



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-1307-18652

内河和近海船舶排放特性及排放清单研究

Research of Emission Inventory and Emission Character of Inland and Offshore Ships



北京理工大学

汽车动力性及排放测试国家专业实验室

2014年4月

致 谢

感谢能源基金会中国可持续项目为本报告提供基金支持，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

宋亚楠，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	研究背景	1
1.1.1	我国航运现状.....	1
1.1.2	船用柴油机常见污染物.....	1
1.2	国内外船舶排放法规现状	3
1.2.1	国际船舶法规 IMO 法规和 MARPOL 公约.....	3
1.2.2	美国环保局(EPA)对船舶的 NO _x 和 SO _x 的法规限制.....	5
1.2.3	欧盟标准.....	5
1.2.4	中国防治船舶大气污染法规.....	6
1.3	国内外研究现状	8
1.3.1	国外船舶排放研究现状.....	8
1.3.2	我国现有针对船舶排放的研究现状.....	9
1.4	研究目的、意义及内容	10
1.4.1	研究的目的是和意义.....	11
1.4.2	主要内容.....	11
2	实验研究及方法	12
2.1	测试仪器介绍	12
2.1.1	气态污染物测试仪.....	12
2.1.2	ELPI 颗粒物测试仪.....	13
2.1.3	EFM 尾气质量流量计.....	14
2.1.4	数据采集.....	16
2.1.5	其他设备.....	16
2.2	船舶测试方案	16
2.2.1	测试区域和路线.....	16
2.2.2	测试内河船舶.....	19
2.2.3	测试设备安装及实验过程.....	22
2.3	船舶排放研究方法	23
2.3.1	直接测量法, 排气分析仪+排气流量计.....	23
2.3.2	排气分析仪+油耗仪.....	24
2.3.3	排气分析仪+排气流速测量仪.....	25
2.3.4	发动机台架实验法.....	26
2.3.5	基于 AIS 的研究方法.....	26
3	内河船舶排放因子及排放清单计算	29

3.1	内河船舶瞬时排放特征	29
3.1.1	航行工况介绍	29
3.1.2	CO 瞬时排放特征	30
3.1.3	NO _x 瞬时排放特征	32
3.1.4	HC 瞬时排放特征	33
3.1.5	PM 瞬时排放特征	35
3.2	不同工况下内河船舶的排放因子	37
3.3	与国外研究结果的对比	38
3.4	内河船舶排放清单计算方法	40
3.5	内河船舶耗油量	40
3.5.1	内河运输船舶耗油量	40
3.5.2	近海渔船耗油量	41
3.6	内河运输船舶排放清单结果	41
3.7	本章小结	42
4	基于 AIS 的船舶排放清单计算方法	43
4.1	排放清单计算基础	43
4.2	船舶主机负荷功率计算	44
4.3	船舶辅机负荷功率计算	45
4.3.1	船舶类型	45
4.3.2	船舶航行状态	46
4.3.3	船舶辅机负荷比例系数	48
4.4	锅炉负荷功率	49
4.5	船舶运行时间	50
4.6	船舶主机排放因子	51
4.7	船舶辅机排放因子	52
4.8	锅炉排放因子	53
4.9	船舶主机低负荷修正	54
4.10	燃油修正系数	57
4.11	减排措施修正因子	58
4.12	数据处理	59
5	基于 AIS 计算渤海湾港口排放清单	61
5.1	唐山港	61
5.1.1	计算区域	61
5.1.2	结果	62
5.2	秦皇岛港	63
5.2.1	计算区域	63
5.2.2	结果	64

5.3	黄骅港	66
5.3.1	计算区域	66
5.3.2	结果	66
5.4	渤海湾结果分析	68
5.4.1	结果分析	68
5.4.2	渤海湾地区空间分布	69
5.5	本章小结	71
	结论	72
	参考文献	74
	附录:ARCGIS 操作方法	80

表目录

表 1.1 2012 年我国船舶结构组成	1
表 1.2 《船舶污染防治国际公约》附录VI中的 NO _x 排放限值 (G/(KW H))	4
表 1.3 EPA TIER2 对 1 类和 2 类发动机排放限值	5
表 1.4 拟定的船用柴油机排气污染物限值 ^[19] (I 阶段)	7
表 2.1 SEMTECH-DS 性能参数	13
表 2.2 ELPI 测量粒径分级(单位: MM).....	14
表 2.3 EFM 流量计技术规格	15
表 2.4 其他设备型号规格	16
表 2.5 内河船舶主要类型	20
表 2.6 大连-丹东附近海域渔船参数	20
表 2.7 江苏段测试船舶参数	21
表 2.8 广东段测试船舶参数	21
表 2.9 长江流域测试船舶类型及参数	22
表 3.1 各研究得出的排放因子(G/KG FUEL).....	39
表 3.2 内河船舶污染物排放清单	42
表 4.1 船舶辅机负荷比例系数 ^[67]	48
表 4.2 锅炉负荷功率 ^[71] (计量单位: KW)	49
表 4.3 船舶主机污染物排放因子 ^[70,71] (计量单位: G/KW H)	52
表 4.4 船舶主机温室气体排放因子 ^[73] (计量单位: G/KW H)	52
表 4.5.1 船舶辅机污染物排放因子 ^[72,73] (计量单位: G/KW H)	53
表 4.6 船舶辅机温室气体排放因子 ^[75] (计量单位: G/KW H)	53
表 4.7 锅炉排放因子 ^[71] (计量单位: G/KW H)	53
表 4.8 船舶主机低负荷排放因子计算公式的变量值 ^[73]	54
表 4.9 船舶主机低负荷排放因子 (计量单位: G/KW H)	55
表 4.10 船舶主机低负荷调整系数	56
表 5.1 唐山港口 2013 年船舶污染物排放清单 (T)	62
表 5.2 秦皇岛港 2013 年船舶污染物排放清单 (T)	64

表 5.3 黄骅港 2013 年船舶污染物排放清单 (T) 67

图目录

图 1.1MARPOL 附录VI中规定的国际船舶运输燃油硫含量下降时间表 ^[1]	4
图 2.1SEMTECH-DS 分析仪外观图	12
图 2.2 ELPI 主机示意图	14
图 2.3EFM2 尾气质量流量计外观图	15
图 2.4 大连近海渔船测试路线	17
图 2.5 货船测试路线	18
图 2.6 集装箱测试路段	18
图 2.7 广东测试路线	19
图 2.8 长江宜昌至重庆段测试路线	19
图 2.9 游船测试仪器安装实物图	23
图 2.10 集装箱船测试仪器安装实物图	23
图 2.11 使用排气分析仪和排气流量计的实物测试图	24
图 2.12 使用排气分析仪和油耗仪的实物测试图	25
图 2.13 排气分析仪和排气流速测量仪实物测试图	26
图 2.14 台架实验法实物测试图	26
图 2.15 船舶 AIS 信息示意图	27
图 2.16 船舶污染物排放空间分布图	28
图 3.1 船舶实际航速示意图	29
图 3.2 CO 瞬时排放浓度示意图	31
图 3.3 NO _x 瞬时排放浓度示意图	33
图 3.4 HC 瞬时排放浓度示意图	35
图 3.5 PM 排放速率示意图	36
图 3.6 船舶基于燃油消耗的排放因子	38
图 3.7 油品抽样检测结果	39
图 4.1 排放清单计算流程图	59
图 5.1 唐山港口船舶类型及功率分布	61
图 5.2 唐山港口船舶航行状态对污染物的分担率	63

图 5.3 唐山港船舶机型对污染物的分担率	63
图 5.4 秦皇岛港船舶类型及功率分布	64
图 5.5 秦皇岛港船舶航行状态对污染物的分担率	65
图 5.6 秦皇岛港船舶机型对污染物的分担率	65
图 5.7 黄骅港船舶类型及功率分布	66
图 5.8 黄骅港船舶航行状态对污染物的分担率	67
图 5.9 黄骅港船舶机型对污染物的分担率	68
图 5.10 渤海湾船舶排放污染物空间分布	71

1 项目背景调研

1.1 研究背景

1.1.1 我国航运现状

海上运输是世界各国文化交流的重要手段，也是天然的交通大道，随着工业技术的极大发展以及人口的快速增长，海上货运量每年都在大幅度增长，船舶尺寸不断增加，世界船舶总吨位也在不断增加。随着船舶数量的日益增加，船舶对大气造成的污染也日趋严重。船舶大气污染到了不可忽视的地步，特别在一些航线密集、船舶流量大的海区和港口、海峡等区域，船舶排放的污染物甚至成为这些地区的主要污染源^[2]。

自上世纪 70 年代起，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。但是与世界船舶构成情况相比，我国船舶结构组成（见表 1.1）存在着比较明显的缺陷：散货船所占比例较高，而集装箱船比例相对偏低，且船龄老，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^[3]。

表 1.1 2012 年我国船舶结构组成

船舶类型	数量（艘）	运力	船龄（年）	运力增幅（%）
干散货船	1618	4940 万吨	8.2	15.2
集装箱船	149	44.8 万标准箱	12.5	
油船	1290	982 万吨	6.9	11.4
化学品船	261	99.7 万吨	6.1	17.9
液化气船	67	17.5 万吨	9.3	13.7

1.1.2 船用柴油机常见污染物

随着各国对道路柴油机动车研究的不断深入，先进的燃烧策略及排气后处理技术相继得到广泛应用，使其污染物排放得到了有效的控制。然而，由于船舶柴油机工作条件恶劣，负荷大，工况变化剧烈，对发动机的可靠性和加速性等都有较高的

要求, 再加上空间分布广, 实施尾气控制难度较大。因此, 船舶柴油机械的排放问题日显突出^[4]。国际海事组织 (IMO) 的统计表明, 全球以柴油机为动力的船舶每年向大气排放的 NO_x 约为 1000 万吨, SO_x 约为 850 万吨^[2]。船舶废气中的 SO_x 和 NO_x 等对大气环境造成的污染已引起国际社会广泛关注。

当今大气污染的最主要污染源之一就是内燃机的有害排放物, 其尾气中含有颗粒物、氮氧化物、一氧化碳、苯、硫化物、芳烃和烯烃等有害气体, 严重威胁着人类的身体健康^[5], 其中最主要的是 PM 和 NO_x 。颗粒物一般由上百种挥发性和半挥发性物质凝结在碳核上形成的^[6], 能够导致身体炎症, 并引起哮喘和心肺疾病^[7, 8]。柴油机排放的颗粒主要由燃油中的碳产生, 并受燃油种类、燃料中的碳原子数量及碳氢比的影响。柴油机颗粒的生成机理为燃油分子经过其氧化中间产物或热解产物形成初始凝聚相物质, 通常包括各种不饱和碳氢化合物和芳香烃, 它们被认为是火焰中形成颗粒的前驱体, 这些气态物质的凝聚反应导致了初始可辨认颗粒 (通常称晶核) 的出现。颗粒生长包括表面积生长、凝结和聚合等作用。表面积生长使固态物块生成, 包括气态物质附着到颗粒表面与它们结合成为粒子相。表面积生长导致颗粒直径增加, 但颗粒数量保持不变。颗粒还能通过凝结生成链状或簇状的聚合物, 该过程通过碰撞使颗粒长大。在颗粒的形成和生长过程中同时发生碳和初始颗粒的氧化, 形成如 CO 和 CO_2 等气态产物, 柴油机最终的颗粒排放取决于形成过程和氧化过程之间的平衡^[9]。而且颗粒数量及其粒径分布在废气冷却以及稀释过程中仍会不断变化。

NO_x 能导致人的咳嗽、呼吸道感染和气喘等症状, 同时使肺功能下降。尤其是儿童, 即使短间接接触 NO_x 也可以造成咳嗽、喉痛。更严重的是, 尾气中的 NO_x 在一定条件下会生成二次污染-光化学烟雾, 对人体造成更大的危害, NO_x 已经成为当今城市空气的主要污染源之一^[10]。氮氧化物包括许多种, 如 NO, NO_2 , N_2O_3 , N_2O , N_2O_5 等, 通称 NO_x 。柴油机排气中的氮氧化物绝大部分是 NO, 少量是 NO_2 。NO 是无色气体, 本身毒性不大, 但在大气中会缓慢氧化成 NO_2 。 NO_2 是一种棕色的刺激性气体^[11], 这种气体被吸入肺部时, 能与肺部的水分结合生成可溶性硝酸, 有刺激作用, 严重时会引起肺气肿。 NO_2 在强烈的日光下会发生光化学反应, 形成二次污染^[12]。海洋船舶是全球氮氧化物(NO_x)的主要排放源^[13]。2007 年, 海洋船舶约排放 NO_x 2500 万公吨, 占全球 NO_x 排放量的 15-30%^[14]。

内燃机燃料中的硫燃烧后产生 SO_2 ，它在空气中缓慢氧化为 SO_3 。 SO_2 是一种无色的气体，亲水性很强，与水结合形成亚硝酸，对人的口鼻粘膜有强烈的刺激性，若空气中 SO_2 浓度过高，会引起呼吸困难、呼吸道红肿、胸闷等症状。一般燃烧排出的 SO_2 在大气中只停留一周左右，但当它遇到水汽，变成硫酸烟雾后，就能长时间停留在大气中，这对人和环境有极大危害。

1.2 国内外船舶排放法规现状

1.2.1 国际船舶法规 IMO 法规和 MARPOL 公约

国际海事组织 IMO (International Maritime Organization) 是联合国一个负责海上航行安全和防止船舶造成海洋污染的专门机构，也是一个促进各国政府和各国航运业改进海上安全，防止海洋污染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“防止船舶造成空气污染规则”MARPOL 73/78 1997 议定书，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^[15]。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水平。它设定的目标是：通过彻底消除向海洋中排放油类和其他有害物质来保持海洋环境，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

MARPOL73/78 附则VI第三章条例第 13 条规定了船舶柴油机氮氧化物的排放限制值。该条例共有三个阶段，Tier I 是在 1997 年版的附则VI中修订的，Tier II/III 在 2008 年附则VI的修正案中做了规定，最新的公约附录VI 管理要求^[1]详见表 1.2。

I 阶段 (Tier I) 标准适用于 2000 年 1 月 1 日后至 2011 年 1 月 1 日前安装于船上的柴油主机；或者 1990 年 1 月 1 日后 2000 年 1 月 1 日前安装的输出功率为 5000kW，单缸排放为 90L 及以上的柴油发动机。

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

日以后主体进行过重大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 日以后主体进行过重大改造的船用柴油发动机。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 (g/(kw·h))

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。

*** II 阶段 (TIER II) 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 (r/min)。

(2) MARPOL 公约对 SO_x 排放的限制

MARPOL 73/78 附则VI 第三章条例第 14 条规定了船舶柴油机硫氧化物的排放限值。该条例主要通过柴油机的运行来实现,而条例 13 则通过控制柴油机的性能来实现。

在世界范围内,从 2012 年 1 月 1 日起,硫含量上限从 4.5%(45000 ppm)降低至 3.5% (35000 ppm)。到 2020 年 1 月 1 日进一步减小到 0.5% (5000ppm)。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%(10000 ppm)的燃油。到 2015 年 1 月 1 日,限值将进一步降低至 0.1% (1000 ppm)。

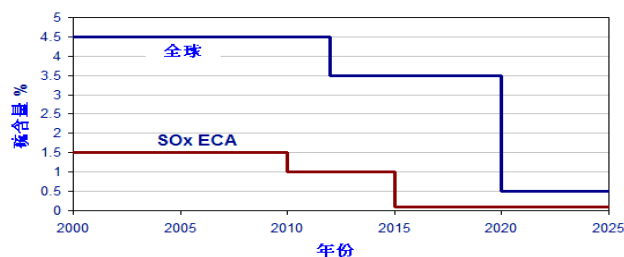


图 1.1 MARPOL 附录VI中规定的国际船舶运输燃油硫含量下降时间表^[1]

MARPOL 附录VI中的燃油硫含量限值降低时间表见表 1.1。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。

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

美国环境保护局(Environmental Protection Agency,EPA)颁布了发动机排放限制 Tier2, 此标准适用于在美国注册的气缸扫气容积 V_d 为 2.5-30dm³ 的船舶, 并于 2007 年开始生效执行。该限值相对 IMO Tier1 来说, NO_x 大约要降低 25%-40%, 而且限值中还包括 NO_x+CnHm、CO、PM 等污染物。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/(kW·h)	PM g/(kW·h)	CO g/(kW·h)
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

类别 1 是指单缸排量 D < 5 dm³; P ≥ 37 kW 的船用发动机; 类别 2 是指单缸排量 5 dm³ ≤ D < 30 dm³ 的船用发动机。

对 SO_x 控制方面, 北美加入 SO_x 的 ECA 区域, 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。

1.2.3 欧盟标准

欧盟标准是将发动机按单缸排量和净功率分类, 其标准要求与美国船用发动机标准一致。

另外, 瑞典除了接受国际海事组织的相关规定外, 又制定了一些辅助的鼓励和惩罚手段。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 $12\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 的全额征收;在 $12\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 和 $2\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 之间的按比例缴纳;小于 $2\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 的征收最少^[16]。

1.2.4 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,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,我国制定实施了《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^[17]。

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,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,采用了 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 37 kW 的非道路移动机械用柴油机用于船舶驱动,则参照 GB20891-2014 《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III、IV阶段)》排放标准执行,自 2014 年 10 月 1 日起,凡进行排气污染物排放型式核准的非道路移动机械用柴油机都必须符合本标准第三阶段要求^[18]。自 2015 年 10 月 1 日起,停止制造和销售第二阶段非道路移动机械用柴油机,所有制造和销售的非道路移动机械用柴油机,其排气污染物排放必须符合本标准第三阶段要求。自 2016 年 4 月 1 日起,停止制造、进口和销售装用第二阶段柴油机的非道路移动机械,所有制造、进口和销售的非道路移动机械应装用符合本标准第三阶段要求的柴油机。

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。环境保护部环境标准研究所正在制定《船用柴油机大气污染物排放标准》。表 1.4 是拟定中的船用柴油机排放标准限值。

表 1.4 拟定的船用柴油机排气污染物限值^[19] (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/(kW·h)	g/(kW·h)	g/(kW·h)	g/(kW·h)
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	

一些地方政府也已经开始寻找减少港口和船舶空气污染的解决方案。今年 2 月,广东省交通运输厅颁布了《广东省绿色港口行动计划(2014-2020)》。这一计划设定了能效和 CO₂ 减排目标,确保到 2015 年,全市有 5 个或更多的港口成为绿色星级码头;到 2020 年,100 个以上的码头成为绿色星级码头^[20]。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国外船舶排放研究现状

船舶运输支撑着绝大部分的全球国际贸易。虽然船舶运输公认比其他交通运输方式对环境更友好，但其仍然是人为污染的重要部分，而对船舶排放的评估也成了各国研究者研究的重要问题。常见的船舶排放清单的研究方法是基于燃油消耗量进行估算。其中燃油消耗有两种估算方法：一是基于船舶载重量估算燃油消耗量，即利用船舶的航行距离和船舶种类（船舶类型、大小、年限、发动机类型、燃油供给方式等），并结合对应的燃油消耗率估算燃油的消耗量；另一种方法是直接调查燃油的销售量（油品和型号）。燃油消耗量乘以排放因子（基于燃油消耗的排放因子 g/kg ）即可得到船舶排放清单。

IMO 在 Second Imo GHG Study1990 中提到，在 1990 至 2007 年间，全球船舶的常规污染物（ NO_x 、 SO_2 和颗粒物）和温室气体（主要是 CO_2 ）排放从 5.85 亿吨上升到了 10.96 亿吨^[21]。国际应用系统分析研究所(IIASA)研究认为全球船舶的 SO_2 、 NO_x 和 PM 排放总量分别是 1650、2430 和 190 万吨^[22]。

Ernestos Tzannatos^[23]根据燃油的销售量研究了希腊过去 25 年（1984-2008）国内和国际航线船舶排放对的 NO_x 、 SO_2 、PM 和 CO_2 贡献，研究发现：过去 25 年希腊船舶排放清单年平均增长率为 2.85%，2008 年 NO_x 、 SO_2 、PM 和 CO_2 的总排放量为 1290 万吨；通过基于燃油消耗计算方法计算排放清单的研究者有，Endresen^[24]，Oli Vler^[25]，Corbett^[14]等人。希腊与瑞典，挪威和英国依靠将国家的燃油销售分为国内航运供应和国际航线供应来建立自己的排放清单^[26]。希腊 2007 年在联合国气候变化纲要公约（UNFCCC）一次年度排放清单中提到希腊的内河航运及领域内国际航运的 CO_2 排放总量分别为 2.1 和 10.1 百万吨。Kourtidis^[27]等人对希腊中东部尤其是爱琴海和爱奥尼亚海域的臭氧和 SO_2 排放水平进行了研究，由于该区域是海域由船舶产生的 NO_x 和 SO_2 很容易被鉴别出来。

另一方面，Psaraftis 和 Kontovas^[28]，Eyring^[29]等人通过船舶载重量估算了燃油消耗量，并进一步获得全球的船舶排放的估算结果： 21.38×10^6 吨 NO_x ， 12.03×10^6 吨 SO_x ， 812.6×10^6 吨 CO_2 ， 1.31×10^6 吨 CO ， 1.67×10^6 吨 PM 和 1.96×10^6 吨 HC；Corbett 和 Kohler^[14]以及 Endresen^[30]等人也是通过载重量得到了全球的排放量

清单： 6.87×10^6 吨 NO_x ， 4.72×10^6 吨 SO_x 。通过载重量计算典型区域排放清单的还有 Schrooten^[31], Wahlstrom^[32], Vestreng^[33], Concawe^[34] 等人，他们的研究范围覆盖了欧洲各大海域；而通过载重量计算方法计算典型的国家排放清单研究者有 Winther^[35] 对丹麦，Schrooten^[36] 等人对比利时的研究。此外，通过基于载重量计算方法计算局部地方的排放清单的研究者有，Tzannatos^[37] 2010 年对 Piraeus 港口，De Meyer^[38] 等人对比利时的海港和内河港，Deniz 和 Durmusoglu^[39] 对土耳其的马尔马拉海港，Saxe 和 Larsen^[40] 对丹麦的港口，Isakson 等人^[41] 对瑞典的哥德堡港口，Kesgin 和 Vardar^[42] 对土耳其海峡，Trozzi^[43] 等人对意大利港口的研究。

应该注意的是，基于燃油消耗计算船舶排放清单过程中，需要多方面的数据，如船舶载重量、船舶航行距离、燃油消耗率、排放因子等，这些数据都是统计统计数据得到，不确定性因素很多，使得研究结果会存在很大的差异。

近年来，随着船舶自动识别系统 AIS (universal shipborne automatic identification system) 的发展，产生了一种新的计算船舶排放清单的方法，即自下而上的动力法，该方法是利用 AIS 采集远洋船舶的船速、航行时间、地理位置信息等实时航行数据，对排放清单进行计算，并可以利用船舶的位置信息做出船舶排放的空间分布状况。

Simon K.W.Ng, Christine Loh 等人对香港地区的船舶排放做了研究，列出了香港地区 2007 年的排放清单，并利用 AIS 获得船舶的活动情况，包括船名、船型、呼号，总吨位、船舶位置、船舶速度和船舶运行时间等信息，作出船舶排放的空间分布图形^[44]。

J.-P.Jalkanen, A.Brink, J.Kalli 等人对波罗的海的排放情况做了研究，并首次尝试利用 AIS 系统做排放模型 (STEAM 模型)^[45]。此模型利用 AIS 获得的船舶瞬时速度信息以及行驶阻力计算出船舶的瞬时功率。另外，此模型还考虑的波浪对排放的影响。

1.3.2 我国现有针对船舶排放的研究现状

我国有关船舶的排放因子研究处于初期阶段。目前尚未建立成熟的船舶排放清单计算模型。国内科研人员一般使用尚不成熟的非道路模型，通过燃料消耗量估算得到排放总量，或是对美国 EPA 的 NONROAD 模型展开了一些基础研究。由于中

美两国之间发动机技术, 活动水平及排放控制的不同, 若直接运用 NONROAD 模型计算我国船舶排放因子, 将引起较大的偏差。因此, 国内的船舶排放因子采用调研加估算的方法获得。

南开大学的金陶胜等人对天津港运输船舶的总体情况进行调研, 根据其排放控制水平合理选择了排放因子^[46]; 而后采用基于燃料消耗的方法, 对 2006 年天津港运输船舶排放的 NO_x、HC、CO 和 PM₁₀ 进行了计算, 建立了天津港运输船舶大气污染物的排放清单; 最后对 2010 年和 2020 年天津港的运输船舶大气污染排放情况进行了预测。

华南理工大学的张礼俊、郑君瑜, 广东省环境保护监测中心站的钟流举等人根据收集到的珠江三角洲非道路移动源活动水平数据, 采用适合各类非道路移动源污染物排放量的估算方法和排放因子, 建立了珠江三角洲地区 2006 年非道路移动源排放清单。并得出在船舶排放源中, 货轮和散装干货船是主要排放源, 其排放的 SO₂, NO_x, VOC, CO 和 PM₁₀ 分别占总排放量的 89.8%, 81.8%, 77.3%, 79.5% 和 81.7%^[47]。

深圳市环境保护监测中心站的李智恒, 何龙通过香港详细的船运资料和大气污染物数据库, 得到船运统计数据与污染物排放量统计数据的关系, 并依据深圳的船运统计数据得到深圳市 2003 年船舶污染物排放清单。结果表明, 深圳市船舶排放的 SO₂ 占全市流动源 SO₂ 排放量的 58.62%^[48]。

青岛市环境监测中心站的刘静, 王静等人建立了青岛市港口船舶大气污染排放清单, 但其排放因子是参考欧盟“欧盟港口船舶运输污染物排放量”报告中的研究成果, 结合青岛市的实际情况, 按船舶航行各个过程的、平均速度、或基于相似类型和船舶信息, 由内插法计算, 分吨位确定^[49]。

另外, 上海环境科学院的伏倩艳等对上海空气中的 NO_x 及其分担率进行了研究, 计算得到了上海市 1998 年船舶的 NO_x 的排放量^[50]。Yang 等人基于 1988 年船舶活动数据和专家观点得到了上海港口的海洋船舶 2003 年度大气排放清单^[51]。Zhang 等人 (2010) 对珠江三角洲地区船舶排放清单的类别与使用进行了适当的估计和数据收集活动^[52]。Yao 人 (2012 年), 制定了详细的海上远洋船舶在香港自底向上的活动为基础的网络模型, 在网络模型的基础上建立了 2007 年基准年的排放清单^[53]。

1.4 研究目的、意义及内容

1.4.1 研究的目的和意义

2012 年底我国内河和近海船舶的保有量在 17.92 万艘左右，船舶总功率 6389 万千瓦。2012 年年末我国渔船保有量 69.56 万艘，渔业机械 348.78 万台，渔业机械总功率 1740.95 万千瓦，2012 年全国机动渔船共消耗柴油 800 多万吨。由于长期以来我国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，对港口城市和周边航道造成了严重的污染，严重影响了周边区域的环境空气质量。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。

