



中国船舶大气污染物排放清单报告
Air Pollutant Emission Inventory of Marine in China

环境保护部机动车排污监控中心

2016.9.28

致 谢

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

报告作者

黄志辉、丁焰、尹航、王宏丽、马冬、肖寒

报告声明

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。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

北京市朝阳区安外大羊坊 8 号院 邮编:100012

电话: 010 -84918110 传真: 010- 84918812 网站: www.vecc-mep.org.cn

目 录

第一章 绪论.....	3
1.1 我国航运业基本情况.....	3
1.2 国内外船舶排放法规现状.....	6
1.3 国内外研究现状.....	12
1.4 主要研究内容.....	13
1.5 技术路线.....	13
第二章 内河船舶排放量.....	15
2.1 污染源分类.....	15
2.2 排放量计算方法.....	15
2.3 船用燃油消耗量.....	15
2.4 排放因子.....	16
2.5 排放结果.....	16
第三章 沿海及远洋船舶排放量.....	18
3.1 污染源分类.....	18
3.2 排放量计算方法.....	18
3.3 船舶排放量.....	25
3.4 不确定分析.....	33
第四章 总结及建议.....	35
4.1 总结.....	35
4.2 建议.....	35
参考文献.....	37

第一章 绪论

1.1 我国航运业基本情况

航运业是指利用江河、湖泊、海洋、水库、渠道等水域，通过船舶等浮载工具运转旅客和货物的活动。按照我国国民经济行业分类（GB/T 4754-2011），也称“水上运输业”，包括水上旅客运输、水上货物运输、水上运输辅助活动三个子行业等，详见表 1、表 2。

表 1 水上运输业分类情况

55	水上运输业	备注
551	水上旅客运输	
5511	海洋旅客运输	
5512	内河旅客运输	指江、河、湖泊、水库的水上旅客运输活动
5513	客运轮渡运输	指城市及其他水域旅客轮渡运输活动
552	水上货物运输	
5521	远洋货物运输	
5522	沿海货物运输	
5523	内河货物运输	指江、河、湖泊、水库的水上货物运输活动
553	水上运输辅助活动	
5531	客运港口	
5532	货运港口	
5539	其他水上运输辅助活动	指其他未列明的水上运输辅助活动

表 2 水上运输业分类情况

分类	定义
海洋旅客运输	指远洋客轮的旅客运输活动；以客运为主的远洋运输活动
内河旅客运输	指江、河、湖泊、水库的水上旅客运输活动
客运轮渡运输	指城市及其他水域旅客轮渡运输活动
远洋货物运输	包括：专门从事远洋货物运输的活动；以货运为主的远洋运输活动；配备操作人员的远洋货轮的出租活动
沿海货物运输	包括：专门从事沿海货物运输的活动；以货运为主的沿海运输活动；原油、成品油的沿海运输活动；干散货、液体散货、件杂货、集装箱运输；普通货物、危险品货物运输活动；配备操作人员的沿海轮船的货物出租活动
内河货物运输	指江、河、湖泊、水库的水上货物运输活动
客运港口	专门为客运服务或客运服务为主的客运服务公司、客运中心、客运站的活动
货运港口	指货运港口的管理活动
其他水上运输辅助活动	指其他未列明的水上运输辅助活动

航运业是世界经济发展中重要的基础性和服务性行业。2016 年 1 月 1 日，新修订的《大气污染防治法》正式实施，明确了船舶港口污染防治部门职能分工。运输船舶主要由交通运输部海事、水运、船级社等部门管理，负责船舶及油品的检验、监督和管理等工作。



图 1 交通运输部门主要职能

渔业船舶及油品主要由农业部渔政、船检等部门管理，负责渔船及油品的检验、监督和管理等工作。

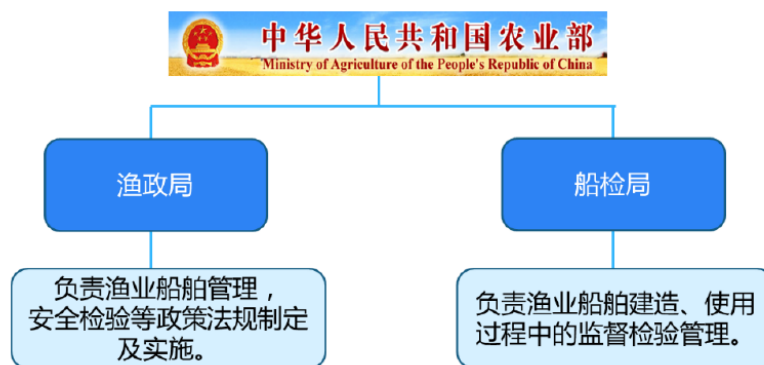


图 2 农业部门主要职能

环境保护主管部门负责大气污染物排放标准制定、大气环境质量和大气污染源监测、大气污染物排放清单及源解析等。



图 3 环境保护部门主要职能

随着国民经济和对外贸易的发展、海上货运量的快速增加，我国航运业也迅速发展，船舶总吨位数、总仓容不断增加，目前已成为世界航运大国。与此同时，带来了严重的船舶大气污染，尤其是在一些航线密集、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^[1]。

2014 年，我国航运业发展相对平稳，拥有水上运输船舶 17.2 万艘，净载重量 25785.2 万吨，载客量 103.2 万客位，集装箱箱位 231.9 万 TEU，船舶功率 7059.8 万千瓦。

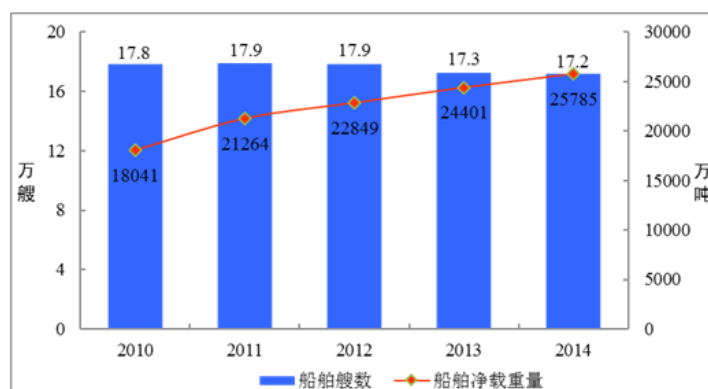


图 4 2010-2014 年全国水上运输船舶拥有量

全年完成水路客运量 2.63 亿人、旅客周转量 74.34 亿人公里，比上年分别增长 11.7%和 8.8%；完成水路货运量 59.83 亿吨、货物周转量 92774.56 亿吨公里，比上年分别增长 6.9%和 16.8%。其中，内河运输完成货运量 33.43 亿吨、货物周转量 12784.90 亿吨公里；沿海运输完成货运量 18.92 亿吨、货物周转量 24054.59 亿吨公里；远洋运输完成货运量 7.47 亿吨、货物周转量 55935.06 亿吨公里。

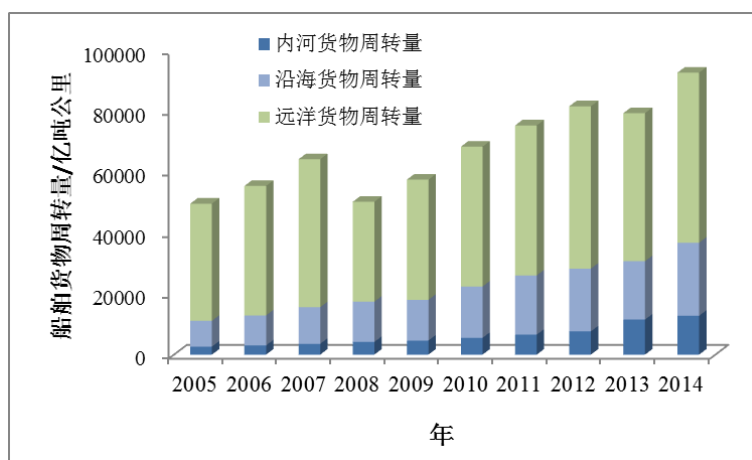


图 5 2005-2014 年全国水上运输船舶货物周转量



图 6 2005-2014 年全国水上运输船舶旅客周转量

与世界船舶构成情况相比，我国船舶结构组成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^[2]，详见表 3。

表 3 2014 年沿海船舶结构组成

船舶类型	数量 (艘)	运力	船龄 (年)	运力增幅 (%)
干散货船	1689	5335.8 万吨	7.2	-3.3
集装箱船	152	42.7 万标准箱	10.0	-15.0
油船	136	995 万吨	7.1	-5.1
化学品船	277	106.6 万吨	7.5	--
液化气船	70	21.3 万吨	8.5	-1.7

1.2 国内外船舶排放法规现状

船舶对大气环境的污染主要来源于船用发动机燃烧，排放的污染物主要包括 NO_x、SO_x、PM 等。与车用柴油发动机相比，我国船用柴油发动机排放标准严重滞后，目前仍执行与国零车相当的排放标准；燃油品质差，船用油硫含量最高可达 3.5%，是车用柴油的 700 倍；同时，船舶柴油发动机工作条件恶劣、负荷大、工况变化剧烈、空间分布广，实施尾气控制难度较大。据国际海事组织(IMO)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^[1]。目前,国际社会已广泛关注船舶发动机排放的 SO_x 和 NO_x, 并出台多部船舶排放法规。

1.2.1 国际船舶排放法规

国际海事组织 (IMO) 是联合国下属负责海上航行安全和防止船舶造成海洋污染的专门机构。1997 年 9 月, IMO 在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。该公约是世界上最重要的国际海事环境公约之一,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。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^[3]

MARPOL 73/78 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值。包括:

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 阶段标准仅对航行于排放控制区 (ECA) 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),其中,北美船舶排放控制区已被划为 NO_x 和 SO_x 排放控制区,波罗的海、北海船舶排放控制区已被划分 SO_x 排放控制区。

表 4 MARPOL 公约附录 VI 中的 NO_x 排放限值 克/千瓦时

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

* 不包括 130 千瓦以下的船用柴油发动机或仅用于应急情况的船只。

** 针对 2000 年 1 月 1 日以后运行的 300 千瓦以上的发动机。

*** III阶段标准仅在排放控制区内实施。

(2) MARPOL 公约对 SO_x 排放的限制^[3]

