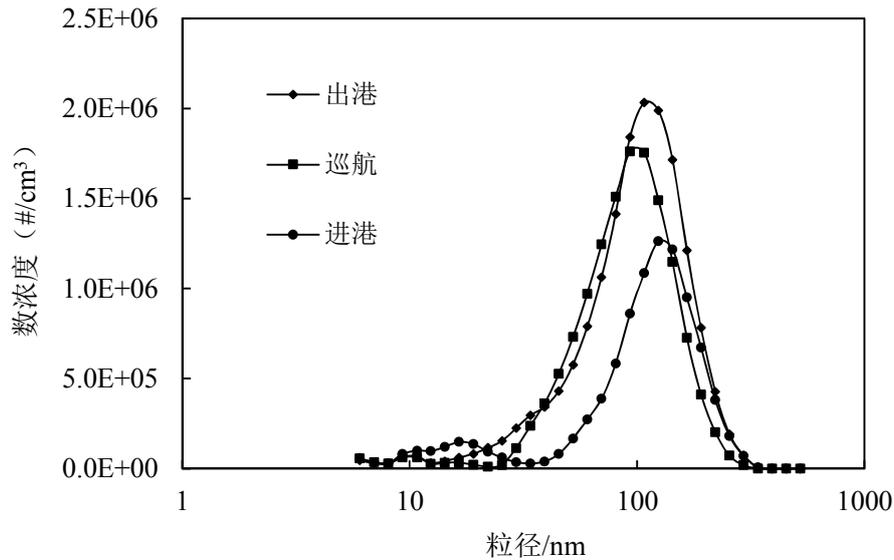


图 3-32 不同工况下粒径分布规律

3.2.2.3 不同航速下排放特征

图 3-33 所示为不同航速下 CO 平均排放率。从图 3-33 中可看出随着速度由 0 增加到 4km/h，CO 平均排放率显著上升；随着速度继续增加，CO 平均排放率持续下降。另外由图中可以看出速度为 0km/h 和 4km/h 时 CO 平均排放率达到最小值和最大值，分别为 0.02g/s 和 0.21g/s。

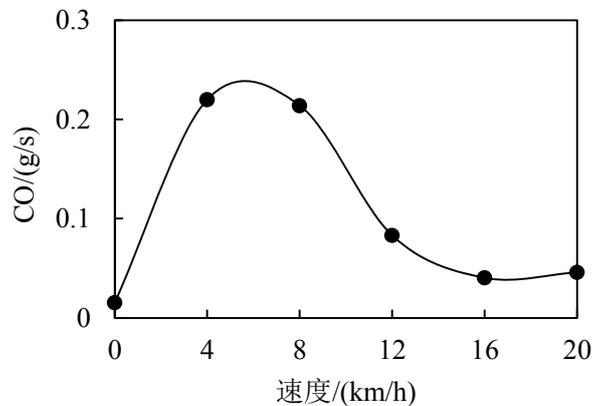


图 3-17 不同航速下 CO 平均排放率

图 3-34 所示为不同航速下 CO₂ 平均排放率。从图 3-34 中可看出随着速度由 0 增加到 20km/h，CO₂ 平均排放率总体呈先上升再下降再上升的趋势。由图中可以看出速度为 0km/h 和 8km/h 时 CO₂ 平均排放率达到最小值和最大值，分别为 1.27g/s 和 22.90g/s。

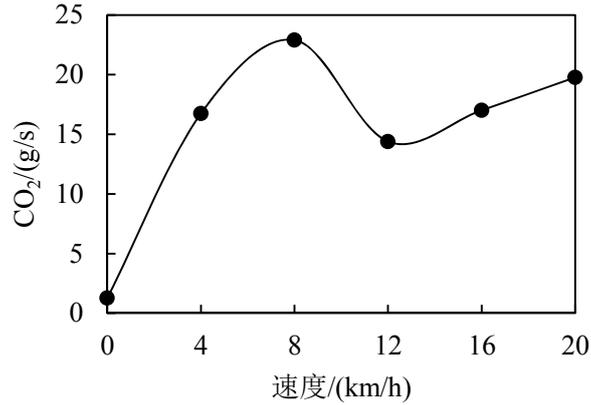


图 3-18 不同航速下 CO₂ 平均排放率

图 3-35 所示为不同航速下 THC 平均排放率。从图 3-35 中可看出随着速度由 0 增加到 20km/h, THC 平均排放率呈现先升高后降低再升高的趋势。由图中可以看出速度 0km/h 和 8km/h 时 THC 平均排放率达到最小值和最大值, 分别为 0.004g/s 和 0.020g/s。

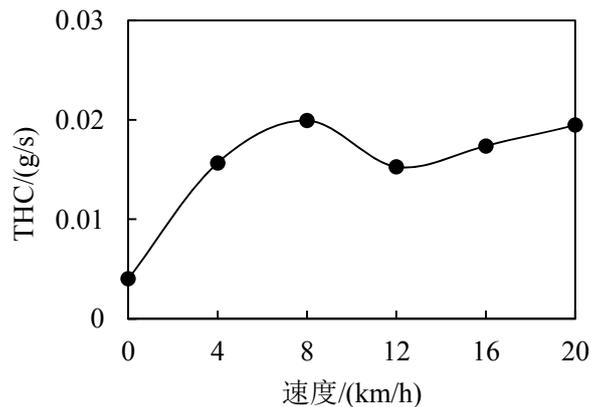


图 3-19 不同航速下 THC 平均排放率

图 3-36 所示为不同航速下 NO_x 平均排放率。从图 3-36 中可看出随着速度由 0 增加到 20km/h, NO_x 平均排放率总体呈先上升后降低再上升的趋势, 在速度为 0km/h 和 8km/h 时 NO_x 平均排放率达到最小值和最大值, 分别为 0.03g/s 和 0.26g/s。

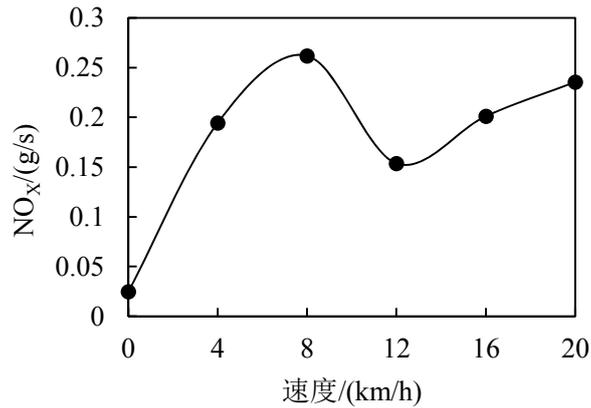


图 3-20 不同航速下 NO_x 平均排放率

图 3-37 所示为不同航速下 PN 平均排放率。从图 3-37 中可看出随着速度由 0 增加到 20km/h，PN 平均排放率总体呈先上升后下降再上升的趋势。由图中可以看出速度为 0km/h 和 8km/h 时 PN 平均排放率达到最小值和最大值，分别为 $5.74 \times 10^{11} \#/\text{s}$ 和 $3.11 \times 10^{12} \#/\text{s}$ 。

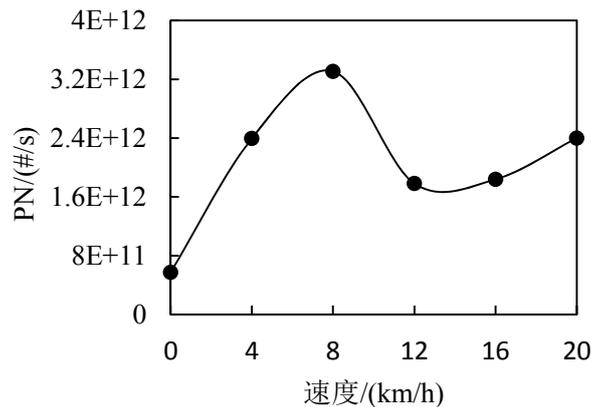


图 3-21 不同航速下 PN 平均排放率

图 3-38 所示为不同航速下 PM 平均排放率。从图 3-38 中可看出随着速度由 0 增加到 20km/h，PM 平均排放率总体呈先上升后下降再略有上升的趋势。由图中可以看出速度为 0km/h 和 8km/h 时 PM 平均排放率达到最小和最大值，分别为 0.77mg/s 和 4.54mg/s。

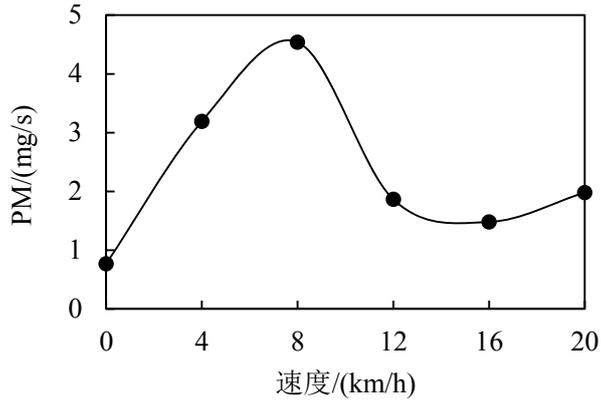


图 3-22 不同航速下 PM 平均排放率

3.2.2.4 小结

本章分析了船舶“沪航 18”在实际航行过程中，气态物和颗粒物的瞬态排放特征、排放因子和粒径分布。然后统计了不同航速下各排放物的排放特征。结果如下。

(1) 进离港工况下 CO 单位时间排放因子显著高于巡航工况。CO₂、THC、NO_x 单位时间排放因子在离港和巡航工况下较高。离港工况下 PM 单位时间排放因子显著高于巡航和进港工况。

(2) 离港工况下 CO、CO₂、THC、NO_x 和 PM 单位里程排放因子显著高于其他工况。CO、NO_x 和 PM 在巡航工况下单位里程排放因子均低于进港工况。而 CO₂、THC 则高于进港工况。

(3) 进离港工况下 CO、PM 单位千克燃油排放因子显著高于巡航工况。各工况下 CO₂、THC 单位千克燃油排放因子变化不大。NO_x 单位千克燃油排放因子在进港工况下最高，巡航工况次之，离港工况最小。

(4) 各工况颗粒数量浓度峰值对应粒径均在 100nm 附近。离港、巡航工况下颗粒数量浓度峰值显著高于进港工况。

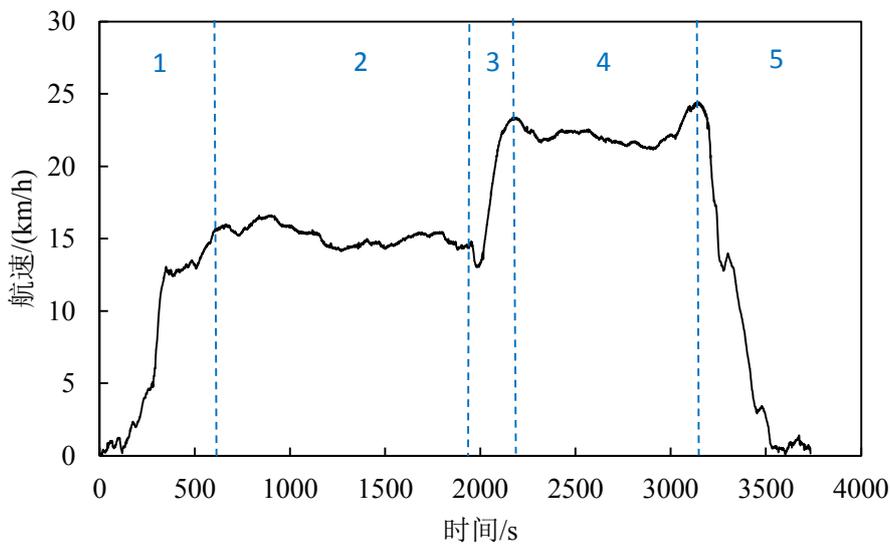
(5) 随着速度的上升，各排放物平均排放率总体均呈先上升后下降再上升的趋势，最大值均出现在速度为 8km/h 时。

3.2.3 油污水处理船“沪环货 501”排放测试结果及分析

3.2.3.1 测试路线及工况

船舶测试路线为进出洋山港码头，即其日常航行路线。该船舶为油污水处理船，日常主要活动区域为洋山港码头。

测试工况包括离港、巡航、进港工况。本报告中离港工况指船舶起动后速度增至正常航行速度，巡航工况指船舶保持稳定速度航行，进港工况指船舶由正常航行减速至停止。测试时船舶为空载。考虑到水流对于船舶排放的影响，在巡航工况下分别进行了顺流和逆流巡航测试。图 3-39 为船舶工况分布示意图。考虑到该船舶最常见的工况为离港工况、逆水巡航工况、顺水巡航工况、进港工况，本报告也基于这四种典型工况进行分析。



1-离港工况；2-逆水巡航工况；3-加速工况；4-顺水巡航工况；5-进港工况.