由于船舶柴油机的特殊性，管理部门的交叉性，相关管理部门对我国船用柴油机的分类保有量、年活动情况、使用的油品，以及实际排放状况的了解甚少，难以估计其实际污染排放。因此，为加强对船用柴油机排放的监督管理，需要调查掌握我国船用柴油机的现状，包括分类保有量、年度活动状况、排放控制水平、使用的油品状况，在用船舶实际航行过程中的排放情况，并在上述研究的基础上，得到不同地区实际船舶的排放总量，以利于从整体上对船舶排放进行评估，并由此提出有效的污染控制策略和管理办法。

1.4.2 主要内容

本报告主要的研究内容为：

- 1) 利用车载排放设备对内河船舶污染物排放进行测量，分析实验数据以获得内河船舶排放因子。
- 2) 基于船舶数量和活动水平及测试船舶排放因子计算得到全国内河船舶排放清单。
- 3) 研究远洋船舶排放因子，并结合 AIS 系统采集远洋船舶运行速度及时间，计算远洋船舶排放清单并做出船舶排放的空间分布图。

2实验研究及方法

我们已经知道船舶的污染物排放是认为污染的重要部分，各国学者也在纷纷研究船舶排放污染物清单。中国对船舶排放清单的研究处于起步阶段，目前的一些研究结果均是以国外的排放数据作为依据获得的。由于各国船舶的发动机技术水平，船舶活动水平等情况存在差异，因此这些数据不能反映中国船舶的实际排放状况。为了解和掌握我国船舶污染物排放现状，有必要通过测试获得本地船舶的排放因子，从而为本国的研究提供借鉴和参考。本报告利用便携式尾气分析仪PEMS(Portable Emission Measurement System)测试系统对我国多地区多类型船舶进行了污染物排放测试实验，获得了各种污染物的排放数据。本章主要介绍测试仪器及实验流程。

2.1测试仪器介绍

本报告中的使用的仪器有：SEMTECH-DS 气态污染物分析仪、EFM2 尾气质量流量计以及 ELPI 颗粒物测试仪等。

2.1.1气态污染物测试仪

SEMTECH-DS 是美国 Sensors 公司生产的测试机动车气态污染物的排放分析仪，仪器外观如图 2.1 所示。一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO₂)采用非分散红外分析法(Non-Dispersive Infra-red detector, NDIR)测量，碳氢化合物(THC)采用氢火焰离子



图 2.1 SEMTECH-DS 分析仪外观图

检测器 (flame ionization detector, FID) 测量, 非分散紫外分析法(Non-Dispersive Ultraviolet detector, NDUV)用来测量一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO₂), 电化学法测量氧气(O₂)含量^[54, 55]。

仪器在使用前需要进行 1 小时左右的预热, 预热后采用纯 N₂ 调零, 为保证仪器测量结果的准确性, 要使用标准气体进行准确性及精确性校准。此外 SEMTECH-DS 通过自带的卫星定位系统(GPS)逐秒记录船舶行驶经过的地理位置(即经度、纬度、高度)和行驶速度。其对工作环境要求为: 工作温度: 0~45℃ (不带环境箱), -10~43℃ (带环境箱), 保存温度: -40~60℃, 相对湿度< 90%。设备的主要性能参数如表 2.1。

表 2.1 SEMTECH-DS 性能参数

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

2.1.2 ELPI 颗粒物测试仪

电子低压冲击器(Electrical Low Pressure Impactor)是芬兰 DEKATI 公司开发的, 可以测量颗粒物粒径尺寸及分布, 在国外已被广泛用于大气细颗粒测量研究^[56-58]。仪器外观如图 2.2 所示。该设备可以实时记录车辆排气中的颗粒物浓度, 并进行统计和分析, 其主要由 3 部分组成: 串级撞击器、线管级电晕和多通道静电计。ELPI 可以测量空气动力学直径(Aerodynamic diameter, D_p)在 28 nm~10 μm 之间的颗粒物, 并分割为 12 级分别计数; 附加过滤级, 能够测试到的颗粒物最小粒径达到 7 nm, 以每级吸收率 50%的颗粒物粒径为标记, 一共分 13 级。

ELPI 支持实时监控, 可以测量颗粒物的瞬时浓度, 其时间分辨率能够达到秒级。设备的灵敏度足以测量大气环境中的气溶胶浓度^[59, 60]。研究表明: ELPI 对于

聚积态颗粒物(约 $100\text{nm} < D_p < 300\text{nm}$)的测量最为准确, 对于其它粒径范围的颗粒物,

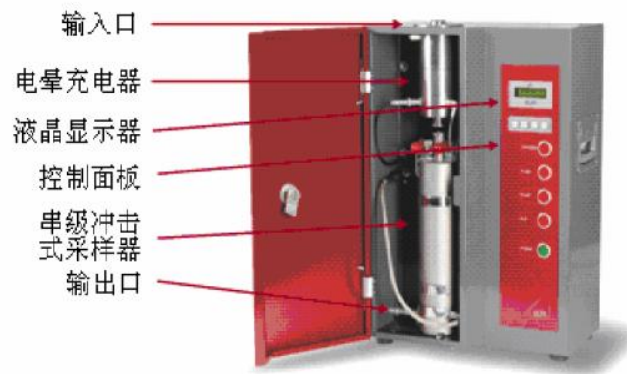


图 2.2 ELPI 主机示意图

结果可能会存在一些误差。ELPI 本身的测量结果只提供按颗粒物粒径的浓度分布, 表 2.2 给出了 ELPI 的 12 级捕集器对应的粒径范围以及切割直径。根据公式 2.1 计算出稀释比修正后的瞬态排放:

$$M_i = \frac{f_i [P(i)] \times \rho_{m_i} \times Q_i}{60} \quad 2.1$$

式中: M_i 瞬态质量排放率(g/s);

$f_i [p(i)]$ 为瞬态稀释比;

ρ_{m_i} 为质量浓度(g/cm³);

Q_i 为瞬态排气流量(m³/min);

表 2.2 ELPI 测量粒径分级(单位: μm)

级别	粒径范围	直径(Dp)	级别	粒径范围	直径(Dp)
1	0.007~0.029	0.02	7	0.393~0.637	0.5
2	0.029~0.057	0.04	8	0.637~0.99	0.79
3	0.057~0.101	0.08	9	0.99~1.61	1.26
4	0.101~0.165	0.13	10	1.61~2.46	1.99
5	0.165~0.255	0.21	11	2.46~3.97	3.13
6	0.255~0.393	0.32	12	3.97~10.15	6.35

2.1.3 EFM 尾气质量流量计

EFM 是美国 Sensors 公司设计的一种紧凑型的汽车尾气流量计，可以测量发动机及车辆的总尾气质量流量，外观如图 2.3 所示。在安装时，一般利用真空吸盘或者金属卡箍将其固定到测试机械上，并通过耐高温软管与发动机排气管连接。SEMTECH-DS 将结合 EFM 的流量数据和尾气分析仪的浓度数据，计算出排气污染物的瞬时及总的的质量排放^[54]。



图 2.3 EFM2 尾气质量流量计外观图

EFM 的核心是一个压差测量设备，主要是利用皮托管测速的原理进行测量。与传统的基于类似技术的设备相比，为了获取更广的动态范围内的更准确的测量，同时使用 4 个压差传感器获得，每个传感器测量不同的流量范围，从而单台仪器可

表 2.3 EFM 流量计技术规格

	1	2	2.5	3	4	5
流量管外径 (mm)		51	64	76	102	127
建议应用车型		轻型汽油 < 2 L 轻型柴油 < 1.5 L	轻型汽油 2~5 L 轻型柴油 1.5~4 L	轻型汽油 > 5 L 轻型柴油 4-6 L	重型柴油 6~12 L	重型柴油 12~18 L
流量(m ³ /min)		4.96	12.0	17.0	31.2	48.1
准确度读数				±2.5 %		
响应时间				<1 s		

以实现从怠速至最大速度范围内瞬态流量的测量，而整个范围内可以保证准确度优于 $\pm 2.5\%$ 。其技术规格见表 2.3。

2.1.4 数据采集

本报告中所有测试仪器都会与 1 台笔记本电脑连接，进行数据传输采集。其中 SEMTECH-DS 通过无线网络与笔记本电脑进行数据传输，ELPI 则通过 1 根 USB-R232 数据线进行数据信号通讯，测试数据通过设备自带软件进行数据接收和储存。

2.1.5 其他设备

整个测试系统除了上述主要设备外，还包括 1 台发电机、1 块 12V 蓄电池、1 台真空泵和 1 台空气压缩机。具体的设备信息如表 2.4 所示。

表 2.4 其他设备型号规格

设备	名称	生产厂商型号
真空泵	莱宝	SV16B
空气压缩机	巨霸	AU3505
发电机	雅马哈	6800E
蓄电池	风帆	12V190Ah

2.2 船舶测试方案

2.2.1 测试区域和路线

我国水系丰富，河流密集，湖泊众多。本报告中选取了大连近海、南京长江和京杭运河、广东珠海等多个地区进行研究。具体的测试区域和测试路线如下：

(1) 大连近海区域

大连是我国重要的渔业生产基地，渔业社会总产值占大农业比重始终保持在 50% 左右。近四年，大连市增加捕捞产量 6200 吨，增加捕捞渔民收入超过 5 亿元，增加渔业社会总产值 13 亿元，直接投入产出比达 1: 10，惠及捕捞渔船近万艘，惠及渔民 3 万余人。因此，选取了 8 艘渔船在此区域进行了实验测试，测试路线如图 2.4 所示。



艾子口郭家沟

*图中蓝色线条所示为 GPS 测得实际测试船舶航行路线；A：艾子口 B：郭家沟

图 2.4 大连近海渔船测试路线

(2) 南京长江流域

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。本次研究再次选取的船舶共有 14 艘，其中小型货船 11 艘，集装箱船 3 艘。其测试路线如图 2.5、图 2.6 所示。

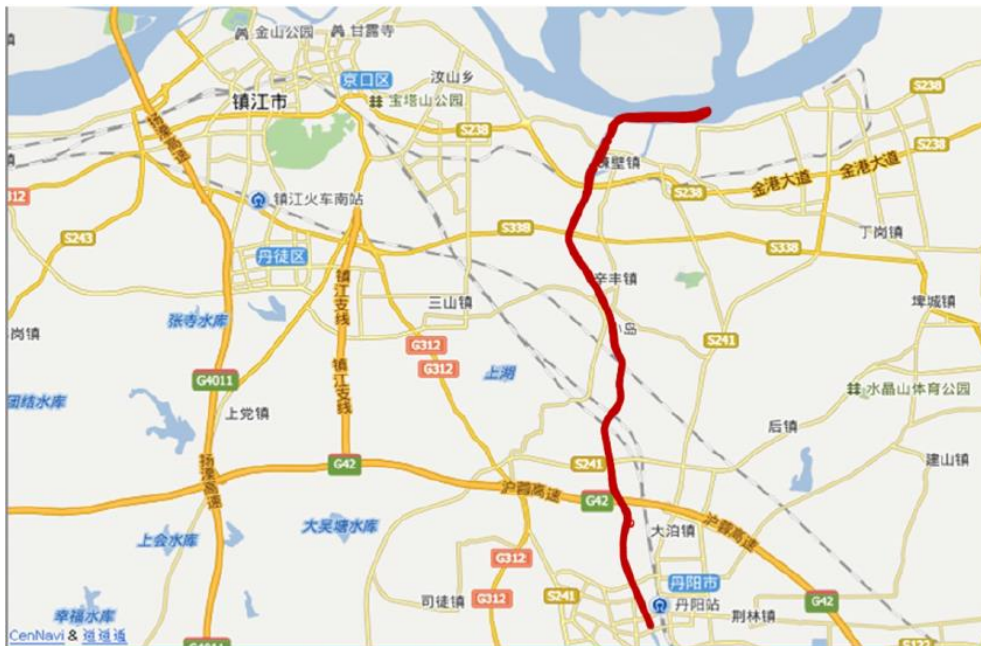


图 2.5 货船测试路线

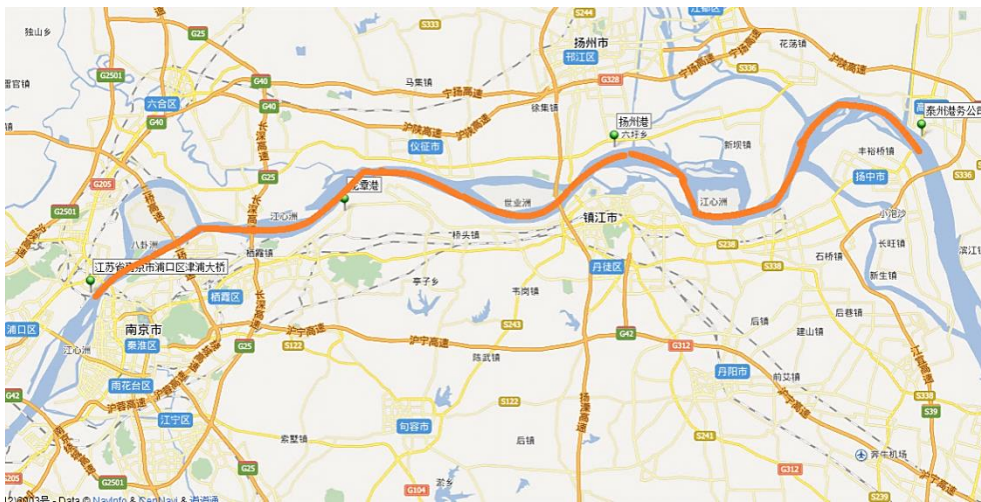


图 2.6 集装箱测试路段

(3) 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。此次试验选取了 4 艘货船和 2 艘客船。其测试路线图 2.7 所示。



图 2.7 广东测试路线

(4) 长江宜昌至重庆段

游轮旅游已经成为中国游客的重要选择之一，2014 年我国游轮市场呈现高位增长。因此本报告选取了一艘游船进行测试，测试路线如图 2.8 所示。



图 2.8 长江宜昌至重庆段测试路线

2.2.2 测试内河船舶

内河船舶种类较多，用途各异。按运输类型可分为客运船舶和货运船舶。其中货运船舶根据运输货物的不同又可分为干货船、液货船、油船等。表 2.5 为主要类型内河船舶介绍。

表 2.5 内河船舶主要类型

内河船舶	船舶类型	具体定义
货船	干货船	以运载干燥货物为主，也可装运成桶液货的货船。
	油船	运载散装石油类货物的液货船
	化学品船	运载液态化学物质的液货船
	拖船	设有拖曳设备，专用于在水上拖曳船舶或其他浮体的船。
	液货船	用于运载散装液态货物的货船
客船	水泥船	用水泥、砂石、钢筋或钢丝网等作为船体结构基本材料的船
	摆渡船	承担运载乘客或车辆，定期由固定地点前往固定地点的船只
	观光船	用于载客游览欣赏周围风景的船只

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。

本报告先后对 30 艘不同类型不同功率不同地区的船只进行了实验测试，其中包括 8 艘大连海域渔船，南京京杭运河段货船 11 艘，广东货船 4 艘，客船 2 艘，长江南京航段集装箱船 3 艘，拖船 1 艘，长江宜昌至重庆段游船 1 艘。测试船舶参数见表 2.6、表 2.7、表 2.8、表 2.9。

表 2.6 大连-丹东附近海域渔船参数

编号	船号	柴油机型号	柴油机制造厂	出厂时间	功率/转速 (kW/(r/min))
No.1	辽丹渔 23601	6190ZLCA-1	济南柴油机厂	2012-12	330/1200
No.2	辽丹渔 23600	6190ZLCA-1	济南柴油机厂	2012-12	330/1200
No.3	辽丹渔 3087	6190ZLCA-1	济南柴油机厂	2011-05	330/1200
No.4	辽丹渔 3088	6190ZLCA-1	济南柴油机厂	2011-04	330/1200
No.5	辽丹渔 3086	6190ZLCA-1	济南柴油机厂	2012-12	330/1200
No.6	辽丹渔 5071	Z6170ZLC-5	淄博柴油机厂	2011-04	260/1200
No.7	辽丹渔 3085	6190ZLCA-1	济南柴油机厂	2012-12	330/1200
No.8	辽丹渔 5070	Z6170ZLC-5	淄博柴油机厂	2011-04	260/1200

表 2.7 江苏段测试船舶参数

测试船 船序号	船舶 类型	发动机生产商	出厂日 期	额定功率 (kW)	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	1500	镇江-长江-镇 江	满载-空 载
2	货船	潍坊柴油机厂	2010.3	136	850	镇江-丹阳	空载
3	货船	上海柴油机厂	2001.1	110.3	1500	镇江-施桥	满载
4	货船	上海柴油机厂	2005.11	162	1500	镇江-施桥	满载
5	货船	潍坊柴油机厂	2009.9	300	1000	镇江-施桥	空载
6	货船	淄博柴油机厂	2008.12	260	1200	镇江-施桥	满载
7	货船	上海柴油机厂	1994.11	88.2	1500	镇江-施桥	满载
8	货船	东风柴油机厂	2010.12	145	1500	镇江-丹阳	空载
9	货船	淄博柴油机厂	2009.11	300	1200	镇江-丹阳	满载
10	货船	潍坊柴油机厂	2004.11	136	850	镇江-丹阳	满载
11	货船	潍坊柴油机厂	2004.11	136	850	丹阳-镇江	空载
12	货船	潍坊柴油机厂	2011.11	136	850	镇江-丹阳	满载

表 2.8 广东段测试船舶参数

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

表 2.9 长江流域测试船舶类型及参数

编号	01 至善号	02 泰州号	03 华远号	04 游轮
测试日期	2014.06.06	2014.06.10	2014.06.15	2014.08.26-29
船舶类型	集装箱船	集装箱船	集装箱船	游轮
主机功率与个数	440kW×2	810kW×2	450kW×2	780kW×2
主机制造商	华东 HBE/淄柴	广州柴油机厂	潍柴	陕西柴油机厂
辅机功率与个数	56kW×2	150kW×3	50kW×2	304kW×3
额定转速(r/min)	1200	主 750 辅 1500	1500	主 900 辅 1500
载重(t)	600	3748	4000	-
制造年份	2011.07	2005.11	2009	1993.1
设计航速(km/h)	24	24	15	-
长宽尺寸(m×m)	74.3×13.2	99.8×16.4	82×16	87.5×14.4
测试起点	龙潭港	扬州港	龙潭港	宜昌桃花村码头
测试终点	扬州港	泰州港	浦口港	重庆朝天门码头

2.2.3 测试设备安装及实验过程

实验测试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。通常情况下，测试仪器安装在发动机舱的顶层甲板上。图 2.9 和图 2.10 分别为测试游轮和集装箱船的测试仪器安装实物图。

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，使之达到相应工作温度。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。



图 2.9 游船测试仪器安装实物图



图 2.10 集装箱船测试仪器安装实物图

2.3 船舶排放研究方法

2.3.1 直接测量法，排气分析仪+排气流量计

一些功率相对较小的柴油机，排气管部位容易布置排气流量计的船舶，适合采用排气分析仪和排气流量计的方法对船舶的排放情况进行测试。图 2.11 是使用排气分析仪和排气流量计测试船舶的实物图。排气流量计受管径限值，只能安装于排气管管径与排气流量计管径相当的船舶。

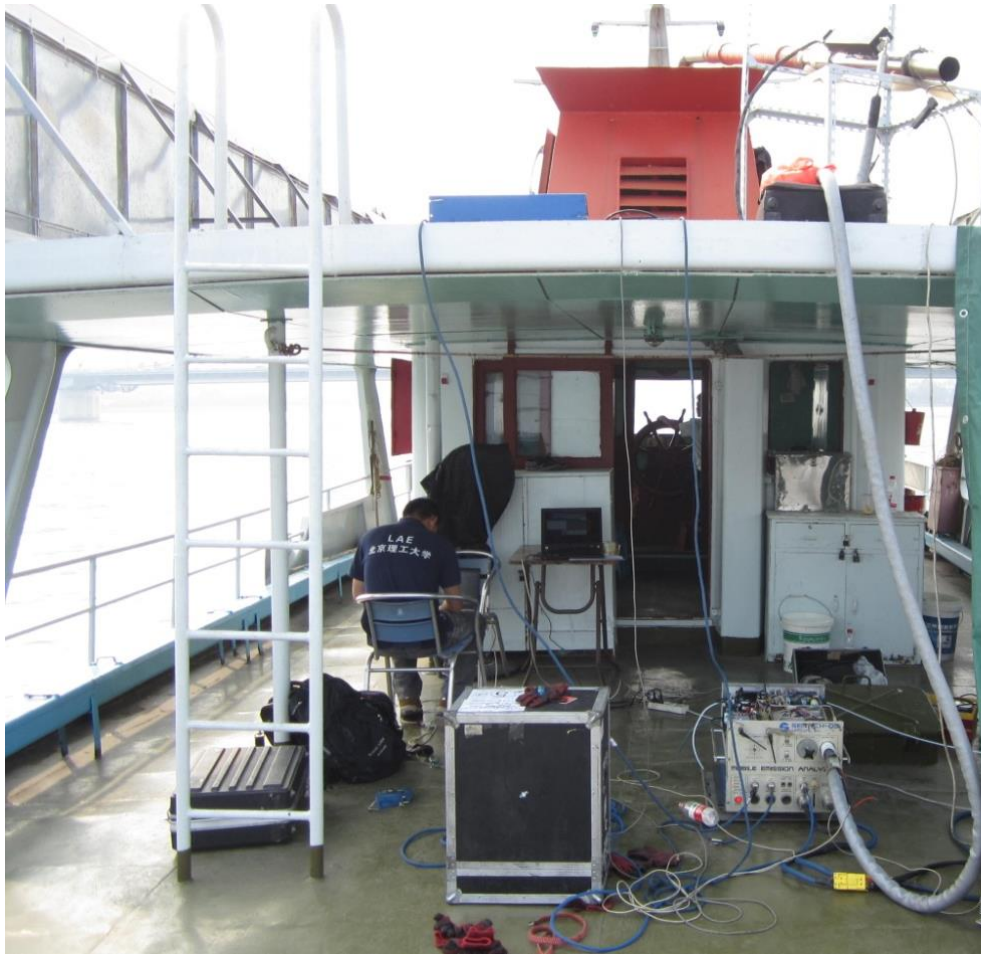


图 2.11 使用排气分析仪和排气流量计的实物测试图

2.3.2 排气分析仪+油耗仪

具有中等功率到大功率柴油机的船舶，一般排气管较粗，排气流量计安装困难，在实际测试中一般使用排气分析仪和油耗仪，这种方式的数据是基于碳平衡原理处理的，根据燃油中碳的比例计算和排气中的 C 成分获得排放量。图 2.12 是使用排气分析仪和油耗仪测试的实物图。在船舶上安装油耗仪会对船舶的油路造成影响，需要征求船主的同意，而且由于船舶使用燃油粘度较大，安装油耗仪容易造成油路堵塞。对于大型船舶，一般会采用 2.3.3 中介绍的排气流速测量仪。



图 2.12 使用排气分析仪和油耗仪的实物测试图

2.3.3 排气分析仪+排气流速测量仪

对于大型船舶，不方便安装排气流量计，一般采用排气分析仪和排气流速测量仪的方法进行测试。图 2.13 为排气分析仪和排气流速测量仪的实物测试图。



图 2.13 排气分析仪和排气流速测量仪实物测试图

2.3.4 发动机台架实验法

以上 3 中方法为船舶实际航行状态下的船舶测试方法。另一种更常见的测量方法是与 GB/T 15907-2008 中规定的方法一致的台架实验法。图 2.14 是台架实验法的测试实物图。

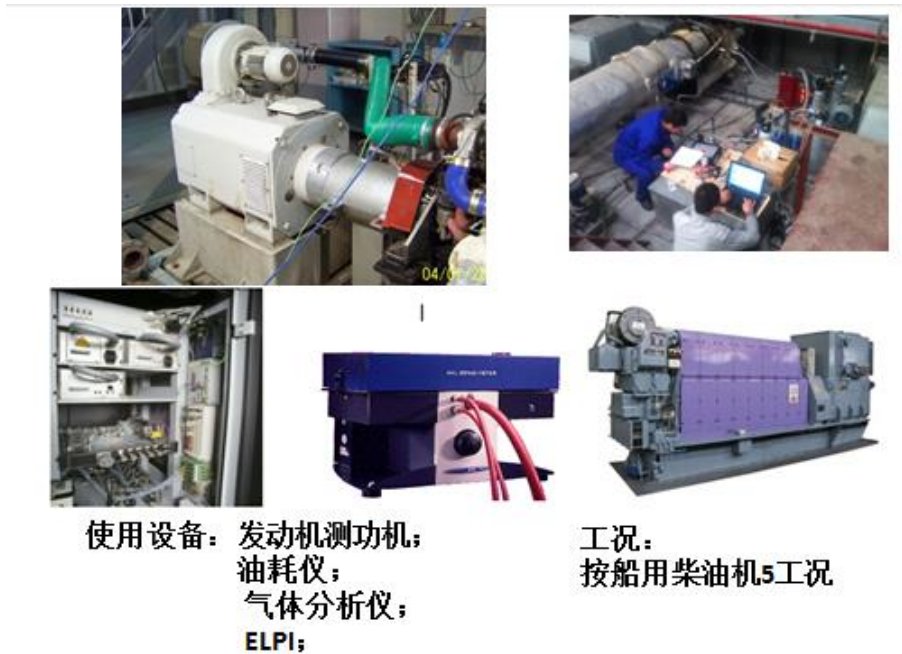


图 2.14 台架实验法实物测试图

2.3.5 基于 AIS 的研究方法

2.3.1~2.3.4 介绍了船舶排放测试四种的方法。下面将介绍一种在获得船舶排放因子后，计算船舶排放清单的方法。

AIS 是利用船舶识别系统获取船舶航行信息的系统，利用 AIS 可以采集船舶的在某时间点的航速和位置信息，此信息在船舶巡航阶段每 6s 发送一次。图 2.15 是船舶 AIS 信息示意图。利用船舶 AIS 信息即可获取船舶的活动水平，采用基于活动水平的方法可以计算出船舶的排放清单。

