



# 广东省典型港口船舶大气污染特征及 控制对策研究报告

Research of Typical Port Motor Vessel Exhaust Pollution Control  
Countermeasures for Guangdong Province

广东省环境科学研究院  
2014.12.15

本报告由能源基金会资助。

报告内容不代表能源基金会观点。

# 目录

一、绪论 .....	1
1.1. 研究背景 .....	1
1.1.1. 区域概况.....	1
1.1.2. 广东省港口船舶大气污染控制存在的问题 .....	2
1.2. 目的意义 .....	2
1.2.1. 主要目的.....	2
1.2.2. 必要性和意义.....	3
1.3. 研究方法和技术路线.....	4
1.3.1. 研究方法.....	4
1.3.2. 技术路线.....	5
二、典型港口概况 .....	6
2.1. 广东省港口码头概况.....	6
2.2. 典型沿海港口 .....	7
2.3. 典型内河港口 .....	7
三、到港船舶排放分析 .....	9
3.1. 排放量计算方法.....	9
3.1.1. 燃油消耗量计算法.....	9
3.1.2. 动力计算法.....	9
3.2. 排放因子数据确定.....	10
3.2.1. 排放测试实验.....	10
3.2.2. 文献因子.....	11
3.3. 活动水平数据 .....	12
3.4. 典型港口排放结果.....	18
3.4.1. 沿海港 .....	18
3.4.2. 内河港 .....	24
四、作业机械排放分析 .....	29
4.1. 排放量计算方法.....	29
4.2. 排放因子数据确定.....	29
4.2.1. NONROAD 模型 .....	29
4.2.2. 排放因子计算结果.....	30
4.3. 活动水平数据确定.....	31
4.4. 典型港口排放结果.....	33
4.4.1. 沿海港 .....	33

4.4.2.	内河港 .....	36
五、	运输车辆排放分析 .....	38
5.1.	排放量计算方法.....	38
5.2.	排放因子数据确定.....	38
5.2.1.	COPERT IV 模型.....	38
5.2.2.	排放因子计算结果.....	39
5.3.	活动水平数据确定.....	39
5.3.1.	沿海港 .....	39
5.3.2.	内河港 .....	40
5.4.	典型港口排放结果.....	41
5.4.1.	沿海港 .....	41
5.4.2.	内河港 .....	42
六、	典型港口污染排放特征及影响分析.....	43
6.1.	沿海港 .....	43
6.2.	内河港 .....	47
6.3.	小结 .....	52
七、	广东省港口船舶排气污染控制建议.....	53
7.1.	远洋船舶排气污染控制措施建议.....	53
(1)	泊岸转换低硫油.....	53
(2)	加强港口岸电建设.....	54
(3)	探索珠三角地区设立排放控制区的可行性 .....	55
7.2.	内河及沿海船舶排气污染控制措施建议.....	56
(1)	加强燃油硫含量控制以及 LNG 等新能源的推广.....	56
(2)	加快船型标准化建设和老旧船舶报废更新 .....	57
(3)	推进先进技术应用及船舶排放黑烟监管 .....	58
7.3.	港口作业机械污染排放控制.....	59
7.4.	进出港运输车辆排放控制措施建议.....	60

# 一、绪论

## 1.1. 研究背景

### 1.1.1. 区域概况

广东省地处我国大陆的南部，位于东经 109°45'—117°20'和北纬 20°09'—25°31'之间。陆域东邻福建，北接江西、湖南，西连广西，南临南海，西南端隔琼州海峡与海南省相望。面积约 18 万平方公里，约占全国陆地面积的 1.85%；大陆海岸线长约 3400 公里，居全国第一位，沿海岛屿约 760 个(不包括香港、澳门地区)；境内港湾众多，河流纵横交错，内陆江河，主要有珠江、韩江、漠阳江和鉴江等。广东地势北高南低，北依五岭，南濒南海，东西向腹部倾斜。境内山地、平原、丘陵纵横交错。广东省包括广州、深圳 2 个副省级市、19 个地级市，23 个县级市、54 个市辖区、44 个县(其中 3 个民族自治县)。截至 2013 年末，广东省常住人口超过 1 亿。广东是经济大省，改革开放以来，国民经济持续快速发展，2013 年 GDP 达 6.2 万亿元，继续居全国首位，在全国经济社会发展和改革开放大局中具有突出的带动作用 and 举足轻重的战略地位。