图 3-23 工况分布示意图

3.2.3.2 实际航行排放特征

3.2.3.2.1 不同工况下瞬态排放

图 3-40 至图 3-45 为不同工况下各气态物和颗粒物的瞬态排放。由于数据较多，每个工况只选取了具有代表性的 500s 来进行比较。图 3-40 至图 3-45 中，1、2、3、4 分别指代含义如下：1—离港工况，2—逆水巡航工况，3—顺水巡航工况，4—进港工况。

图 3-40 为不同工况下 CO 瞬态排放。由图 3-40 可以看出，离港和进港工况下 CO 排放速率波动较大，并且最大值出现在离港工况，达到 1.77g/s。逆水巡航和顺水巡航工况下 CO 的排放速率较稳定，且逆水巡航和顺水巡航工况下 CO 排

放速率变化不大，均稳定在 0.14g/s 左右。

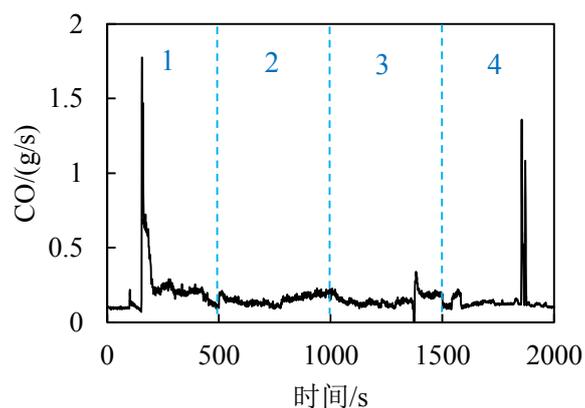


图 3-40 不同工况下 CO 瞬态排放

图 3-41 为不同工况下 CO_2 瞬态排放。由图 3-41 可以看出，离港和进港工况下 CO_2 排放速率波动较大，且最大值出现在离港工况，达到 34.50g/s。逆水巡航和顺水巡航工况下 CO_2 的排放速率分别稳定在 10.4g/s 和 12.7g/s 左右，顺水巡航工况下 CO_2 排放速率比逆水巡航工况高 21.5%，且二者均低于离港工况但高于进港工况。

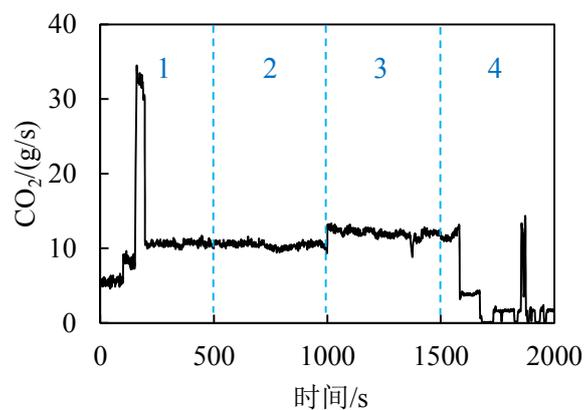


图 3-41 不同工况下 CO_2 瞬态排放

图 3-42 为不同工况下 THC 瞬态排放。由图 3-42 可以看出，离港和进港工况下 THC 排放速率波动较大，且最大值出现在离港工况，达到 0.047g/s。逆水巡航和顺水巡航工况下 THC 的排放速率分别稳定在 0.002g/s 和 0.005g/s 左右，顺水巡航工况下 THC 排放速率比逆水巡航工况约高 150%，且二者均低于离港工况但高于进港工况。

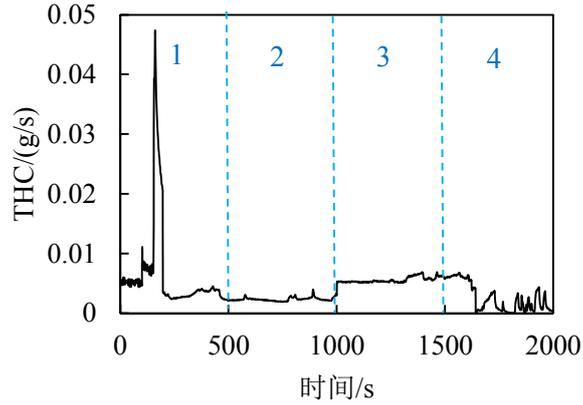


图 3-42 不同工况下 THC 瞬态排放

图 3-43 为不同工况下 NO_x 瞬态排放。由图 3-43 可以看出，离港和进港工况下 NO_x 排放速率波动较大，且最大值出现在离港工况，达到 0.32g/s 。逆水巡航和顺水巡航工况下 NO_x 的排放速率分别稳定在 0.16g/s 和 0.19g/s 左右，顺水巡航工况下 NO_x 排放速率比逆水巡航工况约高 18.7% ，且二者均低于离港工况但高于进港工况。

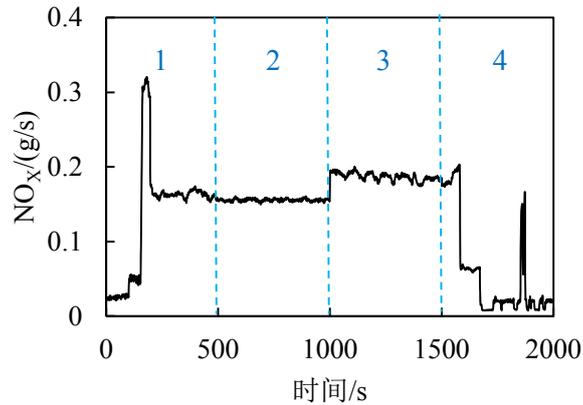


图 3-24 不同工况下 NO_x 瞬态排放

图 3-44 为不同工况下 PN 瞬态排放。由图 3-44 可以看出，离港和进港工况下 PN 浓度波动较大，且最大值出现在离港工况，达到 $3.82 \times 10^{13} \#/\text{s}$ 。逆水巡航和顺水巡航工况下 PN 浓度相差不大，均稳定在 $8.80 \times 10^{12} \#/\text{s}$ 左右。

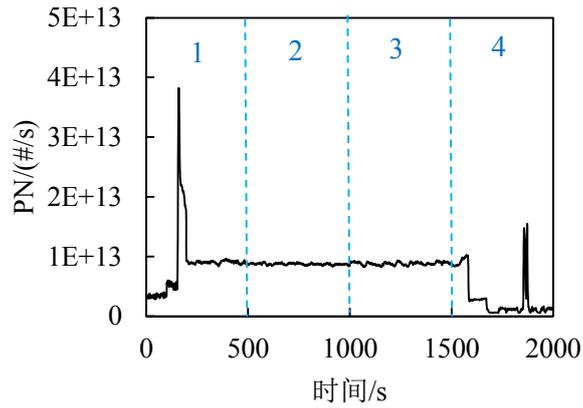


图 3-25 不同工况下 PN 瞬态排放

图 3-45 为不同工况下 PM 瞬态排放。由图 3-45 可以看出，离港和进港工况下 PM 浓度波动较大，且最大值出现在离港工况，达到 2.44g/s。逆水巡航和顺水巡航工况下 PM 浓度相差不大，均稳定在 0.13g/s 左右。

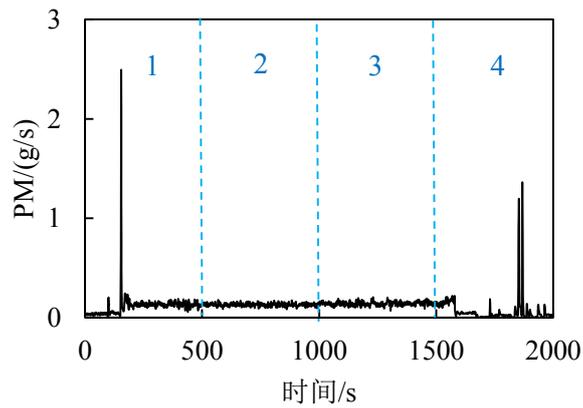


图 3-26 不同工况下 PM 瞬态排放

3.2.3.2.2 不同工况下排放因子

表 3-12 所示为不同工况下 CO、CO₂、THC、NO_x、PM 的单位时间排放因子。由表 3-12 可以看出，各工况 CO 单位时间排放因子按照大小顺序依次为离港、逆水巡航、顺水巡航、进港，而且离港工况下 CO 单位时间排放因子显著高于其他工况。逆水巡航、顺水巡航以及进港工况相对于离港工况分别降低了 61.3%、64.4%、70.2%。

表 3-12 不同工况下各排气成分单位时间排放因子

单位时间排放因子(g/h)	离港	逆水巡航	顺水巡航	进港	全程
CO	345.65	133.87	122.96	103.15	176.40
CO ₂	38374.90	35996.54	41712.96	11591.52	31918.98

THC	22.81	8.41	20.08	9.29	15.15
NO _x	480.85	560.05	673.18	202.27	479.09
PM	461.31	516.82	563.74	273.36	453.81

各工况 CO₂ 单位时间排放因子按照大小顺序依次为顺水巡航、离港、逆水巡航、进港，而且进港工况下 CO₂ 单位时间排放因子显著低于其他工况。顺水巡航、离港以及逆水巡航相对于进港工况分别增加了 259.9%、231.1%、210.5%。

各工况 THC 单位时间排放因子按照大小顺序依次为离港、顺水巡航、进港、逆水巡航。顺水巡航、进港、逆水巡航相对于离港工况分别降低了 12.0%、59.2%、63.1%。

各工况 NO_x 单位时间排放因子按照大小顺序依次为顺水巡航、逆水巡航、离港、进港，而且进港工况下 NO_x 单位时间排放因子显著低于其他工况。顺水巡航、逆水巡航、离港相对于进港工况分别增加了 232.8%、176.9%、137.7%。

各工况 PM 单位时间排放因子按照大小顺序依次为顺水巡航、逆水巡航、离港、进港，而且进港工况下 PM 单位时间排放因子显著低于其他工况。顺水巡航、逆水巡航、离港相对于进港工况分别增加了 106.2%、89.1%、68.8%。

表 3-13 所示为不同工况下 CO、CO₂、THC、NO_x、PM 的单位里程排放因子。由表 3-13 可以看出，各工况 CO 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、进港、逆水巡航、顺水巡航，而且离港工况下 CO 单位里程排放因子显著高于其他工况。进港、逆水巡航、顺水巡航相对于离港工况分别降低了 78.6%、79.6%、86.8%。

表 3-13 不同工况下各排气成分单位里程排放因子

单位里程排放因子(g/km)	离港	逆水巡航	顺水巡航	进港	全程
CO	42.13	8.60	5.58	9.01	12.32
CO ₂	4677.25	2312.56	1893.51	1012.22	2230.10
THC	2.78	0.54	0.91	0.81	1.06
NO _x	58.61	35.98	30.56	17.66	33.47
PM	56.23	33.20	25.59	23.87	31.71

各工况 CO₂ 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、逆水巡航、顺水巡航、进港，而且离港工况下 CO₂ 单位里程排放因子显著高于其他工况。逆水巡航、

顺水巡航、进港相对于离港工况分别降低了 50.6%、59.5%、78.4%。

各工况 THC 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、顺水巡航、进港、逆水巡航。而且离港工况下 THC 单位里程排放因子显著高于其他工况。顺水巡航、进港、逆水巡航相对于离港工况分别降低了 67.2%、70.8%、80.6%。

各工况 NO_x 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、逆水巡航、顺水巡航、进港。逆水巡航、顺水巡航、进港相对于离港工况分别降低了 38.6%、47.9%、69.9%。

各工况 PM 单位里程排放因子按照大小顺序依次为离港、逆水巡航、顺水巡航、进港，而且离港工况下 PM 单位时间排放因子显著高于其他工况。逆水巡航、顺水巡航、进港相对于离港工况分别降低了 40.9%、54.5%、57.5%。

表 3-14 所示为不同工况下 CO、CO₂、THC、NO_x、PM 的单位千克燃油排放因子。由表 3-14 可以看出，各工况 CO 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为离港、进港、逆水巡航、顺水巡航，而且进离港工况下 CO 单位里程排放因子显著高于巡航工况。进港、逆水巡航、顺水巡航相对于离港工况分别降低了 1.1%、58.3%、66.9%。

表 3-14 不同工况下各排气成分单位千克燃油排放因子

单位千克燃油排放因子(g/kg 燃油)	离港	逆水巡航	顺水巡航	进港	全程
CO	27.91	11.63	9.24	27.61	17.24
CO ₂	3098.28	3127.35	3134.69	3102.54	3118.68
THC	1.84	0.73	1.51	2.49	1.48
NO _x	38.82	48.66	50.59	54.14	46.81
PM	37.25	44.90	42.36	73.17	44.34

各工况 CO₂ 单位千克燃油排放因子变化不大。排放因子最小的离港工况相对于最大的顺水巡航工况仅降低 1.2%。

各工况 THC 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、离港、顺水巡航、逆水巡航。离港、顺水巡航、逆水巡航相对于进港工况分别降低了 26.0%、39.4%、70.6%。

各工况 NO_x 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、顺水巡航、逆

水巡航、离港。顺水巡航、逆水巡航、离港相对于进港工况分别降低了 6.6%、10.1%、28.3%。

各工况 PM 单位千克燃油排放因子按照大小顺序依次为进港、逆水巡航、顺水巡航、离港，而且进港工况下 PM 单位时间排放因子显著高于其他工况。逆水巡航、顺水巡航、离港相对于进港工况分别降低了 38.6%、42.1%、49.1%。

3.2.3.2.3 不同工况下粒径分布规律

图 3-46 所示为不同工况下粒径分布规律。各工况下的颗粒均聚集在 0-1 μm 粒径范围内，且颗粒数量浓度峰值对应粒径均为 120nm。离港、逆水巡航、顺水巡航、进港工况下颗粒数量浓度峰值分别为 $1.63\times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ 、 $1.44\times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ 、 $1.53\times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ 、 $7.62\times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ 。离港、逆水巡航、顺水巡航工况下颗粒数量浓度峰值显著高于进港工况，分别高出 114.2%、89.2%、100.6%。

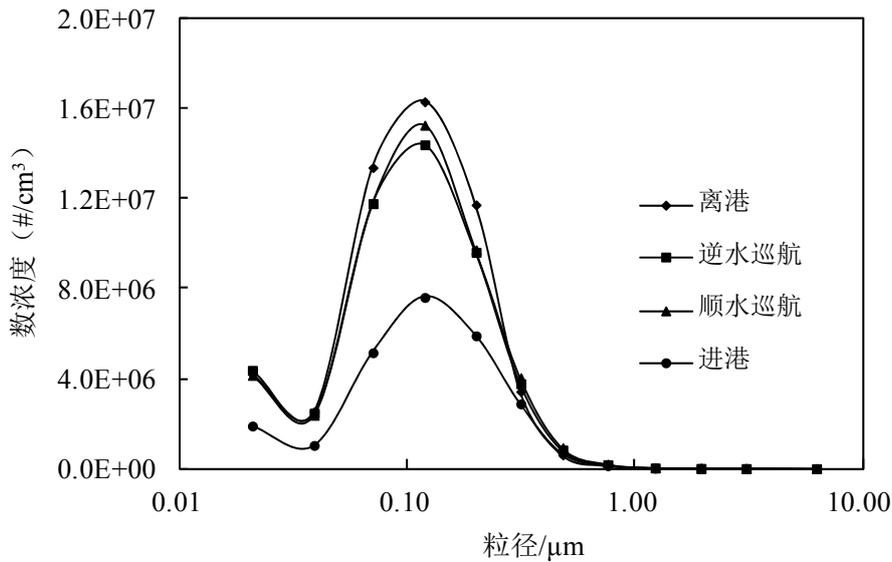


图 3-27 不同工况下粒径分布规律

3.2.3.3 不同航速下排放特征

图 3-47 所示为不同航速下 CO 平均排放率。从图 3-47 中可看出随着速度由 0 增加到 4km/h，CO 平均排放率显著上升；随着速度继续增加到 8km/h，CO 平均排放率有所下降；速度由 8km/h 继续增加时 CO 平均排放率趋向于平稳，总体变化不大。另外由图中可以看出速度为 0km/h 和 4km/h 时 CO 平均排放率达到最小值和最大值，分别为 0.11 g/s 和 0.21g/s。