MARPOL 73/78 附则 VI 第三章第 14 条规定了船舶柴油机硫氧化物的排放限值。包括：自 2012 年 1 月 1 日起，世界范围内的硫含量由 4.5% 降低至 3.5%，自 2020 年 1 月 1 日起，世界范围内的硫含量降至 0.5%；自 2010 年 7 月 1 日起，进入 ECA 区域的船舶应使用硫含量不超过 1%，自 2015 年 1 月 1 日起，应使用硫含量不超过 0.1%。

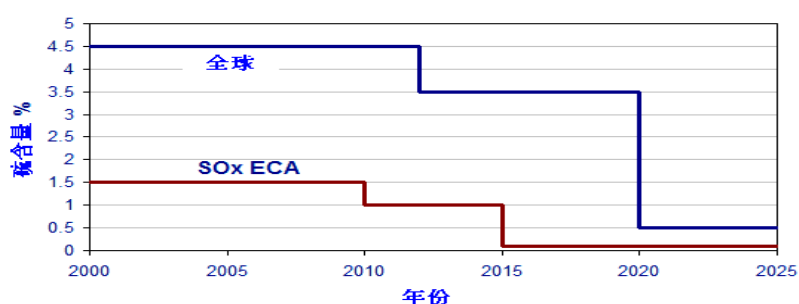


图 7 MARPOL 附录 VI 中规定的燃油硫含量

1.2.2 美国船舶排放法规

美国环境保护局 (EPA) 对船用发动机排放控制的法规见表 5。包括：新生产及在用非道路压燃式发动机排放控制标准，针对额定净功率 < 37kW 的压燃式船机；船用压燃式发动机大气污染控制标准，针对额定净功率 ≥ 37kW 的压燃式船机；船用点燃式发动机排放控制标准，针对点燃式船机。

表 5 美国船用发动机排放法规

法规	法规号变更	适用范围
40 CFR PART 89 新生产及在用非道路压燃式 发动机排放标准	40 CFR PART 1039	<37kW 的压燃式船机
40 CFR PART 94 船用压燃式发动机排放标准	40 CFR PART 1042	≥37kW 的压燃式船机
40 CFR PART 91 船用点燃式发动机排放标准	40 CFR PART 1045	点燃式船机

其中,对于额定净功率 $\geq 37\text{kW}$ 的压燃式船机,已颁布发动机排放限制 Tier2,适用于在美国注册的气缸扫气容积 V_d 为 $2.5\text{-}30\text{dm}^3$ 的船舶,并于 2007 年开始生效执行。与 IMO Tier1 相比, NO_x 大约要降低 25%-40%, 详见表 6。

表 6 EPA Tier2 发动机排放限值

扫气容积 V_d/dm^3	类别	NO_x+CnHm g/kwh	PM g/kwh	CO g/kwh
$2.5 \leq 5.0$	1	7.2	0.20	5.0
$5.0 \leq 15.0$	2	7.8	0.27	5.0
$15.0 \leq 20.0$	2(<3.3MW)	8.7	0.50	5.0
$15.0 \leq 20.0$	2(>3.3MW)	9.8	0.50	5.0
$20.0 \leq 25.0$	2	9.8	0.50	5.0
$25.0 \leq 30.0$	2	11.0	0.50	5.0

类别 1 是指单缸排量 $D < 5 \text{ dm}^3$; $P \geq 37 \text{ kW}$ 的船用发动机

类别 2 是指单缸排量 $5 \text{ dm}^3 \leq D < 30 \text{ dm}^3$ 的船用发动机

1.2.3 欧盟船舶排放法规

欧盟船机排放法规包括欧盟商用内河船机排放法规 2004/26/EC, 娱乐用船机和个人游艇用船机排放法规 94/25/EC, 和三个区域型船机排放条例: 莱茵河条例、博登湖条例和勃兰登堡航运条例, 见表 7。

表 7 欧盟船用发动机排放法规

法规	适用范围
2004/26/EC	商用内河船机
94/25/EC	娱乐用船机和个人游艇用船机
Central Commission for Navigation on the Rhine [CCNR] Regulation 莱茵河条例	
Bodensee Regulation 博登湖条例	区域水域航行的船用发动机
Brandenburg Shipping Order 勃兰登堡航运条例	

其中, 欧盟商用内河船机排放法规限值见表 8。

表 8 欧盟商用内河船用发动机排放限值

类型	功率 (kw) (单缸排量 SV)	实施日期	CO (g/kWh)	HC+NO _x (g/kWh)	PM (g/kWh)
V1:1	P≥37 (SV<0.9L)	2006.12.31	5.0	7.5	0.40
V1:2	(0.9≤SV<1.2L)	2006.6.30	5.0	7.2	0.30
V1:3	(1.2≤SV<2.5L)	2006.6.30	5.0	7.2	0.20
V1:4	(2.5≤SV<5L)	2007.12.31	5.0	7.2	0.20
V2:1	(5≤SV<15L)	2007.12.31	5.0	7.8	0.27
V2:2	P<3300 (15≤SV<20L)	2007.12.31	5.0	8.7	0.50
V2:3	P≥3300 (15≤SV<20L)	2007.12.31	5.0	9.8	0.50
V2:4	(20≤SV<25L)	2007.12.31	5.0	9.8	0.50
V2:5	(25≤SV<30L)	2007.12.31	5.0	11.0	0.50

1.2.4 中国船舶排放法规

我国船机排放法规见表 9。

表 9 我国船舶排放限值

标准编号	标准名称	发布部门
GB3552-83	《船舶污染物排放标准》	城乡环境保护部
GB20891-2007	《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 I、II 阶段)》	环境保护部
GB/T15097-2008	《船用柴油机排气排放污染物测量方法》	国家质量监督检验检疫总局
GB/T5741-2008	《船用柴油机排气烟度测量方法》	国家质量监督检验检疫总局
GB8840-2009	《船用柴油机排气烟度限值》	国家质量监督检验检疫总局
GD01-2011	《船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南》	中国船级社
GB20891-2014	《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(中国第三、四阶段)》	环境保护部
GB15097-2016	《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、二阶段)》	环境保护部

目前,我国正在执行的船用发动机排放法规包括《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(中国第三、四阶段)》(GB20891-2014)、《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、二阶段)》(GB15097-2016)。其中,GB20891-2014 适用于额定净功率<37kW 的船用柴油机;GB15097-2016 适用于额定净功率≥37kW 的船用柴油机和气体燃料发动机。其中,额定净功率≥37kW 的船机第一、二阶段排放限值见表 10、表 11。

表 10 我国船机排气污染物第一阶段排放限值

类型	功率 (kw) (单缸排量 SV)	CO (g/kWh)	HC+NO _x (g/kWh)	CH ₄ (g/kWh)	PM (g/kWh)
第 1 类	P ≥ 37 (SV < 0.9L)	5.0	7.5	1.5	0.40
	(0.9 ≤ SV < 1.2L)	5.0	7.2	1.5	0.30
	(1.2 ≤ SV < 5L)	5.0	7.2	1.5	0.20
第 2 类	(5 ≤ SV < 15L)	5.0	7.8	1.5	0.27
	P < 3300 (15 ≤ SV < 20L)	5.0	8.7	1.6	0.50
	P ≥ 3300 (15 ≤ SV < 20L)	5.0	9.8	1.8	0.50
	(20 ≤ SV < 25L)	5.0	9.8	1.8	0.50
	(25 ≤ SV < 30L)	5.0	11.0	2.0	0.50

表 11 我国船机排气污染物第二阶段排放限值

类型	功率 (kw) (单缸排量 SV)	CO (g/kWh)	HC+NO _x (g/kWh)	CH ₄ (g/kWh)	PM (g/kWh)
第 1 类	P ≥ 37 (SV < 0.9L)	5.0	5.8	1.5	0.30
	(0.9 ≤ SV < 1.2L)	5.0	5.8	1.0	0.14
	(1.2 ≤ SV < 5L)	5.0	5.8	1.0	0.12
第 2 类	P < 2000 (5 ≤ SV < 15L)	5.0	6.2	1.0	0.14
	2000 ≤ P < 3700 (5 ≤ SV < 15L)	5.0	7.8	1.5	0.14
	P ≥ 3700 (5 ≤ SV < 15L)	5.0	7.8	1.5	0.27
	P < 2000 (5 ≤ SV < 15L)	5.0	7.0	1.5	0.34
	2000 ≤ P < 3700 (5 ≤ SV < 15L)	5.0	8.7	1.6	0.50
	P ≥ 3700 (5 ≤ SV < 15L)	5.0	9.8	1.8	0.50

油品质量也直接影响船舶排放。我国境内船舶使用的燃油主要包括普通柴油和船用燃料油。据统计，2015 年我国船用燃油消耗量达 1600 多万吨，其中普通柴油消耗量 400 多万吨，占总用油量的 25%，船用燃料油消耗量 1200 多万吨，占总用油量的 75%^[4]。内河船舶主要使用普通柴油，目前普通柴油硫含量水平为不大于 350 mg/kg。根据发展改革委等七部门印发的《加快成品油质量升级工作方案》，自 2016 年 1 月 1 日起，在东部地区重点城市供应国 IV 标准普通柴油（硫含量水平 50 mg/kg 以下）；2017 年 7 月 1 日起，全国全面供应国 IV 标准普通柴

油；2018年1月1日起，全国供应国V标准普通柴油（硫含量水平10 mg/kg以下）。沿海及远洋船舶主要使用船用燃料油，包括馏分油和残渣油。2015年12月，质检总局、国家标准委发布标准《船用燃料油》（GB17411-2015）。其中，对馏分燃料油硫含量规定了三个等级：I级为1.0%或1.5%，II级为0.5%，III级为0.1%；对残渣燃料油硫含量也规定了三个等级：I级为3.5%，II级为0.5%，III级为0.1%。其中，I级适用于IMO拟定的船舶在普通区域内的要求；II级适用于IMO拟定的2020年（或2025年）船舶在普通区域内的要求；III级适用于船舶在SO_x排放控制区内的要求。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国际研究现状