随着经济社会的不断发展，广东省的大气污染问题日益凸显，特别是珠三角地区的大气污染已经转变为复合型污染，光化学烟雾、灰霾、酸雨等污染现象屡见不鲜，PM<sub>2.5</sub> 和臭氧成为主要的超标污染物。移动源是广东省大气污染物的主要来源之一，其中机动船舶的污染物排放也占相当数量。据调查，2013 年全年水路运输完成货运量 6.84 亿吨，货物周转量超过 9100 亿吨公里，分别占全省货运总量的 22.4%和货物总周转量的 72.9%，水路货运量大，作用突出。机动船舶及港区作业机械等排放的二氧化硫、颗粒物和氮氧化物等大气污染物对环境的影响逐渐凸显。随着机动车排放标准的不断提高，道路移动源的大气污染物排放正逐步得到控制，但船舶及港区作业机械等非道路移动源的大气污染排放还缺乏有效管理和控制。

### **1.1.2. 广东省港口船舶大气污染控制存在的问题**

广东是港口大省，“十五”以来，港口行业随着社会经济稳定增长而迅速发展，2000年广东港口货物吞吐量3.16亿吨，2013年增长至15.64亿吨，13年间年均增长13%。伴随着港口建设和生产规模的不断增大，全省港口泊位数量众多，省内行驶或停靠船舶数量庞大，港区作业机械、进出港运输车辆等数量可观，货运量不断增长，港口行业能源、资源消耗规模及污染物排放量增长趋势明显。

由于广东省的远洋、沿海和内河航运均非常发达，船舶类型复杂，目前对不同船型的实际航行工况、污染排放因子、大气污染物排放量等缺乏了解和认识，同时对港区作业机械、进出港运输车辆的实际排放情况也不掌握。现状不明导致港口及船舶大气污染控制相关对策措施、法规标准的制定和实施缺乏重要基础和依据，海事、交通、环保、渔业等相关管理部门对港口船舶、机械和车辆的排气污染管理和控制也存在很大困难。因此，广东省（乃至全国）针对港口船舶能源消耗水平控制和大气污染物排放的控制对策和措施还比较少。而港口船舶排气污染控制对策及相关管理措施的不足，不利于对港口和船舶排气污染实施控制和减排，不利于区域大气污染减排工作的推进和区域空气质量的改善。

## **1.2. 目的意义**

### **1.2.1. 主要目的**

通过编制广东省典型沿海和内河港口包括船舶、进出港运输车辆、作业机械等的大气污染物排放清单，分析典型港口船舶大气污染物排放特征及其对所在城市及区域的污染影响，加强相关管理部门和港口经营管理单位对港口船舶大气污染的认识，推动全省加快港口船舶排放清单的建立及区域大气污染源清单的完善。结合国内外港口船舶大气污染控制所采取的主要措施，针对广东省港口船舶大气污染控制管理现状及存在问题，分析提出相应的船舶大气污染控制对策及粤港澳区域共同防治港口船舶大气污染的建议，推动广东省或粤港澳地区在“十三五”期间逐步加强对船舶和港口的排放研究，适时出台相应的港

口船舶大气污染防治政策，加强港口船舶大气污染防治，改善区域环境空气质量。

### 1.2.2. 必要性和意义

开展广东省港口船舶大气污染物排放量及污染控制措施研究是改善区域空气质量的基础需求。随着广东省航运业的发展，港口建设和生产规模不断增大，船舶、港区机械、进出港运输车辆等的污染物排放量增大，对周边区域大气环境质量的影响不容忽视。《广东省大气污染防治行动计划（2014-2017）》提出到 2017 年全省空气质量明显好转，重污染天气较大幅度减少，优良天数逐年提高，全省可吸入颗粒物年均浓度比 2012 年下降 10%，力争珠三角区域细颗粒物年均浓度在全国重点控制区域率先达标，年均浓度比 2012 年下降 15%左右，臭氧污染形势有所改善。对于珠三角地区目前较为突出的 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染现状，减排及改善大气环境质量任务艰巨。