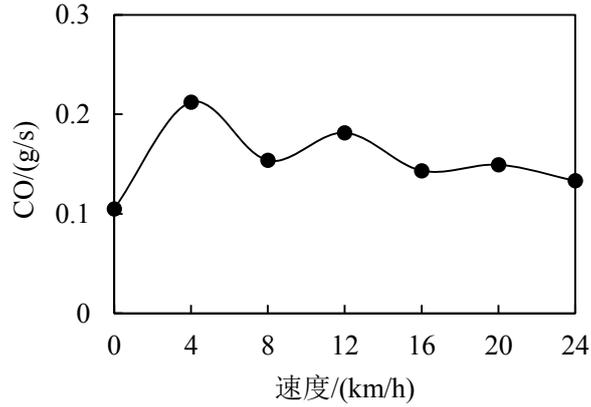


图 3-28 不同航速下 CO 平均排放率

图 3-48 所示为不同航速下 CO_2 平均排放率。从图 3-48 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, CO_2 平均排放率总体呈上升趋势,但在速度由 0 增加到 8km/h 时出现先上升后下降的波动。由图中可以看出速度为 0km/h 和 4km/h 时 CO_2 平均排放率达到最小值和最大值,分别为 1.84g/s 和 11.70g/s。

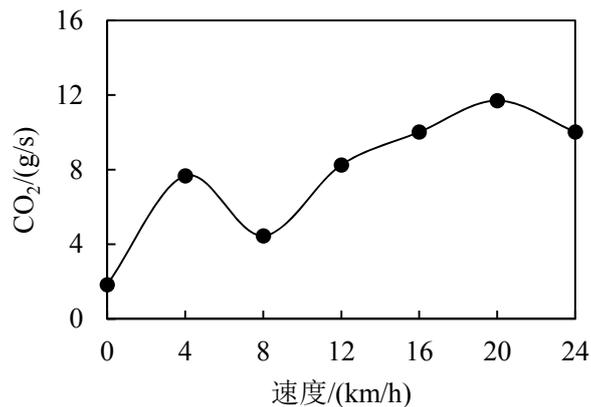


图 3-29 不同航速下 CO_2 平均排放率

图 3-49 所示为不同航速下 THC 平均排放率。从图 3-49 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, THC 平均排放率呈现先升高后降低再升高的趋势。由图中可以看出速度 8km/h 和 4km/h 时 CO 平均排放率达到最小值和最大值,分别为 0.001g/s 和 0.007g/s。

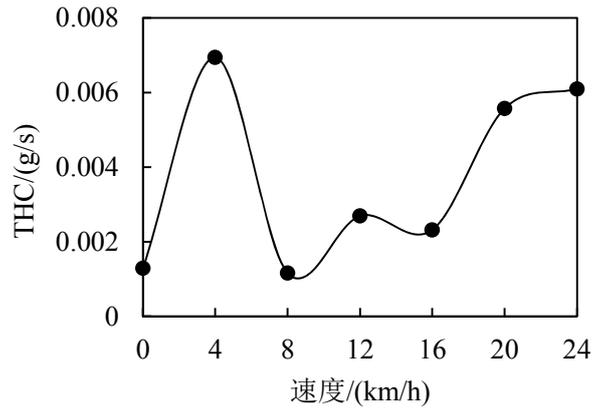


图 3-30 不同航速下 THC 平均排放率

图 3-50 所示为不同航速下 NO_x 平均排放率。从图 3-50 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, NO_x 平均排放率总体呈上升趋势, 在速度为 0km/h 和 20km/h 时 NO_x 平均排放率达到最小值和最大值, 分别为 0.02g/s 和 0.18g/s。

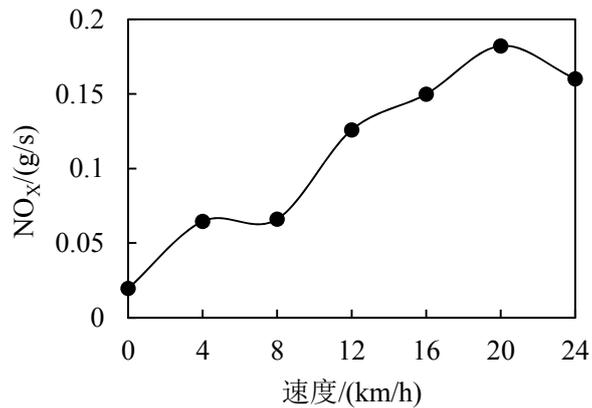


图 3-50 不同航速下 NO_x 平均排放率

图 3-51 所示为不同航速下 PN 平均排放率。从图 3-51 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h, PN 平均排放率总体呈上升趋势, 但在速度由 0 增加到 8km/h 时出现先上升后下降的波动。由图中可以看出速度为 0km/h 和 20km/h 时 PN 平均排放率达到最小值和最大值, 分别为 $1.5 \times 10^{12} \#/\text{s}$ 和 $9.5 \times 10^{12} \#/\text{s}$ 。

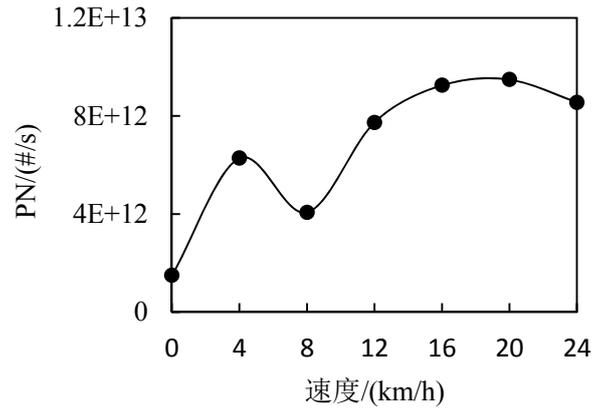


图 3-51 不同航速下 PN 平均排放率

图 3-52 所示为不同航速下 PM 平均排放率。从图 3-52 中可看出随着速度由 0 增加到 16km/h，PM 平均排放率总体呈上升趋势，但在速度由 0 增加到 8km/h 时出现先上升后下降的波动。由图中可以看出速度为 0km/h 和 20km/h 时 PM 平均排放率达到最小和最大值，分别为 0.04g/s 和 0.15g/s。

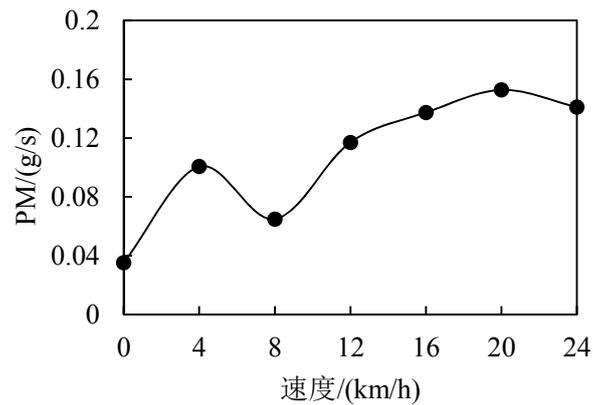


图 3-31 不同航速下 PM 平均排放率

3.2.3.4 小结

本章分析了船舶“沪环货 501”在实际航行过程中，气态物和颗粒物的瞬态排放特征、排放因子和粒径分布。然后统计了不同航速下各排放物的排放特征。结果如下。

(1) 离港工况下 CO 单位时间排放因子显著高于其他工况。THC 单位时间排放因子在离港和顺水巡航工况下较高。而进港工况下 CO₂、NO_x 和 PM 单位时间排放因子显著低于其他工况。除了 CO，其他排放物在顺水巡航工况下单位里程排放因子均高于逆水巡航。

(2) 离港工况下 CO、CO₂、THC、NO_x 和 PM 单位里程排放因子显著高于其他工况。而且各排放物在进港工况下的单位里程排放因子均较小。除了 THC，其他排放物在逆水巡航工况下单位里程排放因子均高于顺水巡航。

(3) 进离港工况下 CO、THC 单位千克燃油排放因子显著高于巡航工况。各工况下 CO₂、NO_x 单位千克燃油排放因子变化不大。进港工况下 PM 单位千克燃油排放因子显著高于其他工况。THC 顺水巡航工况下单位千克燃油排放因子显著高于逆水巡航工况，其他排放物在顺水巡航工况和逆水巡航工况下单位千克燃油排放因子相差不大。

(4) 各工况下的颗粒均聚集在 0-1 μ m 粒径范围内，且颗粒数量浓度峰值对应粒径均为 120nm。离港、逆水巡航、顺水巡航工况下颗粒数量浓度峰值显著高于进港工况。

(5) 随着速度的上升，各排放物平均排放率总体均呈上升的趋势，最大值均出现在速度为 20km/h 时。另外，各排放物平均排放率在速度由 0 增加到 8km/h 时均出现先上升后下降的波动。

3.3 不同类型船舶排放测试结果综合对比

3.3.1 不同船舶基于燃油的排放因子对比

本报告分别对上海港内三种不同类型的船舶进行了排放分析。图 3-53 所示为不同船舶 NO_x 及 PM 排放因子的比较。由于第三艘油污水处理船使用了测量范围更大的 ELPI，为了同小型集装箱船和车客渡船进行对比，只取了粒径小于 560nm 的颗粒进行计算。由图可知，在所测试的三艘船中，小型集装箱船的 NO_x 排放因子最高；油污水处理船的 NO_x 和 PM 排放因子都较高；车客渡船的 NO_x 和 PM 排放因子最低。

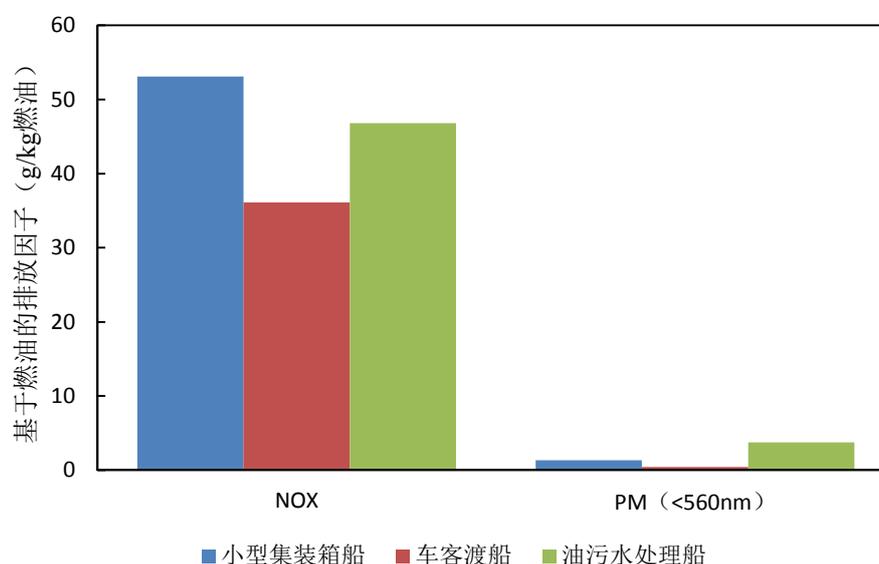


图 3-32 不同船舶 NO_x 、PM 排放因子比较

图 3-54 所示为不同船舶 CO 及 THC 排放因子的比较。由图可知，在所测试的三艘船中，小型集装箱船的 CO 排放因子最高，油污水处理船的 CO 排放因子最低；车客渡船的 THC 排放因子最高，小型集装箱船和油污水处理船的 THC 排放因子接近。

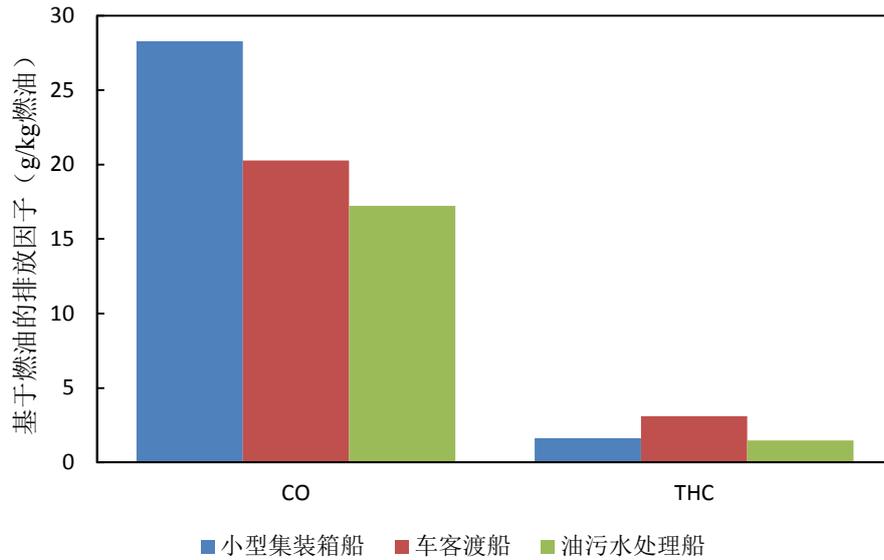


图 3-33 不同船舶 CO、THC 排放因子比较

图 3-55 所示为不同船舶 CO₂ 排放因子的比较。由图可知，在所测试的三艘船中，小型集装箱船的 CO₂ 排放因子最高，车客渡船和油污水处理船的 CO₂ 排放因子接近。

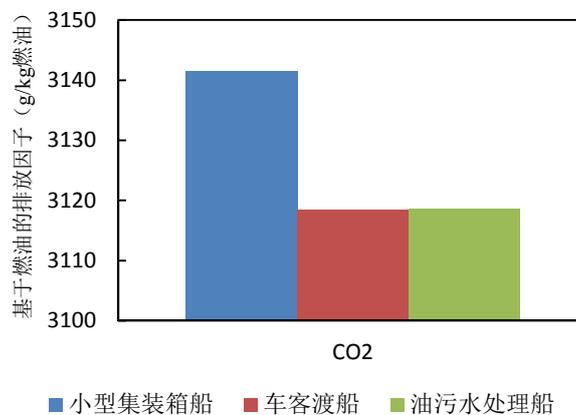


图 3-34 不同船舶 CO₂ 排放因子比较

3.3.2 不同工况基于燃油的排放因子对比

图 3-56 至图 3-60 所示为不同船舶在不同工况下基于燃油的排放因子比较。其中第三艘油污水处理船的巡航工况包含了顺水和逆水工况。图 3-56 为不同工况下 CO 排放因子的比较。由图可知，进港工况下三艘船的 CO 排放因子较高，离港工况其次，巡航工况最低。