国际上船舶排放清单的编制方法主要包括两类：基于燃油消耗量或基于船舶自动识别系统（AIS）的计算方法。

基于燃油消耗量的算法是一种自上而下的方法，其获取方式主要有两类：直接调查或者间接估算。其中，间接估算包括利用船舶客货周转量，或利用船舶航行距离和船舶种类，结合对应的燃油消耗率估算获得。Corbett^[5]、Ernestos^[6]、Endresen^[7]、Olivier^[8]、Winther^[9]、Kourtidis^[10]等利用直接调查的燃油消耗量计算各区域及国家船舶排放清单。Psaraftis^[11]、Eyring^[12]、Endresen^[13]、Schrooten^[14]、Wahlstrom^[15]、Vestreng^[16]、Concawe^[17]、Winther^[18]、Schrooten^[19]、Tzannatos^[20]、De Meyer^[21]、Deniz^[22]、Saxe^[23]、Isakson^[24]、Kesgin^[25]、Trozzi^[26]等利用船舶载重量估算各区域及国家船舶排放清单。

近年来，随着AIS的发展，开发了一种自下而上的船舶排放清单算法。该方法利用船舶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，结合船舶类型数据库，对排放清单进行计算，并可以利用船舶航行的经纬度信息对排放进行空间分布。IMO^[27]、USEPA^[28]、STARCREST CONSULTING GROUP^[29]、Entec^[30]、Simon^[31]、J.-P.Jalkanen^[32]等利用AIS和船型数据库获得船舶活动水平估算各区域及国家船舶排放清单。

1.3.2 国内研究现状

国内对船舶排放清单及排放因子的研究仍处于初期阶段，排放因子测试开展较少，尚未建立成熟完善的船舶排放清单模型。金陶胜^[33]、张礼俊^[34]、刘静^[35]、伏倩艳^[36]、Yang^[37]等基于直接或间接燃油消耗量方法，测算得到天津市、深圳

市、青岛市、上海市等船舶排放清单，其排放因子大多采用国际相关数据。郑岩^[38]等基于船舶 AIS，编制了环渤海地区船舶大气污染物排放清单，并采用 PEMS 测试了 30 艘内河船舶排放因子。李智恒^[39]依据香港船运数据和排放数据库，建立了船运统计数据与污染物排放量之间的关系。同时，依据深圳市船运统计数据，测算得到 2003 年船舶大气污染物排放清单，其中船舶排放的 SO₂ 占全市流动源 SO₂ 排放量的 58.62%。

1.4 主要研究内容

(1) 内河船舶排放清单。依据《非道路移动源大气污染物编制技术指南（试行）》，基于船舶运输的旅客、货物周转量，测算得到全国及环渤海地区的内河船舶排放清单。

(2) 沿海及远洋船舶排放清单。结合船舶 AIS 数据中的船舶航速，劳氏数据库中船舶类型、主机功率、辅机功率，判定航行状态、主机功率、主机负荷系数、辅机功率、辅机负荷功率、锅炉功率、排放因子等，并测算得到全国及环渤海地区的沿海及远洋船舶排放清单。

1.5 技术路线

船舶排放清单编制技术路线如图 8 所示。

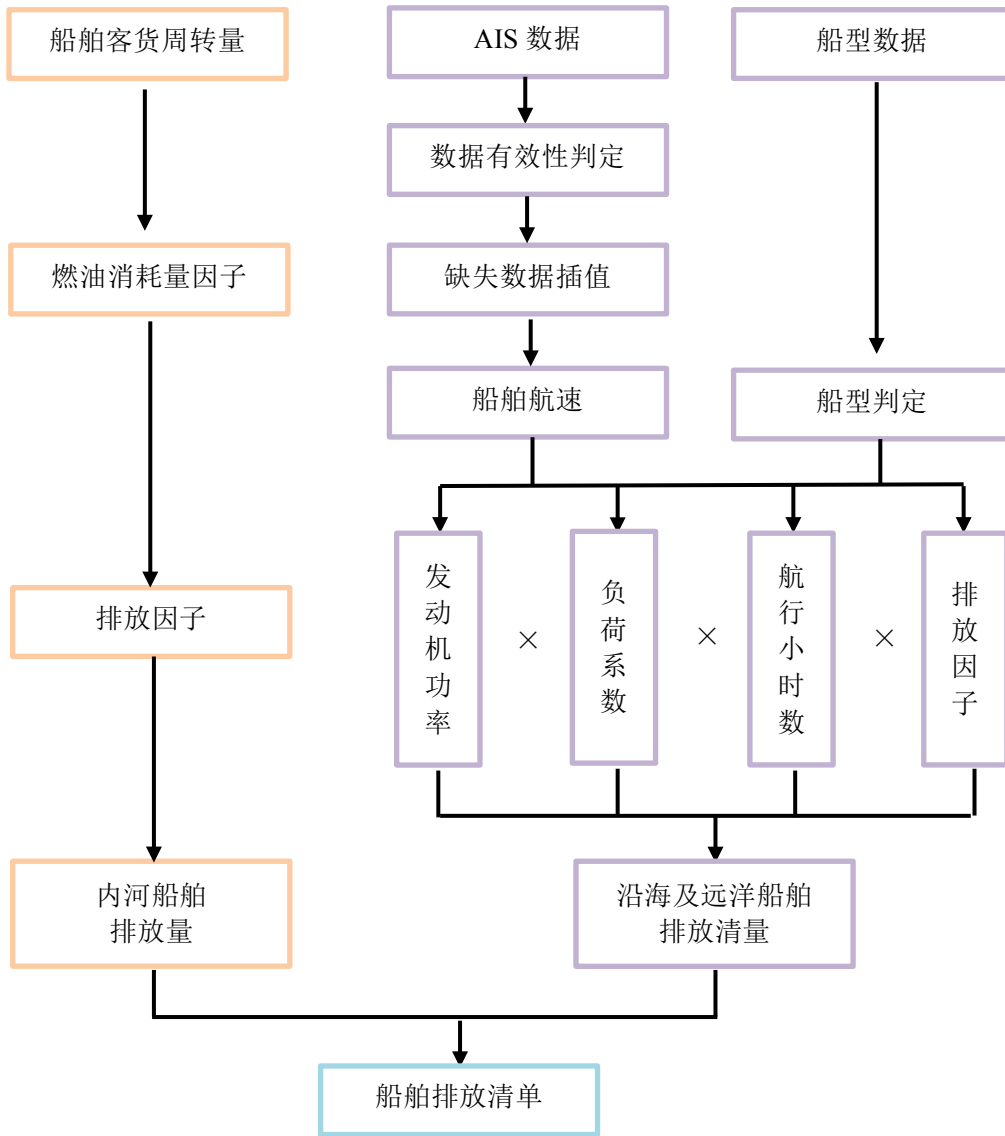


图 8 船舶排放清单编制技术路线

第二章 内河船舶排放量

2.1 污染源分类

目前国内尚无统一的船舶分类。本报告按照航行区域,将船舶分为内河船舶、沿海船舶和远洋船舶等三类,详见表 12。

表 12 按航行区域划分的船舶类型

分类	特征描述
内河船舶	从事江湖河川等天然或人工水道运输货物或旅客的船舶。
沿海船舶	从事本国沿海各港口间的运输货物或旅客的船舶。
远洋船舶	从事跨海洋运输货物或旅客的船舶。

2.2 排放量计算方法

船舶按照作业区域通常分为内河、沿海、远洋船舶。考虑到目前内河船舶的 AIS 数据覆盖率偏低,且难以通过公开途径获取,并实时进行更新,因而建议采用燃料法进行计算,即:

$$E_1 = Y \times EF$$

式中, Y 为燃油消耗量,单位为千克; EF 为排放系数,单位为克/千克燃料。

2.3 船用燃油消耗量

依据《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》,船用燃油消耗量计算公式如下:

$$Y = (0.065 \times Z_{客} + Z_{货}) \times YX$$

式中, $Z_{客}$ 为客运周转量,单位为万人公里; $Z_{货}$ 为货物周转量,单位为万吨公里; YX 为油耗系数,单位为千克/万吨公里,本报告取 50。

其中,船舶客、货周转量采用《中国统计年鉴》、《中国交通年鉴》及《交通运输业发展统计公报》数据,详见

表 13；油耗系数采用《中国交通年鉴》数据，取 50 千克/万吨公里。

表 13 2010-2015 年我国船舶客、货周转量

	内河船舶		沿海船舶	
	货物周转量 亿吨公里	旅客周转量 亿人公里	货物周转量 亿吨公里	旅客周转量 亿人公里
2010	5535.74	29.54	16892.63	32.75
2011	6564.88	33.38	19503.56	30.58
2012	7638.42	35.43	20657.06	30.23
2013	11514.14	32.61	19216.14	22.41
2014	12784.90	35.48	24051.59	24.38
2015	13312.41	34.88	24223.94	23.96

2010-2015 年我国内河船舶燃油消耗量见图 9。内河船舶燃油消费量增长迅速，2015 年内河船舶消费量 665.7 万吨，是 2010 年燃油消费量的 2.5 倍。这部分船用燃油大多数为普通柴油。

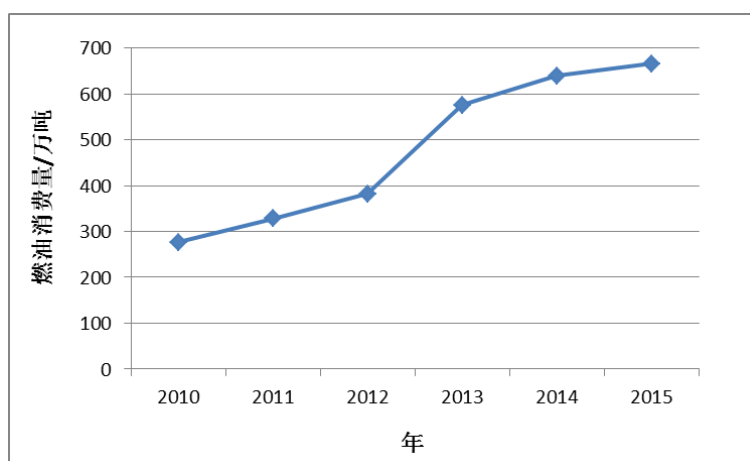


图 9 2010-2015 年内河船舶用柴油消费量

2.4 排放因子

依据《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南（试行）》，船舶大气污染物排放因子见表 14。

	CO	HC	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂
柴油	23.80	6.19	47.60	3.81	3.65	0.35
燃料油	7.40	2.70	79.30	6.20	5.60	27