开展广东省港口船舶大气污染物排放量及污染控制措施研究也是国家航运业绿色发展的需求。“十二五”以来国家积极推进绿色港口建设，《绿色港口等级评价标准》对港口及船舶的节能减排提出了明确的指标要求，交通运输部印发《公路水路交通运输节能减排“十二五”规划》要求到 2015 年港口生产单位吞吐量综合能耗与 2005 年相比下降 8%，CO<sub>2</sub> 排放下降 10%；广东省积极推进交通领域节能减排及绿色港口建设，《广东省交通运输“十二五”节能减排发展规划》、《广东省绿色港口行动计划（2014-2020）》相继印发，对加强船舶污染防治、推进绿色港口建设提出了明确要求，到 2015 年广东省内港口生产单位吞吐量综合能耗比 2005 年下降 8%，CO<sub>2</sub> 排放比 2005 年分别下降 10%，5 个以上的码头成为绿色港口星级码头，到 2020 年 100 个以上的码头成为绿色港口星级码头。

但目前广东省仍存在港口船舶的大气污染物排放情况不明，缺乏相应管理对策的问题，故本课题以广东省典型沿海和内河港口为例，开展到港船舶、进出港运输车辆、港区作业机械等的基本信息及活动水平调研，测算典型港口船舶大气污染物排放量，初步摸清广东省典型港口船舶大气污染物排放特征及影响，加深各有关管理部门和利益相关者对港口船舶排气污染现状的认识，是推

动港口船舶排气污染控制对策制定的重要基础。结合港口船舶大气污染物排放量及排放特征，通过港口船舶大气污染控制管理现状调研，理清港口船舶排气污染管理存在的问题和不足，提出加强港口船舶大气污染排放控制的对策措施，将可为环保、交通、海事及港口经营方等在加强港口船舶大气污染减排和绿色港口建设等方面提供有益的政策建议和技术支持，为加强区域移动源大气污染防治、建设全面的移动源大气污染防治体系提供坚实基础，对削减大气污染物、改善区域空气质量、保障公众健康具有十分重要的意义。

### **1.3. 研究方法和技术路线**

#### **1.3.1. 研究方法**

1、通过对全省所有港口泊位的属性、类型、通过能力、吞吐量等基础信息的调查收集和对比分析，分别选取珠江三角洲地区的典型沿海港和内河港作为本项目的研究对象。

2、通过实地调研、问卷调查和港口经营方座谈等方式，获取到港船舶类型和艘次、进出港运输车辆类型和台次、作业机械类型及保有量等基本信息；通过实地调研和资料收集等方式，获取进出港运输车辆技术水平分布和行驶速度、等待时间等活动水平数据，作业机械发动机功率信息及运行时间、燃油消耗量等活动水平数据。

3、通过问卷调查以及与交通、海事等管理部门、船东协会、中远航运等船舶公司以及相关港口管理单位等多方的联系沟通和实地调研，获取一定时段内逐艘次到港船舶的类型、吨位、主机功率、进出港时间等基本信息，内河船舶、远洋船舶的活动水平信息等。