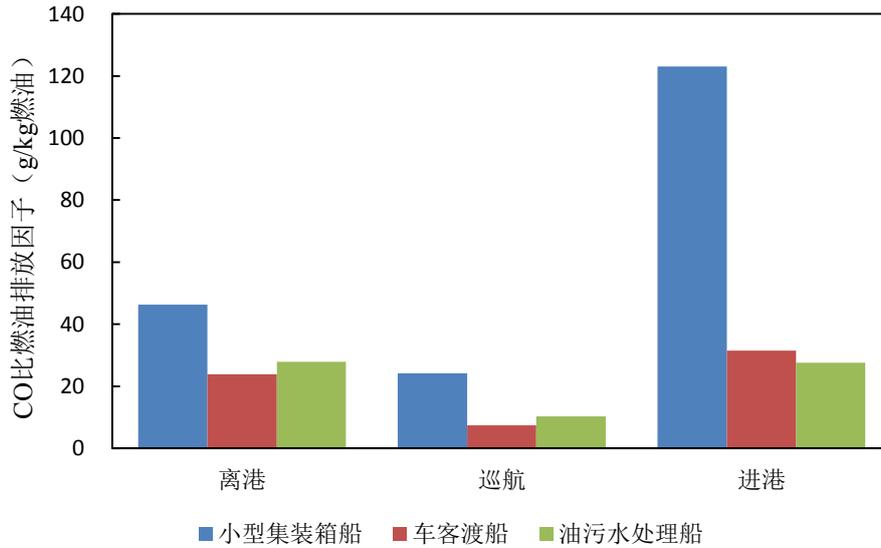


图 3-35 不同工况 CO 排放因子比较

图 3-57 为不同工况下 CO₂ 排放因子的比较。由图可知，除小型集装箱船外，巡航工况下三艘船的 CO₂ 排放因子较高，离港工况其次，进港工况最低。

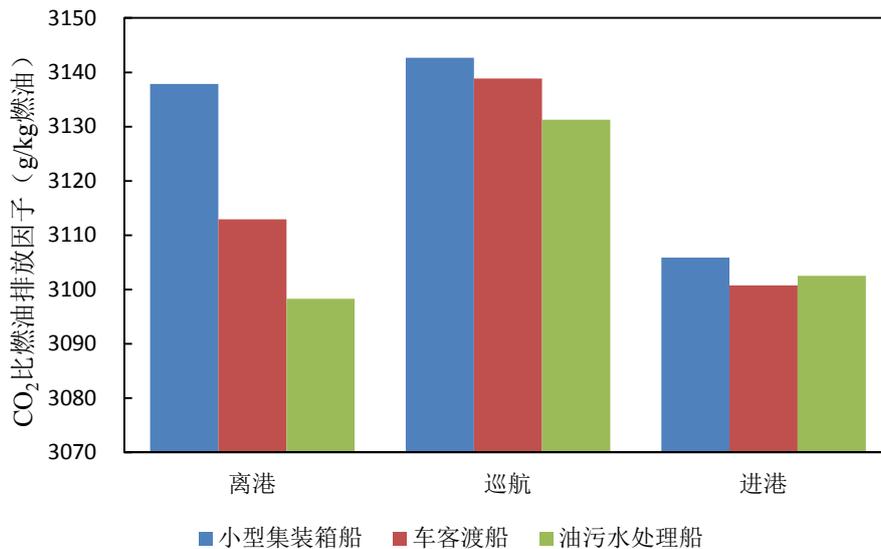


图 3-36 不同工况 CO₂ 排放因子比较

图 3-58 为不同工况下 THC 排放因子的比较。由图可知，除车客渡船三种工况下的排放因子比较接近外，其余两艘船在进港工况下的 THC 排放因子较高，离港工况其次，巡航工况最低。

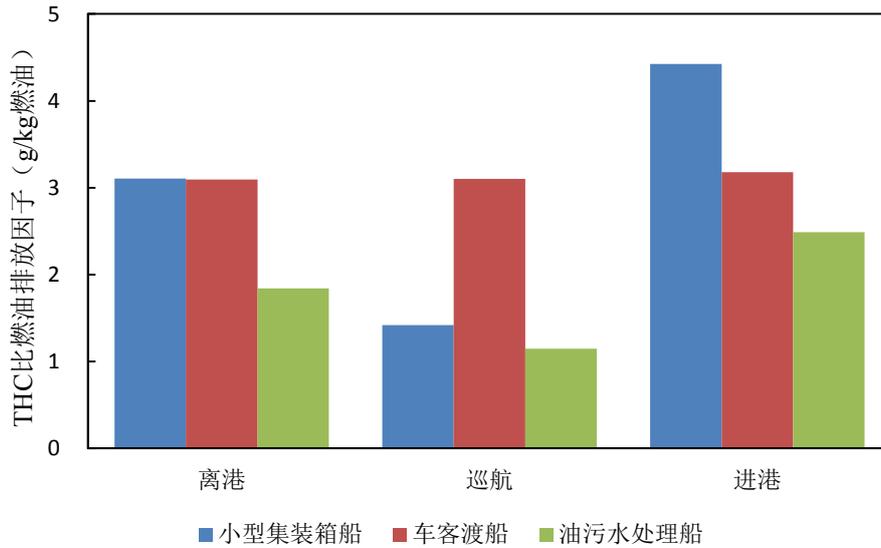


图 3-37 不同工况 THC 排放因子比较

图 3-59 为不同工况下 NO_x 排放因子的比较。由图可知，除小型集装箱船三种工况下的 NO_x 排放因子比较接近外，三艘船在进港工况下的 NO_x 排放因子较高，巡航工况其次，离港工况最低。

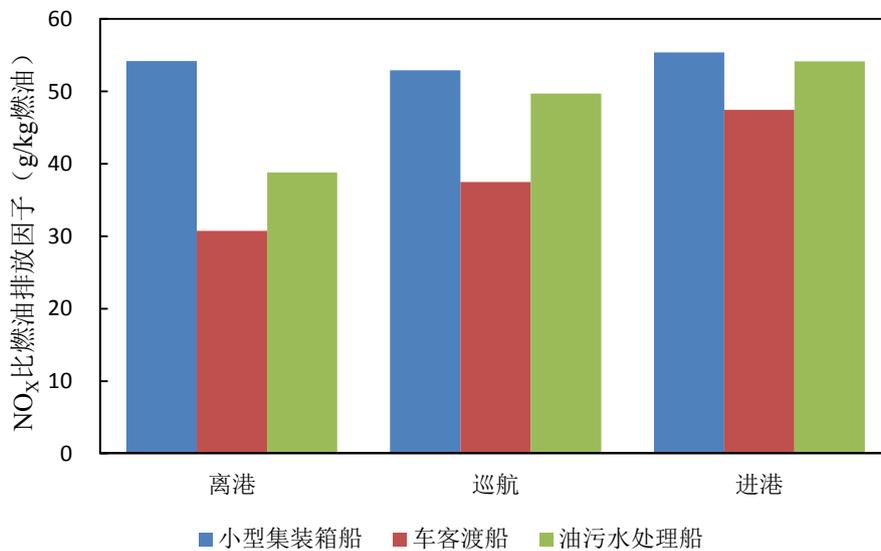


图 3-38 不同工况 NO_x 排放因子比较

图 3-60 为不同工况下 PM 排放因子的比较。由图可知，总体上三艘船在进港工况下的 PM 排放因子较高。

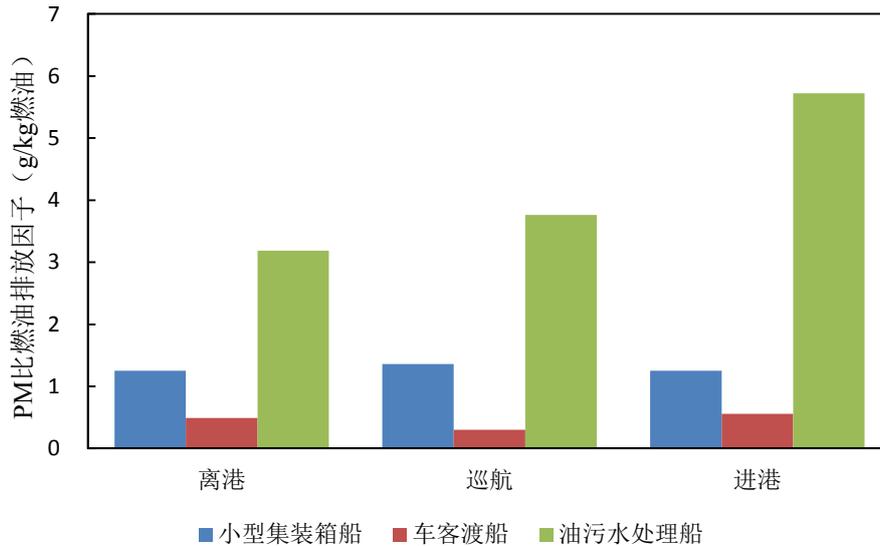


图 3-60 不同工况 PM 排放因子比较

3.3.3 小结

本章利用基于燃油的排放因子综合比较了三艘船舶排放的测试结果，以及对不同工况下的排放因子进行了规律分析。结果如下。

(1) 在所测试的三艘船中，小型集装箱船的 CO 、 CO_2 和 NO_x 排放因子最高；车客渡船的 THC 排放因子最高， NO_x 和 PM 排放因子最低， CO 排放因子处于三艘船舶的中间水平， CO_2 排放因子和油污水处理船接近；油污水处理船的 CO 和 THC 排放因子最低，但 NO_x 和 PM 排放因子都较高，其中 PM 排放因子为三艘船舶中最高。

(2) 总体上，三艘船舶在进港工况下 CO 、 THC 、 NO_x 和 PM 比燃油排放因子高于其他工况；巡航工况下三艘船舶的 CO 、 THC 排放因子相对较低；离港工况下 NO_x 和 PM 排放因子相对较低；巡航工况下三艘船舶的 CO_2 排放因子较高，离港、进港工况相对较低。

3.4 船舶排放实船测试总结

本课题采用国际先进的移动源瞬态气态排放测试设备和颗粒物粒径分析仪，集成船舶排气流量测试和稀释采样技术，在上海市内河及外港开展内河及近海船舶瞬态特性检测研究。通过对不同类型、不同航行特征船舶在特定水域的瞬态尾气（包括气态排放物和颗粒物）排放特性试验，重点考核船舶航行工况及航速对气态物及颗粒物排放特性的影响，分析内河及近海船舶在不同活动水域（内河及近海）、不同运行工况（离港、巡航、进港）的瞬态排放特性，建立上海港内河及近海船舶的瞬态排放数据库，为环保部门对船舶污染物排放监管提供数据支持，为推动船用柴油机的技术改进、排污控制等方面提供技术支持；为建立、健全上海市非道路移动源排放清单以及评估非道路移动源污染物排放对大气环境的影响提供科学依据。

在本研究报告中，根据不同类型船舶的实时排放测试结果，从实际航行排放特征、不同航速下排放特征等方面研究了不同船舶类型、不同航行工况、不同航速等因素对颗粒物、气态物排放特性的影响。分析结果如下：

(1) 三艘船舶各污染物（CO、CO₂、THC、NO_x和PM）的瞬时排放浓度在巡航阶段相对稳定，进出港工况污染物浓度波动较大，且容易出现峰值。CO、THC总体排放水平较低，NO_x和PM总体排放水平较高。

(2) 三艘船舶各工况下的颗粒均聚集在0-1μm粒径范围内，且颗粒数量浓度峰值对应粒径均在120nm以下。

(3) 随着速度的上升，各排放物平均排放率总体均呈上升的趋势。

(4) 在所测试的三艘船中，小型集装箱船的CO、CO₂和NO_x比燃油排放因子最高；车客渡船的THC比燃油排放因子最高，NO_x和PM比燃油排放因子最低，CO排放因子处于三艘船舶的中间水平，CO₂比燃油排放因子和油污水处理船接近；油污水处理船的CO和THC比燃油排放因子最低，但NO_x和PM比燃油排放因子都较高，其中PM比燃油排放因子为三艘船舶中最高。

(5) 总体上，三艘船舶在进港工况下CO、THC、NO_x和PM比燃油排放因子高于其他工况；巡航工况下三艘船舶的CO、THC比燃油排放因子相对较低；离港工况下NO_x和PM比燃油排放因子相对较低。

4. 上海港船舶燃料油供应情况调查

进出长三角区域的船舶从类型上主要分为远洋船舶，沿海船舶，定期签证船舶，外港水域内河船舶以及内河水域内河船舶五类。在这五类船舶中，远洋船与沿海船都属于海船，其燃料油多为重油或渣油；内河船舶多为柴油。而对于船用柴油，目前国家未出台强制性标准。

4.1 船舶燃料种类

我国船用燃料油国家标准 GB/T17411-2012 是按照国际标准 ISO8217-2010 执行的，没有强制性的企业及行业标准。根据我国国家推荐标准规定，船用燃料油分为两类产品，一是馏分型船用燃料，二是残渣型船用燃料。

馏分型燃料包括 DMX（相当-10#轻柴油）、DMA（相当 0#轻柴油）、DMB（相当 5#轻柴油）、DMC（相当 10#重柴油或 20#重柴油），主要在高速柴油机及中速柴油机中使用，主要是为短距离航行的中小型船舶提供动力，例如在长江、运河航行的运沙土船、渔船、干散货船等等，或用于船舶的辅机发电使用等。

馏分型燃料油的称谓上还有 MGO 和 MDO 等不同的说法，都是柴油馏分，粘度不同，MGO(MarineGasOil)是轻柴油，适用于高速柴油机使用。MDO(MarineDieselOil)是重柴油，适用于中速柴油机。

残渣型燃料包括船用残渣燃料油 RMD15（或称为 120#）、RME25（或称为 180#）、RMG35（或称为 380#）。主要用于低速柴油机，或者与馏分型燃料混合后用于低速柴油机。船用燃料油根据 50℃时运动粘度的差异，通常分为 180CST、380CST、500CST 等，主要用在国际运输船舶，以及在沿海、沿江运输的较大船型上，发动机马力大的要求的粘度高，最高可达到 700CST。目前 180CST、380CST 是市场上的主流品种。

1980 年，ISO 设立了 ISO/TC28/SC4/WG6（石油关系技术委员会/分类、标准分技术委员会/船用燃料油的分类、规程标准工作小组），在 1979 年，英国标准协会拟定了船用燃料油规格标准的草案，ISO 以此参考对船用燃料油的标准进行了探讨。ISO 于 1982 年举办的第五次工作会议上，将船用燃料油标准的原案，提交技术标准委员会报批，在 1987 年形成了 ISO8217 标准稿。此标准针对当时船用燃料油的劣质趋向，对相关指标提出了标准化的规定，同时对未来的油品指标特性做出了限制。

国际船用燃料油规格标准（初版）与 1987 年制定，1996 年经过修订，颁布第二版，为 ISO8217-1996。由于燃料油的粘度并不是唯一可靠的质量指标，所以在 ISO8217-1996 标准中，对船用燃料油的质量特性评价包括了粘度、密度、灰分、倾点、残炭、硫含量、钒含量等多项参数。ISO8217 系列发布之后，有效的控制了船用燃料油品质的劣质化情况。标准经过不断修订于 2010 年颁布了 ISO8217-2010，见表 4-1。