2.5 排放结果

基于上述燃油消耗量及排放因子，测算得到全国及环渤海地区内河船舶排放量，见图 10。截至 2015 年，内河船舶五项大气污染物排放 54.6 万吨，其中，排放 SO₂ 0.5 万吨、CO 15.8 万吨、HC 4.1 万吨、NO_x 31.7 万吨、PM 2.5 万吨。

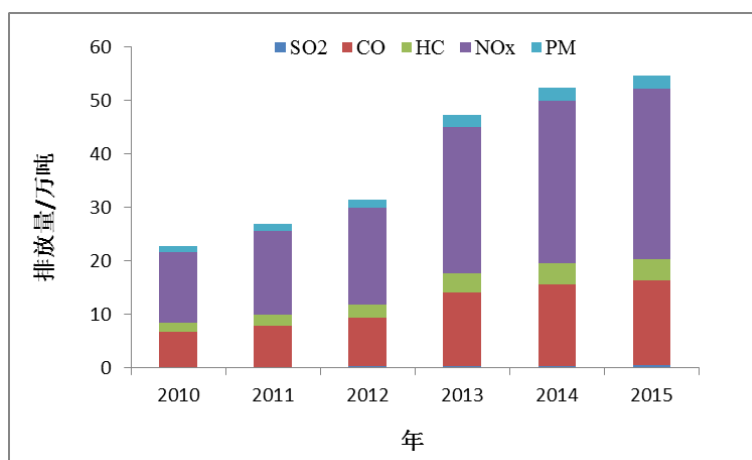


图 10 2011-2015 年内河船舶大气污染物排放量

第三章 沿海及远洋船舶排放量

3.1 污染源分类

目前国内尚无统一的船舶分类。本报告按照用途，将船舶分为客运船舶、货运船舶、工作船舶、工程船舶等四类，详见表 15。

表 15 按用途划分的船舶类型

分类	特征描述
客运船舶	专门用于运输旅客及其可携带行李和邮件的船舶。根据国际海上人命公约（SOLAS），凡载客 12 人以上的船舶为客船。
货运船舶	以载运货物为主的，载客 12 人以下的船舶。包括散货船、集装箱船、油船、杂货船、化学品船、冷藏船、滚装船、载驳船等。
工作船舶	不直接参加客货运输，专为港口生产服务的船舶。包括拖船、消防船、供应船、引航船、科考船和破冰船等
工程船舶	在港口、航道、船厂等水域从事工程作业的船舶。包括挖泥船、起重船、打捞船、海难救助船等。
渔业船舶	从事渔业生产的船舶以及属于水产系统为渔业生产服务的船舶。

3.2 排放量计算方法

沿海、远洋船舶 AIS 覆盖率较高，约占 85%以上，可通过调查或购买等获取，因而采用准确度更高的动力法进行计算。其大气污染物排放量计算公式为：

$$E_2 = \sum G \times LF \times hr \times EF$$

式中， E_2 为沿海船舶及远洋船舶在近海的排放量，单位为吨； G 为船舶发动机（包括主机、辅机和锅炉）额定净功率，单位为千瓦； LF 为负荷系数； hr 为不同状态下（包括停泊、机动、巡航、低速巡航）的航行小时数，单位为小时； EF 为污染物排放系数，单位为克/千瓦时。

3.2.1 地理范围及统计时间

（1）统计时间

统计时间为：2014 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日。

（2）地理范围

全国：北纬 $16^\circ \sim 41^\circ$ ，东经 $100^\circ \sim 125^\circ$ 。

环渤海：中朝分界点与山东高脚连线靠近陆基线的海域，包括两区域：

区域 1：北纬 $37.09^\circ \sim 40.95^\circ$ ，东经 $117.53^\circ \sim 122.71^\circ$

区域 2：北纬 $37.40^\circ \sim 39.74^\circ$ ，东经 $122.71^\circ \sim 124.15^\circ$ 且该点纬度 $\geq 37.4 + 1.620887 \times (\text{该点经度} - 122.705)$

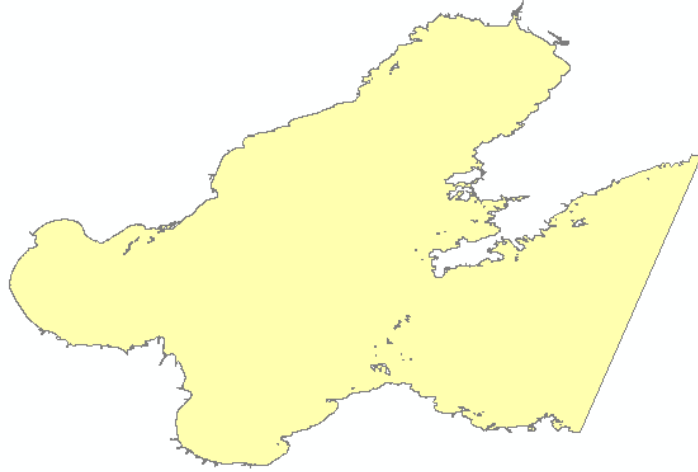


图 11 环渤海海域地理范围

长三角：包括三区域：

区域 1：北纬 $31.53^{\circ} \sim 33.02^{\circ}$ ，东经 $120.06^{\circ} \sim 122.43^{\circ}$ 且该点经度 $\leq 121.88 - 2.7091 \times (\text{该点纬度} - 33.02)$ 。

区域 2：北纬 $30.80^{\circ} \sim 31.53^{\circ}$ ，东经 $120.06^{\circ} \sim 123.42^{\circ}$ 且该点经度 $\leq 122.43 - 1.3562 \times (\text{该点纬度} - 31.53)$

区域 3：北纬 $28.80^{\circ} \sim 30.80^{\circ}$ ，东经 $120.06^{\circ} \sim 123.42^{\circ}$ 且该点经度 $\leq 122.48 + 0.47 \times (\text{该点纬度} - 28.80)$

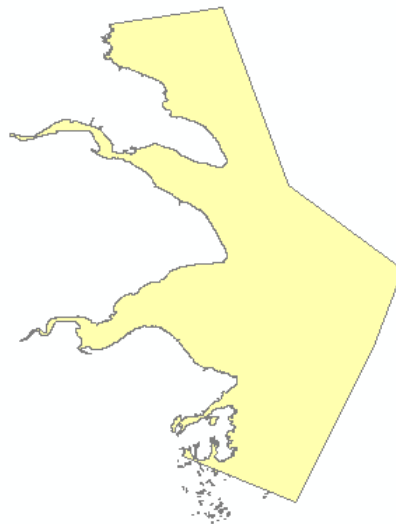


图 12 长三角海域地理范围

珠三角：包括两区域：

区域 1：北纬 $21.26^{\circ} \sim 23.11^{\circ}$ ，东经 $112.34^{\circ} \sim 114.02^{\circ}$ 且该点纬度 $\geq 21.26 + 0.2222 \times (\text{该点经度} - 112.40)$ 。

区域 2：北纬 $21.62^{\circ} \sim 23.11^{\circ}$ ，东经 $114.02^{\circ} \sim 115.1^{\circ}$ 且该点纬度 $\geq 21.62 + 0.4370 \times (\text{该点经度} - 114.02)$ 。

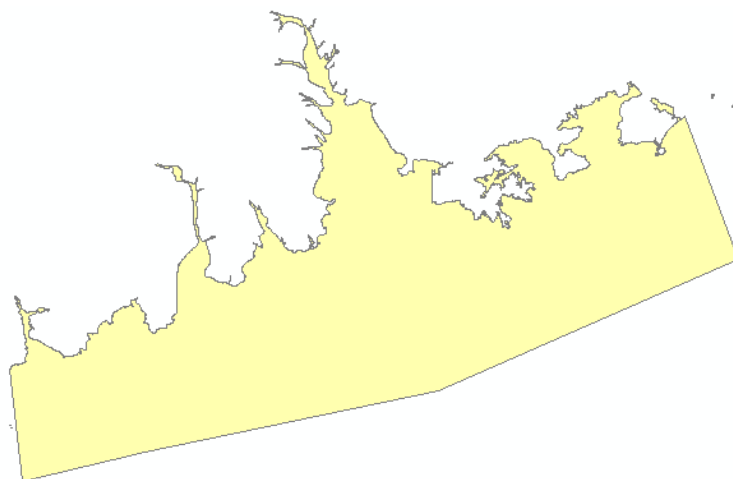


图 13 珠三角海域地理范围

3.2.2 AIS 数据来源及插值

本报告中的 AIS 数据来源于 ICCT 购买的 exactEarth 数据，属于卫星遥感数据，间隔时间为 1 小时。相关参数包括船舶 MMSI 号、船舶 IMO 号、时间、经纬度、航速等信息。

3.2.3 船舶类型

本报告中的船舶类型通过船舶 IMO 号与劳氏船舶数据库匹配后判定；不能匹配的，假定为标准船。

3.2.4 航行状态

按照航行状态，分为巡航、低速巡航、港内机动、停泊等四类。其中，巡航状态指船舶在某个港口的边界到防波堤或减速区域内的航行，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%，锅炉多数情况下处于关闭状态；低速巡航状态指船舶在减速区域内的航行；港内机动状态指船舶在某个港口的防波堤到码头区域内的航行；停泊状态指船舶在某个港口停靠或锚泊时的状态。本报告不同航行状态的划分依据见 **Error! Reference source not found.**