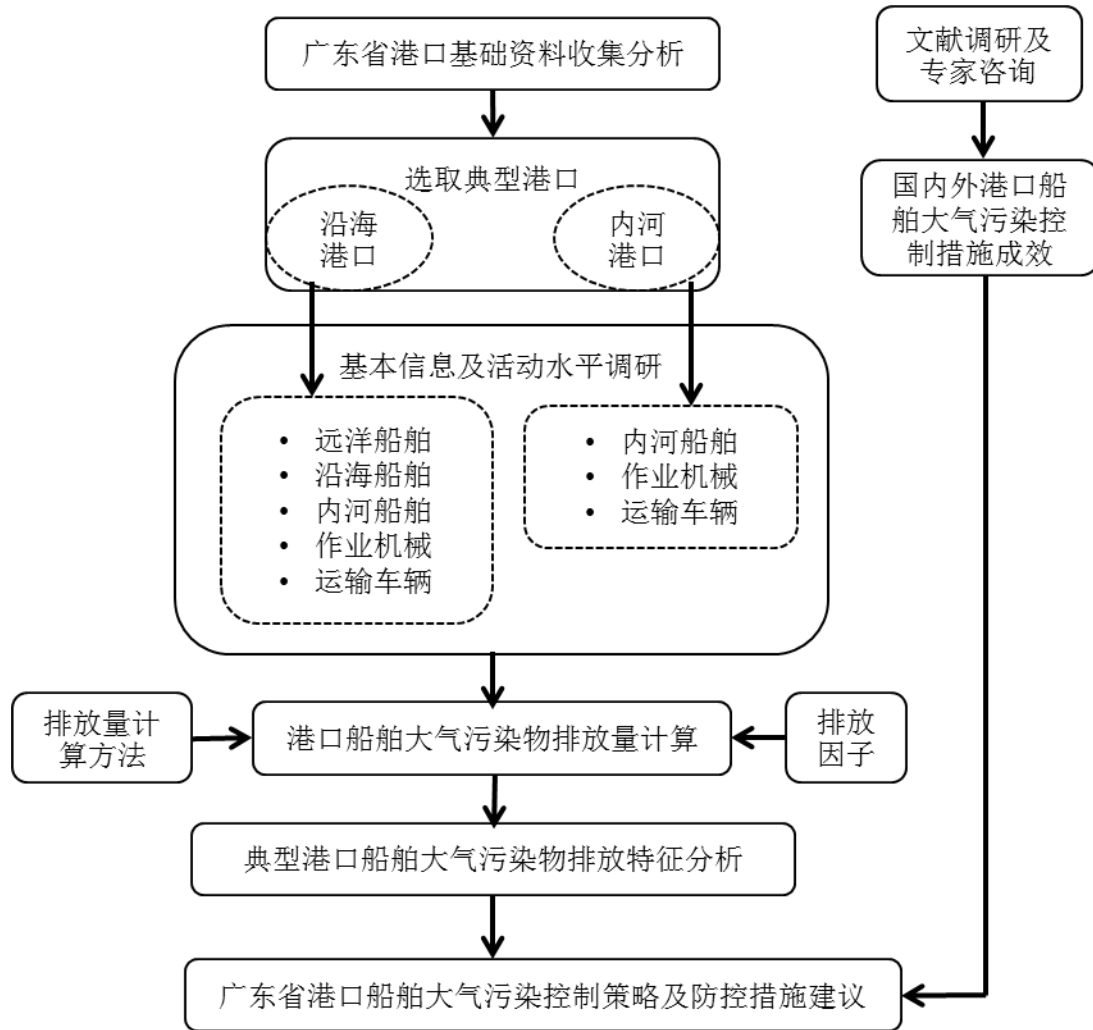
4、通过排放测试、文献调研、专家咨询及模型模拟计算等方法获取远洋船舶、内河船舶、进出港运输车辆、作业机械等的大气污染物排放因子。

5、结合调查获取的基本信息、活动水平调研结果以及排放因子，利用不同排放量计算方法分别计算沿海和内河港到港船舶、港区作业机械、进出港运输车辆等在不同范围内的大气污染物排放量，并分析排放特征。



6、通过文献调研、专家咨询、以及与港口、船舶相关管理方沟通交流，结合沿海港及内河港大气污染物排放量及排放构成，提出加强港口及船舶排气污染控制措施建议。

### 1.3.2. 技术路线



## 二、典型港口概况

### 2.1. 广东省港口码头概况

截至 2013 年底，广东省共有码头泊位超过 3100 个，分属 100 余个港区，其中沿海港口泊位近 2000 个，内河港口泊位 1100 余个。2013 年广东省港口货物吞吐量达 15.6 亿吨（其中沿海 13.1 亿吨，内河 2.5 亿吨），从 2000 年起年均增长 13%；2014 年 1-9 月规模以上港口货物吞吐量同比增长 5.0%。

广东省沿海港口泊位的用途类型如图 2-1 所示，主要泊位用途为通用件杂货泊位、成品油泊位、集装箱泊位和多用途泊位，四种泊位占广东省沿海港口泊位总数的 61%。内河港口泊位的用途类型如图 2-2 所示，与沿海港口泊位用途分布不同，主要为通用散货泊位，占比 39%，其次为成品油泊位、通用件杂货泊位和集装箱泊位，四种泊位共占广东省内河港口泊位总数的 71%。