表 4-1 ISO8217 中油品质量的要求

项目	单位	限值	RMA	RMB	RMD	RME	RMG				RMK			方法
			10	30	80	180	180	380	500	700	380.0	500.0	700.0	
运动粘度 50℃	mm ² /s	Max	10.00	30.00	80.00	180.0	180.0	380.0	500.0	700.0	380.0	500.0	700.0	ISO3104
密度 15℃	Kg/m ³	max	920.0	960.0	975.0	991.0	991.0				1010.0			ISO3675 或 12185
CCAI	--	max	850	850	860	860	870				870			
硫分	m%	max	法定要求										ISO8754 或 14596	
闪点	℃	Min	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0				60.0			ISO2719
硫化氢	mg/kg	max	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00							IP570
酸值	Mg KOH/g	max	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5				2.5			ASTM D664
总不溶物	m%	max	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10				0.10			ISO 10307-2
微量残碳	m%	max	2.50	10.00	14.00	15.00	18.00				20.00			ISO10370
倾点冬季	℃	max	0	0	30	30	30				30			ISO3016
夏季	℃	max	6	6	30	30	30				30			ISO3016
水分	Vol%	max	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50				0.50			ISO3733
灰分	m%	max	0.040	0.070	0.070	0.070	0.100				0.150			ISO6245
钒	mg/kg	max	50	150	150	150	350				450			IP501,470 或 ISO 14597
钠	mg/kg	max	50	100	100	50	100				100			IP501,470
铝+硅	mg/kg	max	25	40	40	50	60				60			IP501,470 或 ISO 10478
废油 (ULO) 钙和锌 或钙和磷	mg/kg	燃油中不应含有废油。如果燃油中有锌、磷、钙的一种或多种，其含量超过限制值，则燃油被认为含有废油。 Ca>30 和 Zn>15 或 Ca>30 和 P>15										IP501,470 或 500		

4.2 上海港国际航行船舶燃油供应情况

从燃油供应体系来分析，远洋船使用的为保税油，且必须遵守国际海事组织防污公约 MARPOL 附则 VI 的规定，使用含硫量低于 3.5% 的燃料油。在上海港提供保税油的公司一共有 5 家，分别是上海中燃船舶燃料有限公司，上海中燃石油有限公司，中石化长江燃料有限公司上海分公司，深圳光汇石油集团（上海）有限公司，中石化浙江舟山石油有限公司。

上海海事局要求所有供油企业定期对其燃油进行送样检查，同时也会开展

油品质量的不定期抽查。据统计，五家保税油共有公司的燃料油（即重油）的平均含硫量 2.9%左右。若保税油 IFO 燃油硫含量降低到 1% m/m 时，船公司燃油成本将增加 40 美元/吨；若用 0.1% m/m 及以下的船用瓦斯油（MGO）时，船公司燃油成本则大幅增加 400 美元/吨。

4.3 上海港国内航行船舶燃油供应情况

国内对于船舶用油没有相关强制要求，故沿海船的燃料油含硫量并没有得到控制。对于内河船，我国于 2013 年出台了《船用燃料油》（GB/T 17411-2012），要求船用馏分油硫含量控制在 1.5%，船用残渣油含硫量控制在 2.0%-3.5%。但该标准仅为推荐性标准，约束力相对较弱。加之目前上海港国内船舶的燃油供应体系较为混乱，与机动车进加油站加油不同，船舶还可通过加油船加注燃油。据调研，上海目前有近 2000 家燃料供应企业为内河船及沿海船加油，燃料并非全部来自中国中石化、中石油和中海油这 3 大炼油公司，不排除在燃油中添加废旧机油以降低成本的可能。

性能		品种 ISO-F-				试验方法
		DMX	DMA	DMZ	DMB	
运动黏度(40℃)/(mm ² /s)	不大于 不小于	5.500 1.400	6.000 2.000	6.000 3.000	11.00 2.000	GB/T 265
密度(满足下列要求之一) 15℃/(kg/m ³) 20℃/(kg/m ³)	不大于 不大于	—	890.0 886.5	890.0 886.5	900.0 896.5	GB/T 1884 和 GB/T 1885 ^c
十六烷指数	不小于	45	40	40	35	SH/T 0694
硫含量 ^b (质量分数)/%	不大于	1.00	1.50	1.50	1.50	GB/T 17040 ^e
闪点(闭口)/℃	不低于	43.0	60.0	60.0	60.0	GB/T 261(步骤 A)
硫化氢 ^d /(mg/kg)	不大于	2.00	2.00	2.00	2.00	IP 570
酸值(以 KOH 计)/(mg/g)	不大于	0.5	0.5	0.5	0.5	GB/T 7304
总沉积物(热过滤法)(质量分数)/%	不大于	—	—	—	0.10 ^e	SH/T 0701
氧化安定性/(g/m ³)	不大于	25	25	25	25 ^f	SH/T 0175
10%蒸余物残炭(质量分数)/% 残炭(质量分数)/%	不大于 不大于	0.30 —	0.30 —	0.30 —	— 0.30	GB/T 17144
浊点/℃	不大于	-16	—	—	—	GB/T 6986
倾点 ^g /℃ —— I —— II	不高于	— —	-6 0	-6 0	0 6	GB/T 3535
外观		清澈透明 ^b			^h	目测
水分(体积分数)/%	不大于	—	—	—	0.3 ^a	GB/T 260
灰分(质量分数)/%	不大于	0.010	0.010	0.010	0.010	GB/T 508
润滑性 ⁱ 磨痕直径(60℃)/μm	不大于	520	520	520	520 ^j	SH/T 0765

本研究抽取了来自不同地区的 9 艘内河船舶，对其燃料油的油品含硫量做了抽样调查，结果如下：

船舶名称	加油地点	船舶发动机型号	功率 (kW)	油品含硫量
安吉货某号	湖州加油站	上柴 6135AcA	110.3	0.0164%
兴良机某号	上海加油船	上柴 6135A	88.3	0.0878%
皖庐江货某号	加油船	上柴 6135AcA	110.3	0.0763%
浙桐乡货某号	浙江加油站	上柴 6135JZCA	140	0.0178%
浙嘉兴槽某号	上海加油站	NT6135CZRX 南通柴	128.7	0.0346%
赣九江货某号	上海加油站	上柴 6135AcA	110.3	0.0407%
皖怀远货某号	上海加油站	上柴 6135AcA	110.3	0.0564%
皖固镇货某号	上海加油船	上柴 6135AcA	110.3	0.088%
苏盐货某号	江苏加油站	上柴 6135AcA	110.3	0.0180%

从抽检结果可以看出，不同来源的柴油，其油品含硫量有较大区别，总体上来分析，加油站油品质量要好于加油船油品质量，同时令人意外的是，外地加油站的油品含硫量要低于上海本地加油站提供的柴油含硫量。

4.4 小结

据上海交通委和中国船级社相关研究表明，燃料成本占整个航运成本近 30%，同时燃油质量对船舶动力系统的维护只管重要，由于燃油杂质多，质量不稳定引起的机械故障次数近年来不断增加。据调查，除含硫量外，国内船舶燃料油中杂质较多，质量相对保税油较为不稳定。

从目前上海港船舶燃油供应实际情况来分析，考虑到油价关系，远洋船通常

会在新加坡港加油，且油品质量在 IMO 的规定下有一定保证；内河船舶燃油虽然有没强制性标准进行规范，但是由于发动机无法使用高粘度和高含硫量的燃油，其油品质量相对于海船要好，但非正规渠道的燃油流入市场，对内河船舶大气污染物的防控不利；而沿海船则主要靠船东和船公司自主选择燃油，其质量不确定性较大。

通过出台相应标准，来规范燃油市场，优化燃油质量，同时提出船舶使用低硫燃料的激励政策是从油品方面改善船舶大气污染物排放的突破口。若上海港出台相应政策，应考虑分步实施，从而降低对本市及周边港口低硫燃油供应的冲击。

5. 上海港船舶大气污染物排放清单

5.1 2013 年上海港船舶航行概况

据上海海事局和上海市地方海事局统计，上海港 2013 年共进出港船舶 212.0 万艘次，其中国际航行船舶 3.9 万艘次，占进出港总数的 1.8%，沿海船舶 13.1 万艘次，占 6.2%，外港水域内河船 130.1 万艘次，占 61.4%，内河水域内河船舶 64.9 万艘次，占 30.9%。（见图 5-1）

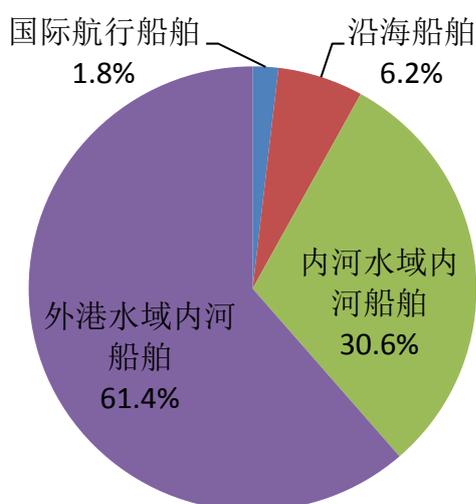


图 5-1 2013 年上海港进出港船舶艘次分布

从船舶总吨来统计，国际航行船舶总吨共 147405.1 万吨位，占进出港船舶总吨总数的 51%，沿海船舶总吨共 55308.0 万吨位，占 19.2%，外港水域内河船总吨共 66108.6 万吨位，占 22.9%，内河水域内河船总吨共 66108.6 万吨位，占 22.9%。（见图 5-2）

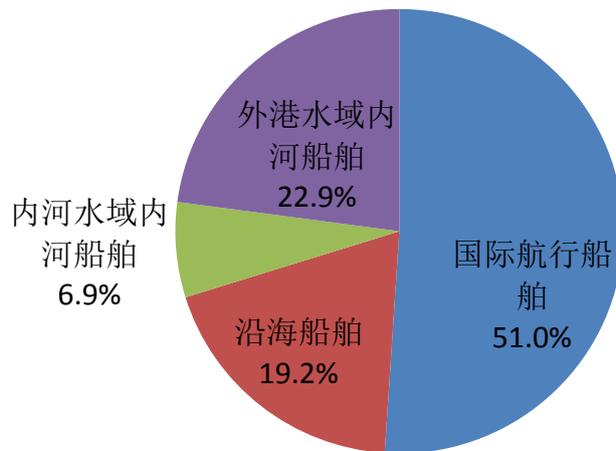


图 5-2 2013 年上海港进出港船舶总吨分布

5.2 船舶大气污染物及 PM_{2.5} 排放清单研究方法

上海港由水域部分与港口部分组成，其中上海港水域由两部分组成：外港水域与内河水域，外港水域由上海海事局进行管理，内河水域由上海市地方海事局进行管理；上海港港口码头由上海港港政管理中心进行管理。根据上海港海事部门的行政划分，本章分别对国际航行船舶、沿海船舶、外港水域航行的内河船舶、内河水域航行的内河船舶排放开展研究，获得上海港港口船舶各种大气污染物排放量。

5.3 船舶大气污染物排放清单计算范围

本课题研究的远洋船大气污染物排放清单主要关注进出上海港主要航道上的远洋船大气污染物排放。对于支线航道，由于缺少具体的流量信息，在此次排放清单中，一并纳入主要航道排放量中进行计算。

上海港远洋船主要从东海进入上海港港区，船舶航行的航道较为规律。目前，上海港外港船舶主要从以下几条航道进入上海港区：长江口深水航道、南槽航道、外高桥航道、宝山航道、洋山航道、金山航道以及漕泾东航道。

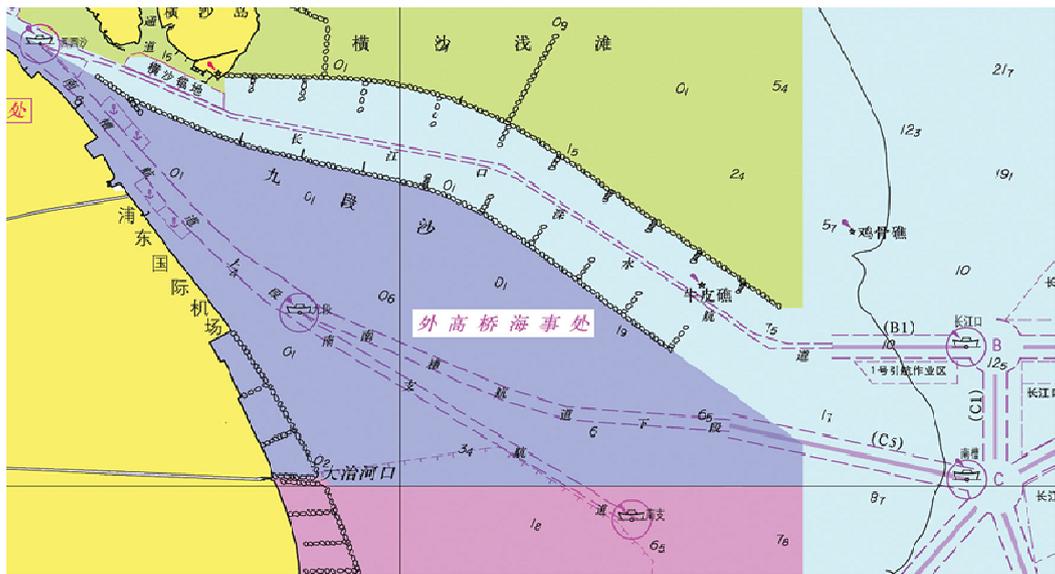


图 5-3 长江口深水航道与南槽航道示意图

如图 3-7 所示,长江口深水航道计算起点为长江口灯船,终点为圆圆沙灯船,航线长度为 43 海里,南槽航道计算起点为南槽航标,终点为圆圆沙灯船,航线长度为 46.7 海里,所有停靠崇明海事局,浦东海事局,宝山海事局,吴淞海事局,杨浦海事局,黄浦海事局,闵行海事局以的途经此航道的的外港船舶的大气污染物排放量都计算入本次排放清单内。