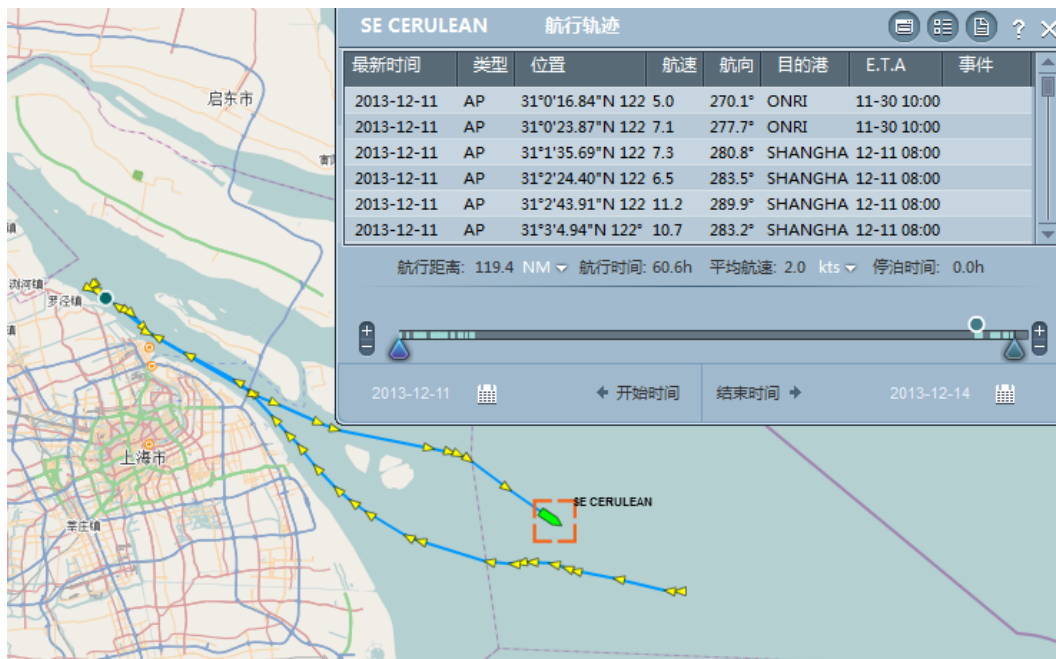


图 2.15 船舶 AIS 信息示意图

另外，由于 AIS 还提供了船舶的位置信息，所以可以根据此位置信息将船舶排放按照船舶路径分布。图 2.16 为根据船舶 AIS 信息作出的船舶排放污染物空间分布图。

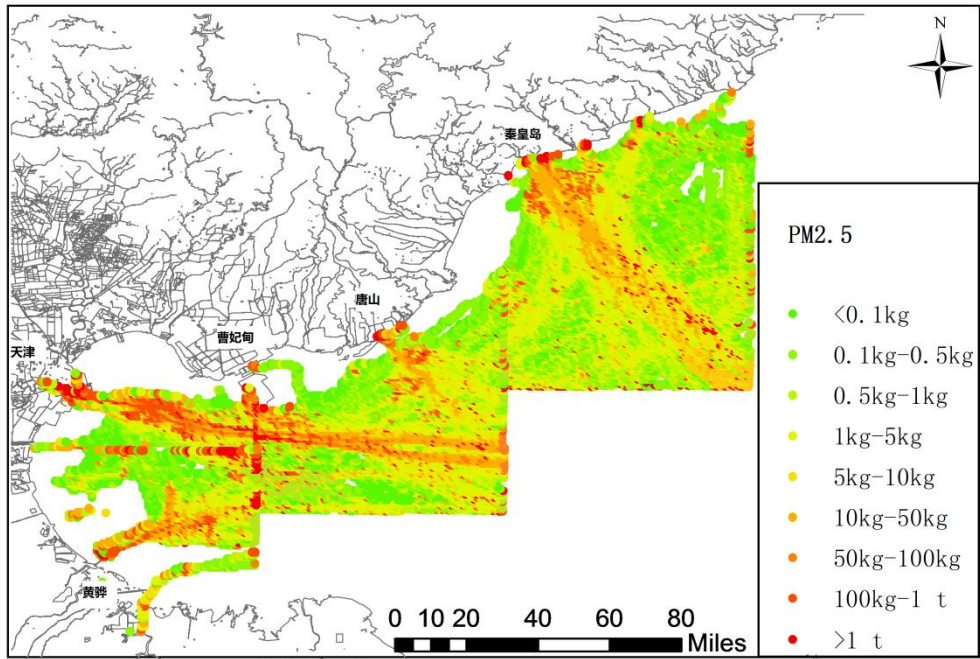


图 2.16 船舶污染物排放空间分布图

3内河船舶排放因子及排放清单计算

3.1内河船舶瞬时排放特征

3.1.1航行工况介绍

所有测试船舶均是在船舶停靠港口时安装实验设备，测试路段为从船舶出港开始，至船舶进港结束。国内外研究中主要将船舶测试工况分为：出港、巡航、进港和停泊四种工况，根据实际调查发现，当船舶停靠岸后，考虑燃油成本和噪音问题，内河船舶上一般都不配备专门为停靠岸后使用的发电辅机（辅助发电机），而利用逆变器经蓄电池组的直流电(12 伏)转换成交流电(220 伏)为船上供电，因此，停泊工况下不存在排放问题。基于此本报告中内河船舶的测试工况主要分为进港、离港和巡航。图 2-4 即为某一船舶实际航行中测试到的速度示意图，按照船舶航速将船舶分为进港、出港和巡航三种运行工况。进港：指从船舶巡航速度开始减速到靠岸为止；出港：静止开始加速到巡航速度为止；巡航：船舶以一定的速度平稳行驶。

在离港工况下，船舶要从停泊位置缓慢驶出，为避免在此过程中与周围其他船舶发生碰撞，货船驾驶人员根据船舶的实际位置不断改变功率以调整航向和航速。当船舶安全进入航道后，货船开始加速直至达到巡航速度，并以这一速度平稳运行。而在进港工况下，货船从巡航速度开始持续减速。在此过程中，驾驶员将方向档从前进移至后退档，利用船尾螺旋桨反向旋转产生的阻力来降低船速。在实际的操作中，驾驶员采取间断性的快速拉大功率使船舶短时间内降至低速状态，然后将方向当从退档移至前进方向。此时船舶保持缓慢航行，直到靠岸停泊，发动机熄火。图 3.1 为船舶航速与工况示意。

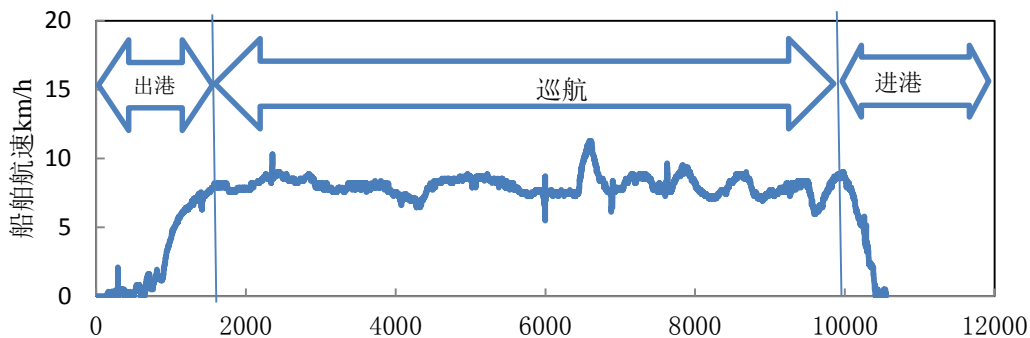


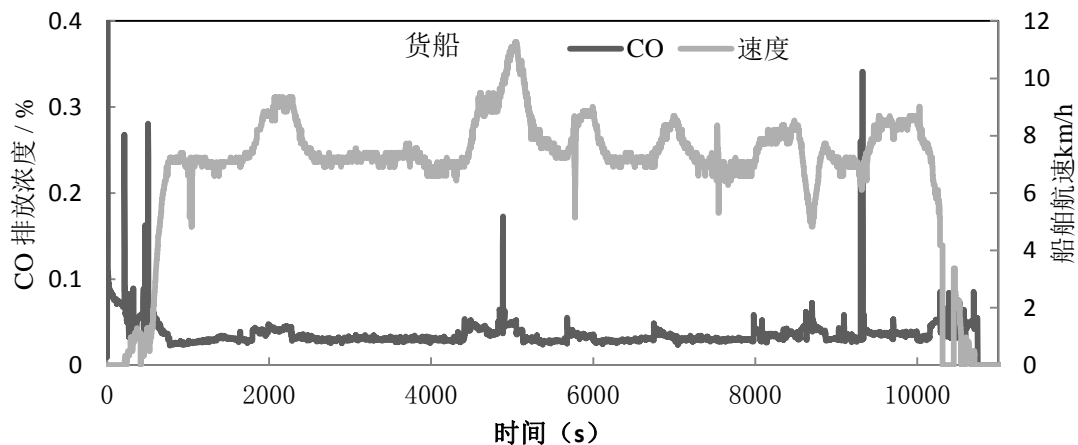
图 3.1 船舶实际航速示意图

3.1.2 CO 瞬时排放特征

CO 是碳氢燃料在燃烧过程中生成的重要中间产物，如果燃料燃烧过程中局部空间和瞬时存在下列情况之一，则 CO 不能继续氧化生成 CO₂ 而就排除机外：①反应着的气体温度突然过低；②反应着的气体突然缺乏氧化剂；③反应物停留在适合的反应条件（如温度和浓度等）的时间太短^[2]。

船舶实际运行中主要变化量负荷对 CO 浓度存在着双向影响：CO 浓度随发动机负荷的增加先降低后增加，有一个谷值，对 CO 来说，有一个最佳的负荷区。大于和小于这个负荷区，CO 浓度均增加。向高负荷发展局部缺氧加剧，使 CO 不能充分燃烧而形成最终产物 CO₂；而向低负荷发展局部温度过低，混合器随负荷的降低而变稀，局部区域温度过低和混合气过稀的情况严重化，使 CO 失去温度条件而不能继续氧化为 CO₂。

图 3.2 为 CO 瞬时排放示意图，从图中可以看出，船舶在离港工况下不断变化的功率导致 CO 排放浓度产生波动，CO 瞬时排放浓度急剧上升，且伴随剧烈波动，产生较多波峰；当船舶进入巡航阶段后，航速稳定在巡航速度，CO 瞬时排放浓度在波谷值 300~800ppm 之间波动，这是因为船舶进入巡航阶段后，航速平稳，混合气浓度变化不大，燃烧室内温度比出港时高，燃烧更完全；当船舶进港时，发动机功率变化较为频繁，特别是突然拉大功率的时刻，发动机迅速升高到较大负荷状态，缸内燃烧条件的急剧变化使不完全燃烧的情况加剧，从而导致 CO 排放浓度升高，并产生剧烈波动。



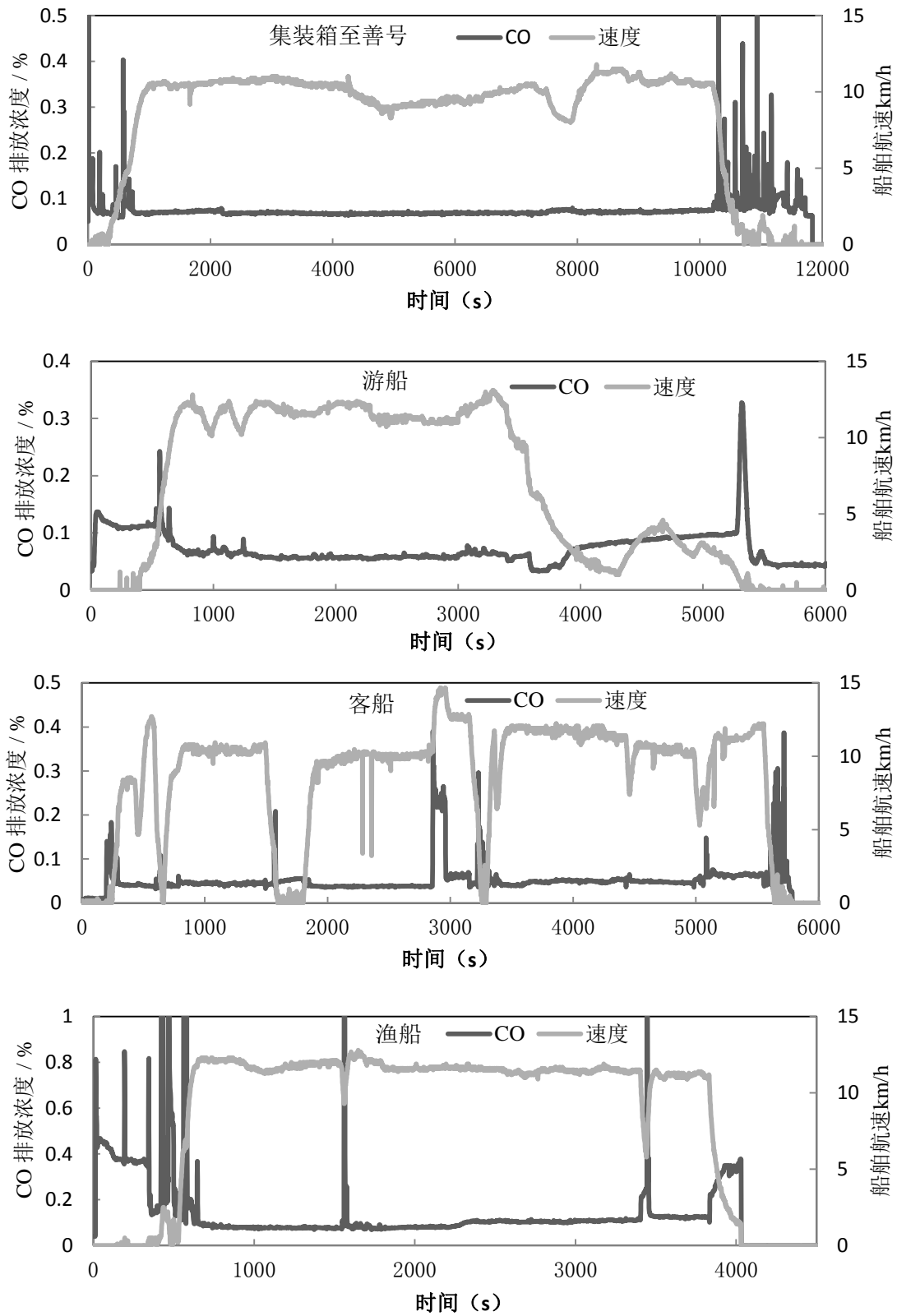
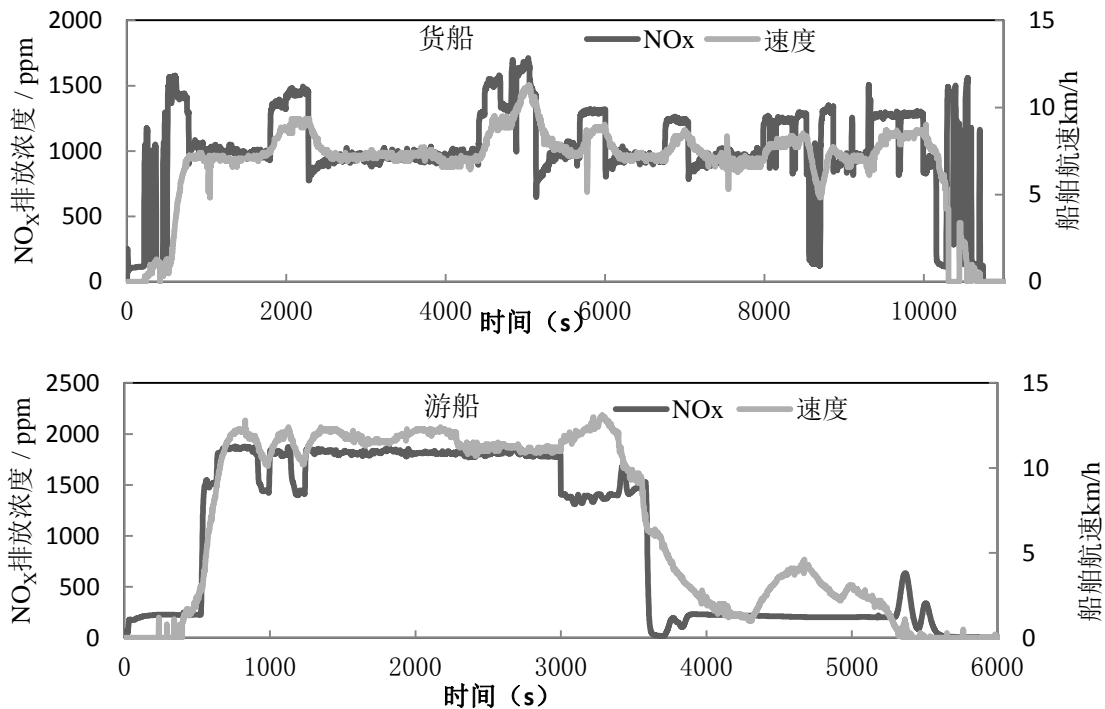


图 3.2 CO 瞬时排放浓度示意图

3.1.3 NO_x 瞬时排放特征

影响氮氧化物生成率和排放率的根本因素为燃烧温度、氧原子浓度和工质在高温环境下的持续时间（即形成氮氧化物的反应时间）。在船舶实际运行中，主要变化量负荷对 NO_x 排放率的影响为：负荷越高，NO_x 的排放率也越高^[2]。负荷对 NO_x 的影响关系中，起关键作用的是火焰温度和缸内平均温度随负荷的增高以及高温持续时间随负荷增加而延长。从低负荷到中负荷时，NO_x 的增加速度大；从中负荷到高负荷时，NO_x 的增加速度变小，这是因为在高负荷时，尽管高温和高温持续时间这两个要素有增无减，但是氧浓度下降，富氧向缺氧过度，从而制约了 NO_x 的生成速率。

图 3.3 为 NO_x 瞬时排放示意图，从图中可以看出，船舶在离港工况下，船舶不断变化的功率，使 NO_x 排放也产生剧烈波动；船舶进入巡航阶段后，NO_x 排放浓度稳定在稍低于波峰位置处，集装箱船、渔船和游船为 1900ppm 左右，货船和客船较低，在 1000ppm 左右波动；当船舶进港时，发动机功率变化较为频繁，特别是突然拉大功率的时刻，发动机迅速升高到较大负荷状态，从而导致 NO_x 排放浓度发生很大的波动。与 CO 排放相比，在整个运行工况下，NO_x 的排放率均比较大，因为在巡航工况下，燃烧温度、氧原子浓度和工质在高温环境下的持续时间都得以满足，所以其排放浓度会比进出港时高。



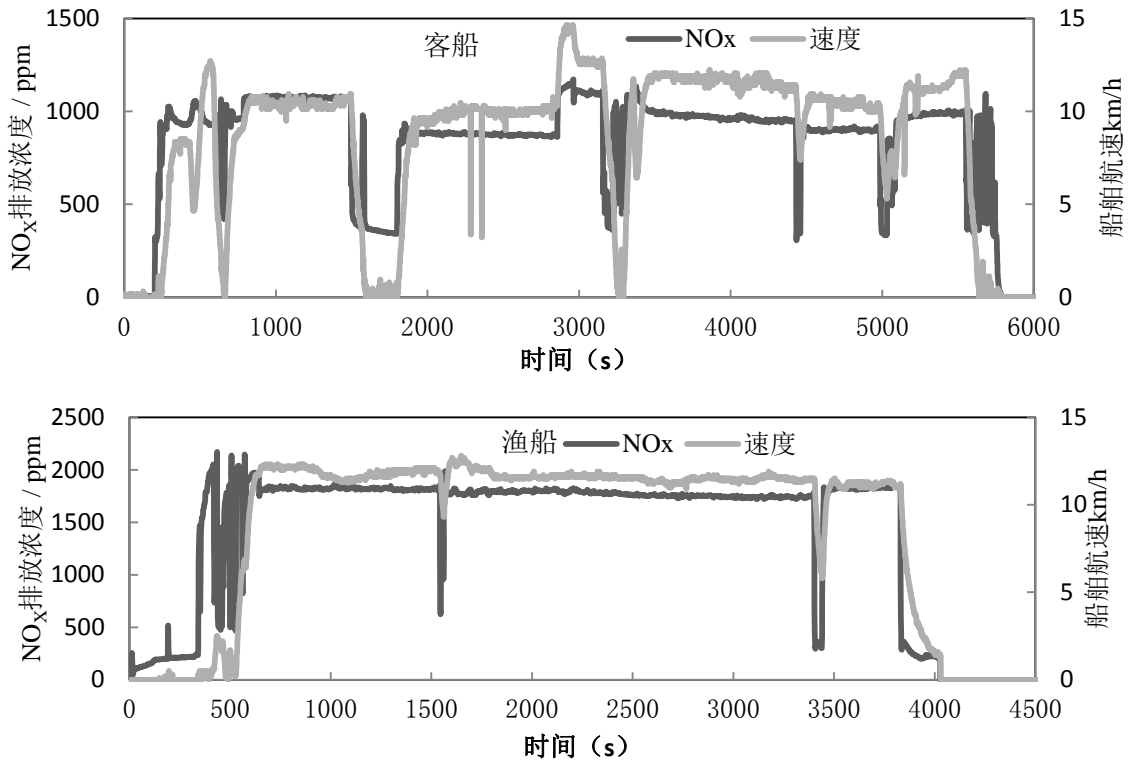


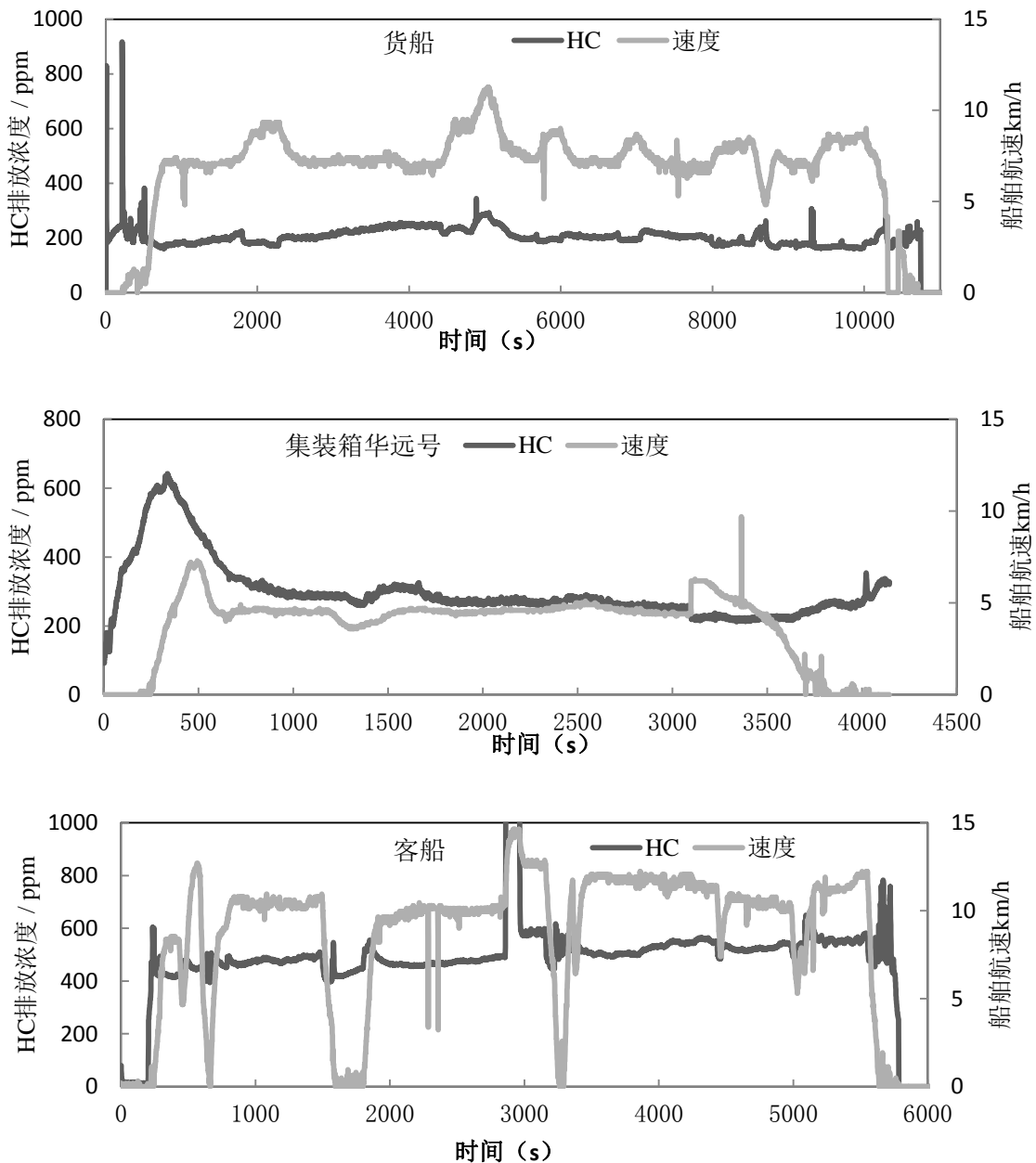
图 3.3 NOx 瞬时排放浓度示意图

3.1.4 HC 瞬时排放特征

碳氢燃料的氧化根据其温度、压力、燃空当量比以及燃料种类、分子结果的不同而又不同的特点。一般情况下，在一定压力下，随着温度升高，反应物会经历稳定反应---冷焰---稳定反应---热焰 4 个阶段，其中唯有在冷焰和热焰阶段烃才进行快速反应（爆炸），也称上述反应过程为两阶段燃烧（低温燃烧和高温燃烧）^[2]。低温燃烧时燃料分子大部分转化为烯烃，高温燃烧时，燃料分子很快被氧化为最终产物。如果燃烧室中某些燃料不能经历高温燃烧阶段，那么他们或者仅仅缓慢氧化，或者经历低温燃烧，最后总有未燃碳氢排出。具体表现为：①虽然燃空比在燃烧界限内，但可能可燃混合物贴近冷的表明，散热损失大，火焰无法传入这部分混合物，这种现象称为壁面激冷效应。②燃烧室内空燃比的空间分布不均匀，造成混合物局部过浓和过稀，致使反应过缓而无法将局部温度提高到产生高温燃烧的程度。由于柴油机在接近压缩终了时才喷射燃油，燃油空气混合物不均匀，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较小。柴油机中影响未燃碳氢的主要因素有局部温度和瞬时温度过低，局部浓度和瞬时浓度过浓

和过稀等。HC 的排放浓度随负荷的变化曲线存在一个谷值，在高负荷和低负荷时，HC 的浓度都上升。

图 3.4 为 HC 瞬时排放示意图，从图中可以看出，船舶在离港工况下，由于船舶不断变化的功率，HC 排放也产生剧烈波动；船舶进入巡航阶段初期，燃空比、缸内温度和压力等条件的稳定使 HC 排放浓度会有所降低，最终稳定在 300ppm 左右；当船舶进港时，发动机功率变化较为频繁，特别是突然拉大功率的时刻，发动机迅速升高到较大负荷状态，从而导致 HC 排放浓度迅速升高，产生波动。