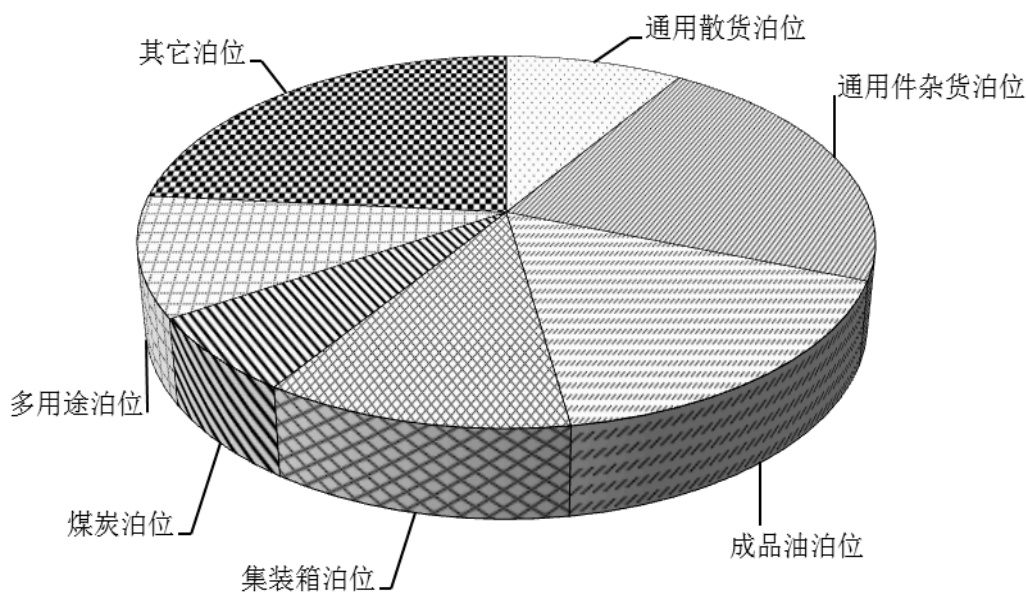


图 2-1 广东省沿海港口泊位用途分布

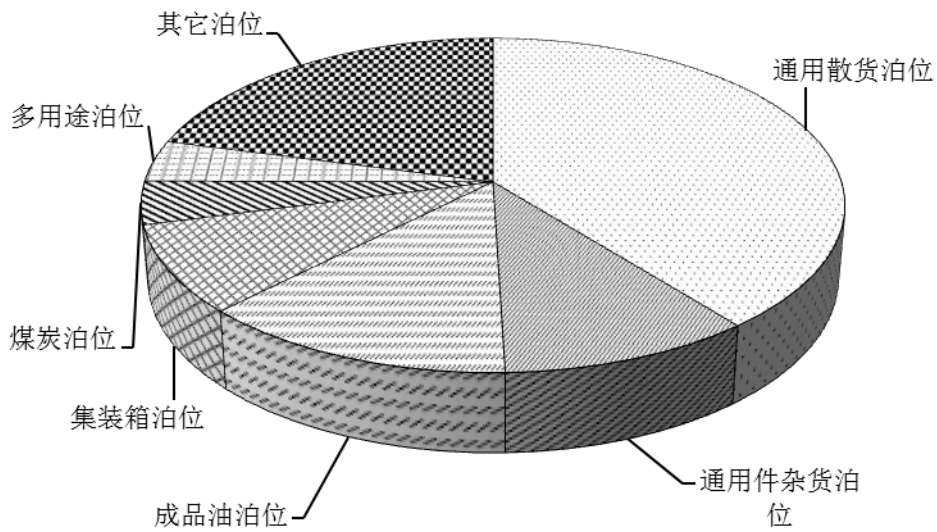


图 2-2 广东省内河港口泊位用途分布

通过对全省所有港口泊位的属性、类型、通过能力、吞吐量等基础信息的调查收集和对比分析，以规模较大、用途类型较丰富、具有典型代表性等原则，分别选取了珠江三角洲地区的一个沿海港（以 A 表示）和三个内河港（分别以 B1、B2 和 B3 表示）作为本项目典型沿海港和内河港的研究对象。

## 2.2. 典型沿海港口

本研究选定的沿海港口地处珠江三角洲几何位置中心，是规模比较大、现代化程度比较高的港区，在本报告以 A 港口表示。港区内共有 24 个泊位，其中 3.5 万吨以上的深水泊位 10 个，泊位用途类型多样，包括集装箱、煤炭、散装粮食、通用件杂货、通用散货、液体化工等，年吞吐量近 6000 万吨，是华南地区最大内陆港。