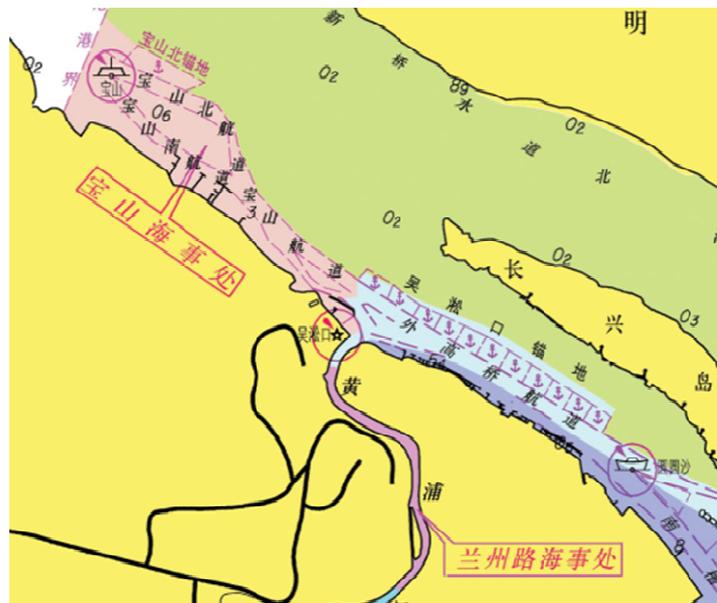


图 5-4 外高桥与宝山航道示意图

如图 3-8 所示,外高桥航道东起圆圆沙灯船,西至吴淞口航标,航道长度 10.6 海里,所有停靠吴淞海事局,宝山海事局,杨浦海事局,黄浦海事局,闵行海事

局的途经此航道的外港船舶的大气污染物排放量都计算入本次排放清单内。

宝山航道东起吴淞口航标，西至宝山航标，从吴淞口至罗泾航道长度为 6.7 海里。所有停靠宝山海事局的途经此航道的外港船舶的大气污染物排放量都计算入本次排放清单内。

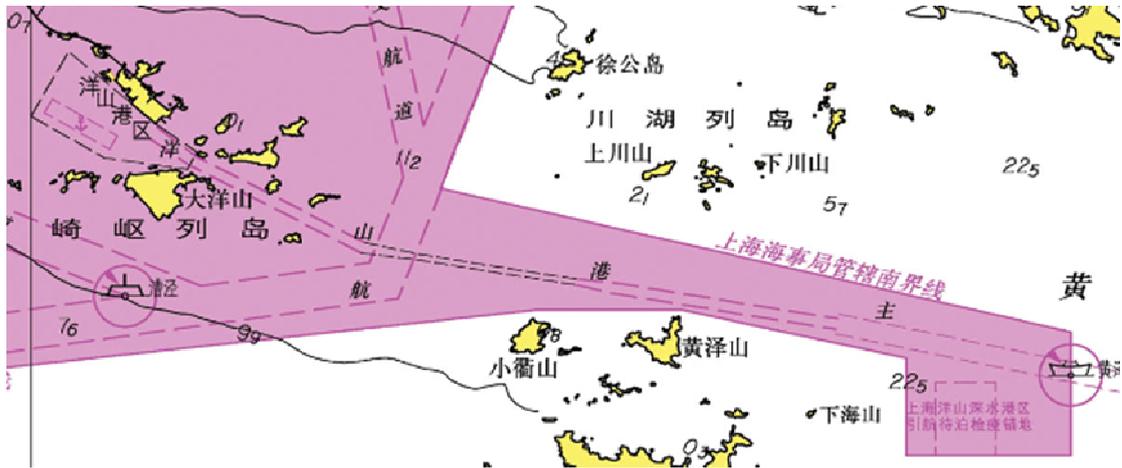


图 5-5 洋山主航道示意图

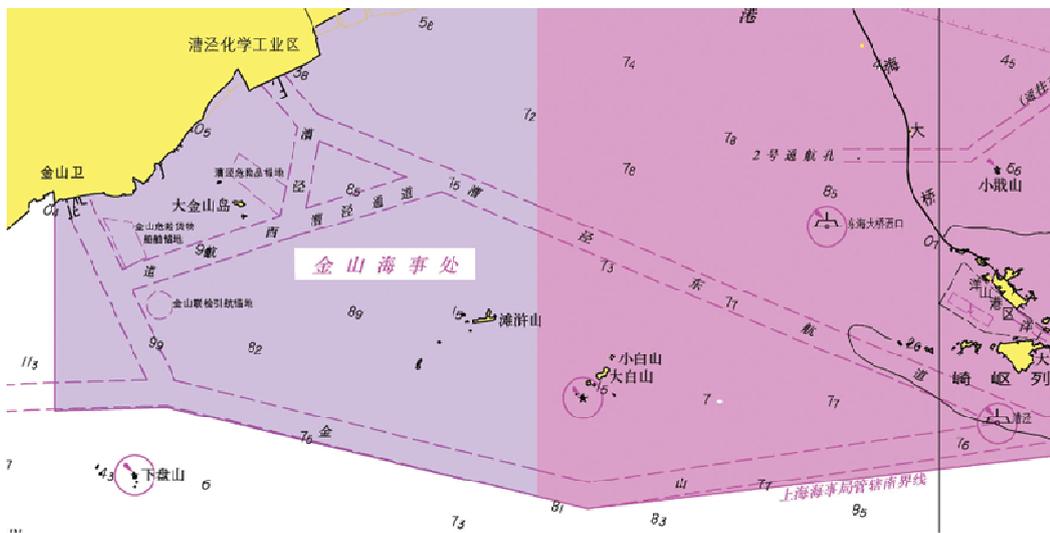


图 5-6 金山和漕泾东航道示意图

如图 5-5 所示，洋山主航道东起黄泽洋灯船，西至洋山港区，航道长度 26.5 海里，所有停靠洋山海事局和金山海事局的外港船舶途经此航道的大气污染物排放都计算入内。

如图 5-6 所示，金山航道东起北鼎星岛，东至金山卫，主要航运活动集中在洋山主航道以西的部分，金山航道从东经 121°30'到东经 121°57'长度为 24 海里。

通过航线经纬度计算可知，从洋山主航道其至金山卫码头的航线长度为 66 海里；漕泾东航道东起漕泾航标，西至漕泾化工区码头，航道长度为 30 海里；因为缺乏准确的金山航道和漕泾东航道流量信息，此次大气污染物排放清单测算中假设如下：金山航道和漕泾航道在金山航道漕泾航标处分流后，各有 50% 的外港船舶经金山航道和漕泾航道进入港区，而对于漕泾西航道和漕泾通道的船舶大气污染物排放，则统一计算入金山航道和漕泾航道内。

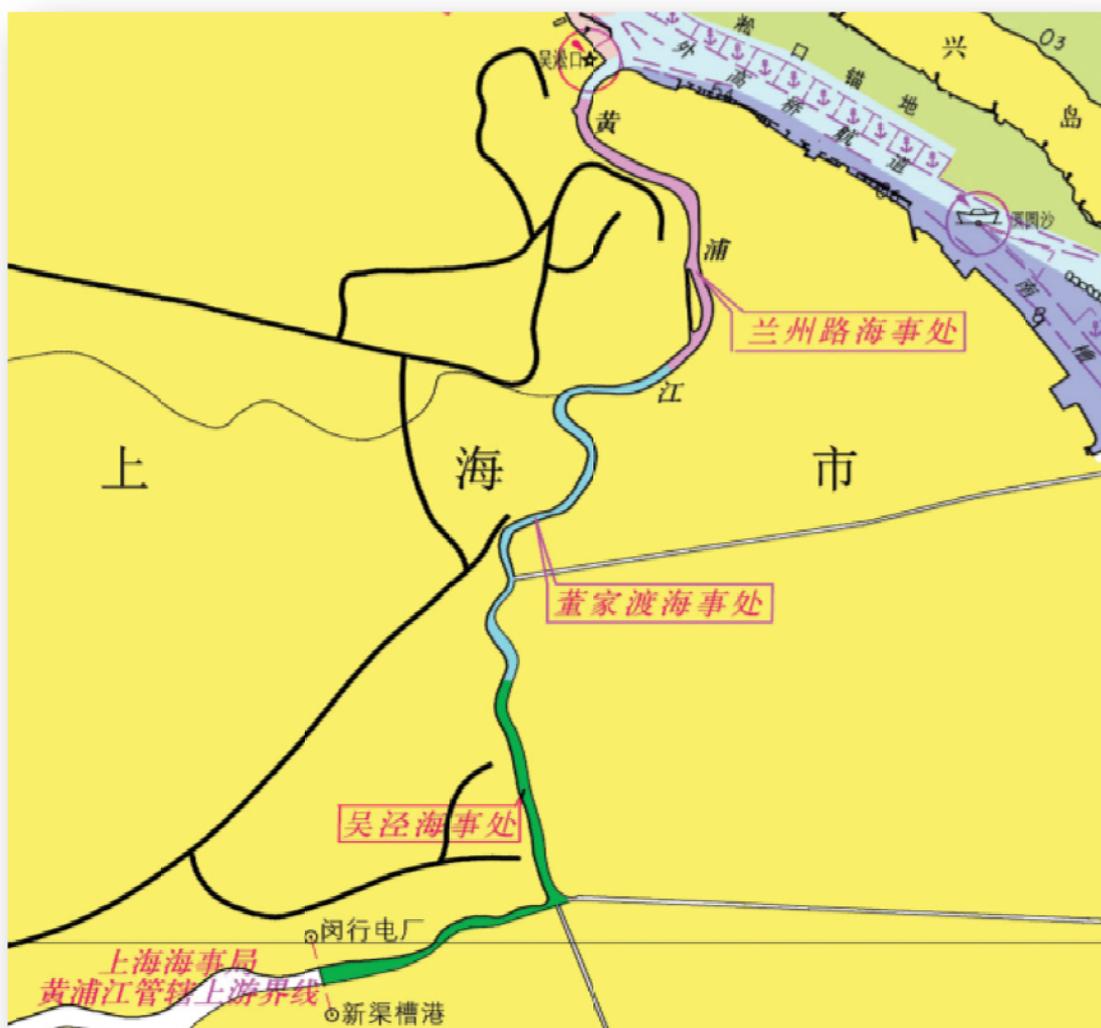


图 5-7 黄浦江航道示意图

如图 5-7 所示，黄浦江航道北起吴淞口，南至闵行电厂与新渠槽港界线，停靠杨浦海事局、黄浦海事局、闵行海事局的船舶均须经过黄浦江。

内河水域航行的内河船舶排放清单的研究方法与外港水域航行的内河船舶研究方法相同。但是在排放清单的地理范围上有所区分。



图 5-8 内河排放清单范围

如图 5-8 所示，本次内河船舶排放研究的范围为上海市内河主要航道，包括黄浦江上游航道，通航里程 23.39 公里；苏申外港线航道，通航里程 35.50 公里；太浦河航道，通航里程 14.36 公里；杭申线航道，通航里程 17.24 公里；平申线航道，通航里程 19.30 公里；吴淞江航道，通航里程 40.22 公里；淀浦河航道，通航里程 49.95 公里；苏申内港线航道，通航里程 46.69 公里；川杨河航道，通航里程 28.62 公里；大治河航道，全长 38.04 公里。内河主要航道在地图上用紫色表示，形成“一环十射”的形状。

5.4 船舶排放因子和工况设定

除了出厂柴油机的型式核准外，国内对于在用船柴油机排放因子开展的研究比较有限，故本研究使用美国洛杉矶港船舶排放清单中的排放因子^[14]。

由于目前对于船舶 AIS 系统解析尚无法对船舶工况进行分析，故本研究沿用了 2011 年《上海市港口及船舶污染物排放情况调查和对策研究》课题中对于船舶工况的设定^[15]，对于对部分工况进行了修订。

5.5 上海港船舶 PM_{2.5} 及主要大气污染物排放清单

2013 年上海港船舶共排放颗粒物 PM₁₀: 0.33 万吨、PM_{2.5}: 0.27 万吨、DPM: 0.32 万吨, 气态污染物 NO_x: 5.4 万吨、SO_x: 2.3 万吨、CO: 0.4 万吨、HC: 0.2 万吨。

5.5.1 国际航行船舶

2013 年上海港国际航行船舶排放 PM₁₀: 0.22 万吨, 占 2013 年上海港船舶 PM₁₀ 排放量的 66.7%, PM_{2.5}: 0.18 万吨, 占 66.7%, DPM: 0.21 万吨, 占 66.4%, NO_x: 2.4 万吨, 占 45.6%, SO_x: 1.7 万吨, 占 74.4%, CO: 0.2 万吨, 占 44.0%, HC: 0.1 万吨, 占 43.1%。

表 5-1 2013 年上海港各类国际航行船舶排放分担率

船舶种类	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
集装箱船	85.8%	85.9%	86.0%	85.1%	86.4%	85.2%	85.2%
散货船	5.2%	5.2%	5.3%	5.4%	4.6%	5.3%	5.4%
滚装船	4.9%	4.9%	4.9%	4.7%	4.8%	4.6%	4.4%
其他货船	2.6%	2.6%	2.7%	3.5%	2.4%	3.5%	3.6%
油船	1.0%	1.0%	0.7%	0.8%	1.3%	0.8%	0.8%
化学品船	0.4%	0.4%	0.3%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%
非运输船	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
顶推拖轮	0.01%	0.01%	0.01%	0.04%	0.003%	0.05%	0.05%

如表 5-2 所示, 2013 年上海港国际航行船舶集装箱船排放量最大, 约占所有国际航行船舶大气污染物排放 85%, 按 PM_{2.5} 排放排序, 排放贡献最多的依次是集装箱船、散货船、滚装船、其他货船、油船、化学品船、非运输船和顶推拖轮。

表 5-2 2013 年上海港国际航行船舶各工况排放分担率

工况	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
巡航	71.7%	72.0%	76.7%	77.0%	63.1%	77.6%	78.4%
装卸作业	14.3%	14.0%	9.1%	10.1%	22.6%	9.8%	8.9%
进出港	13.0%	13.0%	13.5%	12.1%	12.9%	11.8%	12.1%
靠泊	1.0%	1.0%	0.7%	0.8%	1.4%	0.8%	0.7%

2013 年, 国际航行船舶排放主要集中在巡航工况, 其次是装卸作业和进出港工况, 靠泊无作业状况下排放较少。

5.5.2 沿海船

2013 年上海港沿海船排放 PM₁₀: 0.08 万吨, 占 2013 年上海港船舶 PM₁₀ 排

放量的 23.8%，PM_{2.5}: 0.06 万吨，占 23.8%，DPM: 0.07 万吨，占 23.4%，NO_x: 1.4 万吨，占 25.8%，SO_x: 0.5 万吨，占 23.1%，CO: 0.1 万吨，占 25.2%，HC: 0.05 万吨，占 25.2%。

表 5-3 2013 年上海港各类沿海船舶排放分担率

船舶种类	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
非运输船	28.8%	28.9%	29.7%	22.1%	26.3%	21.6%	21.7%
散货船	25.0%	25.0%	25.8%	18.6%	23.6%	18.2%	18.2%
集装箱船	18.1%	18.1%	17.7%	15.8%	21.8%	16.0%	15.6%
其他货船	12.7%	12.8%	13.4%	21.1%	11.9%	21.6%	21.9%
油船	8.2%	8.1%	6.3%	8.7%	11.5%	8.8%	8.4%
顶推拖轮	3.2%	3.2%	3.5%	9.5%	0.9%	9.7%	10.0%
滚装船	2.7%	2.7%	2.7%	2.0%	2.8%	2.0%	1.9%
化学品船	1.2%	1.2%	0.9%	2.2%	1.3%	2.3%	2.2%