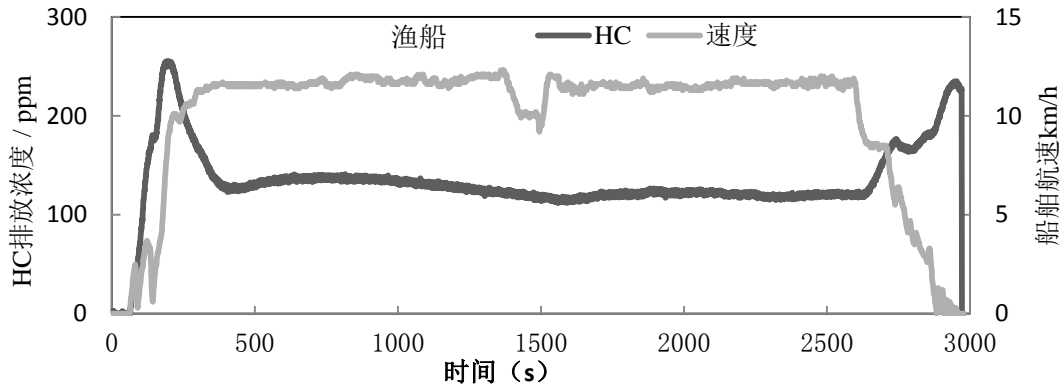


图 3.4 HC 瞬时排放浓度示意图

3.1.5 PM 瞬时排放特征

内燃机排气中出现的颗粒是燃料在燃烧过程中经历了一系列物理化学变化后形成的。首先，燃料分子在高温中裂解或氧化裂解，接着形成颗粒核心，这就是成核阶段。成核后同时经历表面增长和凝聚两个过程。当颗粒长大到某一尺寸时，增长速度急剧下降。以后便以集聚方式形成链状结构物。从核的萌发到成长、聚集这一系列过程都伴随着颗粒的氧化。因此，排气管排出的颗粒量是颗粒生产和氧化竞争的结果^[2]。柴油机的负荷是对其颗粒物排放影响最大的因素，它不仅影响颗粒物排放的大小，也明显影响颗粒的组分。空负荷和低负荷时颗粒物排放率（以燃烧每千克燃油排出的颗粒的克数表示）最高，50%~75%的中等负荷时最低，而在满负荷时排放率又明显上升。在低负荷时，由于空燃比过高，缸内温度低，燃烧室内较大的过稀燃烧气区域处于稀燃界限之外，而不能燃烧，或者只是以缓慢的速度进行氧化反应。因而，有较多的未燃燃油、比润滑油以及他们的部分燃烧中间产物等，最终以颗粒形式排出。而在内燃机接近全负荷时，由于缸内火焰温度高，过量空气系数小，喷油持续期长，滞燃期缩短，着火后喷入缸内的燃油量占循环喷油量的分量增加，燃烧局部过浓情况加剧。这一切构成了高温缺氧、燃油裂解脱氢反应的有利条件，从而形成较多的燃油深度裂解产物，后者最终聚合和附聚成颗粒。从颗粒构成来看，高负荷下的颗粒以固态碳烟为主，低负荷下的颗粒以液态碳氢为主。

图 3.5 为 PM 瞬时排放示意图，从图中可以看出，船舶在离港工况下，由于船舶不断变化的功率，PM 排放同样产生了剧烈波动；船舶进入巡航阶段后，PM 排放浓度在波谷位置 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 左右波动；当船舶进港时，发动机功率变化较为频繁，

突然拉大功率的时刻，发动机迅速升高到较大负荷状态，从而导致 PM 排放浓度发生很大的波动。

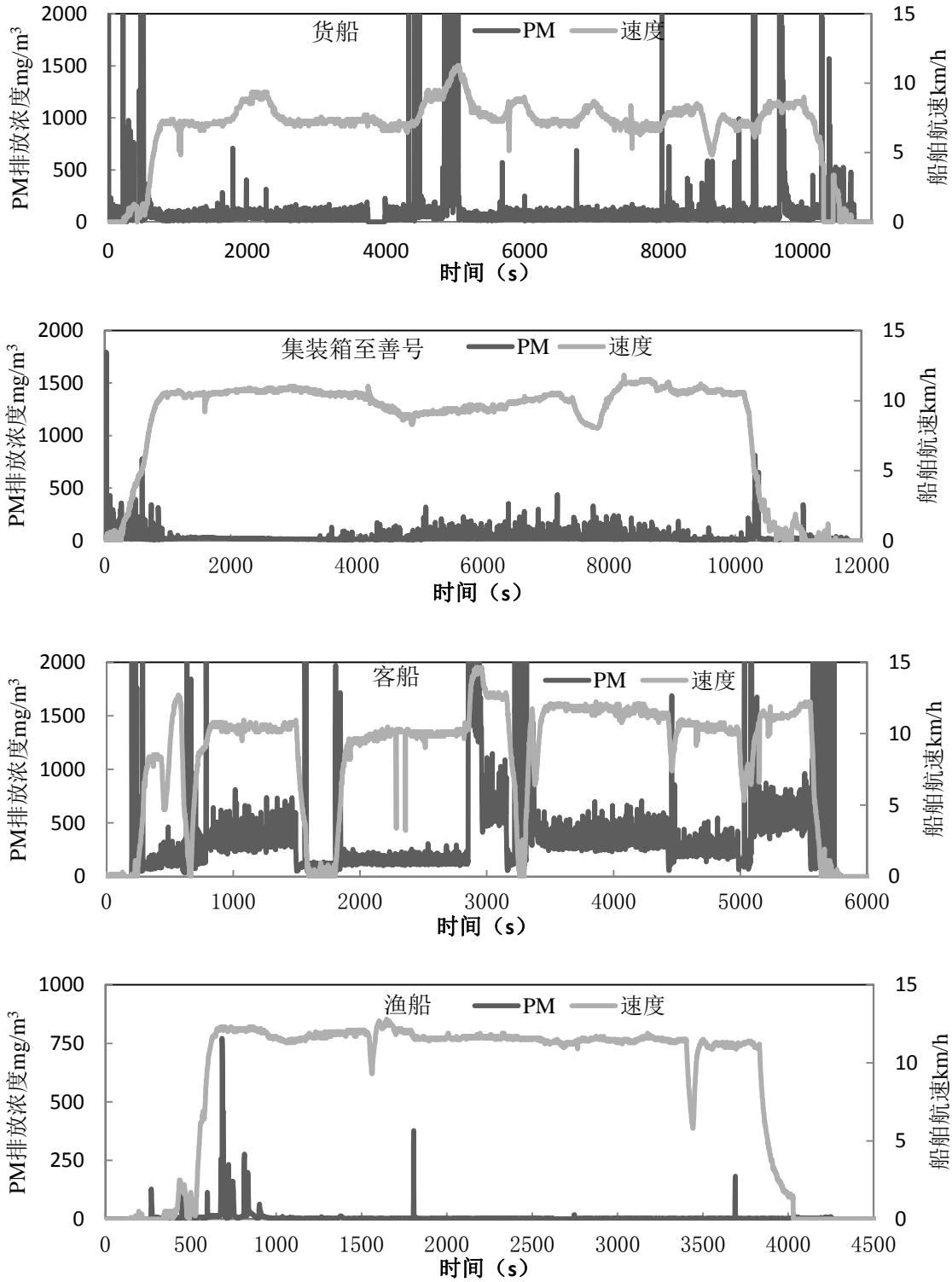
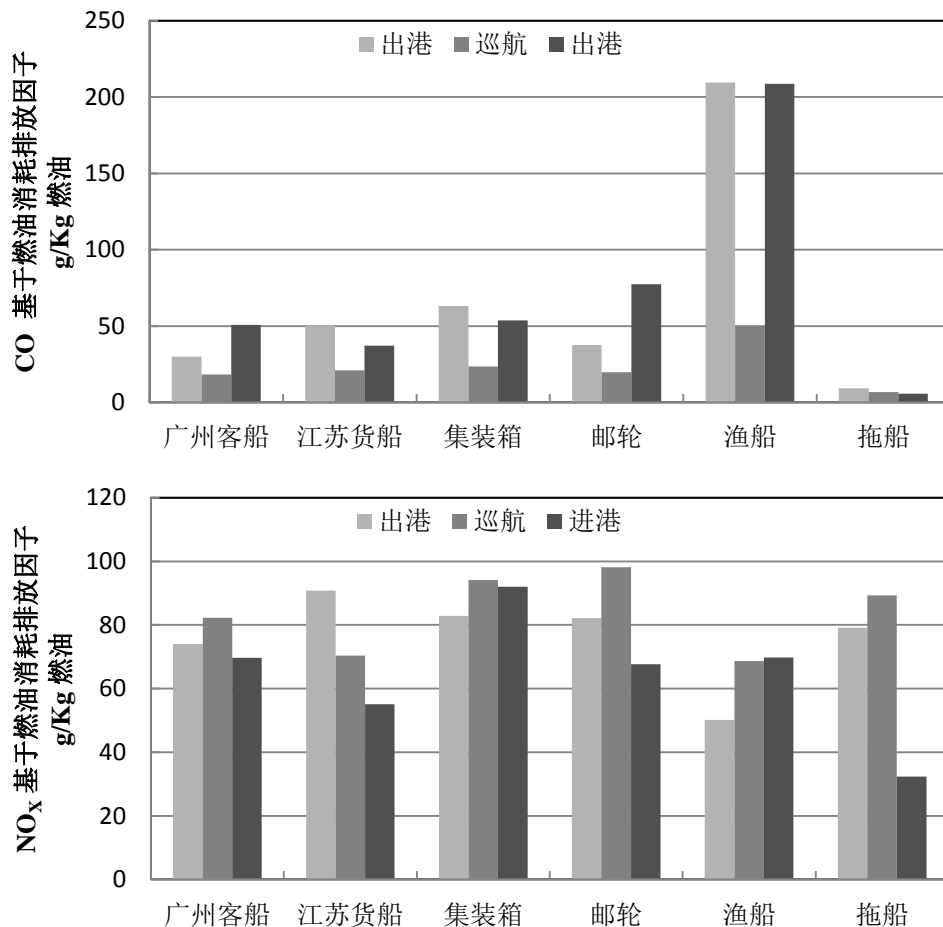


图 3.5 PM 排放速率示意图

3.2不同工况下内河船舶的排放因子

图 3.6 为各种工况下船舶基于油耗的排放因子。由于广东船舶客船和货船功率都比较小，在计算时并没有区分客船和货船，考虑到广东和南京的实验人员和时间不同，因此在计算排放因子时按地区做了区分。CO 的平均排放因子为 $52\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{燃油})$ ；从图中可以看出，渔船的排放因子为其他船舶的 4~18 倍，除渔船外，其他类型船舶的平均排放因子仅为 $30.8\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{燃油})$ ；船舶在进出港工况下排放因子均大于巡航工况。NO_x 的平均排放因子为 $75.6\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{燃油})$ ，各种类型船舶 NO_x 排放因子相当；船舶在巡航工况下排放因子稍大于进出港，其原因在 2.2 节 NO_x 的瞬时排放特征中已经解释过。HC 的平均排放因子为 $5.4\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{燃油})$ ，其中小功率客货船和渔船排放因子较大，为其他船舶类型的 3~5 倍；船舶在进出港工况下排放因子是巡航工况的 1.5~3 倍。PM 的排放因子为 $7.3\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{燃油})$ ，其中内河小功率货船和渔船排放因子较大；进出港工况下排放因子是巡航工况的 2~5 倍。



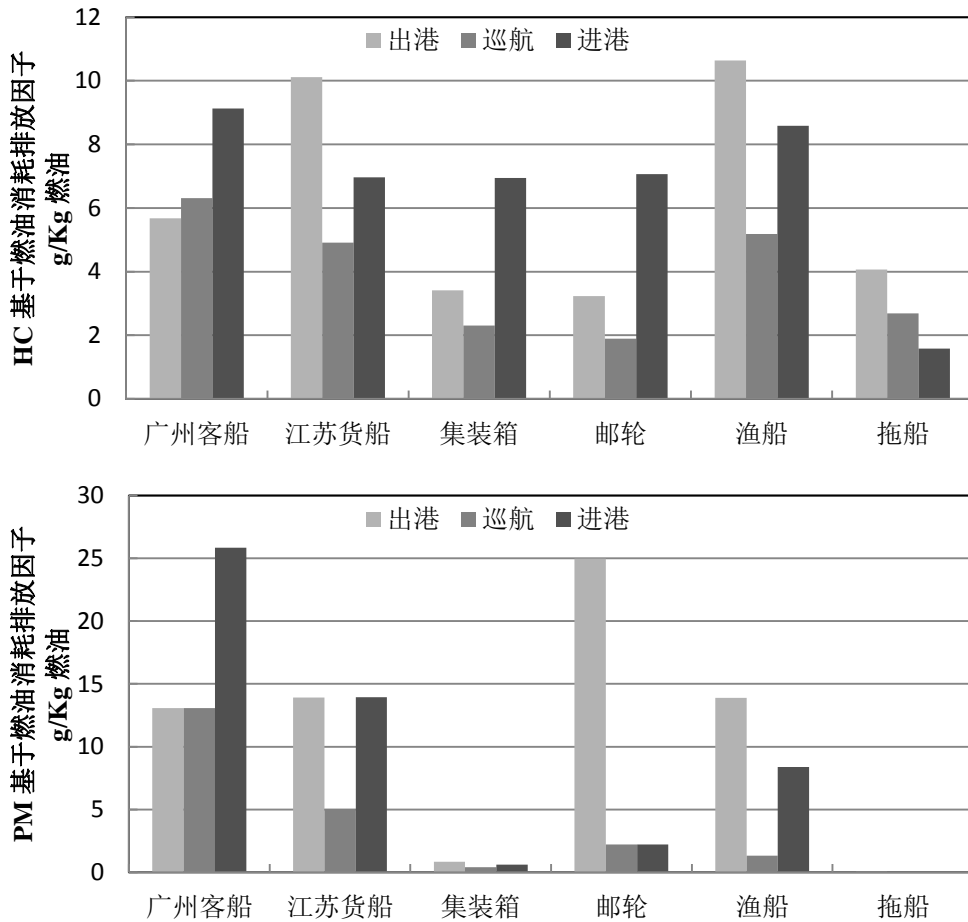


图 3.6 船舶基于燃油消耗的排放因子

3.3 与国外研究结果的对比

近年来，国外研究人员对船舶排放也进行了一系列的研究。由于众多文献中测试船舶类型不同，功率各异，本报告只能利用基于燃油消耗的排放因子来进行对比。表 3.1 中列出了 Moldanova^[61]和 Sinha^[62]的研究结果。Moldanova 对一艘功率为 20200kW 的货船在巡航工况时进行了实验测试，测试时该船舶燃用的是硫含量为 1.9 的 HFO(heavy-fule oil); Sinha 等人对名为 Royal Sphere 的油轮和名为 MSC Giovanna 的集装箱船基于燃油消耗的排放因子进行了测试研究，Royal Sphere 和 MSC Giovanna 的功率分别为 8200kW 和 13400kW，两船使用的都是渣油，只是 MSC Giovanna 使用的燃油比 Sphere 的杂质更少一些。从表中可以看出，本报告中的 CO、HC、NO_x、PM 数据均偏高，其中 HC 是其他船舶的数倍，HC、NO_x、PM 与其他

研究数据相当。

表 3.1 各研究得出的排放因子(g/kg fuel)

污染物种类	Sinha 等人		Moldanova 等		本报告	
	Royal Sphere 船	MSC Giovanna 船	人 (巡航工况)	Carlton 等人.	全程	巡航
CO	19.5	3.0	2.17	7.4	51.7	23
HC	7.8	3.0	0.36	2.4	5.4	3.9
NOx	22.3	65.5	73.4	57-87	75	86.3
PM	-	-	5.3	1.3 (DFO) /8.4(RFO)	7.2	3.7

出现这种现象的原因是多方面的，其中一个重要原因是：本报告中测试的船舶均为内河船舶，且功率较小，不受国际法规监管，而我国又尚未颁布船用发动机排放测试法规。自 2000 年以来，中国环境保护部(MEP)对机动车已经实施了一系列的排放法规，被称为中国 1-4 阶段排放法规。然而，并没有针对全国范围内新建成的船只发动机的排放控制法规。在没有严格的排放法规限值督促下，发动机制造商缺乏改进船用发动机排放情况的积极性。另外，实验期间发现渔民在开渔期为了能够争取时间，通常无暇给渔船定期维护，同时，为了节省成本开支，渔船使用的油品很差，渔民称之为“黑油”，图 3.7 是从部分船舶中抽取的油样，“黑油”的颜色图 3.7 中的 5 号油。

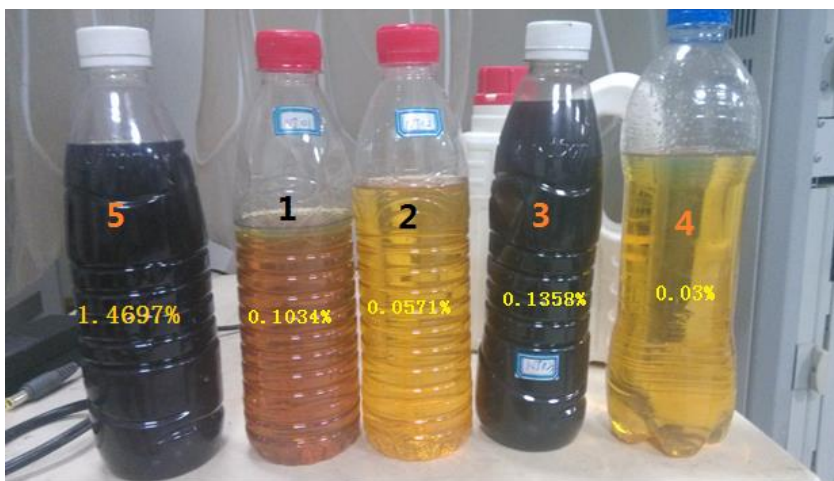


图 3.7 油品抽样检测结果

3.4内河船舶排放清单计算方法

船舶排放清单的计算方法有两种思路，一是根据船舶的统计信息，如某地区货物吞吐量，船舶平均活动水平，船舶燃油使用情况等信息，选择合适的排放因子，如基于燃油消耗的排放因子 ($\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{燃油})$)、基于吨公里的排放因子 ($\text{g}/(\text{km} \cdot \text{ton})$) 等，估算此地区船舶排放情况，此方法也称为“自上而下”的估算方法；另外一种计算船舶排放清单的思路是基于船舶自动识别系统 AIS 发展而逐渐发展起来的，正如 1.3.3 中所介绍的，AIS 可以采集到船舶每 30s 发送一次的实时航行信息，利用此信息可以准确的跟踪船舶的航行轨迹，因此选择合适的排放因子即可准确计算每一艘船舶的排放情况，此方法也称为“自下而上”的计算方法。

对于内河船舶来说，AIS 安装的普及度不够高，并且部分安装了 AIS 的船舶船主没有及时打开 AIS 设备，因此本报告对内河船舶的计算使用了“自下而上”的计算方法。计算公式如下：

$$E_p = W_p \times E_{fp} \quad (3.1)$$

式中， p 为污染物类型； E 为污染物的排放量， kg ； W 为总燃油消耗量， kg ； E_{fp} 为污染物的排放因子， g/kg 。

以往计算排放清单排放因子的选择多为参考国内外文献所得，本报告使用的排放因子为第 2 章中从实验中计算得出的数据，因为这些实验船舶取自中国内河船舶，是根据中国内河船舶的功率，生产年份，船舶类型等参数挑选出的一些典型船舶，而且实验是在船舶的实际运行工况下进行的，因此此排放因子更符合中国内河船舶的实际情况，与中国内河船舶的排放特性更加贴合，这样计算出来的排放清单也更能接近真实值。

3.5内河船舶耗油量

内河船舶主要包括水运和渔用等船舶。水路运输主要为通过各种交通类运输船舶承担货物或旅客运输活动，主要分为内河(包括运河、湖泊)运输、近洋 / 沿海运输和远洋运输。渔用和内河船舶以燃用柴油为主、近洋 / 沿海和远洋运输船舶则以燃用燃料油为主^[63]所以本报告将对渔用和内河船舶的柴油消耗量进行计算。

3.5.1内河运输船舶耗油量

内河运输船舶燃油消耗量的进一步计算公式为：

$$C_f = (P_f + N_f \times W_a) \times R_f \quad (3.2)$$

其中： C_f 为燃油消耗量(t)； P_f 为港口货物吞吐量(t)，2011年全国内河货物周转量为 $76\,384\,153 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}$ ； N_f 为全国客运周转量，2011年全国内河旅客周转量 $354\,295 \times 10^4 \text{ 人次} \cdot \text{km}$ ； W_a 为公民平均体重，取公民平均体重为 65 kg ； R_f 为单位货物周转量的能耗 ($\text{kg}/(10^4 \text{ t} \cdot \text{km})$)，本报告中取为 $550 \text{ t}/(10^8 \text{ t} \cdot \text{km})$ ^[46,64]。

3.5.2 近海渔船耗油量

由于农村使用柴油大部分都是农用机械所用，故本报告采用农业统计资料中农村柴油总消耗量估算我国农业移动机械的柴油消耗量。我国缺乏对这几类机械各自耗油量的详细统计数据，且各种机械间柴油消耗量差异较大，故本报告以机械总动力为依据，按照下式 3.3 推出 2013 渔用机动渔船的耗油量：

$$N_x = a \times D_n \times P_x / P_n \quad (3.3)$$

其中： N_x 为 X 类机械的柴油消耗量； D_n —农村柴油总使用量(104t),2011年我国农用柴油使用量为 $2057.44 \times 10^4 \text{ t}$ ； P_x 为 X 类机械的总功率(kW)，2011年我国渔业机械总功率为 $1663.69 \times 10^4 \text{ kW}$ ； P_n 为农用机械柴油机总功率(kW)，2011年我国农用机械柴油机发动机动力为 $78536.31 \times 10^4 \text{ kW}$ ； a 为修正系数(考虑到各类机械的使用时间及其他不确定因素确定的修正系数)由于我国农业移动机械除包括前文提到的大中型拖拉机、小型拖拉机、农用排灌机、联合收割机这些主要机械外，还包括耕整地及种植机械、其他收割机、农田基本建设机械等，同时考虑到各类机械使用时间的差异性，本报告在计算农业移动机械耗油量时加入一个修正系数，由于渔用机动船海上作业时间较长，除去 6 月到 9 月的休渔期和冬季的捕鱼淡季外，其他时期均会长期在海上作业，一般渔民的工作时间较长，少则每天 6 小时左右，多则超过 10 个小时，比一般农业移动机械使用总时间要多很多，考虑这些情况，本报告确定渔用机动船的修正系数为 $a=2.5$ ^[66]。

3.6 内河运输船舶排放清单结果

根据公式 3.1、3.2 和 3.3 计算出全国 2011 年内河运输船舶大气污染物排放量如表 3.2 所示。

表 3.2 内河船舶污染物排放清单

污染物	CO(10 ⁴ t)	HC(10 ⁴ t)	NO _x (10 ⁴ t)	PM(10 ⁴ t)
内河运输船舶	14.5	2.4	45.8	3.6
近海渔船	17	0.9	6.9	0.9
总计	31.5	3.3	52.7	4.5

2011 年全国机动车 NO_x、HC、CO、PM 排放总量为 640×10⁴t、438.2×10⁴t、3471.7×10⁴t、62.2×10⁴t。内河船舶 NO_x、HC、CO、PM 污染物排放分别占全国机动车总排放的 8.2%、0.75%、0.91%、7.2%。

3.7本章小结

本章使用利用车载排放测试系统（PEMS）对 31 艘不同地区、不同类型的船舶进行了典型工况排放测试实验。基于测试结果，分析了各种污染物的瞬时排放特性及各工况下的排放因子。结合内河船舶的货物周转量和近海渔船总功率计算出全国内河船舶及近海渔船排放清单。

4 基于 AIS 的船舶排放清单计算方法

船舶自动识别系统 AIS (universal shipborne automatic identification system), 这是一种新型的助航系统, 其不仅可以保存船舶的航行信息, 提高船舶路径的准确性、空间细节和辨识度。而且也为统计船舶活动水平提供了便利, 使船舶排放清单得以利用船舶活动水平进行计算。AIS 数据包括: 船舶海上移动业务识别码 MMSI、船舶主机最大连续额定功率、船舶发动机额定转速、船舶设计航速、船舶类型、船舶载重吨、船舶实际航速、船舶实时位置的经纬度、船舶运行状态、船舶标记的定位时间等船舶的基本信息, 这一章将介绍如果利用 AIS 数据计算船舶排放清单, 以及如何获得船舶大气污染物排放的空间分布图, 以直观的看出污染物在空间上的排放情况。

4.1 排放清单计算基础

一般来说, 采用基于活动水平的计算方法来计算船舶排放量, 是以船舶主机、船舶辅机以及锅炉输出的能量 (单位: kW · h) 与各自相对应的排放因子相乘这一函数关系式为基础, 计算中所采用的排放因子以 g/kW · h 为计量单位, 同时, 还需要结合相应的排放因子修正系数进行修正。

下面给出的公式 4.1 是基于功率计算船舶排放量的基本公式, 公式 4-2 是船舶在某种航行状态下, 船舶主机、船舶辅机和锅炉输出能量的计算公式。

$$E_i = \text{Energy} \times EF \times FCF \times CF \quad (4.1)$$

其中:

E_i 为某种类型的污染物的排放量, 单位为: g;

Energy 为船舶在某种运行状态下消耗的能量, 单位为: kW · h。它的具体计算方法在公式 4.2 中给出;

EF 为该种污染物的排放因子, 单位为: g/kW · h;

FCF 为燃油修正系数, 无量纲单位;

CF 为排放修正因子, 无量纲单位。

$$\text{Energy} = \text{Load} \times \text{Act} \quad (4.2)$$

其中：

Energy 为船舶在某种运行状态下消耗的能量，单位为： $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；

Load 为船舶主机、船舶辅机或者锅炉在某种船舶运行状态下的负荷功率。对于船舶主机来说，负荷功率由船舶主机的最大连续额定功率（MCR）与船舶在该种运行状态下的负荷系数（LF）相乘得到。单位为： kW ；

Act 为船舶航行的时间，单位为： h 。

下面将具体介绍利用 AIS 数据计算排放清单所需要的船舶主机负荷功率、船舶辅机负荷功率、锅炉负荷功率、船舶航行时间、船舶主机排放因子、船舶辅机排放因子、锅炉排放因子、船舶主机低负荷修正系数、燃油修正系数以及排放修正因子等。

4.2 船舶主机负荷功率计算

在公式 4-2 中，我们已经介绍了船舶主机的负荷功率 Load 的计算方法，用公式表述为： $\text{Load} = \text{MCR} \times \text{LF}$ 。