表 16 船舶航行状态判定依据

	已匹配船状态判定	未匹配船判定
停靠	航速 < 1 节	航速 < 1 节
锚泊	1 节 ≤ 航速 < 介于到 3 节	1 节 ≤ 航速 < 介于到 3 节
机动	航速 ≥ 3 节且主机负荷 < 20%	3 节 ≤ 航速 < 介于到 8 节
低速巡航	航速 ≥ 3 节且 20% ≤ 主机负荷 < 65%	8 节 ≤ 航速 < 介于到 12 节
巡航	主机负荷 ≥ 65%	航速 ≥ 12 节

3.2.5 发动机分类及功率

非道路船舶大气污染物排放主要来源于发动机，包括主发动机、辅发动机和锅炉。其中，主发动机主要为船舶提供推进动力的装备；辅发动机主要为船舶提供照明、空调、冰箱等电力用途的装备；锅炉主要为船舶提供热水或蒸汽泵驱动用的装备。发动机种类通常分为低速柴油发动机、中速柴油发动机、高速柴油发动机、燃气轮机、蒸汽轮机共五类。其中，低速柴油发动机指以柴油为动力，曲轴最高转速小于 350 转/分钟，主要为大型船舶主机；中速柴油发动机指以柴油为动力，发动机曲轴最高转速介于 350 至 1000 转/分钟，通常用于大型船舶主机或辅机；高速柴油发动机指以柴油为动力，发动机曲轴最高转速超过 1000 转/分钟，通常用于小型船主机或大型船辅机；燃气轮机指以连续流动的气体为工质带动叶轮高速旋转，将燃料的能量转变为有用功的内燃式动力机械，是一种旋转叶轮式热力发动机；蒸汽轮机指将蒸汽的能量转换成为机械功的旋转式动力机械。

船舶主机实际功率为主机负荷系数与主机额定功率的乘积。已匹配船舶主机额定功率采用劳氏数据库数据，未匹配船主机额定功率假定为 1732kw。主机负荷系数为船舶实际航速与设计航速之比的 3 次方。

船舶辅机实际功率为辅机负荷系数与辅机额定功率的乘积。船舶辅机额定净功率采用劳氏数据库数据；无数据的，采用主发动机功率乘以辅助发动机功率与主机功率的比值，见

表 17。辅机负荷系数根据船舶类型、航行状态确定，见表 18。

表 17 船舶辅助发动机与主机功率的比值

船舶类型	辅机功率与主机功率的比值 (%)
载车船	0.266
散货船	0.222
集装箱船	0.220
游轮	0.278
杂货船	0.191
远洋拖轮	0.222
冷藏船	0.406
滚装船	0.259
油轮	0.211
其他类型	0.222

表 18 船舶辅机负荷比例系数

船舶类型	航行状态			
	巡航状态	低速航行状态	机动操作状态	停泊状态
载车船	0.15	0.30	0.45	0.26
散货船	0.17	0.27	0.45	0.22
集装箱船	0.13	0.25	0.48	0.19
游轮	0.80	0.80	0.80	0.64
杂货船	0.17	0.27	0.45	0.10
远洋拖轮	0.17	0.27	0.45	0.22
冷藏船	0.20	0.34	0.67	0.32
滚装船	0.15	0.30	0.45	0.26
油轮	0.24	0.28	0.33	0.26
其他类型	0.17	0.27	0.45	0.22

锅炉仅当主机负荷系数小于等于 20%开启，船舶锅炉负荷功率见

表 19。

表 19 船舶锅炉负荷功率

/kw

船型	巡航状态	减速区航行	机动操作状态	锚泊状态	停泊状态
载车船			371	371	371
散货船			106	106	106
集装箱-1000			506	506	506
集装箱-2000			506	506	506
集装箱-3000			506	506	506
集装箱 4000			506	506	506
集装箱 5000			506	506	506
集装箱 6000			506	506	506
集装箱 7000			506	506	506
集装箱 8000			506	506	506
游轮			1000	1000	1000
杂货船			109	109	109
远洋拖轮			0	0	0
滚装船			109	109	109
冷藏船			464	464	464
油轮			371	3000	3000
其他类型			371	371	371

3.2.6 航行小时数

船舶航行小时数由各航行状态的条数叠加获得。

由于部分数据缺失，需要对缺失数据进行插值。插值方法包括随机插值、向上插值或向下插值。本报告采用 8 小时随机插值，即对缺失数据小于等于 8 小时，按缺失数据插值，缺失数据大于 8 小时的，按 8 小时插值。插值对船舶排放的影响见图 14。

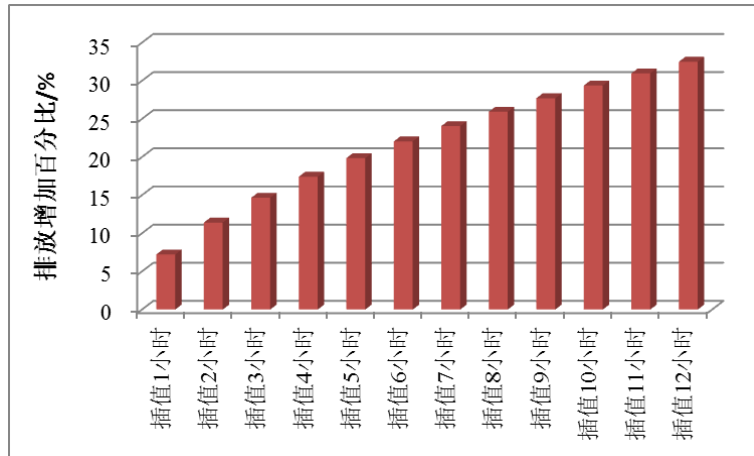


图 14 数据插值对船舶排放的影响

3.2.7 排放因子

基于动力法的船舶排放因子计算公式如下：

$$EF = BEF \times LCF \times FCF \times CF$$

式中，BEF 为基本排放因子，单位为克/千瓦；LCF 为低负荷修正因子，仅对船舶主机进行修正；FCF 为燃料修正因子；CF 为排放控制技术修正因子。

燃油对船舶二氧化硫、颗粒物排放有较大影响，影响因素主要为硫含量。本指南根据油耗及硫含量确定二氧化硫、颗粒物排放系数，计算公式如下：

$$BEF_{SO_2} = BSFC \times 2 \times 0.97753 \times S$$

对于渣油， $BEF_{PM_{10}} = 1.35 + BSFC \times 7 \times 0.02247 \times (S - 0.0246)$

对于柴油， $BEF_{PM_{10}} = 0.23 + BSFC \times 7 \times 0.02247 \times (S - 0.0024)$

式中，BSFC 为燃油消耗量，单位为克/千瓦；S 为燃油硫含量，%。

细颗粒物排放系数为可吸入颗粒物排放系数与 0.92 的乘积。

船舶主机其他污染物基本排放系数见表 20；船舶辅机其他污染物基本排放系数见表 21；船舶锅炉其他污染物基本排放系数见表 22。

此外，一些排放控制技术也会对船舶排放产生影响。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。研究表明，安装燃油滑阀后，可有效降低船舶污染物的排放，NO_x 排放降低 30%，PM 排放降低 25%。本指南暂不考虑排放控制技术修正。

表 20 基于动力法的船舶主机排放因子 g/kwh

		油耗	二氧化碳	一氧化碳	碳氢化合物	氮氧化物
低速发动机	渣油	195	620.6	1.4	0.6	18.1
	柴油	185	588.8	1.4	0.6	17.0
中速发动机	渣油	213	677.9	1.1	0.5	14.0
	柴油	203	646.1	1.1	0.5	13.2
燃气轮机	渣油	305	970.7	0.2	0.1	6.1
	柴油	290	923.0	0.2	0.1	5.7
蒸汽轮机	渣油	305	970.7	0.2	0.1	2.1
	柴油	290	923.0	0.2	0.1	2.0

表 21 基于动力法的船舶辅机排放因子 g/kwh

	油耗	二氧化碳	一氧化碳	碳氢化合物	氮氧化物
渣油	227	722.5	1.1	0.4	14.7
柴油	217	690.7	1.1	0.4	13.9

表 22 基于动力法的船舶锅炉排放因子 g/kwh

	油耗	二氧化碳	一氧化碳	碳氢化合物	氮氧化物
渣油	305	970.7	0.2	0.1	2.1
柴油	290	923.0	0.2	0.1	2.0

3.3 船舶排放量

3.3.1 全国船舶排放

2014 年，我国沿海及远洋船舶排放五项大气污染物 239.2 万吨。其中，CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别排放 8.8 万吨、3.6 万吨、114.9 万吨、12.0 万吨、99.9 万吨，与全球、欧盟、东亚、香港、洛杉矶港、上海港船舶排放相比，数量级基本类似，详见

表 23。

表 23 基于动力法的全国沿海及远洋船舶排放量

万吨

	一氧化碳	碳氢化合物	氮氧化物	颗粒物	二氧化硫
中国-不插值	7.1	2.9	91.9	9.6	79.9
中国-8 小时插值	8.8	3.6	114.9	12.0	99.9
全球-IMO (2007) ^[27]	250	80	2430	190	1650
欧盟 28 国 (2013) ^[40]			253	16	72
东亚 (2013) ^[41]	10.8	10.0	280	24	185
香港 (2007, OGV) ^[31]	0.14	0.06	1.45	0.14	1.24
洛杉矶港 (2007) ^[29]	0.05	0.02	0.62	0.06	0.56
上海港 ^[36]	0.4	0.2	5.4	0.3	2.3

按发动机类型划分，主发动机排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 58.3%、62.1%、57.8%、47.2%、42.3%；辅助发动机排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 38.8%、34.5%、40.0%、37.5%、37.5%；锅炉排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 2.8%、3.5%、2.3%、15.4%、20.3%。按发动机类型划分的船舶排放占比见图 15。