## 2.3. 典型内河港口

本次内河港口排放研究以珠三角河网地区的某港区内的三个货运港口为代表，在本报告以 B1、B2 和 B3 表示，整体以 B 表示。其中 B1 港共有 10 个泊位，包括 9 个集装箱泊位和 1 个件杂货泊位，货物年吞吐量超过 200 万吨，B2 港共有 7 个泊位，包括 4 个集装箱泊位和 3 个通用散货泊位，货物年吞吐量

近 80 万吨，B3 港共有 8 个泊位，分为集装箱泊位和通用散货泊位，货物年吞吐量约 150 万吨。B 港共有泊位 25 个，货物吞吐量 430 万吨。

### 三、到港船舶排放分析

结合国内外研究基础及课题组已开展的船舶排放测试结果，对于内河及沿海船舶排放量计算采用燃料消耗法和动力法两种方法进行对比验证，排放因子分别采用修正后的文献因子和本地的船舶尾气排放测试试验因子。由于暂未开展远洋船舶排放测试试验，针对远洋船舶排放量只采用动力法进行计算，排放因子采用文献因子法。结合大量活动水平调研结果，计算得到了典型沿海港和内河港的船舶二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等大气污染物排放量。

#### 3.1. 排放量计算方法

##### 3.1.1. 燃油消耗量计算法

燃油消耗量计算法是根据船舶消耗的燃料量来计算大气污染物各成分的排放量，即将基准年运输船舶的总燃料消耗量乘以各类大气污染物排放系数，得到基准年运输船舶的各类大气污染物排放量。计算公式如下：

$$I_a = W \times E_{fa}$$

其中， $I_a$ 为污染物 a 的基准年排放量，单位：t/a； $W$ 为燃油消耗量，单位： $10^6$ L/a； $E_{fa}$ 为污染物 a 的排放系数。

##### 3.1.2. 动力计算法

动力法即基于船舶发动机做工状况对船舶排放进行计算，首先需确定船舶发动机（包括主机、辅机和锅炉）在不同运行工况下的运行功率，根据排放因子及相应的发动机负载校正因子、油品校正因子，结合对应工况下的运行时间计算得到排放量。

- 船舶发动机排放量计算公式为：

$$E = W \times EF \times FCF \times CF \times 10^{-6}$$

其中，E 为污染物排放量，t/a；W 为船舶发动机所做的功 kwh；EF 为排放因子，g/(kwh)；FCF 为燃料修正因子；CF 为排放控制因子（使用了减排措施后的变化）。

- 船舶发动机做功 W 的计算公式为：

$$W = MCR \times LF \times Act$$

其中，MCR 为发动机额定功率，kw；LF 为负载因子（平均负荷与最大负荷的比值）；Act 为工作时间。

- 排放因子修正公式为：

$$EF = EF_0 \times LLA$$

其中，EF<sub>0</sub>为基础排放因子，g/(kwh)；LLA 为低负载调整系数。

## 3.2. 排放因子数据确定

### 3.2.1. 排放测试实验

组内其他课题根据对广东省内河船舶数量、类型、船龄和功率的调查分析，按功率大小和船龄长短分别对广东省内河客船和货船选择测试样船，完成了 2 艘内河客船、4 艘内河货船的排放测试。

表 3-1 测试船舶基本情况

编号	船舶类型	发动机生产厂商	生产日期	型号	主机数量
1	客船	东风	1982.9	6135Aca	单机
2	客船	东风	1983.11	6136Acaf	单机
3	货船	潍柴	1994.6	6160A	双机
4	货船	康明斯	2004.12	NTA55-M350	双机
5	货船	潍柴	2007.05	R6160A-4	双机
6	货船	潍柴	2007.05	R6160A-5	双机

依据测试结果计算获取了基于燃油消耗的内河船舶排放因子，如表 3-2 所示。

表 3-2 基于燃油消耗的内河船舶排放因子

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

### 3.2.2. 文献因子

依据香港船舶排放清单报告<sup>1</sup>获取了远洋船舶主机、辅机、锅炉在燃用含硫率 2.7%重油下的排放因子，内河船舶燃用含硫率 0.5%轻柴油下的排放因子，以及油品校正因子和发动机低负载校正因子，如表 3-3 至 3-6 所示。

表 3-3 远洋船舶排放因子 (g/kwh)