如表 5-3 所示，2013 年上海港沿海船中非运输船排放量最大，约占所有沿海船大气污染物排放 85%，按 PM_{2.5} 排放排序，排放贡献最大的依次是非运输船、散货船、集装箱船、其他货船、油船、顶推拖轮、滚装船、化学品船。

表 5-4 2013 年上海港沿海船各工况排放分担率

工况	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
巡航	71.4%	71.7%	77.1%	75.6%	61.7%	75.7%	77.2%
装卸作业	15.8%	15.5%	9.9%	10.8%	25.5%	10.8%	9.7%
进出港	11.3%	11.3%	11.8%	12.1%	10.7%	12.1%	11.9%
靠泊	1.5%	1.5%	1.2%	1.4%	2.1%	1.4%	1.2%

2013 年，国际航行船舶排放主要集中在巡航工况，其次是装卸作业和进出港工况，靠泊无作业状况下排放较少。

5.5.3 外港水域内河船舶

2013 年上海港外港水域内河船舶排放 PM₁₀: 0.02 万吨，占 2013 年上海港船舶 PM₁₀ 排放量的 4.5%，PM_{2.5}: 0.01 万吨，占 4.6%，DPM: 0.02 万吨，占 4.8%，NO_x: 0.7 万吨，占 13.6%，SO_x: 0.03 万吨，占 1.2%，CO: 0.06 万吨，占 14.6%，HC: 0.03 万吨，占 15.1%。

表 5-5 2013 年各等级进出外港水域内河船舶排放分担率

船舶等级	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
三等	48.5%	48.5%	48.5%	48.5%	48.5%	48.5%	48.5%
四等	19.7%	19.7%	19.7%	19.7%	19.7%	19.7%	19.7%
一等	17.5%	17.5%	17.5%	17.5%	17.5%	17.5%	17.5%
二等	14.1%	14.1%	14.1%	14.1%	14.1%	14.1%	14.1%

五等 0.3% 0.3% 0.3% 0.3% 0.3% 0.3% 0.3%

如表 5-5 所示,2013 年上海港进出外港水域的内河船舶中三等船舶排放量最大,约占所有该类船舶大气污染物排放 48%,按 PM_{2.5} 排放排序,排放贡献最大的依次是三等船舶、四等船舶、一等船舶、二等船舶和五等船舶。

5.5.4 内河水域内河船舶

2013 年上海港进出内河水域内河船舶排放 PM₁₀: 0.02 万吨,占 2013 年上海港船舶 PM₁₀ 排放量的 5.0%,PM_{2.5}: 0.01 万吨,占 5.0%,DPM: 0.02 万吨,占 5.3%,NO_x: 0.8 万吨,占 15.0%,SO_x: 0.03 万吨,占 1.4%,CO: 0.07 万吨,占 16.1%,HC: 0.03 万吨,占 16.6%。

表 5-6 2013 年各等级进出内河水域内河船舶排放分担率

船舶等级	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
三等	43.9%	43.9%	43.9%	44.0%	43.3%	44.0%	44.0%
四等	34.4%	34.4%	34.4%	34.5%	34.0%	34.5%	34.5%
一等	15.8%	15.8%	15.8%	15.8%	15.6%	15.8%	15.8%
二等	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.5%	5.6%	5.6%
五等	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%

如表 5-6 所示,2013 年上海港进出外港水域的内河船舶中三等船舶排放量最大,约占所有该类船舶大气污染物排放 44%,按 PM_{2.5} 排放排序,排放贡献最大的依次是三等船舶、四等船舶、一等船舶、二等船舶和五等船舶。

5.6 上海港船舶 PM_{2.5} 及大气污染物排放总量

5.6.1 排放总量和一级分担率

2013 年上海港船舶共排放颗粒物 PM₁₀: 0.33 万吨、PM_{2.5}: 0.27 万吨、DPM: 0.32 万吨,气态污染物 NO_x: 5.4 万吨、SO_x: 2.3 万吨、CO: 0.4 万吨、HC: 0.2 万吨。

表 5-7 2013 年各类型船舶大气污染物排放分担率

船舶类型	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
国际航行船舶	66.7%	66.7%	66.4%	45.6%	74.4%	44.0%	43.1%
沿海船	23.8%	23.8%	23.4%	25.8%	23.1%	25.2%	25.2%
内河水域内河船	5.0%	5.0%	5.3%	15.0%	1.4%	16.1%	16.6%
外港水域内河船	4.5%	4.6%	4.8%	13.6%	1.2%	14.6%	15.1%

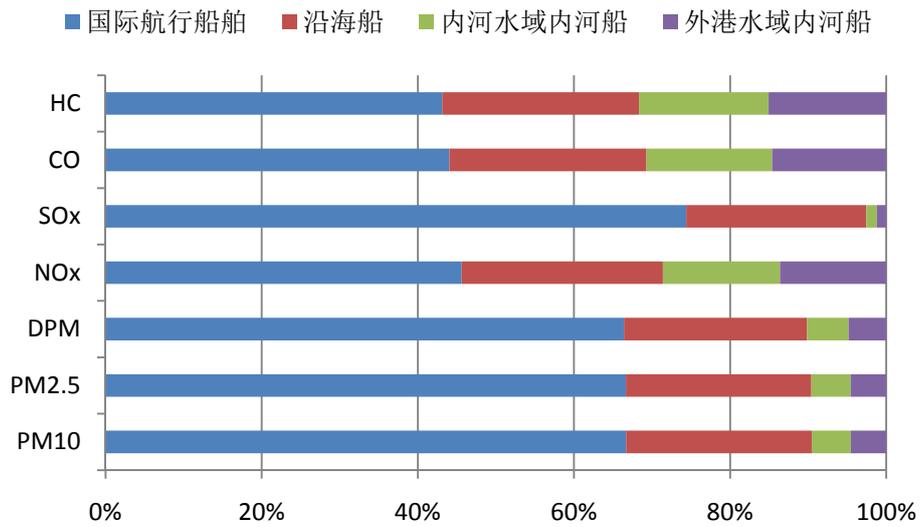


图 5-9 2013 年各类型船舶大气污染物排放分担率

有图和表可见，进出港船舶排放量与其进出港艘次无明显关系，与其发动机、燃油和作业时间有关。

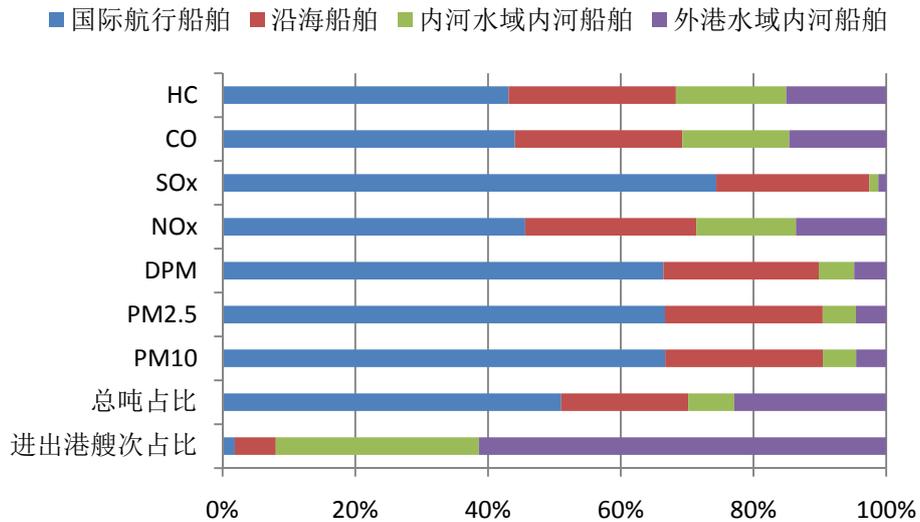


图 5-10 2013 年各类型船舶进出港艘次、总吨分布与大气污染物排放分担率

从 PM2.5 排放量排序，2013 年上海港进出港国际航行船舶排放最多，其次是沿海船舶、内河水域内河船舶和外港水域内河船舶。

表 5-8 2013 年船舶各工况排放分担率

工况	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
巡航	74.4%	74.6%	79.1%	83.2%	63.7%	84.0%	84.9%
装卸作业	13.3%	13.0%	8.4%	7.4%	22.7%	7.1%	6.3%
进出港	11.3%	11.4%	11.7%	8.6%	12.0%	8.2%	8.2%

靠泊 1.0% 1.0% 0.7% 0.7% 1.5% 0.7% 0.6%

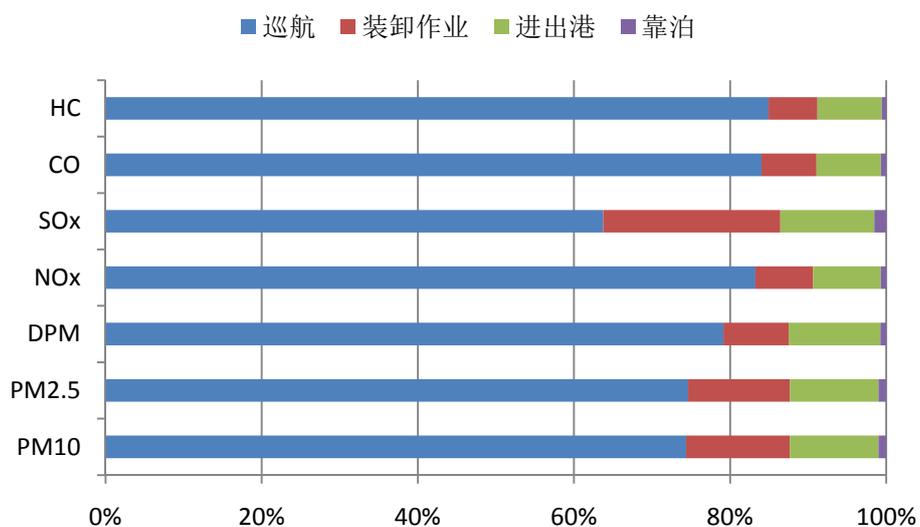


图 5-11 2013 年船舶各工况排放分担率

2014 年各类船舶在巡航时排放最多，其次是装卸作业，进出港和靠泊。

5.6.2 二级分担率

表 5-9 2013 年进出上海港各类船舶排放二级分担率

船舶种类	PM10	PM2.5	DPM	NOx	SOX	CO	HC
国际航行集装箱船	57.2%	57.2%	57.1%	38.8%	64.2%	37.5%	36.7%
沿海非运输船	6.9%	6.9%	7.0%	5.7%	6.1%	5.4%	5.5%
沿海散货船	5.9%	5.9%	6.0%	4.8%	5.4%	4.6%	4.6%
沿海集装箱船	4.3%	4.3%	4.1%	4.1%	5.0%	4.0%	3.9%
其他	25.7%	25.7%	25.8%	46.7%	19.2%	48.5%	49.3%

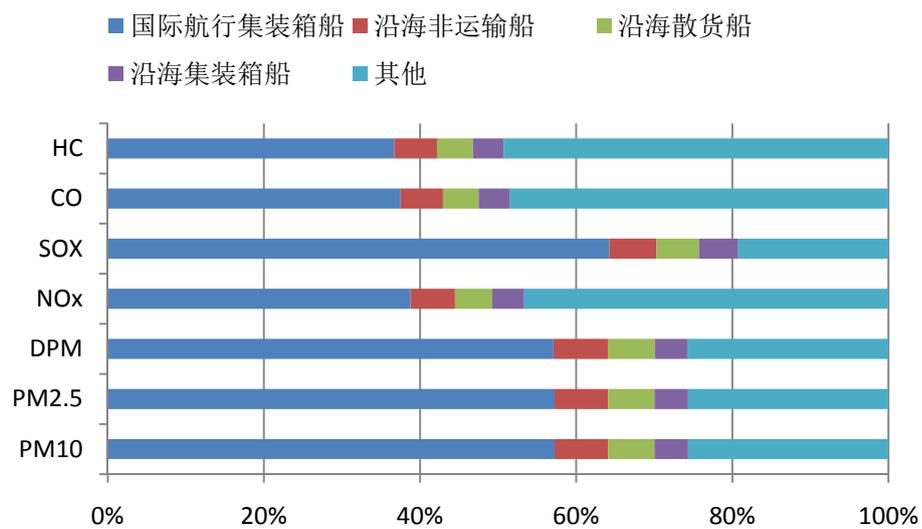


图 5-12 2013 年进出上海港各类船舶排放二级分担率

从按船舶种类划分的二级分担率来分析，国际航行集装箱船是上海市船舶大气污染物排放的主要贡献者，其对可吸入颗粒物 PM2.5 分担率高达 57.2%，对于 SO_x 的贡献率更达到了 64.2%。

6. 上海港船舶颗粒物排放控制对策

6.1 减排政策概述

根据上海港进出港船舶特点以及船舶管理主体，有必要针对国内航行船舶（内河船和沿海船）与远洋船提出不同的大气污染物管理措施。

6.1.1 国内航行船舶

国内航行船舶（内河船舶和沿海船舶）相对于远洋船，其排放不受国际公约限制，欧美国家对于本国船舶及港区非道路移动机械的大气污染物排放控制要求往往严于国际公约，所以在本市以及长三角地区，有必要率先制定针对于国内航行船舶（内河船和沿海船）的大气污染物排放控制措施。

(1) 提高发动机排放标准

研究制定长三角区域乃至全国统一的船舶排放标准体系。建立长三角区域的船用发动机和在用船舶排放标准体系，分别对注册登记的新生产船用发动机和在用的船舶排放设置标准限值，逐步加严其污染物排放要求。

(2) 提高油品标准

船舶发动机使用的油品质量直接影响到船舶大气污染物的排放。鉴于目前国内船舶燃料油市场鱼龙混杂，建议长三角地区共同规范船舶燃料油市场，并逐步提高船舶燃料标准，尽可能实现船用燃料与车用燃料的接轨，以减少船舶 PM 以及 SO_x 的排放。

(3) 推进老旧船舶淘汰

由上海市交通、海事等部门会同江浙沪皖有关部门负责，根据国家交通运输部《“十二五”期间推进全国内河船型标准化工作实施方案》的要求，共同推进高污染老旧船舶淘汰，鼓励老旧运输船舶提前退出航运市场。2015 年，研究出台高污染老旧船舶淘汰补贴政策。到 2017 年底前，本市力争完成船龄在 15 年-30 年之间的货船和船龄在 10 年-25 年之间的客船提前报废更新工作。