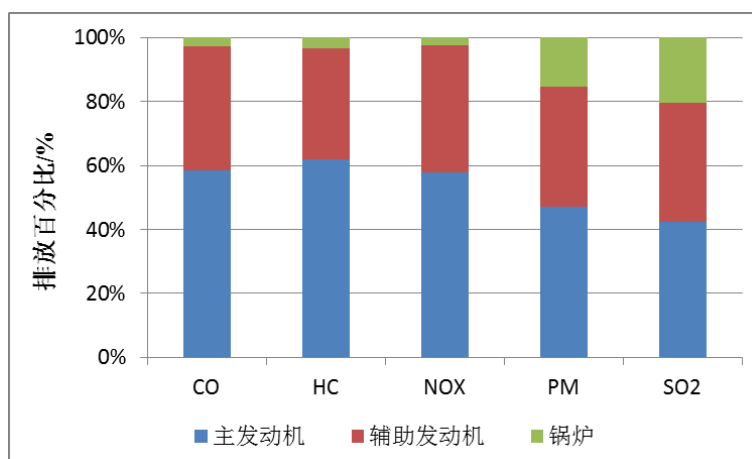


图 15 按发动机类型划分的全国船舶排放占比图 (%)

按航行状态划分，停靠状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 26.1%、23.9%、26.3%、35.4%、39.3%；锚泊状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 1.6%、1.5%、1.6%、2.1%、2.3%；机动状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 17.1%、16.9%、17.1%、

17.2%、17.2%；低速巡航状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 34.2%、35.5%、34.1%、28.0%、25.5%；巡航状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 21.0%、22.2%、20.9%、17.3%、15.7%。按发动机类型划分的船舶排放占比见图 16。

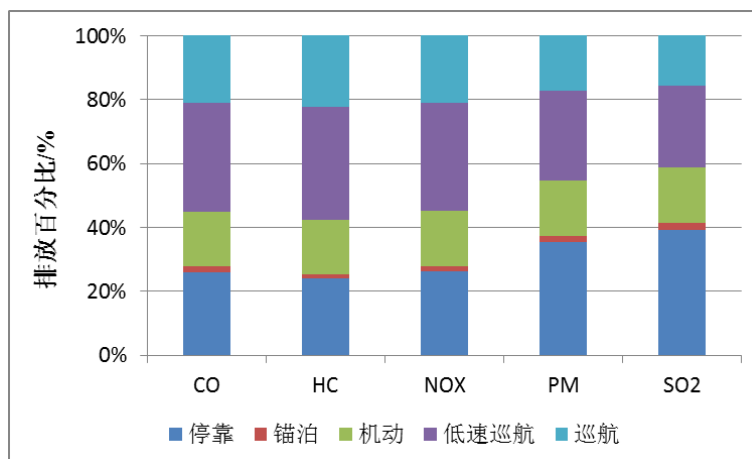


图 16 按航行状态划分的全国船舶排放占比图 (%)

按是否与劳氏数据库匹配看，匹配船占总船数的 8%，匹配条数占总条数的 20%，但匹配船舶排放排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 66.2%、66.6%、66.3%、60.4%、58.3%；未匹配船舶排放排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 33.8%、33.4%、33.7%、39.6%、41.7%。按匹配状态划分的船舶排放占比见图 17。

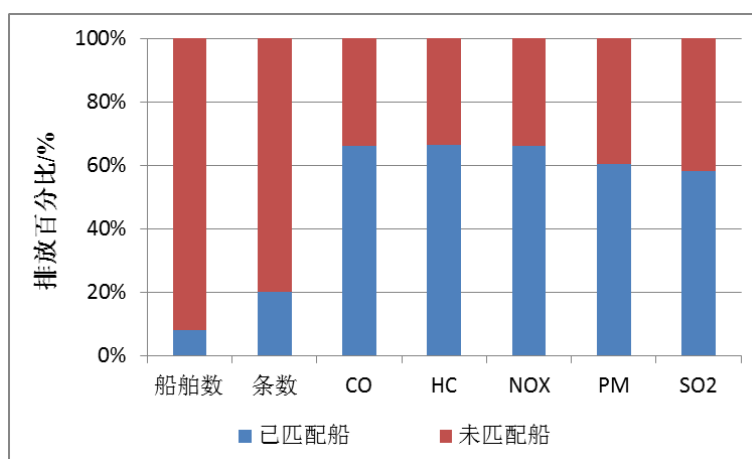


图 17 按匹配状态划分的全国船舶排放占比图 (%)

3.3.2 环渤海海域船舶排放

2014 年，我国环渤海海域沿海及远洋船舶排放五项大气污染物 40.6 万吨。其中，CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别排放 1.5 万吨、0.6 万吨、19.6 万吨、2.0 万吨、SO₂ 16.9 万吨；NO_x、SO₂ 排放分别占全国总排放量的 17.1%、16.9%，详见表 24。

表 24 基于动力法的环渤海海域沿海及远洋船舶排放量 万吨

	一氧化碳	碳氢化合物	氮氧化物	颗粒物	二氧化硫
不插值	1.2	0.5	15.7	1.6	13.5
8 小时插值	1.5	0.6	19.6	2.0	16.9

按发动机类型划分，主发动机排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 59.0%、62.7%、58.4%、47.8%、42.8%；辅助发动机排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 38.2%、33.9%、39.3%、37.1%、37.2%；锅炉排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 2.8%、3.4%、2.2%、15.2%、20.0%。按发动机类型划分的船舶排放占比见图 18。

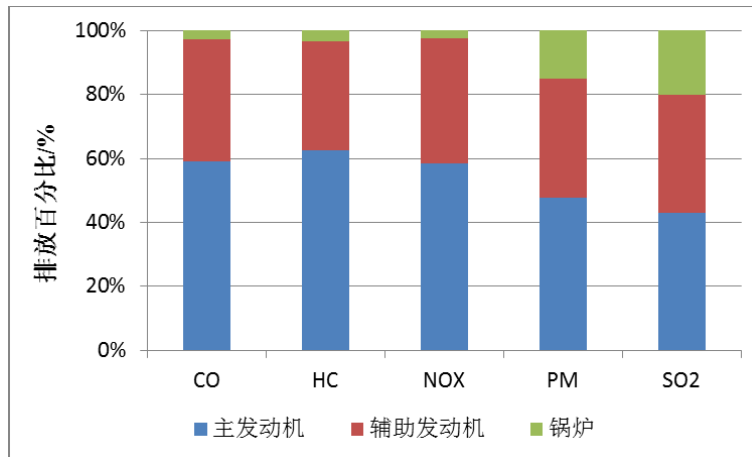


图 18 按发动机类型划分的环渤海海域船舶排放占比图 (%)

按航行状态划分，停靠状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 27.9%、25.5%、28.1%、37.6%、41.8%；锚泊状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 1.8%、1.6%、1.8%、2.3%、2.5%；机动状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 11.3%、11.2%、11.3%、11.3%、11.3%；低速巡航状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排

放量的 35.8%、37.2%、35.7%、29.7%、27.2%；巡航状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 23.3%、24.5%、23.1%、19.0%、17.2%。按发动机类型划分的船舶排放占比见图 19。

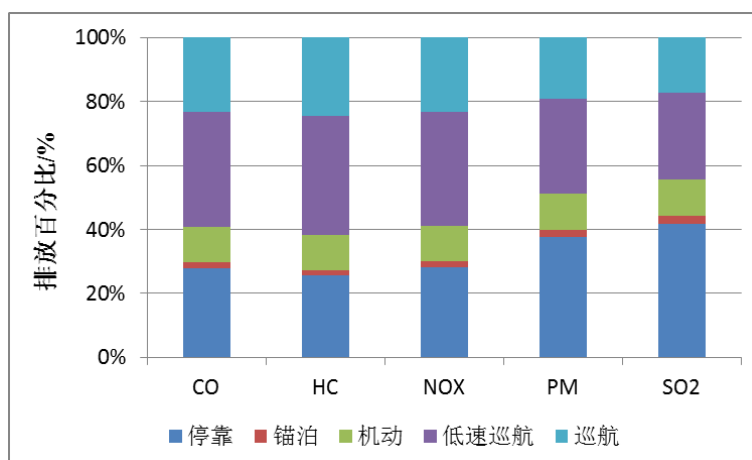


图 19 按航行状态划分的环渤海海域船舶排放占比图 (%)

按是否与劳氏数据库匹配看，匹配船占总船数的 8%，匹配条数占总条数的 20%，但匹配船舶排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 66.2%、66.6%、66.3%、60.4%、58.3%；未匹配船舶排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 33.8%、33.4%、33.7%、39.6%、41.7%。按匹配状态划分的船舶排放占比见图 20。

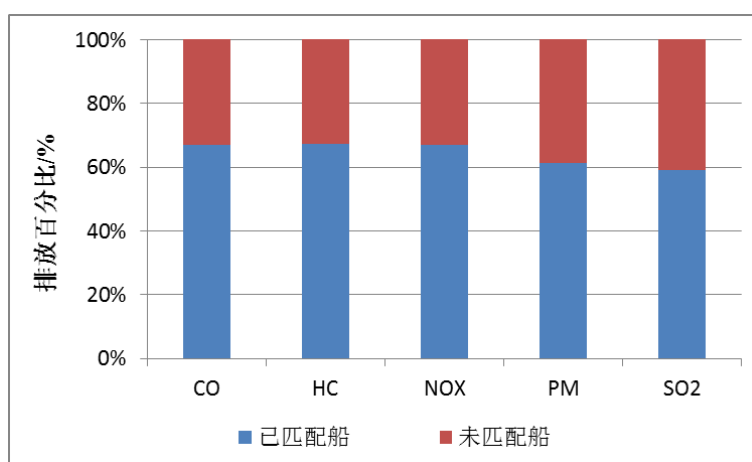


图 20 按匹配状态划分的环渤海海域船舶排放占比图 (%)

3.3.3 长三角海域船舶排放

2014 年，我国长三角海域沿海及远洋船舶排放五项大气污染物 66.0 万吨。其中，CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别排放 2.4 万吨、1.0 万吨、31.3 万吨、3.3

万吨、28.2 万吨；NO_x、SO₂ 排放分别占全国总排放量的 27.2%、18.2%，详见表 25。

表 25 基于动力法的长三角海域沿海及远洋船舶排放量 万吨

	一氧化碳	碳氢化合物	氮氧化物	颗粒物	二氧化硫
不插值	1.9	0.8	24.9	2.7	22.6
8 小时插值	2.4	1.0	31.1	3.3	28.2

按发动机类型划分，主发动机排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 52.7%、56.6%、52.1%、41.8%、37.2%；辅助发动机排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 44.1%、39.4%、45.3%、41.3%、40.8%；锅炉排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 3.2%、4.0%、2.6%、16.9%、22.0%。按发动机类型划分的船舶排放占比见图 21。