其中，MCR 为船舶主机的最大连续额定功率，是针对船舶主机来说的，与船舶辅机没有关系。在本报告研究中，船舶主机的最大连续额定功率是船级社数据库中直接获得的，属于船舶排放计算的基本数据。

船舶主机的负荷系数 LF 是由船舶的实际航速除以船舶的设计航速得出的，由于船舶发动机即船用柴油机作为船舶的动力装置，用来驱动船舶的螺旋桨，船舶主机输出的功率被螺旋桨吸收，其转矩与螺旋桨的阻转矩相同，因此，船舶主机按照螺旋桨的特性工作，发动机负荷系数的估计使用螺旋规律，也就是说，发动机负荷的变化是随着船舶的实际航速与船舶的设计航速的比值的 3 次方进行变化。公式 4.3 给出了船舶主机负荷系数 LF 的计算方法。

$$\text{LF} = \left(\text{Speed}_{\text{Actual}} / \text{Speed}_{\text{Maximum}} \right)^3 \quad (4.3)$$

其中：

LF 为船舶主机的负荷系数，无量纲单位；

$\text{Speed}_{\text{Actual}}$ 为船舶航行的实际航速，单位：节；

$\text{Speed}_{\text{Maximum}}$ 为船舶的最大设计航速，单位：节。

以计算船舶排放量为目的，负荷系数的最大值是 1，若计算得到的发动机的负

荷系数大于 100%的情况，按 1 进行计算，在船舶正常航行的情况下，发动机的负荷系数不会超过 1。

由于船舶的航行驱动力主要是由船舶主机产生的，船舶主机的负荷功率与船舶的实际航速密切相关，可以利用船舶实际航速这一参数进行计算得出，同时，船舶的实际航速也在一定程度上反应出了船舶的航行状态（船舶的航行状态是通过船舶的实际航速划分的）。

船舶主机的负荷功率可以直接通过计算得出，而船舶辅机的负荷功率与船舶的实际航速之间关联不大，不能同船舶主机一样，直接利用船舶的实际航速进行计算得出，而是需要通过船舶类型、船舶航行状态以及船舶主机最大连续额定功率等参数才能得出。下面，将详细介绍船舶辅机负荷功率的计算方法。

4.3 船舶辅机负荷功率计算

船舶辅机的额定功率应该同船舶主机的最大连续额定功率一样，是我们能够获得的用于船舶排放计算的基本数据，但是，事实上船舶辅机额定功率的数据匮乏，不能用于船舶辅机负荷功率的计算。目前，应用于实践的确定船舶辅机负荷功率的计算方法是：首先，基于船舶类型和船舶航行状态确定出船舶辅机负荷功率占船舶主机最大连续额定功率的比例系数；然后，将得出的比例系数和与其相对应的船舶主机最大连续额定功率相乘，就可以得出船舶辅机的负荷功率。因此，要想得到船舶辅机的负荷功率，首先要知道这条船的类型以及它的航行状态。下面，我们将分别介绍一下船舶类型分类以及船舶的航行状态。

4.3.1 船舶类型

基于确定船舶辅机负荷功率比例系数的需要，我们按照船舶的用途以及船舶运输种类的不同将船舶进行分类，它可以分为：载车船、载驳船、散货船、集装箱船、游轮、杂货船、远洋拖轮、冷藏船、滚装船、油轮以及其他类型的船舶等。

载车船主要是用来装运进口或者出口车辆的船舶，船舱容量大，甲板层数多，船首、船尾以及船的中部处有舷门和跳板，用于车辆上下船，属于是自行推进式的干货船。

载驳船就是载运货驳的运输船舶，又称为子母船，是将驳船装上货物，再将驳

船装上载驳船，运至目的港后，将驳船卸下水域，由内河推船分送至目的港装卸货物并等待下一次的运输。

散货船是专运散装货物的自行推进式的干货船，比如运输谷物、矿砂、煤炭等大宗散货等。

集装箱船是运载集装箱货物的自行推进式的干货船。游轮是由于搭载乘客从事参观、旅行、游览活动的各类客运机动船只的统称。

杂货船是以运载成包、成捆、成桶等件杂货为主，也可装运某些散装货的自行推进式的干货船。

远洋拖轮是指在海洋里用于拖或推货船或者驳船的自行推进式拖轮，船上没有用于装载货物的船舱，船上带有拖带设备，动力装置功率大，用于拖带没有动力的船只。

冷藏船用于运载使鱼、肉、水果、蔬菜等容易腐烂的食品处于冻结状态或者某种低温条件下的专用运输船舶，属于自行推进式的干货船，因受货运批量的限制，冷藏船的吨位不大。

滚装船又称“开上开下”船，或者称“滚上滚下”船。它是利用运货车辆来载运货物的专用船舶，用牵引车牵引载有箱货或其他件货的半挂车或轮式托盘直接进出货舱装卸的运输船舶，属于自行推进式的干货船。

油轮是指载运散装石油或成品油的液货运输船舶，从广义上讲是指散装运输各种油类的船，除了运输石油外，装运石油的成品油，各种动植物油，液态的天然气、石油气以及化学用品等，属于自行推进式的液货船。

其他类型船舶是指不适合以上分类的其他类别的远洋船舶。

4.3.2 船舶航行状态

船舶在航行过程中的航行状态是通过船舶的实际航行速度进行划分的，每一种航行状态中，船舶都具有相似的航速特性。船舶在不同的航行状态下，都有各自独特的排放特性。

根据船舶的实际航行速度可以将船舶的航行状态分为：巡航状态、减速区航行状态、机动操作状态以及停泊状态。

1) 巡航状态下，船舶以巡航速度航行，航行速度一般为船舶最大航速的 94%。

船舶主机输出功率为船舶最大连续额定功率的 83%^[67]，锅炉则多数情况下处于关闭状态。船舶位于某个港口的边界到该港口的防波堤（从开放的海洋区域变化为内河航道的地理标志）或者该港口的减速区这部分区域内时，船舶的航行状态一般为巡航状态。本报告将船舶实际航行速度大于 12 节的船舶航行状态归为巡航状态。

2) 船舶在减速区域内航行的时候，船舶的实际航速小于船舶的巡航速度，但是大于船舶的机动速度。减速区规定的船舶最大航速是船舶在通往港口的水道上航行的最大安全速度，船舶航行至减速区必须要服从减速区的航速规定。在美国的切萨皮克湾，减速区规定的船舶的最大航速可以达到 15 节，然而，在其他的大多数减速区域，船舶的最大航速介于 9 节到 12 节之间。本报告将船舶的实际航行速度介于 8 节到 12 节之间的船舶航行状态归为减速区航行状态。

目前，在减速区航行的船舶的实际航速趋向于低于减速区规定的最大航速的趋势。例如，在美国的洛杉矶港，警戒区规定船舶以低于 12 节的航速航行，统计数据显示，集装箱船和游轮以平均 11 节的航行速度通过减速区，其他类型的远洋船则以平均 9 节的航行速度通过，因此，减速区的航速规定取得了很好的实施效果。此外，一些港口通过建立减速区来减少远洋船在驶进港口时的污染物排放。

3) 船舶在港口的防波堤到港口的码头这部分区域内行驶时，船舶一般处于机动操作状态。根据船舶航行的方向以及船舶类型的不同，船舶处于机动操作状态的平均航行速度介于 3 节到 8 节之间。一般情况下，出港的船舶的平均航行速度以及它的输出功率要高于进港的船舶的平均航行速度以及它的输出功率，这是由于，出港的船舶需要船舶的动力装置输出功率来提高船舶的航行速度离开码头，进港的船舶则只需要最终停在码头处，航行速度较慢，在拖船的帮助下，船舶主机输出的功率很小，有时候船舶主机甚至会停止工作。

洛杉矶港的统计数据显示^[68]，航行速度较快的船舶，比如集装箱船和游轮，进港时的平均航行速度为 7 节；其他类型的航行速度较慢的船舶，进港时的平均航行速度为 5 节；而船舶在驶出港口时，平均航速则增加到 8 节。

本报告将船舶的实际航行速度介于 1 节到 8 节之间的船舶航行状态归为机动操作状态。

4) 船舶离开某港口的时刻减去船舶达到该港口的时刻，就是船舶在该港口停留的时间，但是，这其中包括了船舶进港和出港所花费的时间，所以，再减去船舶进

港和出港的时间，就是船舶在港口停泊的时间。如果船舶出现抛锚的情况，则船舶抛锚也算在船舶停泊的状态之内。当船舶处于停泊状态时，船舶主机停止工作，船舶辅机和锅炉处于工作状态，船舶辅机和锅炉要输出船舶正常运转以及装卸货设备的所需要功率和热能，此时，船舶辅机和锅炉的负荷会达到它们的峰值负荷。

由于，AIS 系统在船舶航行速度很小的情况，船舶 AIS 数据会有误差。因此，本报告将船舶的实际航行速度小于 1 节的船舶航行状态归为停泊状态。

通过以上对不同的船舶航行状态的描述，可以看出，船舶在不同的航行状态下，航行速度有很大的差别，船舶主机、船舶辅机和锅炉的工作情况也不同，船舶的排放特性也不相同。

4.3.3 船舶辅机负荷比例系数

影响船舶辅机负荷比例系数的因素有两个：船舶的类型和船舶的航行状态。船舶主机在船舶处于停泊状态时会停止工作，而船舶辅机会一直处于工作状态，并且在停泊状态时出现峰值负荷，不会出现停止工作的情况。通过对船舶总工程师、船长以及船员的调查采访以及相关的船舶数据统计资料，得出了不同船舶类型的船舶辅机在不同的船舶航行状态下的负荷比例系数（见表 4.1）。

表 4.1 船舶辅机负荷比例系数^[67]

船舶类型	船舶航行状态			
	巡航状态	减速区航行	机动操作状态	停泊状态
载车船	0.13	0.3	0.67	0.24
散货船	0.17	0.27	0.45	0.22
集装箱船	0.13	0.25	0.50	0.17
游轮	0.80	0.80	0.80	0.64
杂货船	0.17	0.27	0.45	0.22
远洋拖轮	0.17	0.27	0.45	0.22
冷藏船	0.20	0.34	0.67	0.34
滚装船	0.15	0.30	0.45	0.30
油轮	0.13	0.27	0.45	0.67
其他类型	0.17	0.27	0.45	0.22

船舶的类型以及船舶的航行状态是可以从 AIS 数据中直接获得的用于船舶排放计算的基本数据，利用这两项数据在表 4.1 中查出船舶辅机的负荷比例系数，将得到的负荷比例系数与船舶主机的最大连续持续功率相乘，即可得出船舶辅机的负荷功率。

4.4 锅炉负荷功率

锅炉用于加热燃油、润滑油、船上生活用水，主机暖缸，驱动辅助机械以及其他船上生活杂用等^[69]。

当船舶在海上正常航行时，锅炉在大多数情况下处于关闭状态。这是因为船舶上配备了废气余热锅炉，它能够吸收船舶主机废气的热量，代替锅炉正常工作，提供船上所需的热能。因此，船舶在海上正常航行时，锅炉处于关闭状态^[70]。

船舶航行至港口附近时，为了保证航行安全，船舶航行速度会有所降低。美国洛杉矶长滩港规定距离港口 40 海里的海域范围内为船舶航行减速区^[68]，当船舶航行至船舶减速区域时，船舶的航速降低，相应的船舶主机负荷功率会下降，船舶主机排放的废气能量降低，废气余热锅炉不能代替锅炉正常工作。相关研究表明^[44]，当船舶主机的负荷系数小于或等于 20% 时，废气余热锅炉关闭，锅炉开启。

锅炉负荷功率的确定与船舶主机和船舶辅机不同，由于获得的 AIS 数据中没有关于锅炉负荷功率的数据，因此，本报告采用 Entec 研究提供的锅炉负荷功率数据，具体内容见表 4.2。

表 4.2 锅炉负荷功率^[71]（计量单位：kW）

船型	巡航状态	减速区航行	机动操作状态	停泊状态
载车船	253	253	253	253
散货船	132	132	132	132
集装箱-1000	241	241	241	241
集装箱-2000	325	325	325	325
集装箱-3000	474	474	474	474
集装箱 4000	492	492	492	492
集装箱箱 5000	630	630	630	630

4.2 续表

集装箱-6000	565	565	565	565
集装箱-7000	551	551	551	551
集装箱-8000	525	525	525	525
集装箱-9000	547	547	547	547
集装箱-11000	600	600	600	600
游轮	1393	1393	1393	1393
杂货船	137	137	137	137
远洋拖轮	0	0	0	0
滚装船	137	137	137	137
冷藏船	255	255	255	255
油轮	371	371	371	3000
其他类型	137	137	137	137

表 4.2 给出了不同类型的远洋船舶在不同船舶航行状态下的锅炉负荷功率。其中，游轮不同于其他类型的船舶，其上承载的大量乘客对船上生活用水以及其他生活杂用的需求增加，加重了锅炉的负荷；油轮需要锅炉提供驱动液货泵以及惰性气体鼓风机的蒸汽，同样加重了锅炉的负荷；远洋拖船上没有配备锅炉。因此，游轮的锅炉输出功率明显高于其他类型船舶的锅炉输出功率，油轮的锅炉输出功率相比于其他类型船舶的锅炉输出功率也比较高，远洋拖船的锅炉输出功率则为零。

此外，研究远洋船排放清单时，只有当船舶主机的负荷系数小于或等于 20% 时，才可以通过表 4.2 获得锅炉负荷功率数据；若船舶主机的负荷系数大于 20%，锅炉的负荷功率为零。

4.5 船舶运行时间

在公式 4.2 中，船舶主机和船舶辅机输出的功率乘以与之相对应的船舶的运行时间，就是船舶在这段时间内消耗的能量。在以往的计算中船舶运行的时间是通过船舶航行的距离除以船舶在这段时间内的平均航行速度获得，对于船舶处于停泊状态与抛锚状态时的时间则通过船舶的数据统计中获得。

但是，本报告对船舶运行时间的计算采用了另外一种方法。鉴于 AIS 采集到的数据是船舶每 6s 一次船航行信息，这个信息不仅包含船舶的所在位置的经纬度、船舶航速，还包括了这个时刻的 Unix 时间信息（Unix 时间是从 1970 年 1 月 1 日开始所经历的秒数）。所以在计算船舶航行时间时，本报告采用的方法是用两次船舶发出的航行信息时间做差，例如要计算在港停靠时间，只需要用出港时的时间减去进港时的时间即可。

4.6 船舶主机排放因子

在船排放清单的计算过程中，最薄弱的环节就是船舶的排放因子的研究，这是因为，船的排放测试试验成本很高，难度很大，以至于在全球范围内关于船舶排放因子的数据很少，关于远洋船舶的排放因子更少，因此，船舶的排放因子数据只能从有限的数据中获得。

关于远洋船排放因子的最新研究是由 Entec 研究提供的，并且这些排放因子的数据是目前公认的最新的可用于实践的数据。但是，Entec 研究提供的排放因子的数据中没有包含污染物 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO 以及温室气体 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 的排放因子数据。

在船舶污染物排放因子的测量中，PM 排放因子的测量是最受争议的。同其他污染物排放因子的测量相比，PM 排放因子的测量更加困难，受到影响因素更多。但是，在众多影响因素中，船用燃油的含硫量对船舶 PM 排放因子的影响最大^[66]。

船舶污染物 PM_{10} 的排放因子由 ENVIRON 研究提供^[72]，对于 $PM_{2.5}$ 排放因子的确定，EPA 认为船舶 $PM_{2.5}$ 的排放因子为 PM_{10} 排放因子的 97%^[73]，但是，这一结论适用于使用低含硫量燃油的高速船用柴油机；IVL 的研究表明，船舶 $PM_{2.5}$ 的排放因子为 PM_{10} 排放因子的 80%，但是，这一研究结果并没有得到社会各界研究的一致认可。

船舶主机通常为低速柴油机或者中速柴油机，而低速柴油机以及中速柴油机的燃油喷射系统与高速柴油机的燃油喷射系统相比，压力要低很多，同时，船舶所使用的燃油并不是精炼的，含硫量较高。因此，船舶主机排放的 $PM_{2.5}$ 的排放因子占 PM_{10} 排放因子的比例要小于 EPA 的研究结果，即低于 97%，但是，船舶 $PM_{2.5}$ 的排放因子为 PM_{10} 排放因子的 80% 又比较小。所以，对于低速柴油机以及中速柴油

机，选择船舶 $PM_{2.5}$ 的排放因子为 PM_{10} 排放因子的 92% 比较合适。

CO 以及温室气体 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 的排放因子由 IVL 研究提供^[73]，其中， CH_4 的排放因子为 HC 排放因子的 2%。

通过以上内容的描述，表 4.3 给出了船舶主机污染物排放因子的具体数据，表 4.4 则为船舶主机温室气体排放因子的数据，两个表格中的排放因子的数据都是基于船用燃油为船用重油，即燃油的含硫量为 2.7% 的基础上得出的。

表 4.3 船舶主机污染物排放因子^[70, 71]（计量单位：g/kW h）

船舶类型	建造年份	PM_{10}	$PM_{2.5}$	DPM	NO_x	SO_x	CO	HC
低速柴油机	≤1999	1.05	0.96	1.5	18.1	10.5	1.4	0.6
中速柴油机	≤1999	1.11	1.02	1.5	14	11.5	1.1	0.5
低速柴油机	2000-2010	1.05	0.96	1.5	17.0	10.5	1.4	0.6
中速柴油机	2000-2010	1.11	1.02	1.5	13.0	11.5	1.1	0.5
低速柴油机	2011-2015	1.05	0.96	1.5	15.3	10.5	1.4	0.6
中速柴油机	2011-2015	1.11	1.02	1.5	11.2	11.5	1.1	0.5

注：船舶主机的额定转速低于 130r/min 时，船舶主机为低速柴油机；船舶主机的额定转速高于 130r/min 且低于 1400r/min 时，船舶主机为中速柴油机。

表 4.4 船舶主机温室气体排放因子^[73]（计量单位：g/kW h）

船舶类型	建造年份	CO_2	N_2O	CH_4
低速柴油机	≤1999	620	0.031	0.012
中速柴油机	≤1999	683	0.031	0.010
低速柴油机	2000-2010	620	0.031	0.012
中速柴油机	2000-2010	683	0.031	0.010
低速柴油机	2011-2015	620	0.031	0.012
中速柴油机	2011-2015	683	0.031	0.010

注：船舶主机的额定转速低于 130r/min 时，船舶主机为低速柴油机；船舶主机的额定转速高于 130r/min 且低于 1400r/min 时，船舶主机为中速柴油机。

4.7 船舶辅机排放因子

船舶辅机的排放因子与船舶主机的排放因子的来源相同，大部分的排放因子数

据来自于 Entec^[71]。船舶污染物 PM₁₀ 的排放因子由 ENVIRON 研究提供^[71], PM_{2.5} 的排放因子为 PM₁₀ 的排放因子的 92%, CO 以及温室气体 CO₂、N₂O、CH₄ 的排放因子由 IVL 研究提供, 其中, CH₄ 的排放因子为 HC 排放因子的 2%。

表 4.5 给出了船舶辅机污染物排放因子的具体数据, 表 4.6 则为船舶辅机温室气体排放因子的数据, 两个表格中的排放因子的数据都是基于船用燃油为船用重油, 即燃油的含硫量为 2.7% 的基础上得出的。

表 4.51 船舶辅机污染物排放因子^[72, 73] (计量单位: g/kW h)

建造年份	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
≤ 1999	1.11	1.02	1.50	14.7	12.3	1.1	0.4
2000-2010	1.11	1.02	1.50	13.0	12.3	1.1	0.4
2011-2015	1.11	1.02	1.50	11.2	12.3	1.1	0.4

表 4.6 船舶辅机温室气体排放因子^[75] (计量单位: g/kW h)

污染物种类	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
排放因子	683	0.031	0.010

船舶辅机一般为高速柴油机, 所以, 船舶辅机的排放因子不会受船舶辅机额定转速的影响。

4.8 锅炉排放因子

锅炉的排放因子数据大部分来自于 Entec, CO 以及温室气体 CO₂、N₂O、CH₄ 的排放因子由 IVL 研究提供, 与船舶主机和船舶辅机相同, CH₄ 的排放因子为 HC 排放因子的 2%。

表 4.7 给出了锅炉排放的污染物和温室气体的排放因子的具体数据, 同船舶主机和船舶辅机一样, 表格中排放因子的数据都是基于船用燃油为船用重油, 即燃油的含硫量为 2.7% 的基础上得出的。

表 4.7 锅炉排放因子^[71] (计量单位: g/kW h)

PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
0.8	0.64	0	2.1	16.5	0.2	0.1	970	0.080	0.002

4.9 船舶主机低负荷修正

当船舶航行至减速区或者船舶处于机动操作状态时，船舶的航行速度降低，船舶主机的输出功率也会相应降低，船舶主机负荷减小，船舶主机排放的污染物的质量排放量降低。但是，由于柴油机在低负荷运行时，柴油机的燃烧效率会降低，导致船舶主机污染物的排放因子变大，因此，当船舶主机处于低负荷状态时，有必要对船舶主机的排放因子进行修正。

EPA 给出了用于计算船舶主机处于低负荷状态时的排放因子的计算公式^[75]4.4。

$$y = a \times (\text{fractional load})^{-x} + b \quad (4.4)$$

其中：

y 为修正后的排放因子，单位：g/kW h；

a 为斜率系数，无量纲单位；

b 为截距，无量纲单位；

x 为指数（负的），无量纲单位；

fractional load 为船舶主机的负荷系数，在章节 4.2 中介绍过它的计算方法，当船舶主机的负荷系数小于或者等于 20% 时，认为船舶主机处于低负荷状态，即 fractional load ≤ 20%。

公式 4.4 中的变量 a、b、x 的值在表 4.8 中给出。

表 4.8 船舶主机低负荷排放因子计算公式的变量值^[73]

污染物种类	指数 (x)	截距(b)	斜率系数 (a)
PM	1.5	0.2551	0.0059
NOX	1.5	10.4496	0.1255
CO	1.0	0.1458	0.8378
HC	1.5	0.3859	0.0667

从公式 4.4 中同样可以看出船舶主机的低负荷效应，即船舶主机处于低负荷状态时，船舶主机的排放因子增加，ENVIRON 通过 EPA 进行的研究^[76]中对船舶主机的低负荷效应也得出了同样的结论。

表 4.9 给出了利用公式 3-4 和表 3-11 计算得出的船舶主机处于低负荷状态时的排放因子。

表 4.9 船舶主机低负荷排放因子（计量单位：g/kW h）

负荷系数	PM	NO _x	CO	HC
2%	2.34	54.82	42.04	23.97
3%	1.39	34.60	28.07	13.22
4%	0.99	26.14	21.09	8.72
5%	0.78	21.67	16.90	6.35
6%	0.66	18.99	14.11	4.92
7%	0.57	17.23	12.11	3.99
8%	0.52	16.00	10.62	3.33
9%	0.47	15.10	9.45	2.86
10%	0.44	14.42	8.52	2.50
11%	0.42	13.89	7.76	2.21
12%	0.40	13.47	7.13	1.99
13%	0.38	13.13	6.59	1.81
14%	0.37	12.85	6.13	1.66
15%	0.36	12.61	5.73	1.53
16%	0.35	12.41	5.38	1.43
17%	0.34	12.24	5.07	1.34
18%	0.33	12.09	4.80	1.26
19%	0.33	11.96	4.56	1.19
20%	0.32	11.85	4.33	1.13

船舶主机的低负荷调整因子是由船舶主机在低负荷状态下的排放因子（表 4.9 中给出）除以船舶主机在负荷系数为 20% 时的排放因子（以 20% 为船舶正常负荷状态下的负荷系数的最小值）所得到的，具体算法见公式 4-5。由于船舶主机处于低负荷状态时，船舶主机的排放因子会随着船舶主机负荷的减小而增大，因此，船舶主机的低负荷调整系数都是大于 1 的。此外，由于在公式 4.4 中是以船舶主机在负荷系数为 20% 时的排放因子为除数，所以，当船舶主机的负荷系数为 20% 时，船舶主机的低负荷调整因子为 1。

$$LLA (\text{at } x\% \text{ load}) = y (\text{at } x\% \text{ load}) / y (\text{at } 20\% \text{ load}) \quad (4.5)$$

其中：

LLA 为船舶主机的低负荷调整系数，无量纲单位；

x 为船舶主机的负荷系数，x 的值小于或者等于 20%，无量纲单位；

y 为船舶主机在低负荷状态下的排放因子，由公式 4.4 和表 4.9 计算得出，单位：g/kW h。

表 4.10 给出了利用公式 4.5 计算得出的船舶主机的低负荷调整系数。

表 4.10 船舶主机低负荷调整系数

负荷系数	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
2%	7.29	7.29	7.29	4.63	1.00	9.70	21.18	1.00	4.63	21.18
3%	4.33	4.33	4.33	2.92	1.00	6.49	11.68	1.00	2.92	11.68
4%	3.09	3.09	3.09	2.21	1.00	4.86	7.71	1.00	2.21	7.71
5%	2.44	2.44	2.44	1.83	1.00	3.90	5.61	1.00	1.83	5.61
6%	2.04	2.04	2.04	1.60	1.00	3.26	4.35	1.00	1.60	4.35
7%	1.79	1.79	1.79	1.45	1.00	2.80	3.52	1.00	1.45	3.52
8%	1.61	1.61	1.61	1.35	1.00	2.45	2.95	1.00	1.35	2.95
9%	1.48	1.48	1.48	1.27	1.00	2.18	2.52	1.00	1.27	2.52
10%	1.38	1.38	1.38	1.22	1.00	1.97	2.18	1.00	1.22	2.18
11%	1.30	1.30	1.30	1.17	1.00	1.79	1.96	1.00	1.17	1.96
12%	1.24	1.24	1.24	1.14	1.00	1.64	1.76	1.00	1.14	1.76
13%	1.19	1.19	1.19	1.11	1.00	1.52	1.60	1.00	1.11	1.60
14%	1.15	1.15	1.15	1.08	1.00	1.41	1.47	1.00	1.08	1.47
15%	1.11	1.11	1.11	1.06	1.00	1.32	1.36	1.00	1.06	1.36
16%	1.08	1.08	1.08	1.05	1.00	1.24	1.26	1.00	1.05	1.26
17%	1.06	1.06	1.06	1.03	1.00	1.17	1.18	1.00	1.03	1.18
18%	1.04	1.04	1.04	1.02	1.00	1.11	1.11	1.00	1.02	1.11
19%	1.02	1.02	1.02	1.01	1.00	1.05	1.05	1.00	1.01	1.05
20%	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