排放因子	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	CO	HC
主机	1.42	1.31	18.10	10.29	1.40	0.60
辅机	1.44	1.32	14.70	11.98	1.10	0.40
锅炉	0.80	0.60	2.10	16.10	0.20	0.10

注：船用燃料为重油，含硫率 2.7%下的排放因子

表 3-4 内河船舶排放因子 (g/kwh)

发动机类型	燃料种类	含硫率%	排放因子					
			PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	HC
主机 (Cat.1)	轻柴油	0.5	0.30	0.29	10.0	2.08	1.5	0.27
主机 (Cat.2)	轻柴油	0.5	0.72	0.70	13.2	2.08	1.1	0.5

注：Cat.1 表示除了总吨位≥1000 的油轮和拖船之外的内河货船，Cat.2 表示总吨位≥1000 的油轮和拖船

表 3-5 燃油校正因子

燃油种类	含硫率	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	CO	HC
重油	1.00%	0.73	1	0.370	1	1
船用柴油/轻柴油	0.50%	0.25	0.94	0.185	1	1
船用柴油/轻柴油	0.20%	0.19	0.94	0.074	1	1
船用柴油/轻柴油	0.10%	0.17	0.94	0.037	1	1

<sup>1</sup> Study on Marine Vessels Emission Inventory Final Report, February 2012

表 3-6 低负载校正因子

负载率	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	CO	HC
2%	7.29	4.63	1	9.70	21.18
3%	4.33	2.92	1	6.49	11.68
4%	3.09	2.21	1	4.86	7.71
5%	2.44	1.83	1	3.90	5.61
6%	2.04	1.60	1	3.26	4.35
7%	1.79	1.45	1	2.80	3.52
8%	1.61	1.35	1	2.45	2.95
9%	1.48	1.27	1	2.18	2.52
10%	1.38	1.22	1	1.97	2.18
11%	1.30	1.17	1	1.79	1.96
12%	1.24	1.14	1	1.64	1.76
13%	1.19	1.11	1	1.52	1.60
14%	1.15	1.08	1	1.41	1.47
15%	1.11	1.06	1	1.32	1.36
16%	1.08	1.05	1	1.24	1.26
17%	1.06	1.03	1	1.17	1.18
18%	1.04	1.02	1	1.11	1.11
19%	1.02	1.01	1	1.05	1.05
20%	1	1	1	1	1

### 3.3. 活动水平数据

通过与交通、海事等管理部门、船东协会、中远航运等船舶公司以及相关港口管理单位等多方的联系沟通和实地调研，开展了大量的内河船舶、远洋船舶等的活动水平调研及相关统计数据收集整理工作。通过港口管理方和海事部门调研获取了 2013 年全年到港船舶数量和典型时段内逐艘次实际到港船舶的基本信息（主要包括船舶名称、类型、吨位、主机功率、进出港时间等）。通过问卷调查、实地访谈调研及数据资料搜集的方式，调查收集了 100 余艘内河、40 余艘远洋等船舶的活动水平数据，分析得到不同船舶的设计航速、平均航速、航行时间、不同功率等级下主发动机的平均小时油耗水平、不同工况下开机时长等基本信息，并利用网络资源和相关研究结果进行补充完善。

通过问卷调查的方式获取内河船舶活动水平情况，共收回有效问卷 115 份。内河船舶平均总长 55 米、总宽 14 米，船舶平均总吨位约 1150 吨、载重吨位约 1300 吨，单航次平均运行时间 12 小时，单航次平均停泊时间 14 小时。主发动机平均总额定功率约 490 千瓦，辅助发动机平均总额定功率约 100 千瓦，燃料类型主要为 0#轻柴油。