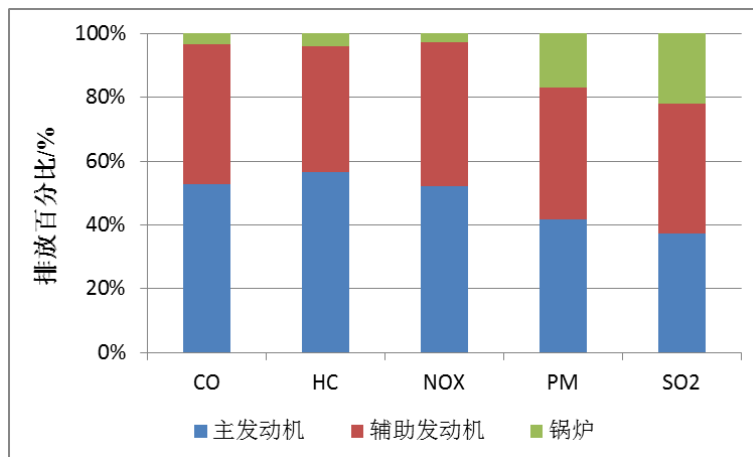


图 21 按发动机类型划分的长三角海域船舶排放占比图 (%)

按航行状态划分，停靠状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 30.6%、28.2%、30.9%、39.8%、43.6%；锚泊状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 1.8%、1.7%、1.8%、2.2%、2.4%；机动状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 19.0%、18.9%、19.0%、18.6%、18.5%；低速巡航状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 30.8%、32.2%、30.6%、24.9%、22.6%；巡航状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 17.8%、19.0%、17.7%、14.4%、12.9%。按发动机类型划分的船舶排放占比见图 22。

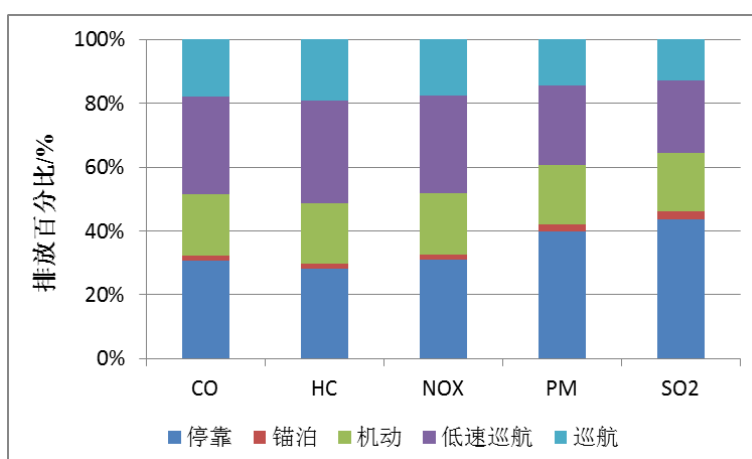


图 22 按航行状态划分的长三角海域船舶排放占比图 (%)

按是否与劳氏数据库匹配看，匹配船占总船数的 8%，匹配条数占总条数的 20%，但匹配船舶排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 62.4%、62.5%、62.5%、57.2%、55.5%；未匹配船舶排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 37.6%、37.5%、37.5%、42.8%、55.5%。按匹配状态划分的船舶排放占比见图 23。

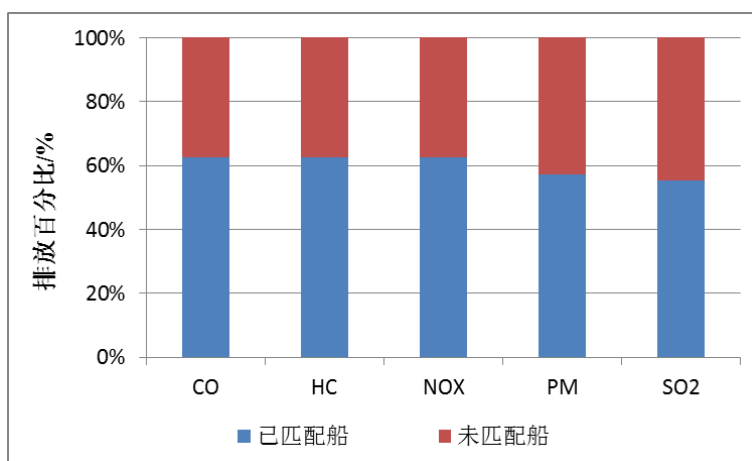


图 23 按匹配状态划分的长三角海域船舶排放占比图 (%)

3.3.4 珠三角海域船舶排放

2014 年，我国珠三角海域沿海及远洋船舶排放五项大气污染物 31.3 万吨。其中，CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别排放 1.1 万吨、0.4 万吨、14.2 万吨、1.6 万吨、13.9 万吨；NO_x、SO₂ 排放分别占全国总排放量的 12.4%、13.9%，详见表 26。

表 26 基于动力法的珠三角海域沿海及远洋船舶排放量

万吨

	一氧化碳	碳氢化合物	氮氧化物	颗粒物	二氧化硫
不插值	0.9	0.4	11.4	1.3	11.2
8 小时插值	1.1	0.4	14.2	1.6	13.9

按发动机类型划分，主发动机排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 44.0%、48.2%、43.3%、34.6%、30.6%；辅助发动机排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 52.1%、46.9%、53.5%、45.8%、44.4%；锅炉排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 4.0%、4.9%、3.2%、19.6%、25.0%。按发动机类型划分的船舶排放占比见图 24。

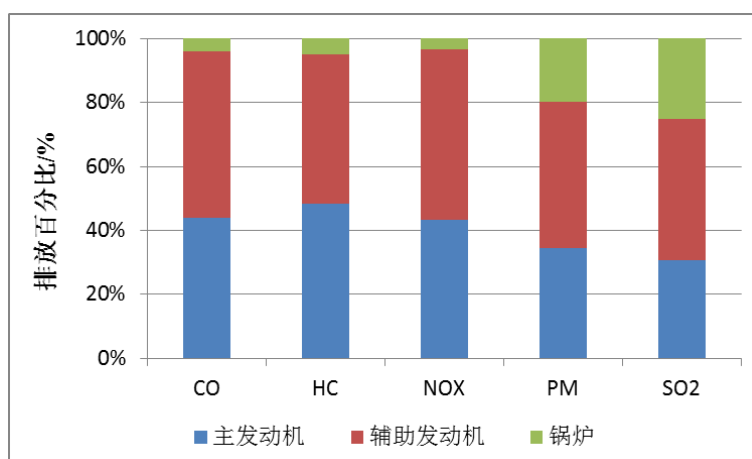


图 24 按发动机类型划分的珠三角海域船舶排放占比图 (%)

按航行状态划分，停靠状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 38.4%、35.6%、38.7%、46.6%、49.9%；锚泊状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 1.7%、1.6%、1.7%、2.0%、2.1%；机动状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 22.7%、22.7%、22.8%、21.8%、21.4%；低速巡航状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 18.1%、19.1%、18.0%、13.8%、12.3%；巡航状态排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 19.1%、21.0%、18.8%、15.9%、14.4%。按发动机类型划分的船舶排放占比见图 25。

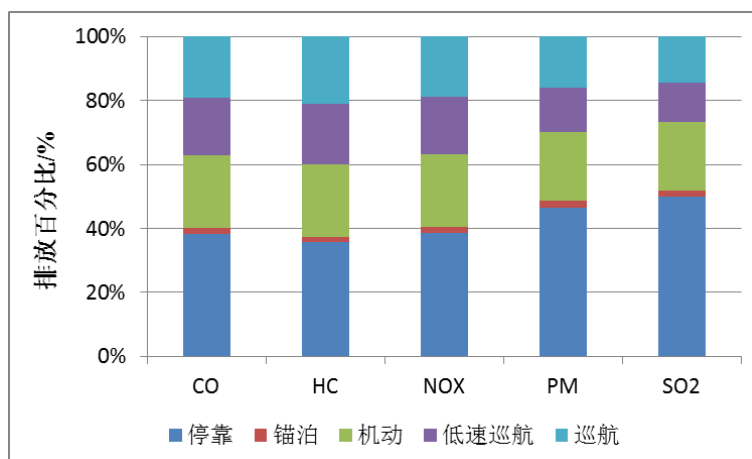


图 25 按航行状态划分的珠三角海域船舶排放占比图 (%)

按是否与劳氏数据库匹配看，匹配船占总船数的 8%，匹配条数占总条数的 20%，但匹配船舶排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 59.6%、60.0%、59.6%、54.8%、53.2%；未匹配船舶排放的 CO、HC、NO_x、PM、SO₂ 分别占总体排放量的 40.4%、40.0%、40.4%、45.2%、46.8%。按匹配状态划分的船舶排放占比见图 26。

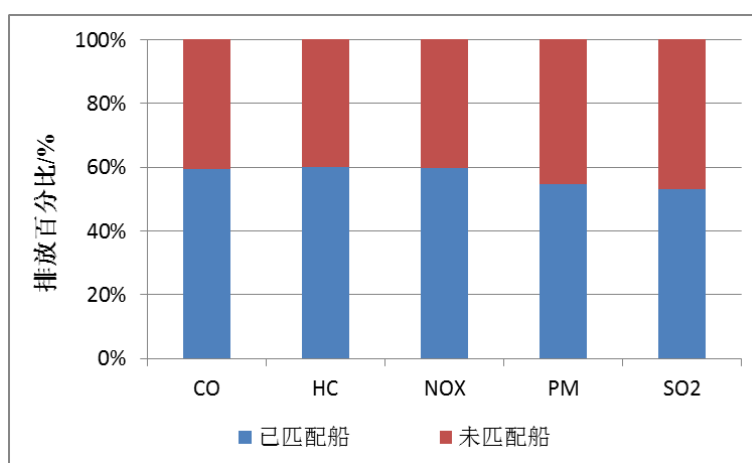


图 26 按匹配状态划分的珠三角海域船舶排放占比图 (%)