表 4.10 给出的船舶主机的低负荷调整系数假定了船舶主机负荷系数的最小值为 2%，没有包括负荷系数为 1% 的情况，若出现负荷系数 < 2%，当做负荷系数为 2% 看待；其中， N_2O 和 CH_4 排放因子的低负荷修正系数是以 NO_x 和 HC 为基础得到的； SO_x 的排放量仅仅与船用燃油中的含硫量有关，与其他因素无关，因此，它的低负荷修正系数为 1；由于船舶主机的负荷变化会影响它的燃烧效率，所以， CO_2 的排放量会随着船舶主机负荷的变化而变化，但是，目前还没有有关 CO_2 排放因子变化的有效数据，因此，认为 CO_2 排放因子的低负荷修正系数为 1。

当船舶主机的负荷系数 < 20% 时，船舶主机的排放因子需要进行低负荷修正，使用修正后的排放因子进行计算。公式 4.6 给出了船舶主机低负荷状态下，使用的排放因子的计算方法。

$$\text{EF} = \text{Base EF} \times \text{LLA} \quad (4.6)$$

其中：

EF 为船舶主机处于低负荷状态下，修正后的排放因子，单位：g/kW h；

Base EF 为船舶主机处于正常状态下选用的排放因子，在章节 4.6 中介绍了它的选取方法，单位：g/kW h；

LLA 为船舶主机低负荷调整系数（具体内容见表 4.10），无量纲单位。

表 4.10 给出的低负荷修正系数只适用于船舶主机的排放因子，船舶辅机不需要进行低负荷修正。这是因为，在一艘远洋船上会配备若干个船舶辅机，当辅机功率减小时，一些船舶辅机会自动关闭，以保证工作中的船舶辅机一直处于效率较高的状态，所以，船舶辅机不需要进行低负荷修正。

4.10 燃油修正系数

船舶使用的燃料不同，它所排放的大气污染物的量也会相应的发生变化，尤其是船用燃油中含硫量的变化对船舶污染物的排放量的影响最为明显。相关研究表明^[77]，当船舶使用的船用燃油的含硫量降低时，船舶所排放的 SO_x 和 PM 的量也会不同程度地下降。

在章节 4.6、章节 4.7 和章节 4.8 中分别介绍了船舶主机、船舶辅机以及锅炉的排放因子，其中，这些排放因子都是在船用燃油为船用重油即含硫量为 2.7% 的燃油的基础上得到的，若换用低含硫量的燃油（例如含硫量为 0.5% 的燃油），船舶 PM 的

排放量降低为原来的 25%，SO_x 的排放量降低为原来的 18.5%。因此，当船舶使用的燃油不是含硫量为 2.7% 的船用燃油时，理论上，应该对选取的船舶主机的排放因子、船舶辅机的排放因子以及锅炉的排放因子进行修正。

但是，由于我们获得的 AIS 数据中，没有包含与船舶使用的燃油种类相关的信息，同时，考虑到我国目前还没有制定出控制远洋船舶排放的法规，可以采用含硫量较高的船用重油的排放因子对船舶的排放量进行估算（向偏大的方向估算），为制定船舶排放法规做准备。因此，本报告没有对船舶主机、船舶辅机和锅炉的排放因子进行燃油修正，认为船舶均使用含硫量为 2.7% 的船用重油，燃油修正系数为 1。

4.11 减排措施修正因子

由于之前对船舶的排放缺乏监督管理，船用柴油机的发展与车用柴油机相比要相对落后。如今，随着人们的环保意识逐渐加强，船舶排放引起的大气污染已经受到了社会各界的广泛重视。为了降低船舶污染物的排放量，提高船用柴油机的整体质量，船舶柴油机的生产制造公司开始对船用柴油机进行技术改造，优化船用柴油机的燃烧排放特性。

著名的德国船用柴油机制造商 MAN 公司对于船用柴油机的改装提出了多项技术方案，例如，在船用主机上安装燃油滑阀，涡轮增压系统增加断路器以及进行汽缸润滑油系统优化等等。其中，在船用主机上安装燃油滑阀得到了更广泛的认可^[78]。

安装燃油滑阀可以减少针阀压力室的容积，提高燃油喷射压力，避免喷油嘴出现喷嘴油滴的情况，减少燃烧室的积碳，使燃烧室和排气通道更加清洁，改善了柴油机的燃烧过程，提高了燃烧效率，降低燃油消耗率。研究数据表明，对船舶主机进行改造后，即安装燃油滑阀之后，可有效降低船舶污染物的排放，船舶 NO_x 排放降低 30%，颗粒物 PM 的排放降低 25%。

目前，MAN 公司制造生产的新型船用柴油机都安装有燃油滑阀，并且开始对 2004 年后生产的船用柴油机进行技术改造，为其配备燃油滑阀，其他公司也开始对船用柴油机进行改造，安装 MAN 公司的燃油滑阀。

随着减排技术在船舶上的应用，研究学者开始考虑引入排放修正因子来修正船舶采用减排技术所带来的船舶排放量的降低，在进行船舶排放清单的计算中也应该引入排放修正因子进行修正。但是，由于目前无法得知每一艘船舶上是否采用了减

排技术以及采用了何种减排技术，同时，也没有关于每一项船舶减排技术的排放修正因子的有效数据。所以，本报告没有考虑船舶采用减排技术改造后排放量产生的变化。

4.12 数据处理

针对以上建立的船舶排放清单的计算方法，结合船舶 AIS 数据，采用 Matlab 建立了远洋船舶排放的计算模型，下图 4-1 为远洋船舶排放计算的流程图。

依据图 4.1 的船舶排放计算流程图以及第 4 章所讲述的船舶排放清单的计算方法，

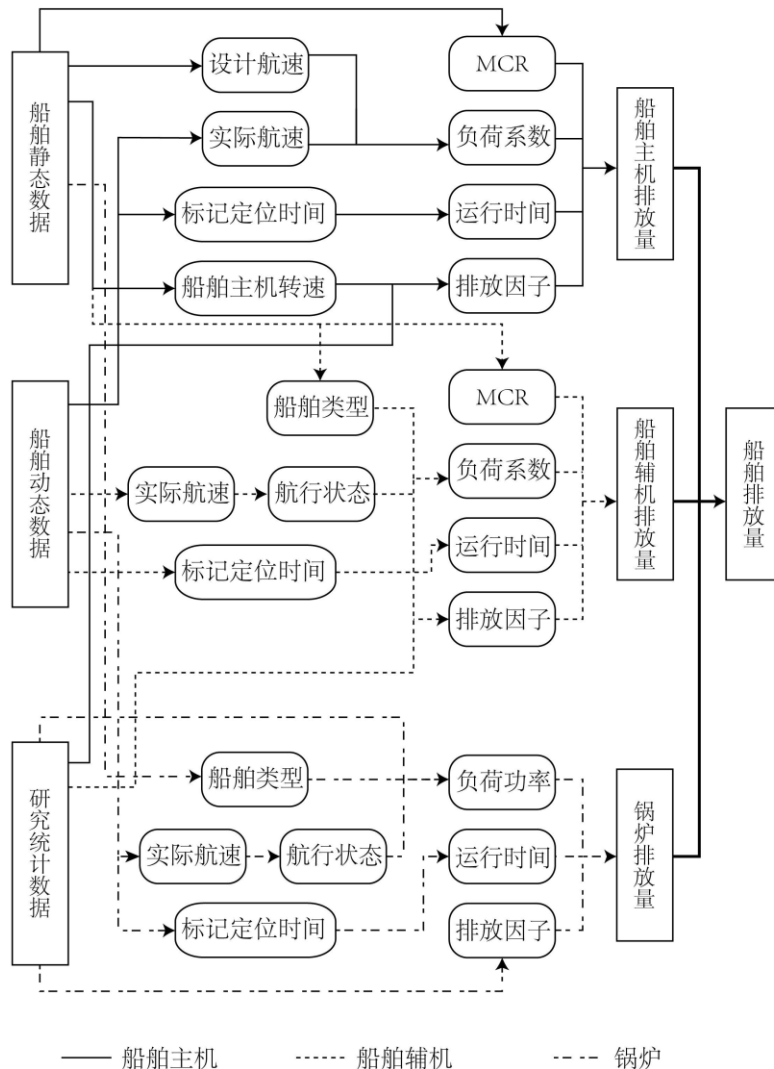


图 4.1 排放清单计算流程图

本报告利用 Matlab 实现了对船舶的航行时间、船舶的航行状态、船舶主机负荷功率、船舶辅机负荷功率、锅炉负荷功率、船舶主机负荷系数、船舶主机排放、船舶辅机排放、锅炉排放、船舶的总排放量、不同航行状态下的船舶排放量、不同船舶类型的总排放量、船舶不同机型的排放量等数据的计算。

最后将计算所得结果导入到 ARCGIS 中，获得将排放量作为属性的点元素，在 ARCGIS 中将空间划分为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 的网格，将点与网格空间关联，使网格以排放量大小为属性，最后将网格可视化，即可获得船舶排放污染物的空间分布图。

5 基于 AIS 计算渤海湾港口排放清单

渤海湾是一个近封闭的内海，地处中国大陆东部北端，它一面临海，三面环陆，北、西、南三面分别与辽宁、河北、天津和山东三省一市毗邻，辽东半岛和山东半岛犹如伸出的双臂将其合抱，构成首都北京的海上门户。

本报告对地处渤海的黄骅港、秦皇岛港、唐山港四个港口的排放清单进行了计算，全国沿海亿吨港口共有 19 个，以上 3 个港口均是货物吞吐量超过亿吨的沿海港口。

考虑到污染物在空气中会四处飘散，且渤海湾的特殊地形，本报告的研究区域并没有局限在港口的行政区域，实际的计算区域比港口的行政区域大很多。

5.1 唐山港

5.1.1 计算区域

唐山港口位于唐山市东南部沿海，下辖京唐港区和曹妃甸港区。2012 年，唐山港口拥有各类泊位 63 个，2012 年，全港完成货物吞吐量 3.65 亿吨，同比增长 06.6%，增幅位居全国港口前列。唐山港口集装箱吞吐量打破多年徘徊的局面，一举突破 40 万关口，完成 45.4 万 TEU，同比增长 33.2%。

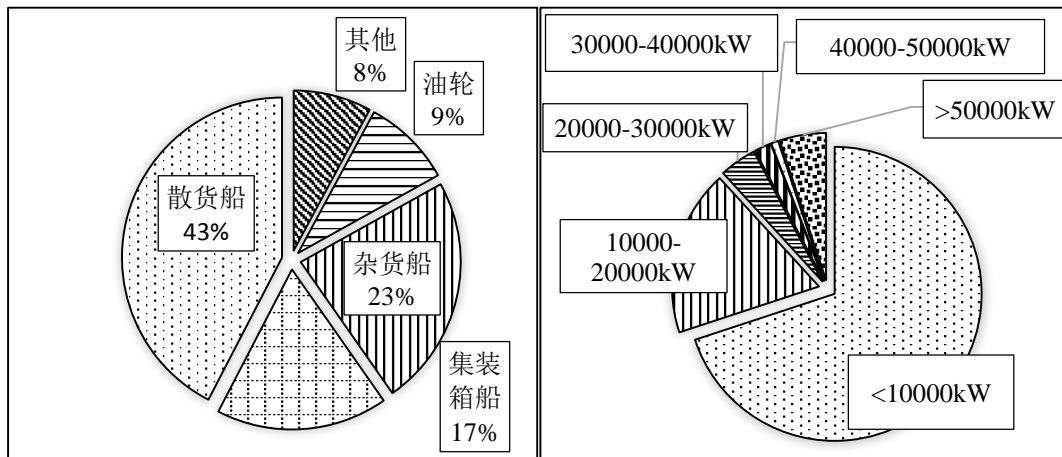


图 5.1 唐山港口船舶类型及功率分布

唐山港口的计算区域为东经 $118.5^{\circ} \sim 119.5^{\circ}$ 北纬 $38.5^{\circ} \sim 39.7^{\circ}$ 。将途经该区

域的船舶分为散货船、集装箱船、油轮和其他 4 类。客货船（6 艘）、滚装船（1 艘）、冷藏船（2 艘）也不再一一列出，均放入其他类型中。计算中涉及的船舶一共有 762 艘。图 5.1 为船舶类型分布，其中散货船共有 323 艘，占船舶总数 43%，其次是杂货船和集装箱船，分别为 178 艘和 132 艘，占船舶总数 23% 和 17%。从功率分布来看，功率小于 20000kW 的船舶占船舶总数的 88%，功率大于 30000kW 的船舶占船舶总数的 8%。

5.1.2 结果

表 5-1 列出了唐山港口船舶排放清单。从表中可以看出 2013 年唐山港 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_x 、 SO_x 、CO、HC、 CO_2 的排放量分别分 $0.76 \times 10^4 t$ 、 $0.70 \times 10^4 t$ 、 $11.22 \times 10^4 t$ 、 $7.97 \times 10^4 t$ 、 $0.87 \times 10^4 t$ 、 $0.36 \times 10^4 t$ 、 $462.95 \times 10^4 t$ 。

表 5.1 唐山港口 2013 年船舶污染物排放清单 (t)

船舶类型	PM_{10}	$PM_{2.5}$	NO_x	SO_x	CO	HC	CO_2
散货船	3136	2872	47339	32791	3650	1512	1893887
集装箱船	2496	2284	38368	25810	3009	1259	1497366
油轮	606	552	7921	6758	615	260	392914
杂货船	771	707	10501	8115	815	347	472481
其他	590	540	8087	6269	625	262	362895
总计	7598	6956	112216	79743	8713	3640	4619543

从计算结果来看，散货船排放的污染物贡献率最高，各类污染物的贡献率均在 41% 左右，其次是集装箱船舶，其各类污染物的贡献率在 33% 左右，杂货船的污染物贡献率只有 10%。

图 5.2 为船舶航行状态污染物分担率，从图中可以看出，唐山港的航行状态分担率与天津港大不相同，巡航状态为船舶排放最大工况，其分担率在 65% 左右。其次是减速区航行状态，其排放分担率为 26% 左右。机动操纵和停泊两种状态的分担率之和不到 10%。

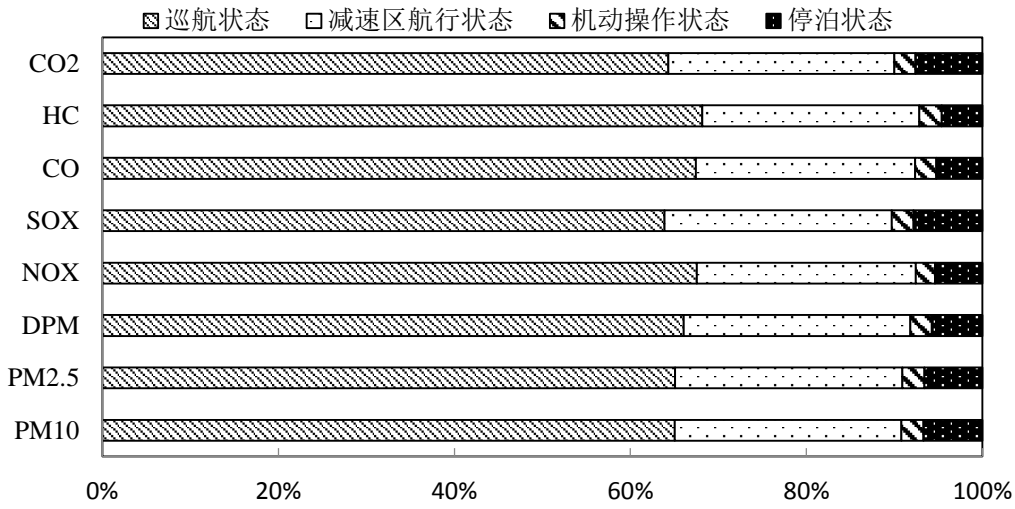


图 5.2 唐山港口船舶航行状态对污染物的分担率

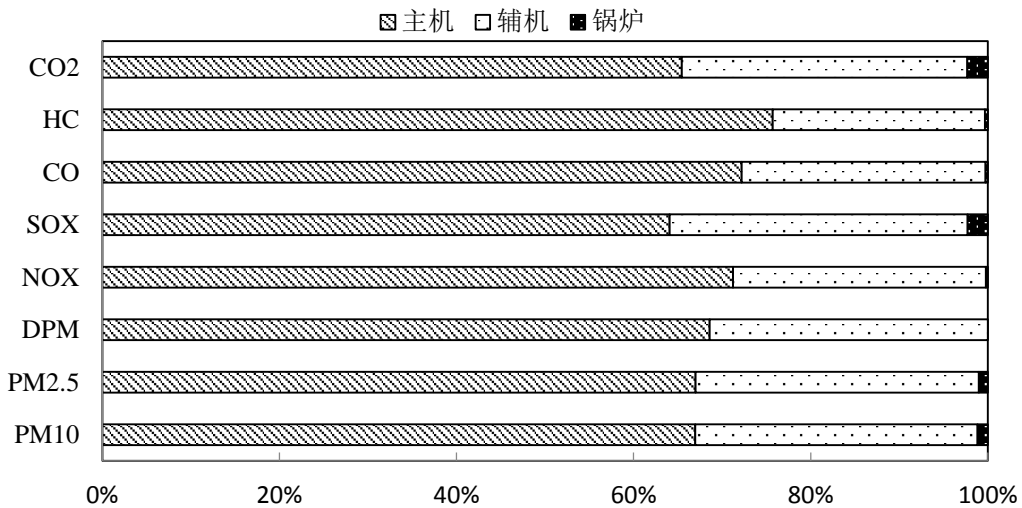


图 5.3 唐山港船舶机型对污染物的分担率

从排放机型来看，如图 5.所示，唐山港和天津港依然存在很大差异，唐山港的主机排放分担率在 70%左右，成为船舶排放的主要机型。其次是辅机，其分担率在 28%左右，而锅炉的去染污排放却微乎其微。

5.2 秦皇岛港

5.2.1 计算区域

秦皇岛地处渤海之滨，是我国北方著名的天然不冻港，是我国北煤南运大通道

的主枢纽港，是我国煤炭装船泊位最多的港口。2012年，全港完成货物吞吐量2.71亿吨，同比减速5.8%。其中煤炭完成2.38亿吨，集装箱完成34.4万TEU，其他散货完成2338万吨。

秦皇岛的计算区域为东经 $119^{\circ} \sim 120.5^{\circ}$ 北纬 $39^{\circ} \sim 40.2^{\circ}$ 。图5.4是秦皇岛港船舶类型分布，计算中涉及船舶共518艘，其中散货船300艘，占船舶总数的58%，其次是杂货船110艘，占船舶总数的21%。从功率分布来看，功率小于20000kW的船舶占船舶总数的98%，没有功率大于30000kW的船舶。

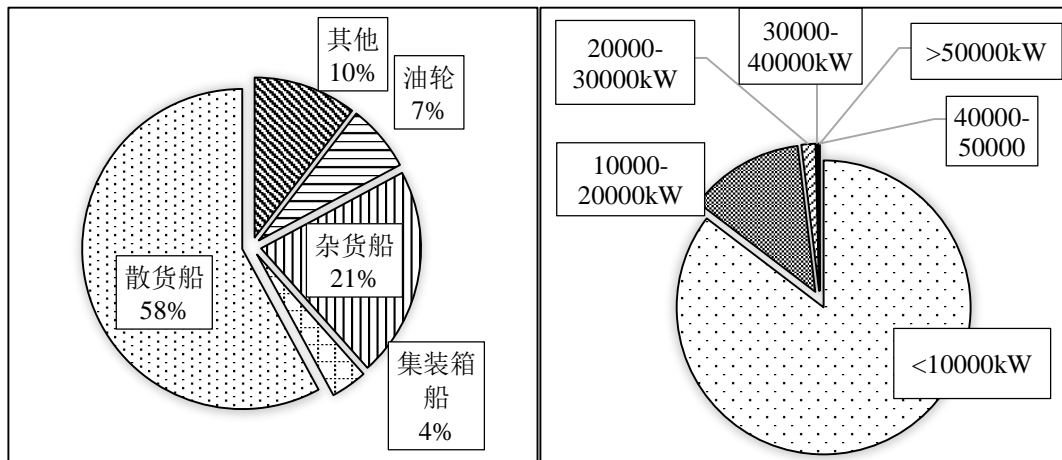


图 5.4 秦皇岛港船舶类型及功率分布

5.2.2 结果

表5.列出了秦皇岛港口船舶排放清单。从表中可以看出2013年秦皇岛港口 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_x 、 SO_x 、 CO 、 HC 、 CO_2 的排放量分别分 $0.060 \times 10^4 t$ 、 $0.55 \times 10^4 t$ 、 $8.63 \times 10^4 t$ 、 $6.44 \times 10^4 t$ 、 $0.67 \times 10^4 t$ 、 $0.28 \times 10^4 t$ 、 $372.70 \times 10^4 t$ 。

表 5.2 秦皇岛港 2013 年船舶污染物排放清单 (t)

船舶类型	PM_{10}	$PM_{2.5}$	NO_x	SO_x	CO	HC	CO_2
散货船	4016	3679	59143	41999	4592	1921	2428284
集装箱船	429	393	6113	4536	486	202	261007
油轮	724	655	9782	8381	753	308	482593
杂货船	485	445	6328	5179	492	210	300305
其他	390	357	4903	4258	379	158	244780
总计	6044	5528	86269	64352	6703	2798	3716969

从计算结果来看，散货船排放的污染物贡献率最高，各类污染物的贡献率均在66%左右，其次是油轮，其各类污染物的贡献率在12%左右。

图5.中为船舶不同航行状态污染物分担率示意图，从图中可以看出，秦皇岛港口的航行状态分担率与唐山港比较相似，巡航状态为船舶排放最大工况，占船舶总排放的57%左右。其次是减速区航行状态，其排放分担率为22%左右。与唐山港不同的是，秦皇岛港的停泊状态虽然不大，其分担率也到了11%左右。

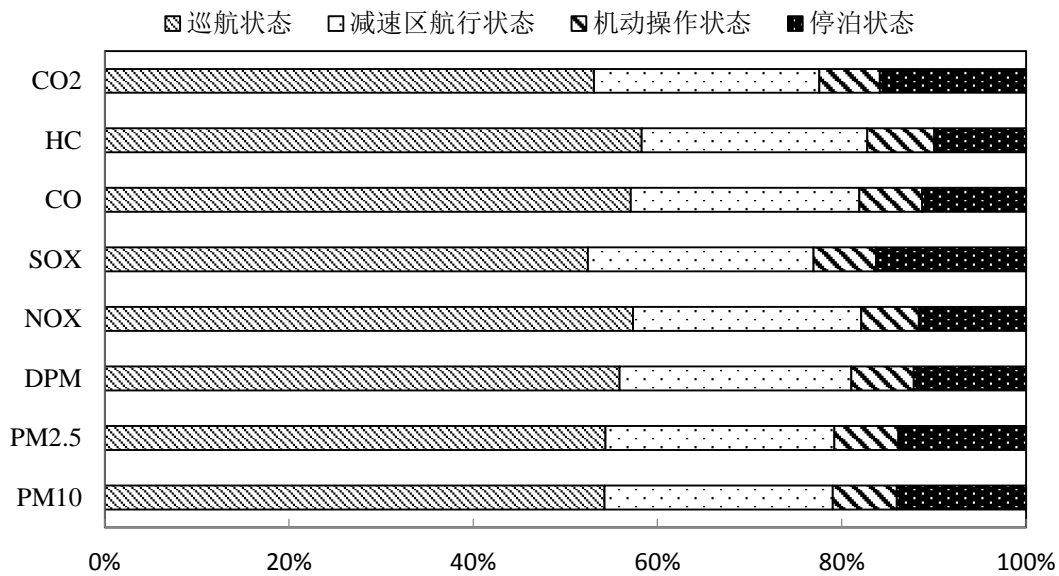


图 5.5 秦皇岛港船舶航行状态对污染物的分担率

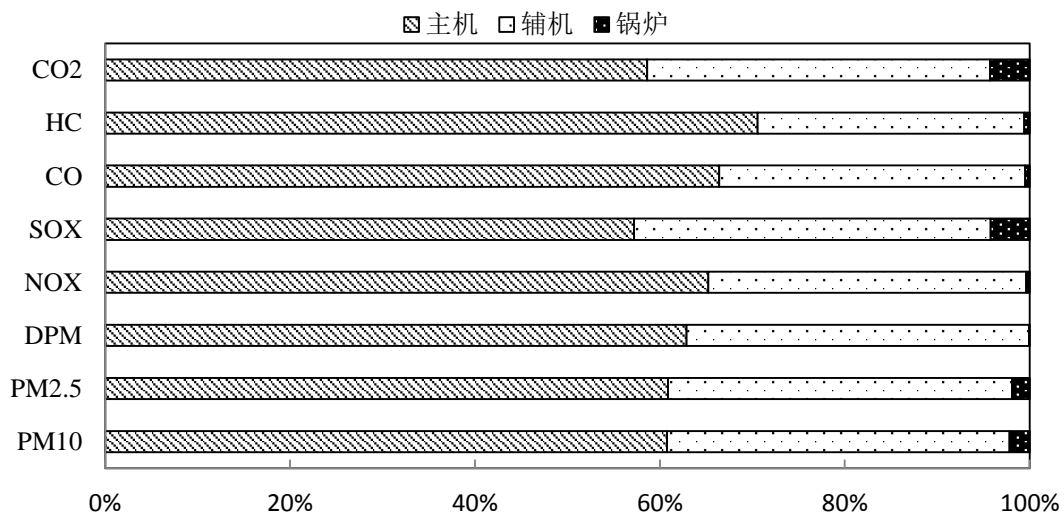


图 5.6 秦皇岛港船舶机型对污染物的分担率

从污染物排放机型来看，如图 5.所示，主机也是最重要的排放机型，其分担率在 62%左右，辅机是第二大排放源，其分担率在 33%左右，锅炉排放最少。

5.3 黄骅港

5.3.1 计算区域

黄骅港是山西地区运距最短的出港口，现已建成 20 万吨级航道和万吨级以上泊位 25 个，吞吐量连续三年突破亿吨。2012 年，黄骅全年完成货物吞吐量 12630 万吨，集装箱吞吐量 10.2 万 TEU；其中，煤炭完成吞吐量 10436 万吨，矿石完成货物吞吐量 1796 万吨。

黄骅港的计算区域为东经 $117.5^{\circ} \sim 118.5^{\circ}$ ，北纬 $38.1^{\circ} \sim 38.75^{\circ}$ 。图 5.是