(4) 开展船舶冒黑烟监测与执法工作

逐步建立环保部门与海事部门的联合执法队伍，根据《上海市大气污染防治条例》第三十八条、第四十三条、第四十六条的要求，在重点港区与市中心航道开展船舶冒黑烟监测与执法工作。在 2017 年前，在黄浦江水域和外高桥港区

开展冒黑烟执法试点工作。

6.1.2 国际航行船舶

对于国际航行船舶的大气污染物排放管理，除了需要遵循国际公约外，还应根据我国对于重点区域空气质量达标的要求，制定相应的法律法规，以减少其大气污染物排放，改善本市和长三角地区的环境空气质量。

(1) 逐步推进实施进港换低硫油

进港换油措施对于改善港区周边的空气质量有着显著的效果。目前，欧洲和北美通过设立排放控制区，很好地控制了当地的船舶 SO_2 排放；香港通过《乘风公约》3 年来的努力，并在 2014 年把船舶进港换油立法提上议事日程。对于货物吞吐量占全国 28.2% 的长三角地区而言，降低船舶燃油含硫量将对改善区域空气质量带来积极的影响。

表 6-1 船舶使用清洁燃油后各污染物的减排比例

燃油种类	含硫量	PM	NO _x	SO _x
重油	1.50%	18%	0%	44%
柴油	1.50%	53%	10%	44%
柴油/轻质柴油	0.50%	75%	6%	82%
柴油/轻质柴油	0.20%	81%	6%	93%
柴油/轻质柴油	0.10%	83%	6%	96%

如表 6-1 所示，根据美国某机构研究结果，以目前远洋船舶燃油含硫量 3.5% 为基准，使用更清洁的燃油将直接改善船舶的 PM 和 SO_x 排放，同时也会适量减少 NO_x 的排放。

在实施进港换油政策的同时，建议给予船舶一定的补贴及优惠政策，鼓励其主动使用低硫燃油。

(2) 设立长三角船舶污染排放控制协作区

依托长三角区域大气污染防治协作机制，由上海市交通、海事、环保部门会同江浙沪皖有关部门，研究建立长三角船舶污染防治协作区的可行性，推进低硫油使用示范区，力争将长三角区域船舶燃油含硫量降至 0.5% 以下，并提出中远期燃油质量持续改善建议。

(3) 推广大型船舶及邮轮码头岸电工程

研究建立适用于上海市乃至长三角地区港口码头的岸电工程示范,制定长三角区域岸电技术标准规范和配套支持政策,逐步推广靠港船舶使用岸电。

针对大型货轮及邮轮能耗大,停靠时间长的特点,至 2017 年,在上海市有条件的客运码头及大型集装箱和散货码头靠港船舶全部使用岸电。

综上所述,近期在上海港可行的 PM2.5 减排方案主要是船舶进港换油以及使用岸电。

6.2 船舶进港换油

6.2.1 船舶进港换油的可行性分析

(1) 使用船用柴油替代重油

表 6-2 船用柴油替代重油的经济性分析

优势	弱势
√ 减少燃油消耗:使用船用柴油从总量上至少可以减少 4% 的燃料消耗	× 成本高 × CO ₂ 排放量增高
√ 降低污染物的排放量:重油含硫率为 3.5%,柴油含硫率为 1.5%,能同时减少颗粒物 PM 和 NO _x 的排放	

(2) 使用低硫油/超低硫油

在上海实行油品转换的措施——即船舶使用低硫油/超低硫油的优势及弱势如下表所示。

表 6-3 低硫油/超低硫油的经济性分析

优势	弱势
√ 降低污染物的排放量:计算可知 ^[a] , 1. 使用含硫率为 1.5% 的柴油,PM 降低 53%,NO _x 降低 10%,SO _x 降低 44%; 2. 使用含硫率为 0.5% 的柴油/轻质柴油,PM 降低 75%,NO _x 降低 6%,SO _x 降低 82%; 3. 使用含硫率为 0.2% 的柴油/轻质柴油,PM 降低 81%,NO _x 降低 6%,SO _x 降低 93%; 4. 使用含硫率为 0.1% 的柴油/轻质柴油,PM 降低 83%,NO _x 降低 6%,SO _x 降低 96%	× 生产问题:油品需要专门的供应,上海燃油的品质不理想,在上海使用低硫油,生产是一个问题 × 成本高:低硫油的使用成本很高 × 技术问题:若未对发动机和相关系统进行严格校准测量,当船使用硫含量较低的燃油(<1%)时可能造成燃油系统故障、在燃油转换发生发动机意外停机以及加速发动机和燃油系统磨损等问题

(注: a. 根据美国 EPA 燃料含硫量修正因子并假设燃油消耗量相等计算,认为含硫量 3.5% 的重油的 PM, NO_x 和 SO_x 的排放系数为 1; 据上海油品质量的调查可知,油品的含硫量在 3.0% 左右,与美国水平相当)

6.2.2 低硫油成本效益

下表为 2007 年 4 月，欧盟一项关于船舶污染物减排研究报告中对于使用低硫油的成本效益分析，供参考。

表 6-4 低硫油的成本列表（替换含硫量为 2.7%¹ 的油品）[2]

含硫量	额外费用€/t	€/t SO ₂ 的减少 ²	去除效率/每船
1.5%MARPOL	9	360	44%
1.5%EU	14	581	44%
1.5%所有馏分航海油	19	783	44%
0.5%所有馏分航海油	39	879	81%
0.2% RO ³ 转换成 MD ⁴	110	2200	93%
0.1% RO 转换成 MD	130	2500	96%

（注：1 国际油品平均含硫量为 2.7%，上表数据是由含硫量 2.7% 油品转换成其他油品而计算的）；2 中的成本效益分析不确定范围大约在 50%；3 RO 为馏分油；4 MD 为航海柴油）

6.2.3 油品转换的实例

OOCL 公司在香港实行了自愿油品转换，从 2011 年 1 月起，OOCL 的船在香港靠港期间辅机自愿使用含硫量≤0.5%的油品，2011 年有超过 800 条船靠港，成本花费预计超过\$140,000，同时将减少超过 80%的硫氧化物的排放。使用低硫油的措施对环境质量的改善有较为明显的作用，但上海若要实行“油品转换”的措施，要解决两个主要问题：1 优质油品的供应；2 政府油价的补贴激励政策。

6.3 大型船舶使用岸电

6.3.1 岸电使用的优势分析

岸基船用供电系统是目前应用最成熟的船舶节能减排技术措施，也是除低速行驶外削减船舶废气排放效果最好的方法。

● 技术成熟

目前国际上采用的三种岸电技术，既固定式岸电系统、驳船式岸电系统和移动式岸电系统都已投入实际运用，证明该技术是现实可用的。影响岸电使用的几个关键性技术障碍已经克服，包括码头与船舶的电制差异性；变频变压技术；配电箱、插座屏、连接屏等硬件设备。由于上海港靠港船舶的高密度性和靠港船型的种类繁杂性等特点，采用移动式岸基船用供电系统是比较合适的，并将供电对码头装卸作业的影响降到最低。

● 具有良好的环境效益和社会效益

在大多数情况下,船舶使用岸电的废气排放量只有船舶辅机燃油发电废气排放量的 0.3%。对于废气排放量较低的汽轮机,船舶接用岸电的污染物排放量相当于船舶辅机燃油发电污染物排放量的 0.8%。在任何情况下,船舶接用岸电时,NO_x 的排放量将减少 99%。船舶接用岸电时,估计 PM 的排放量相当于船舶辅机发电时 PM 排放量的 3%-17%。船舶接用岸电时的 PM 排放物主要来自天然气的混合物,与燃油混合物相比,其有害成分少得多。预测使用岸电后到港船舶单船靠港期间污染物排放降低百分比为 92.8%。岸基船用供电系统的运用将基本消灭船舶靠港期间烟囱冒黑烟、噪声扰民等等环境治理的老大难问题,有重大社会效益和环境效益。岸电的能效是柴油发动机的 2-3 倍。

- 具有一定的经济效益

以一艘载重 6400TEU 的船舶为例,停靠 1 天消耗 7 吨左右的柴油,花费 3 万多元,如果使用岸电,费用降低到 1 万元左右。

- 市场前景广阔

据《2009 年中国港口年鉴》统计,至 2008 年底,全国港口拥有生产用码头泊位 31050 个,其中万吨级及以上泊位 1416 个。目前深圳盐田港和蛇口港、天津港、青岛港、宁波港等国内主要港口也计划实施岸电项目,一旦岸电船用供电系统商业推广,其国内市场非常广阔。由于国内开发的岸电船用供电系统性能可靠、价格相对低廉,因此在国际市场上也具有相当的竞争优势。

6.3.2 岸电使用的弱势分析

- 造成污染的转移

船舶用岸电替代柴油机发电,在一定程度上缓解了码头区域的大气污染,但会增加燃煤发电造成的污染。也可以说是,造成了污染物的转移,因此,针对环保措施,应当对其整个生命周期进行分析。

- 成本投入大

岸电措施一次性的成本投入以及每次使用岸电的运营成本较大,不仅需要建造岸边的基础设施,还需要改造船的费用。

- 岸电切换过程复杂、船舶靠岸时间短

上海港作业繁忙,船舶靠岸停留时间短,部分船舶停留 6 小时左右即要离港,而使用岸电的船舶在离港前 4 小时必须启动发动机,岸电切换过程复杂,不利于靠岸时间较短的船舶使用。

6.3.3 岸电措施推行有待解决的几个问题

● 资金来源

上港集团联合港迪集团研制成功首台移动式岸基船用供电系统,是企业自主进行的技术创新运动,由企业自筹研制经费、设备采购费、设施改造费等相关费用,对企业产生较大的资金压力。大力推进环保事业的发展,必须要发挥政府的主导作用。由于该技术在其他码头的进一步推广应用,需要持续投入的资金较大,对于实施船舶岸电技术的港区码头,政府应该在政策上积极鼓励、经济上补贴,解决企业资金短缺的困难。

● 船用接电装置的改造

目前大部分船舶没有安装岸电接电装置,也没有预留放置该装置的空间。对现有船舶的技术改造存在一定的困难,改造过程不仅要调整船舶原有的空间布局 and 追加改造成本,而且也影响到船方的正常航运业务,需要船方的支持和合作。

● 电力供应

上海是一个缺电城市,用电需要外省市输入,尤其在夏冬季用电高峰,电力短缺的矛盾异常突出,前几年不乏出现拉闸限电的情况。岸电使用耗电量巨大,一旦岸电技术的广泛应用,港口用电量会大幅增加。说服电力部门增加港口用电配额和克服城市用电高峰期的电力供给是需要解决的两大难题。对新建码头、待建码头,功率裕量较大,完全能满足船舶对岸电的需求,可以不考虑功率增容问题;但对于老码头,功率裕量较小,必须对港区码头的降压变电站进行增容扩建。此外,船舶使用岸电,耗电的这部分能耗仍需要码头企业自身来承担,影响其节能减排的考核,因此而造成企业对于岸电使用的积极性不高。

● 电价和补贴机制

对于船方来说,当船舶靠泊期间使用岸电的费用低于使用燃油的费用时,船方才有动力去采用岸电代替船电,因此电价是衡量岸电使用经济效益的最重要指标。但实际岸电的价格会随着季节、电力需求等因素影响而出现波动,而船舶辅机发电的成本取决于船舶电力系统和船用燃料的使用,还与燃料(重油或轻油)的价格、船舶辅机的耗油量、船舶辅机设备的投资及设备的维修等因素有关。因此船方在考虑使用岸电适宜性是会比较岸电与船电的成本高低。同时,码头方为了维持岸电系统的正常运行,抵消岸电系统使用的成本支出,会考虑以高出电力部门销售价格一定比例的电价出售给船方。出售电价定价需要充分考虑,也需要获得电力部门、物价部门和船东三方的认可。

- 码头配套设施改造

新建码头在码头面预设电缆沟、已建码头需要重新开设电缆沟以及配置配电箱，一方面需要考虑码头面结构是否适合重新开挖，；另一方面需要考虑电缆沟走向和位置是否影响装卸设备的安置和装卸作业的顺畅。后方变电站与码头前沿配电站的输送电缆布设也有可能存在一定在障碍。

- 邮轮、滚装及其他货运码头的供电系统改进

移动式岸基船用供电系统目前在集装箱码头试运行成功，该技术向邮轮、滚装及其他货运码头推广。考虑到其他货运码头不同的码头布局、不同的装卸工艺、不同的靠泊船型和不同的航班密度，供电系统和相应设备需要相应的改进。因此该技术的推广应用是一个逐步改进不断适应的过程。

- 解决污染转移的问题

在上文弱势中分析到使用岸电会造成污染的转移。但是，一般来说，固定源的控制会比移动源容易。只要能使用清洁电能源，就能很好地解决这个问题。

参考文献

- [1] 孙伟, 赵同宾, 范建新等. 船用柴油机陆上试验大气污染物排放标准现状分析. 柴油机. Vol.33 (2011) No.4.
- [2] 张生光, 鞠美庭, 邵超峰. 我国港口发展中的环境问题及对策分析. 我国环境管理. 2008:26-29.
- [3] 张庭发. 港口空气污染及防治. 交通与运输. 2006: 44-45
- [4] 鄂海亮. 我国船舶污染防治体系的分析研究[D]. 大连海事大学, 2008.)
- [5] 范利彬. 国外绿色港口的发展与借鉴. 珠江水运. 2009: 21-23)
- [6] 国际海事组织. 73/78 防污公约 1997 年缔约国大会决议. 1997. 19~20.
- [7] 国际海事组织. 73/78 防污公约附则 VI《防止船舶造成大气污染规则》的修正案. 2008.
- [8] 郭洋. 船舶污染气体排放迎接新规则. 中国船检. 2010.6. 35~37.
- [9] 马广元. 浅谈船舶国际防止大气污染证书及相关内容的检查. 中国水运. 2008.6. 18~19
- [10] IAPH Tool Box for Port Clean Air Program. 2008.
- [11] The Port of Los Angeles and Port of Long Beach. San Pedro Bay Ports Clean Air Action Plan 2010 Update. 2010. 30~54.
- [12] 金柏江. 天津港生态港口建设规划研究. 南开大学. 2008. 27~28.
- [13] Sydney Ports Corporation. Green Port Guidelines. 2006. 16~24.
- [14] Archana Agrawal, Guiselle Aldrete, Bruce Anderson, etc. Port of Los Angeles Air Emissions Inventory 2010[R]. 2011:33-38. ADP# 050520-525
- [15] 伏晴艳, 沈寅, 张健. “上海港船舶大气污染物排放清单研究”. 安全与环境学报, 12:5 (2012 年 12 月): 57-64.