3.4 不确定分析

本报告中的清单不确定主要存在以下四方面：缺失数据插值、发动机功率取值、排放因子选取、最大航速确定等。本报告中的 AIS 数据为 1 小时数据，部分小时数据缺失，需要进行插值。插值方法包括随机插值、向上插值或向下插值。不同的插值方法及插值时间会对排放结果产生 5%-35% 的偏差。发动机功率取值产生误差的原因包括：未匹配船主发动机、辅助发动机额定功率取值；已匹配船、

未匹配船锅炉实际功率取值。本报告中的排放因子采用国际研究报告。考虑到国内船舶发动机与国际存在较大差异，船龄较高，燃油品质差等因素，国际船舶排放因子不能代表国内船舶实际排放因子。最大航速用于判定主机负荷功率及航行状态，未匹配船舶的最大航速也是产生误差的重要因素之一。

第四章 总结及建议

4.1 总结

根据国内外研究成果及本国航运业基本情况,建立了内河船舶排放清单测算方法,开发了高精度高时空分辨率的沿海及远洋船舶排放量测算方法。

(1) 基于燃油消耗方法,测算了全国内河船舶排放清单。2015年,我国内河船舶排放五项大气污染物 54.6 万吨,其中,排放 SO₂ 0.5 万吨、CO 15.8 万吨、HC 4.1 万吨、NO_x 31.7 万吨、PM 2.5 万吨。

(2) 基于船舶自动识别信息(AIS)方法,测算了全国沿海及远洋船舶排放量。2014年,我国沿海及远洋船舶排放五项大气污染物 239.2 万吨。其中,CO、HC、NO_x、PM、SO₂分别排放 8.8 万吨、3.6 万吨、114.9 万吨、12.0 万吨、99.9 万吨。

(4) 基于船舶自动识别信息(AIS)方法,测算了环渤海海域沿海及远洋船舶排放量,排放五项大气污染物 40.6 万吨。其中,CO、HC、NO_x、PM、SO₂分别排放 1.5 万吨、0.6 万吨、19.6 万吨、2.0 万吨、SO₂ 16.9 万吨;NO_x、SO₂排放分别占全国总排放量的 17.1%、16.9%。

(5) 基于船舶自动识别信息(AIS)方法,测算了长三角海域沿海及远洋船舶排放量,排放五项大气污染物 66.0 万吨。其中,CO、HC、NO_x、PM、SO₂分别排放 2.4 万吨、1.0 万吨、31.3 万吨、3.3 万吨、28.2 万吨;NO_x、SO₂排放分别占全国总排放量的 27.2%、28.2%。

(6) 基于船舶自动识别信息(AIS)方法,测算了珠三角海域沿海及远洋船舶排放量,排放五项大气污染物 31.3 万吨。其中,CO、HC、NO_x、PM、SO₂分别排放 1.1 万吨、0.4 万吨、14.2 万吨、1.6 万吨、13.9 万吨;NO_x、SO₂排放分别占全国总排放量的 12.4%、13.9%。

(7) 环渤海、长三角、珠三角海域沿海及远洋船舶排放的五项污染物占全国总排放的 57.6%。其中,环渤海、长三角、珠三角海域沿海及远洋船舶排放的NO_x、SO₂分别占全国总排放的 56.7%和 59%。

4.2 建议

基于船舶自动识别信息（AIS）方法是目前国际上正在开发中的船舶排放清单编制方法，应用于我国，存在船舶匹配率低、部分发动机功率丢失、本地化排放因子空缺、部分船舶最大航速缺失等问题，需要在下一步工作中加以完善。

（1）**提升船舶匹配率**。通过购买国内船舶类型数据库，含船舶长度和总吨位的 AIS 数据，提升船舶匹配率。

（2）**强化本地化船舶发动机功率的调查工作**。通过船舶签证数据、检验数据、调查表调查数据，凝练并总结不同船型、不同功率段的船舶辅助发动机、锅炉功率均值。

（3）**加强本地化船舶排放因子测试工作**。基于车载排放测试（PEMS），开发我国不同类型发动机的排放因子。

（4）**开展本地化船舶最大航速调查工作**。通过船舶签证数据、检验数据、调查表调查数据，凝练并总结我国不同船型、不同功率段的船舶最大航速。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 交通运输部. 2014 年国内沿海货运船舶运力情况分析报告 [M]. 2015.03.
- [3] International:IMO Marine Engine Regulations . <http://www.dieselnet.com/standards/inter/imo.php#nox>
- [4] 安迅思.中国燃料油市场年度报告(2015)[M].2015.10.
- [5] Corbett, J.J., Kohler, H.W., 2003. Updated emissions from ocean shipping [J]. *Journal of Geophysical Research* 108 (D20), 4650.
- [6] E.Tzannatos.Ship emissions and externalities for Greece [J]. *Atmospheric Environment* 44 (2010)2194-2202.
- [7] Ndrsen, O., Bakke, J., Sorgard, E., Berglen, T.F., Holmvang, P., 2005. Improved Modeling Of Ship SO₂ Emissions E Fuel-Based Approach [J]. *Atmospheric Environment* 39, 3621e3628.
- [8] Olivier, J.G.J., Van Aardenne, J.A., Dentener, F., Pagliari, V., Ganzeveld, L.N., Peters, J.A.H.W., 2005. Recent trends in global greenhouse gas missions: regional trends 1970e2000 and spatial distribution of key sources in 2000 [J]. *Environmental Sciences* 2 (2e3), 81e99.
- [9] Winther, M., 2008. New national emission inventory for navigation in Denmark [J].*Atmospheric Environment* 42,4632e4655.
- [10]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., 2002. Regional levels of ozone in the troposphere over eastern Mediterranean [J]. *Journal of Geophysical Research* 107 (D18), 8140. doi:10.1029/2000JD000140.
- [11]Psaraftis, H.N., Kontovas, C.A., 2009. CO₂ emission Statistics for the world Commercial fleet WMU [J]. *Journal of Maritime Affairs* 8, 1e25.
- [12]Eyring, V., Kohler, H.W., Van Aardenne, J., Lauer, A., 2005a. Emissions from international shipping: 1. The last 50 years [J]. *Journal of Geophysical Research* 110 (D17305).
- [13]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.
- [14]Schrooten, L., De Vlieger, I., Panis, L.I., Chiffi, C., Pastori, E., 2009. Emissions of maritime transport: a European reference system [J]. *Science of the Total Environment* 408, 318e323.
- [15]Wahlstrom, J., Karvosenoja, N., Porvari, P., 2006. Ship Emissions and Technical Emission Reduction Potential in the Northern Baltic Sea [J]. *Finnish Environment Institute, Helsinki*.
- [16]Vestreng, V., Mareckova, K., Kakareka, S., Malchukhina, A., Kukharchyk, T., 2007.Inventory Review 2007; Emission Data reported to LRTAP Convention and NEC Directive, MSC-W Technical Report 1/07, The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway.
- [17]Concawe, 2007. Ship Emissions Inventory-Mediterranean Sea [R]. April 2007. Entec UK Limited, vol. 47, pp. 7160.
- [18]Winther, M., 2008. New national emission inventory for navigation in Denmark [J].*Atmospheric Environment* 42, 4632e4655.
- [19]Schrooten, L., De Vlieger, I., Panis, L.I., Styns, K., Torfs, R., 2008. Inventory and forecasting of maritime emissions in the Belgian sea territory, an activity-based emission model [J]. *Atmospheric Environment* 42, 667e676.
- [20]Tzannatos, E., 2010. Ship emissions and their externalities for the port of Piraeuse Greece [J]. *Atmospheric Environment* 44, 400e407.
- [21]De Meyer, P., Maes, F., Volckaer, A., 2008. Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaports [J]. *Atmospheric Environment* 42, 196e206.
- [22]Deniz, C., Durmusoglu, Y., 2008. Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey. *The Science of the Total Environment* 390, 255e261. EEA, 2006. *The Changing Faces of Europe's Coastal Areas*. Report No 6/2006. EEA (European Environment Agency) and OPOCE (Office for Official Publications of the European Communities).
- [23]Saxe, H., Larsen, T., 2004. Air pollution from ships in three Danish ports [J]. *Atmospheric Environment* 38, 4057e4067.
- [24]Isakson, J., Persson, T.A., Lindgren, E.S., 2001. Identification and assessment of ship emissions and their effects in the harbour of Goteborg, Sweden [J]. *Atmospheric Environment* 35, 3659e3666.
- [25]Kesgin, U., Vardar, N., 2001. A study on exhaust gas emissions from ships in Turkish Straits [J]. *Atmospheric Environment* 35, 1863e1870.
- [26]Trozzi,C., Vaccaro, R., Nicolo, L., 1995. Air pollutants emissions estimate from maritime traffic in the Italian harbours of Venice and Piombino [J]. *The Science of the Total Environment* 169, 257e263.
- [27]Third IMO Greenhouse Gas Study 2014 Executive Summary and Final Report International Maritime Organization, 2015.
- [28]USEPA. Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories[M]. 2009.09.
- [29]STARCREST CONSULTING GROUP, LLC. Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions 2005[M].
- [30]Entec UK limited. Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community
- [31]Ng S. 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.

- [32]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.
- [33]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.
- [34]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.
- [35]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.
- [36]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
- [37]Yang D-q, Kwan SH, Lu T, Fu Q-y, Cheng J-m, Streets DG, et al. An Emission Inventory of Marine Vessels in Shanghai in 2003 [J]. Environmental Science & Technology 2007; 41: 5183-5190.
- [38]郑岩. 渤海湾远洋船舶排放清单[M]. 北京, 2016.10.
- [39]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.
- [40]European Environment Agency. European Union emission inventory report 1990-2009 under the UNECE Convention on long-range Transboundary Air Pollution(LRTAP) [M]. 2015.03.
- [41]Huan Liu, Mingliang Fu etc. Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia[J]. nature climate change, 2016.7.18.