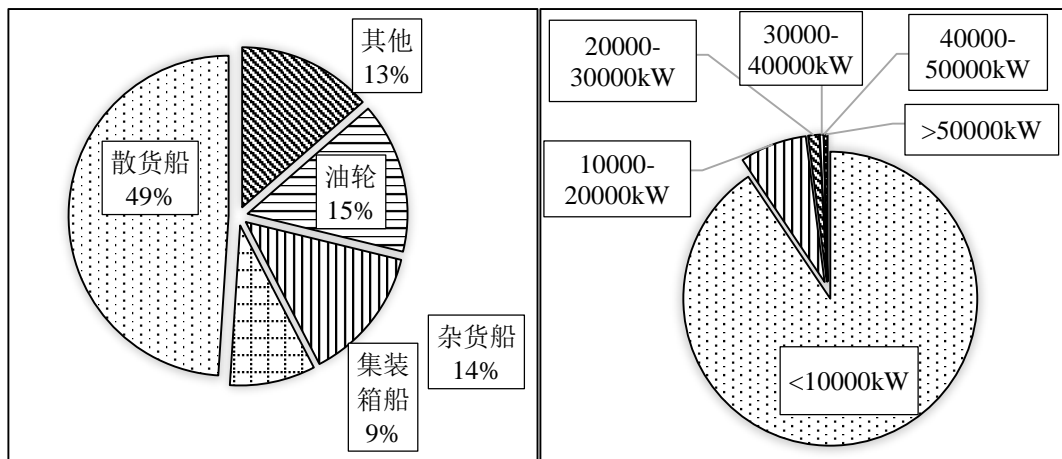


图 5.7 黄骅港船舶类型及功率分布

黄骅港口船舶类型分布，计算中的船舶共 243 艘，与秦皇岛港类似，散货船 119 艘，占了船舶总数的 49%，这与黄骅港和秦皇岛港是主要煤港口有关。其他类型船舶都是 30 艘左右。从功率分布来看，功率小于 20000kW 的船舶占船舶总数的 98%，功率大于 30000kW 的船舶只有 1 艘。

5.3.2 结果

表 5.列出了黄骅港口船舶排放清单。从表中可以看出 2013 年黄骅港口 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_x 、 SO_x 、CO、HC、 CO_2 的排放量分别分 $0.25 \times 10^4 t$ 、 $0.23 \times 10^4 t$ 、 $3.46 \times 10^4 t$ 、 $2.63 \times 10^4 t$ 、 $0.27 \times 10^4 t$ 、 $0.11 \times 10^4 t$ 、 $152.60 \times 10^4 t$ 。

表 5.3 黄骅港 2013 年船舶污染物排放清单 (t)

船舶类型	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO _x	CO	HC	CO ₂
散货船	1363	1249	19811	14307	1530	638	827603
集装箱船	461	423	5988	4858	467	203	284417
油轮	317	290	4005	3450	311	133	201062
杂货船	79	72	1120	842	86	36	48572
其他	268	245	3640	2852	283	120	164328
总计	2488	2280	34562	26310	2678	1130	1525983

从计算结果来看，散货船排放的污染物贡献率最高，各类污染物的贡献率均在 55% 左右，杂货船排放的污染物贡献率最低，仅有 3%，其他船舶类型排放污染物贡献率相差无几，在 14% 左右。

船舶不同航行状态污染物分担率不同，从图 5. 中可以看出，巡航状态为船舶排放最大工况，占船舶总排放的 50% 左右。其次是减速区航行状态，其排放分担率为 33% 左右。机动操纵和停泊良好总状态的分担率在 17% 左右。

从排放机型来看，如图 5. 所示，主机是主要污染物排放机型，其污染物排放分担率在 67% 左右，其次是辅机排放，其分担率在 31% 左右。

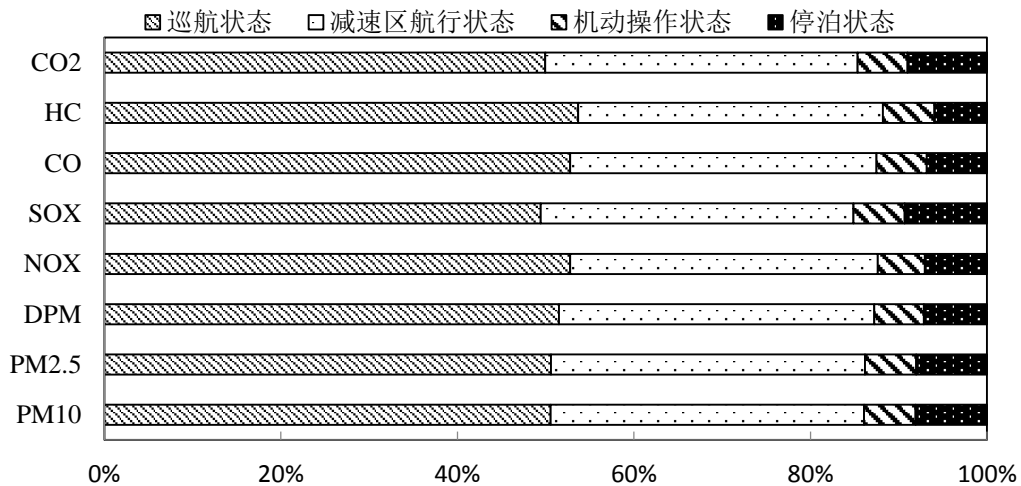


图 5.8 黄骅港船舶航行状态对污染物的分担率

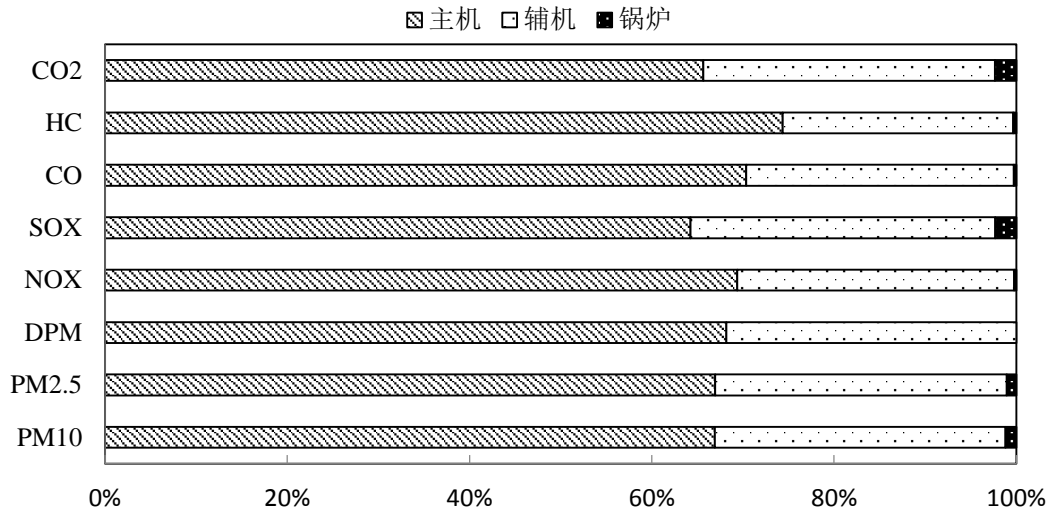


图 5.9 黄骅港船舶机型对污染物的分担率

5.4 渤海湾结果分析

5.4.1 结果分析

5.1-5.3 节给出了各个港口的基本计算区域和排放清单计算结果，四个港口的主要船舶类型均为散货船、集装箱船和杂货船；从船舶功率分布，天津港和唐山港的大型船舶更多，功率大于 30000kW 的船舶分别占船舶总数的 10% 和 8%。

从排放结果来看，集装箱船和散货船是污染物排放主要船舶类型，这与集装箱船和散货船的数目有关。但是集装箱船舶是一种污染物排放较多的船舶，相同的船舶数目其污染物排放会更多，另外杂货船是一种污染物排放较少的船舶，虽然每个港口杂货船均是主要船舶类型，但其污染物贡献率均小于 10%。这是因为一般集装箱船舶功率较大，杂货船功率较小的缘故。

从船舶航行状态来看，港口污染物排放最多的状态是巡航状态，其次是减速区航行状态，机动操纵和停泊是排放较少的航行状态。航行状态污染物分担率首先会受到计算区域的影响，当计算范围增大时，巡航的计算时间就会加长，巡航状态下的污染物排放分担率自然会上升。其次，航行状态的分担率还与港口的规模和港口进出的船舶类型有关。当港口的油轮和集装箱船较多且功率较大，在港口停留时间比一些小型船舶会更长，导致港口停泊状态下污染物排放分担率上升，因此，对于一些停靠远洋船舶，且船舶停泊时间较长的港口，泊岸时使用岸电比一些小型港

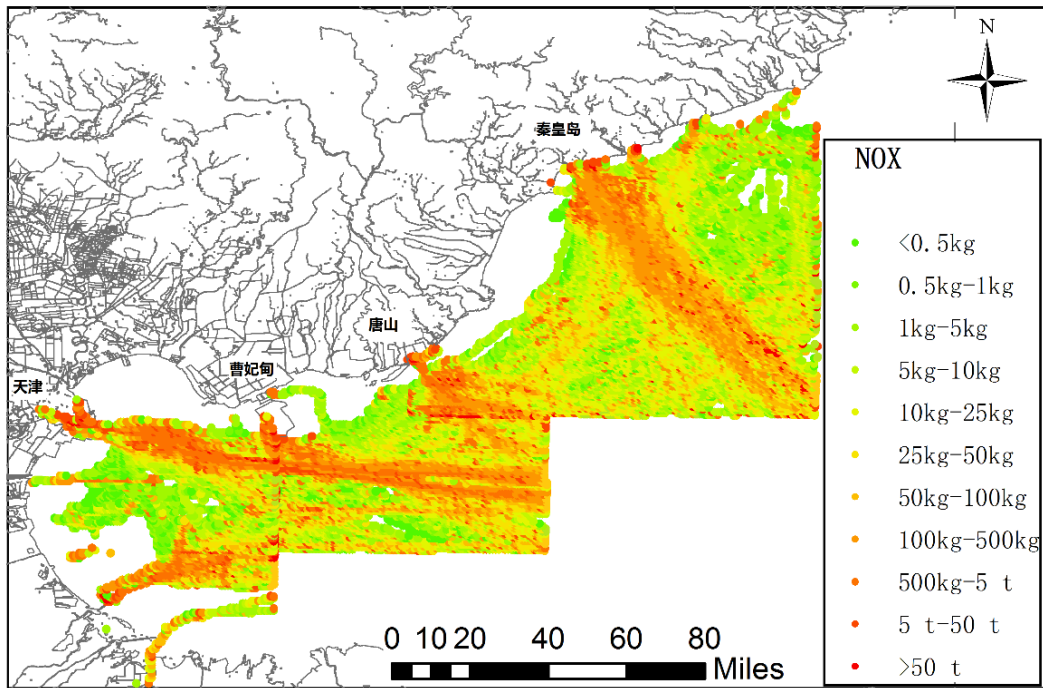
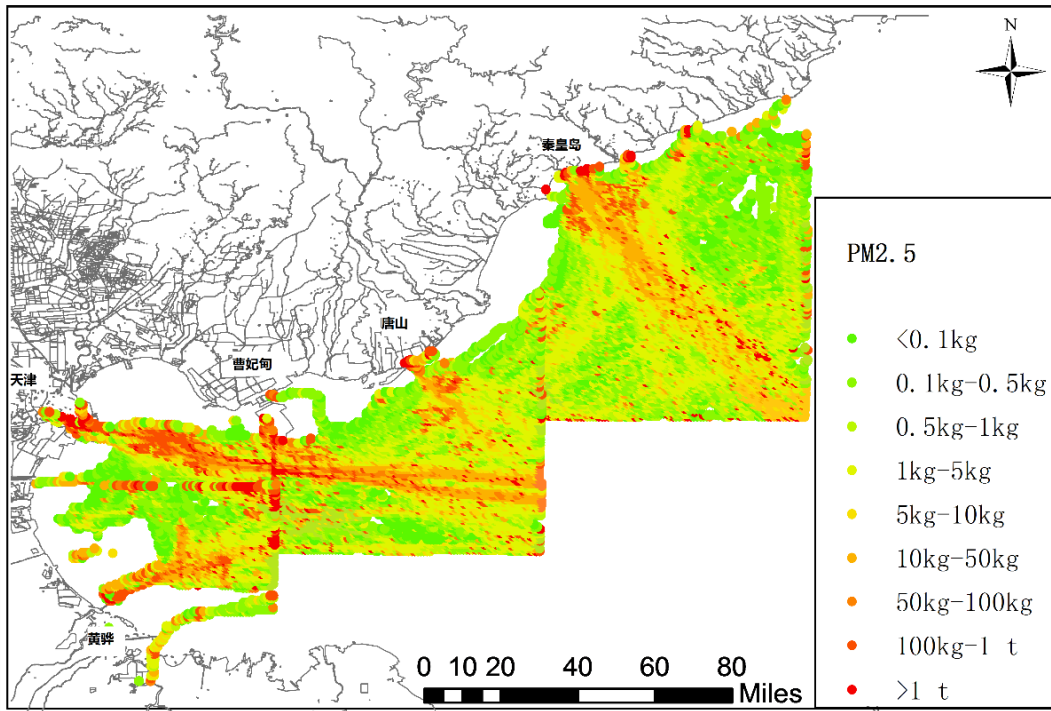
口更有必要。

从船舶排放的机型来看，主机是最主要排放机型，其次是辅机排放。由 4.3 节中介绍的船舶辅机的计算方法可知，船舶在停泊状态时主机关闭，此时辅机功率最高，因此高的停泊状态分担率同时导致了口的辅机分担率高。进一步说明，靠岸时使用岸电的必要性。

因此对于不同的港口，根据港口规模和港口特点，应使用不同的管制措施，以获得最大的性价比。像天津这样规模的港口，靠港船舶使用岸电是首要选择。而对于秦皇岛、唐山和黄骅等港口，其主要污染物排放状态为巡航状态，划分排放控制区，船舶驶入该区域转换为低硫油，或者划分减速区，船舶驶入减速区地带减速航行也可显著降低污染物的排放。

5.4.2 渤海湾地区空间分布

为了更加直观的看出污染物在空间上的分布，这一节中将船舶的污染物排放按其行驶路径分布，设置的网格精度为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。图 5.110 给出了渤海湾船舶排放污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 、 SO_x 的空间分布状况，从图中可以看出，船舶主要航行路径和港口的排放密度较大，这是比较容易接受的，然而，从图中还可以看出，港口区域的排放情况也航道更严重，距离港口 15 海里范围内，是排放最密集的区域。这是因为船舶进入港口停靠时的排放。因此，建议在港口 15 海里范围划分为减速区，限制船舶进入港区的速度，以减少船舶排放。在港口建立排放控制区，船舶驶入控制区时改用硫含量为 0.5% 的燃油，通过控制船用燃料的硫含量限制颗粒物，硫氧化物的排放。



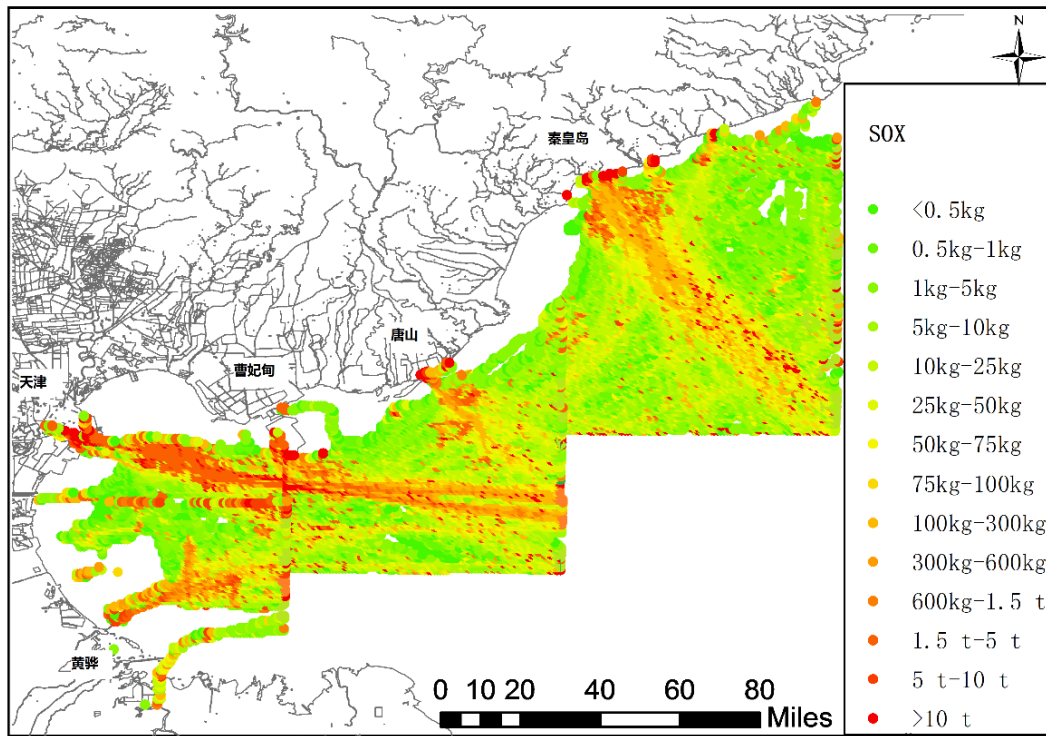


图 5.1 渤海湾船舶排放污染物空间分布

5.5本章小结

本章主要利用船舶 AIS 数据，采用动力法对渤海湾三个港口的排放清单进行了计算。根据计算结果，分析了各个港口主要排放船舶类型、主要排放机型及主要排放状态。针对分析结果，给出了控制港口排放的建议：对于远洋港口，靠港船舶使用岸电是首要选择；而秦皇岛、唐山和黄骅等港口，其主要污染物排放状态为巡航状态，划分排放控制区，船舶驶入该区域转换为低硫油，或者划分减速区，船舶驶入减速区地带减速航行可显著降低污染物的排放。

结论

报告的主要内容及结论

本报告利用车载排放测试系统（PEMS）在国内开展了内河船舶在实际工作状态下的排放特性研究，基于实验研究获得了各种内河船舶在典型工况下的排放速率及排放因子，并利用该排放因子对国内内河船舶的排放清单进行了计算。同时，利用船舶自动识别系统（AIS）采集到的船舶实时运行数据，对渤海湾的天津港、唐山港、秦皇岛港和黄骅港的排放清单进行了计算，并利用 ARCGIS 软件做出了船舶排放污染物在的空间分布图。报告的主要研究内容及结论如下：

（1）利用 PEMS 对 31 艘内河船舶进行排放测试研究，获得客船、货船、集装箱船、渔船等在典型工况下的排放因子。工况对污染物排放影响较大，船舶在进出港时频繁变化功率，使污染物瞬时排放产生波动，使得 CO、HC、PM 在进出港时排放因子均大于巡航工况。而 NO_x 进出港工况与巡航工况排放因子相差不大。

（2）利用本报告中的实验数据计算了 2011 年内河船舶污染物排放清单。2011 年内河船舶排放 NO_x、HC、CO、PM 分别为 $52.7 \times 10^4\text{t}$ 、 $3.3 \times 10^4\text{t}$ 、 $31.5 \times 10^4\text{t}$ 、 $4.5 \times 10^4\text{t}$ 。

（3）国内首次利用 AIS 数据，对渤海湾 2013 年部分港口的排放清单进行计算：

天津港 PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x、SO_x、CO、HC、CO₂ 的排放量分别分 $0.54 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.49 \times 10^4\text{t}$ 、 $7.27 \times 10^4\text{t}$ 、 $6.05 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.57 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.24 \times 10^4\text{t}$ 、 $347.11 \times 10^4\text{t}$ ；

唐山港 PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x、SO_x、CO、HC、CO₂ 的排放量分别分 $0.76 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.70 \times 10^4\text{t}$ 、 $11.22 \times 10^4\text{t}$ 、 $7.97 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.87 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.36 \times 10^4\text{t}$ 、 $462.95 \times 10^4\text{t}$ ；

秦皇岛港口 PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x、SO_x、CO、HC、CO₂ 的排放量分别分 $0.060 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.55 \times 10^4\text{t}$ 、 $8.63 \times 10^4\text{t}$ 、 $6.44 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.67 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.28 \times 10^4\text{t}$ 、 $372.70 \times 10^4\text{t}$ ；

黄骅港口 PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x、SO_x、CO、HC、CO₂ 的排放量分别分 $0.25 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.23 \times 10^4\text{t}$ 、 $3.46 \times 10^4\text{t}$ 、 $2.63 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.27 \times 10^4\text{t}$ 、 $0.11 \times 10^4\text{t}$ 、 $152.60 \times 10^4\text{t}$ 。

（4）从船舶污染物的空间分布图来看，船舶越靠近港口，其排放密度越大，距离港口 15 海里范围内，是排放最密集的区域。

（5）根据港口规模和港口特点选择不同的管制措施，天津港应首选靠岸使用岸电，秦皇岛港、唐山港和黄骅港应将设置船舶减速区和排放控制区作为减排首要选

择措施。

下一步工作展望

(1) 由于时间和人员有限,本报告对部分类型船舶测试数据较少,如拖船和油轮只有 1 艘船舶实验数据,集装箱船舶也只有 4 艘船舶实验数据。今后应该对做船舶污染物测试实验。

(2) 计算船舶排放清单时,排放因子的选择是非常重要的,而国际上关于船舶排放因子的数据很缺乏,尤其是远洋船舶等大型船舶,在计算这些船舶的排放清单时只能利用文献中查到的排放因子进行计算。国内应该建立起适合国情的排放因子。

(3) 燃油是选择排放因子的重要依据,国内关于船舶使用燃油品质的数据较少,日后应该多做这方面的调研。

(4) 由于时间限制,本报告计算了渤海湾四个港口的排放清单,下一步工作可以运用此方法计算全国港口排放清单。

参考文献

- [1] 李静,梁嘉琳.船舶排放成大气污染防治盲点[N].经济参考报,2013-07-08.
- [2] 周松,肖友洪,朱元清.内燃机排放与污染控制[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010:179.
- [3] 交通部. 2012 年国内沿海货运船舶运力情况分析报告[N]. 2013,02.
- [4] 李玉刚,向梁山,罗马吉,等. 非道路用柴油机排放控制现状与发展趋势研究[J]. 中国水运(下半月), 2010,(04): 90-91.
- [5] 董红义,帅石金,李儒龙,土建昕. 柴油机排气后处理技术最新进展与发展趋势[J]. 小型内燃机与摩托车,2007(6):87-91.
- [6] 赵荣荣.装有颗粒捕集器的柴油机的排放特性研究[D]:北京理工大学, 2011.
- [7] 叶慧海,许允,肖宗成.柴油车排气后处理器的研究[J].环境科学研究,2001, 14(4): 54-56.
- [8] 王天友, Eric L im Khim Song,林漫群,等.燃油催化微粒捕集器微粒捕集与强制再生特性的研究[J].内燃机学报,2007,25 (6) : 527-531.
- [9] 王小臣.柴油机排放颗粒物的理化特性研究[D].北京理工大学, 2009.
- [10] 陆小明.生物柴油发动机燃烧过程与 PAHs 排放特性研究[D].北京:北京理工大学,2006.
- [11] 刘杰. 柴油机氮氧化物排放的测量与计算方法研究[D]. 大连海事大学, 2006.
- [12] 李艳丽. 废气再循环增压中冷柴油机氮氧化物排放的仿真研究[D]. 天津大学, 2009.
- [13] Wang, H., D. Liu, and G. Dai. Review of Maritime Transportation Air Emission Pollution and Policy Analysis [J]. Journal of Ocean University of China, 2009, (3).
- [14] Corbett, J.J., Kohler, H.W., 2003. Updated emissions from ocean shipping [J]. Journal of Geophysical Research 108 (D20), 4650.
- [15] 吴校明.基于 MARPOL73/78 附则 VI 的船用柴油机排放控制研究[D].上海海事大学,2006.
- [16] 吴世雷.ME/MC 型船用柴油机废气排放和燃油消耗分析[D].同济大学机械工程学院,2008.
- [17] 中华人民共和国大气污染防治法 [EB/OL].
http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2005-08/05/content_20945.htm
- [18] GB 20891—2014.非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国III,IV阶段) [S]. 2014-05-16.
- [19] 《船用柴油机排气污染物限值》标准编制组.
- [20] <http://www.okship.com/news/html/Policy/11070.html> [EB/OL].

- [21] Buhaug, O., Corbett, J.J., Endresen, O., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D.S., Lee, D., Lindstad, H., Markowska, A.Z., Mjelde, A., Nelissen, D., Nilsen, J., Palsson, C., Winebrake, J.J., Wu, W.Q., Yoshida, K.. Second IMO GHG Study [R].International Maritime Organization (IMO), London, UK. , 2009.
- [22] Cofala, J., Amann, M., Hezes, C., Wagner, F., Klimont, Z., Posch, M., Schopp, W., Tarasson, L., Eiof Jonson, J., Whall, C, and Stavrakaki, A. Analysis of Policy Measures to Reduce Ship Emissions in the Context of the Revision of the National Emissions Ceilings Directive [R]. Submitted to the European Commission, DG Environment, 2007.
- [23] E.Tzannatos.Ship emissions and externalities for Greece [J]. Atmospheric Environment, 2010 (44):2194-2202.
- [24] Endresen, O., Bakke, J., Sorgard, E., Berglen, T.F., Holmvang, P., 2005. Improved modeling of ship SO₂ emissions fuel-based approach [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(20):3621-3628.
- [25] Olivier, J.G.J., Van Aardenne, J.A., Dentener, F., Pagliari, V., Ganzeveld, L.N., Peters, J.A.H.W. Recent trends in global greenhouse gas missions: regional trends 1970-2000 and spatial distribution of key sources in 2000 [J]. Environmental Sciences, 2005, 2: 81-99.
- [26] Winther, M.New national emission inventory for navigation in Denmark [J].Atmospheric Environment, 2008, 42:4632-4655.
- [27] Kourtidis, K., Zerefos, C.S., Rapsomanikis, S., Simeonov, V., Balis, D., Perros, P.E., Thompson, A.M., Witte, J., Calpini, B., Sharobiem, W.M., Papayannis, A., Mihalopoulos, N., Drakou, R. Regional levels of ozone in the troposphere over eastern Mediterranean [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 8140.
- [28] Psaraftis, H.N., Kontovas, C.A. CO₂ emission Statistics for the world Commercial fleet WMU [J]. Journal of Maritime Affairs, 2009, 8:1-25.
- [29] Eyring, V., Kohler, H.W., Van Aardenne, J., Lauer, A. Emissions from international shipping: 1.The last 50 years [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110:D17305.
- [30] Endresen, O., Sorgard, E., Sunddet, J.K., Dalsoren, S.B., Isaksen, I.S.A., Berglen, T.F., Gravir, G., 2003. Emission from international sea transportation and environmental impact [J]. Journal of Geophysical Research 108 (D17), 4560.

- [31] Schrooten, L., De Vlieger, I., Panis, L.I., Chiffi, C., Pastori, E. Emissions of maritime transport: a European reference system [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 408: 318-323.
- [32] Wahlstrom, J., Karvosenoja, N., Porvari, P., 2006. Ship Emissions and Technical Emission Reduction Potential in the Northern Baltic Sea [J]. Finnish Environment Institute, Helsinki.
- [33] Vestreng, V., Mareckova, K., Kakareka, S., Malchykhina, A., Kukharchyk, T.. Inventory Review 2007: Emission Data reported to LRTAP Convention and NEC Directive, MSCW Technical Report[R].The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway, 2007.
- [34] Concawe. Ship Emissions Inventory Mediterranean Sea [R]. Entec UK Limited, 2007.
- [35] Winther M. New national emission inventory for navigation in Denmark [J].*Atmospheric Environment*, 2008, 42: 4632-4655.
- [36] Schrooten, L., De Vlieger, I., Panis, L.I., Styns, K., Torfs, R. Inventory and forecasting of maritime emissions in the Belgian sea territory, an activity-based emission model [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42:667-676.
- [37] Tzannatos, E. Ship emissions and their externalities for the port of Piraeuse Greece [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44: 400-407.
- [38] De Meyer, P., Maes, F., Volckaer, A. Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaports [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42, 196-206.
- [39] Deniz, C., Durmusoglu, Y. Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey. *The Science of the Total Environment*, 2008,390: 255-261.
- [40] Saxe, H., Larsen, T. Air pollution from ships in three Danish ports [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 4057-4067.
- [41] Isakson, J., Persson, T.A., Lindgren, E.S. Identification and assessment of ship emissions and their effects in the harbour of Goteborg, Sweden [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35, 3659-3666.
- [42] Kesgin, U., Vardar, N. A study on exhaust gas emissions from ships in Turkish Straits [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35, 1863-1870.
- [43] Trozzi, C., Vaccaro, R., Nicolo, L. Air pollutants emissions estimate from maritime traffic in the Italian harbours of Venice and Piombino [J]. *The Science of the Total Environment*, 1995, 169: 257-263.

- [44] Ng Simon. K. W., Loh C., Lin C., et al. Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta [J]. Atmospheric Environment, 2013, 76:102-112.
- [45] Jalkanen J.P., Brink A., Kalli J., et al. A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(23): 9209-9023.
- [46] 金陶胜,殷小鸽,许嘉,等.天津港运输船舶大气污染物排放清单 [J].海洋环境科学, 2009, 28(6): 623-625.
- [47] 张礼俊,郑君瑜,尹沙沙,等.珠江三角洲非道路移动源排放清单开发[J]. 环境科学,2010(4): 886-891.
- [48] 李智恒, 何龙. 船舶污染物排放清单估算方法研究[J]. 广西轻工业, 2011(5): 79-80.
- [49] 刘静,王静,宋传真,等.青岛市港口船舶大气污染排放清单的建立及应用[J]. 中国环境监测, 2011,3: 50-53.
- [50] 伏晴艳,陈明华,钱华.上海市空气中 NO_x 的污染现状及分担率[J].上海环境科学,2001, 20(5):224-226.
- [51] Yang D Q, Kwan S H, Lu T, Fu Q Y, Cheng J M, Streets D G, et al. An Emission Inventory of Marine Vessels in Shanghai in 2003 [J]. Environmental Science & Technology 2007; 41: 5183-5190.
- [52] Zhang L Z, Yin S S, Peng K, Zhong L. Development of Non-road Mobile Source Emission Inventory for the Pearl River Delta Region [J]. Environmental Science 2010: 886-891.
- [53] Yao Z, Huo H, Zhang Q, Streets D G, He K. Gaseous and particulate emissions from rural vehicles in China [J]. Atmospheric Environment 2011; 45: 3055-3061.
- [54] 付明亮.北京市柴油机动车辆排放特性研究[D].北京工商大学, 2009.
- [55] 申现宝.农用运输车排放特征研究[D].北京工商大学, 2010.
- [56] 刘双喜,陈杰峰,李孟良,等.ELPI 在重型车车载 PM 测试中的应用研究[J].汽车工程,2007(7):582-585.
- [57] 高继东.城市机动车道路排放因子和排放特性[D].天津大学,2008.
- [58] 王猛,谭建伟,韩秀坤,等.非道路车用柴油机排放颗粒粒径分布特性研究[J].内燃机工程,2010(3):44-47.

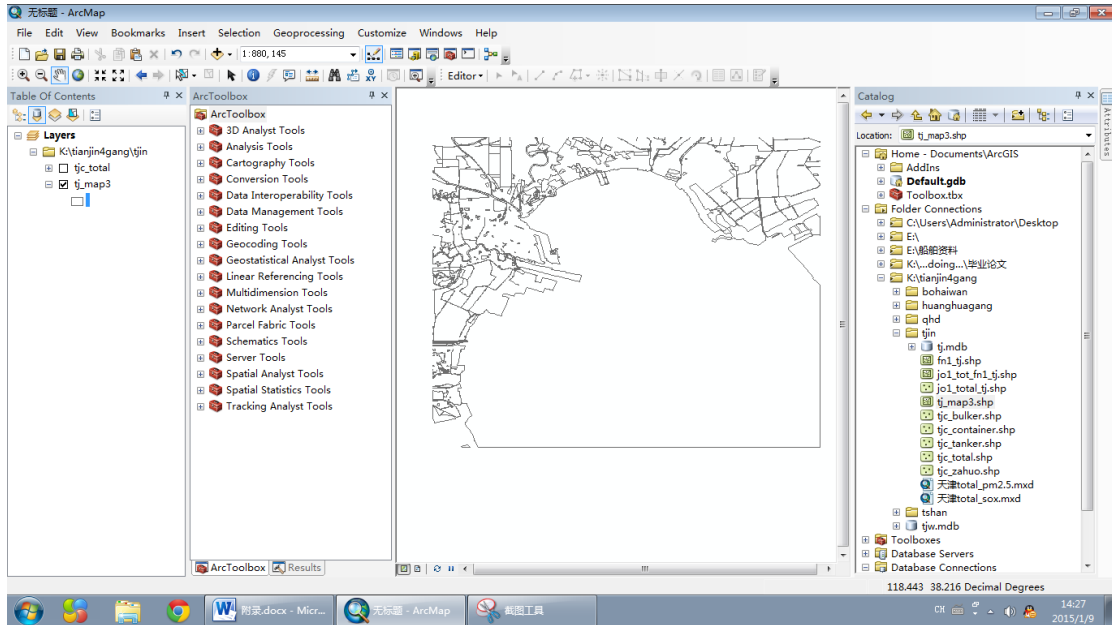
- [59] 陈绍刚.重型柴油车辆排放因子和排放特性[D].武汉理工大学,2009.
- [60] 付张劲,王凤滨,高俊华.电子低压冲击仪的颗粒测试[J].汽车工程师,2009(2):40-45.
- [61] Moldanov áJ, Fridell E, Popovicheva O, et al. Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(16): 2632-2641.
- [62] Sinha P, Hobbs PV, Yokelson RJ, et al. Emissions of trace gases and particles from two ships in the southern Atlantic Ocean[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(15): 2139-2148.
- [63] 国家环保总局机动车排污监控中心. 机动车船用燃料环保对策研究报[N]. 北京: 中国环境标准网, 2005
- [64] 杨柳. 全国及典型港口城市运输船舶大气污染物排放清单研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [65] 清华大学环境科学与工程系. 移动污染源大气环境影响研究报告[R]. 北京: 中国环境标准网,2005.
- [66] 殷小鸽. 非道路移动源燃油品质改善对污染排放影响的成本效益分析[D]. 南开大学,2010.
- [67] Louis Browning , Kathleen Bailey. Current Methodologies and Best Practices for Preparing Port Emission Inventories[EB].
- [68] ARCHANAA, GUISELLEA,ANDERSONB, et al. Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions[R]. LLC, Poulsbo: Starcrest Consulting Group,2012.
- [69] 富贵根,费千.船舶辅机(第4版) [M]. 大连:大连海事大学出版社,2010,68-73.
- [70] 伏晴艳,沈寅,张健.上海港船舶大气污染物排放清单研究[J].安全与环境学报,2012,12(5): 57-64.
- [71] Entec UK Limited, Quantification of Emissions from Ships Associated with Ship Movements between Ports in the European Community[EB]. 2002.
- [72] Memo from Chris Lindhjem of ENVIRON, PM Emission Factors[EB]. 2005.
- [73] U.S. EPA. Recommended revision of the fraction of diesel particulate emissions mass less than 2.5 microns in size, memo to the docket from Bruce Cantrell [EB]. 2003.
- [74] IVL. Methodology for Calculating Emissions from Ships: Update on Emission Factors[EB]. 2004.
- [75] EPA. Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data[EB]. 2000.
- [76] EPA. Commercial Marine Inventory Development[EB]. 2002.

[77] 徐万毅.油品对船用高速柴油机排放的影响[J]. 航海工程, 2008, 37(4): 25-27.

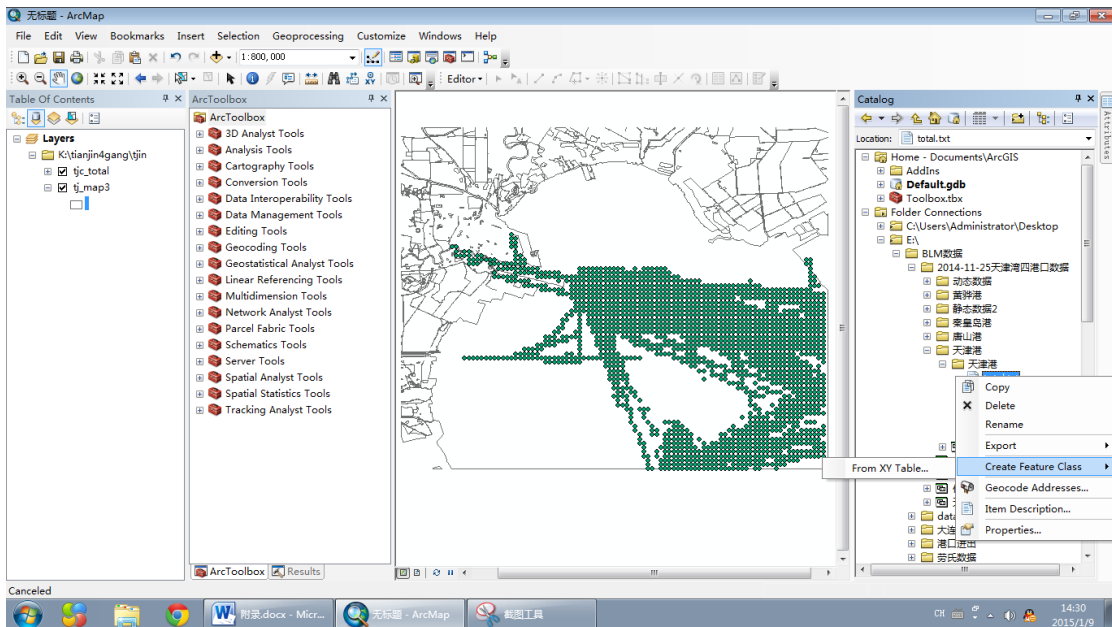
[78] 李源. MAN 低速航行调查[J]. 中国船检, 2012 (9): 58-59.

附录:ARCGIS 操作方法

1) 首先选择底图



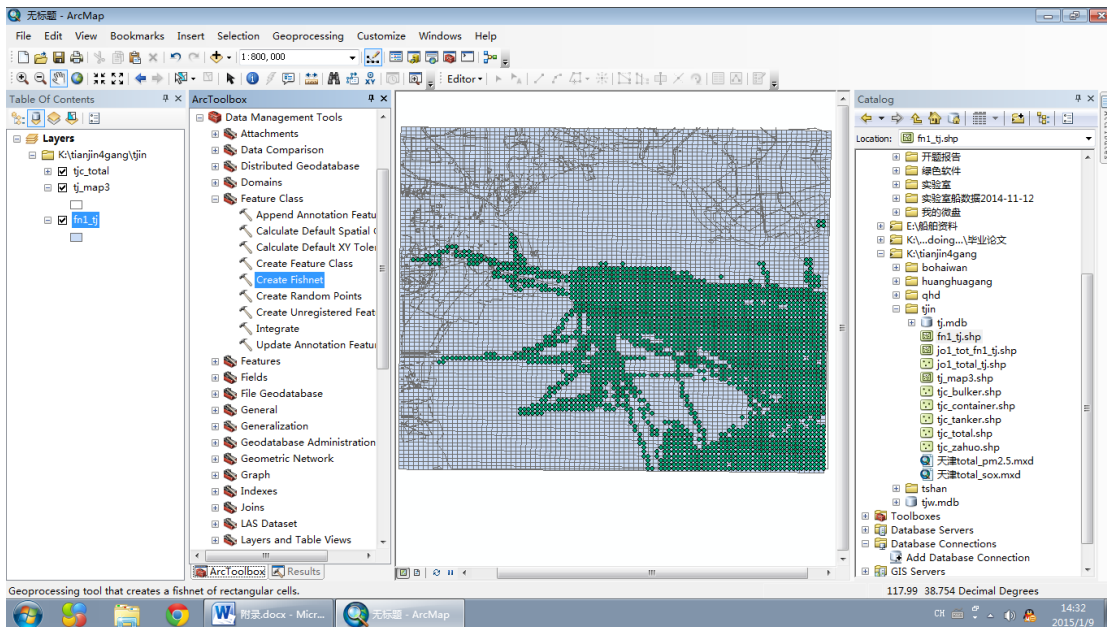
2) 将计算结果作为点要素导入 ARCGIS



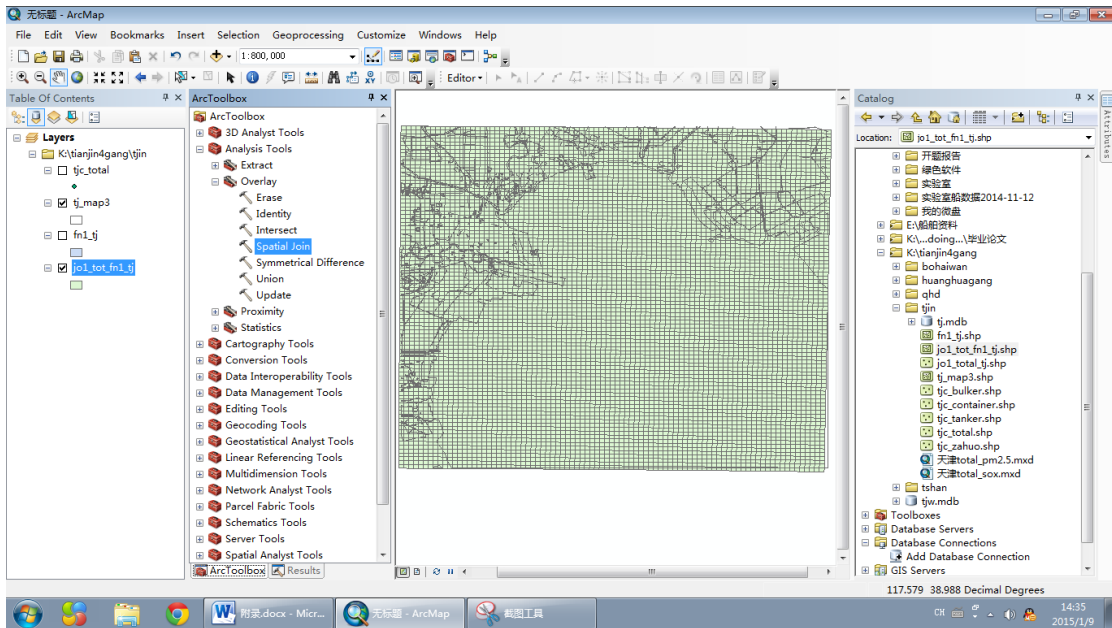
3) 为点的属性表，污染物排放量为点的属性

FID	Shape *	JING	WEI	PM10	PM2_5	DPM	NOX	SOX	CO	HC	CO2	N2O	CH4
0	Point	118.46	38.83	42.334	38.751	59.71	690.06	434.08	53.043	22.093	25244	1.234	.441860
1	Point	118.45	38.84	465.67	426.27	656.81	7590.6	4774.9	583.47	243.03	0	13.574	4.8605
2	Point	118.45	38.84	84.668	77.503	119.42	1380.1	868.17	106.09	44.186	50488	2.468	.883730
3	Point	118.44	38.84	169.34	155.01	238.84	2760.2	1736.3	212.17	88.373	0	4.936	1.7675
4	Point	118.43	38.84	317.5	290.64	447.82	5175.4	3255.6	397.82	165.7	0	9.255	3.314
5	Point	118.42	38.84	150.96	138.18	212.97	2463.3	1547.2	189.37	78.919	90000	4.4013	1.5784
6	Point	118.42	38.84	88.418	80.933	124.74	1442.8	906.2	110.92	46.224	52715	2.5779	.924480
7	Point	118.42	38.84	107.83	98.699	152.12	1759.5	1105.1	135.26	56.371	64286	3.1438	1.1274
8	Point	118.42	38.84	21.565	19.74	30.424	351.89	221.02	27.053	11.274	12857	.628760	.225480
9	Point	118.41	38.84	40.974	37.506	57.805	668.6	419.95	51.4	21.421	24429	1.1946	.428420
10	Point	118.41	38.84	86.261	78.959	121.7	1407.6	884.1	108.21	45.097	51429	2.515	.901940
11	Point	118.41	38.84	40.974	37.506	57.805	668.6	419.95	51.4	21.421	24429	1.1946	.428420
12	Point	118.4	38.84	419.63	384.1	592.14	6854.4	4298.9	527.01	219.75	0	12.238	4.3951
13	Point	118.39	38.84	114.14	104.48	161.11	1866.4	1168.8	143.52	59.877	68029	3.3295	1.1975
14	Point	118.39	38.84	19.773	18.099	27.902	322.98	202.57	24.833	10.355	11787	.576640	.207100
15	Point	118.39	38.84	114.14	104.48	161.11	1866.4	1168.8	143.52	59.877	68029	3.3295	1.1975
16	Point	118.38	38.84	154.43	141.35	217.97	2525.1	1581.4	194.17	81.01	92040	4.5047	1.6202
17	Point	118.38	38.84	22.381	20.486	31.59	365.96	229.19	28.141	11.741	13339	.652850	.234810
18	Point	118.38	38.84	183.53	167.98	259.04	3000.9	1879.3	230.75	96.272	0	5.3534	1.9254
19	Point	118.36	38.85	542.62	496.66	766.04	8881.3	5554.1	683.01	285.11	0	15.832	5.7022
20	Point	118.32	38.85	1100.8	1008.2	1543.3	17462	11418	1338.1	549.07	0	31.895	10.981
21	Point	118.32	38.85	65.426	59.924	91.698	1036.4	679	79.399	32.555	39201	1.8951	.651110
22	Point	118.32	38.85	68.801	63.017	96.398	1088.3	714.46	83.359	34.151	41233	1.9922	.683020
23	Point	118.3	38.85	537.88	492.74	752.37	8442.9	5603.2	646.12	263.55	0	15.549	5.271
24	Point	118.3	38.85	14.316	13.115	20.025	224.72	149.13	17.197	7.0147	0	.41385	.14029
25	Point	118.3	38.85	18.407	16.862	25.747	288.92	191.74	22.111	9.0189	11045	.532100	.180380
26	Point	118.29	38.85	333.07	305.15	465.39	5202.4	3476.6	397.89	161.84	0	9.6181	3.2368
27	Point	118.29	38.85	58.433	53.534	81.648	912.7	609.93	69.806	28.393	35092	1.6874	.567860
28	Point	118.29	38.85	21.426	19.629	29.938	334.66	223.64	25.595	10.411	12867	.618710	.208220
29	Point	118.29	38.85	17.53	16.06	24.494	273.81	182.98	20.942	8.5179	10527	.50622	.170360

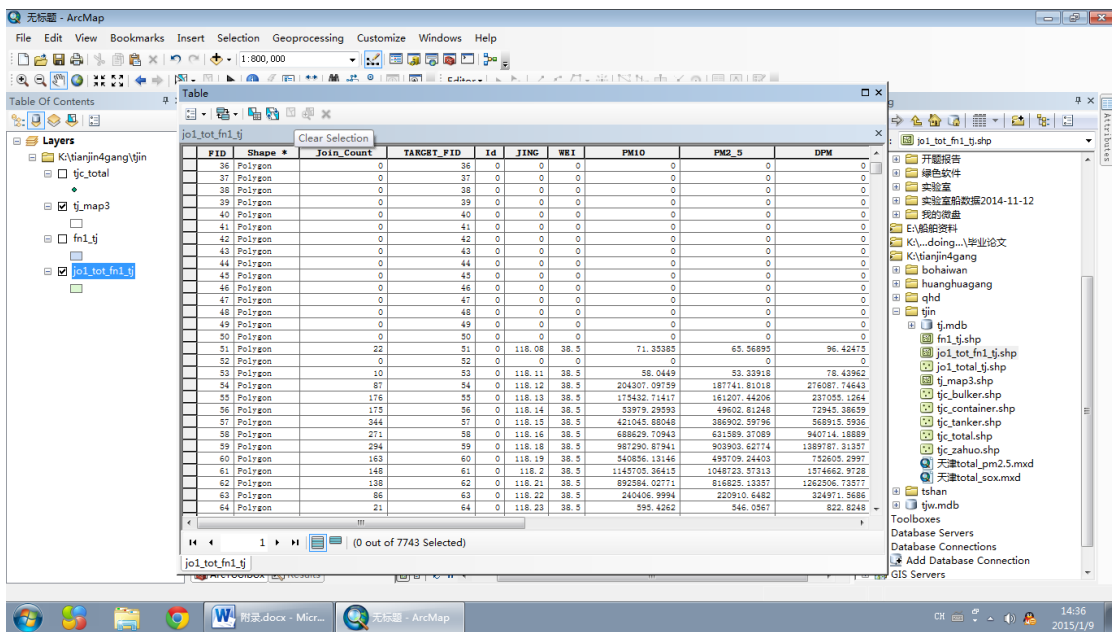
4) 将底图划分为 1km×1km 大小的网格



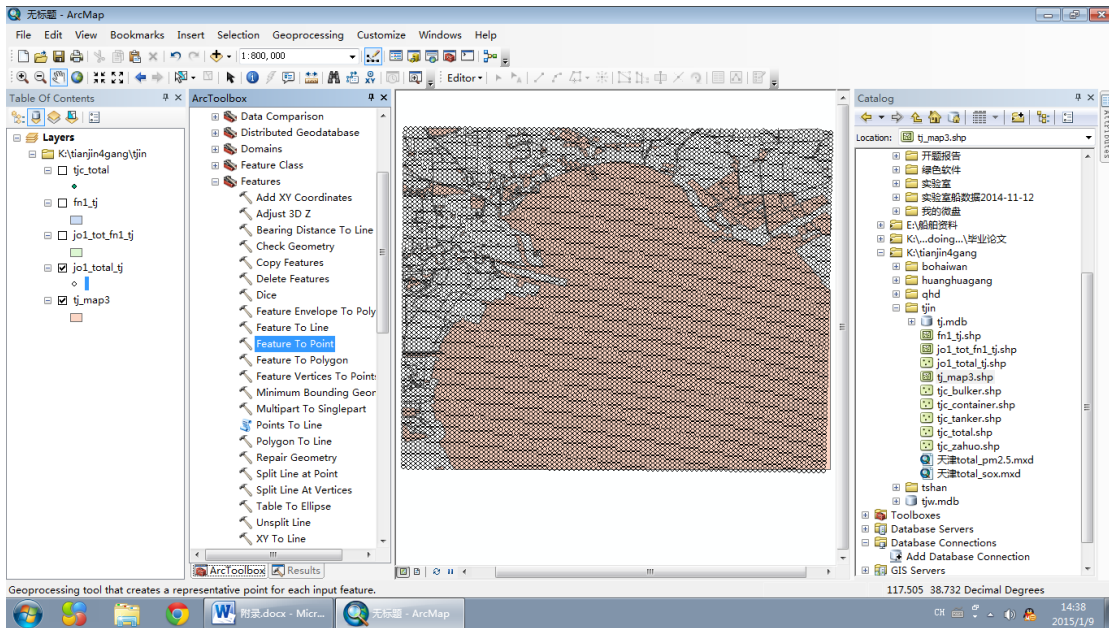
5) 点与网格空间关联, 将点的属性传递给网格, 关联规则为加和



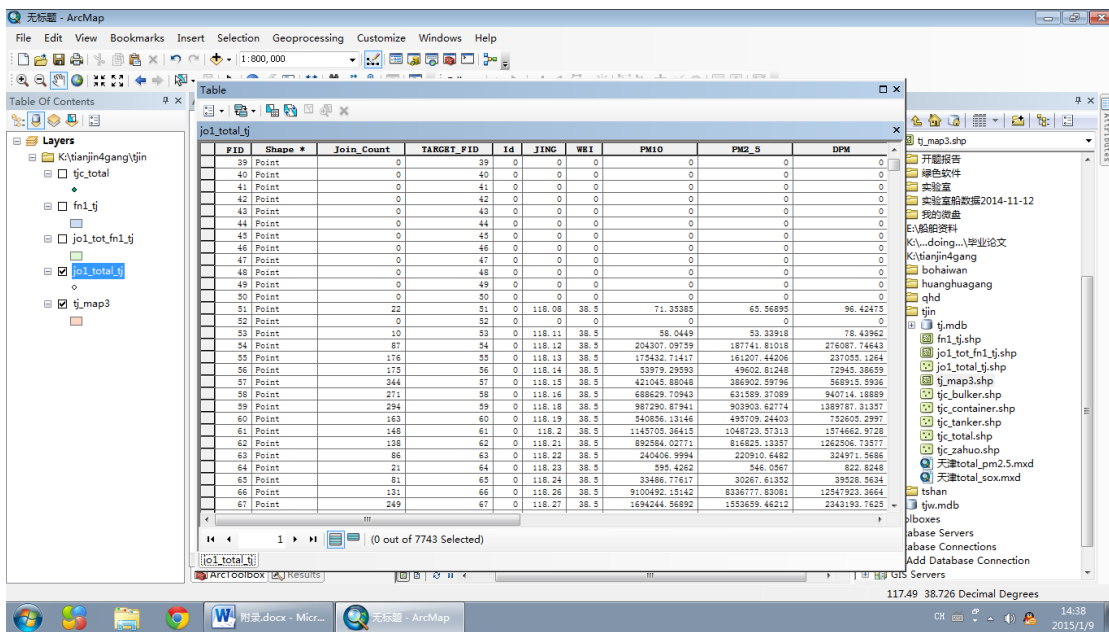
6) 关联后的网格具有了属性



7) 提取网格的中心点



8) 提取出的中心点具有了网格的属性特征



9) 将提取出的中心点可视化