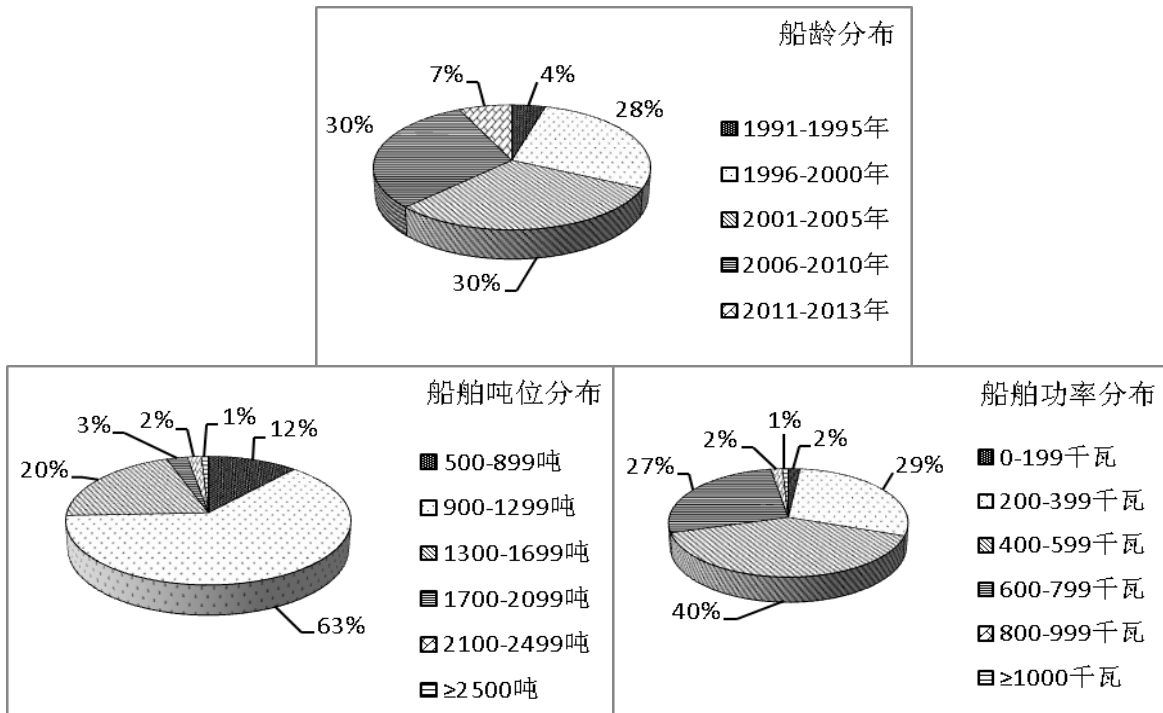


图 3-1 调查获取的内河船舶基本信息

鉴于实际获取每艘到港船舶功率数据工作繁琐而且较难实现的现状，为使研究结果更具推广性，根据 100 余艘船舶调研结果，获取广东省内河船舶总吨位和总额定功率之间的相互关系，如下所示：

$$Power = 379.31 \times \ln(Tonnage) - 2166.1$$

其中，Power 为船舶发动机总额定功率，单位 kw；Tonnage 为船舶总吨位，单位 t。

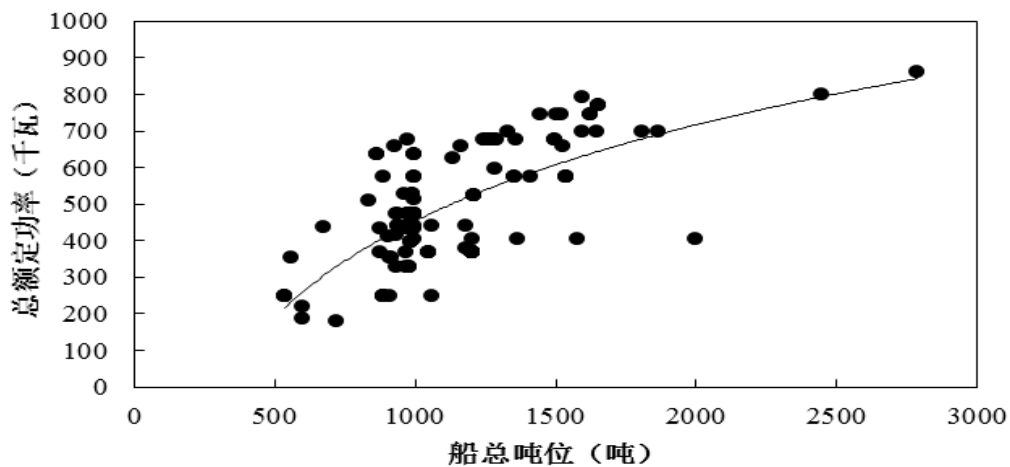


图 3-2 内河船舶额定功率与船舶总吨位相互关系

通过调查的 100 余艘内河船舶航行状态下主机额定功率与实际运行功率的比较，获取内河船舶主机负载率信息，负载率平均值为 80.5%。

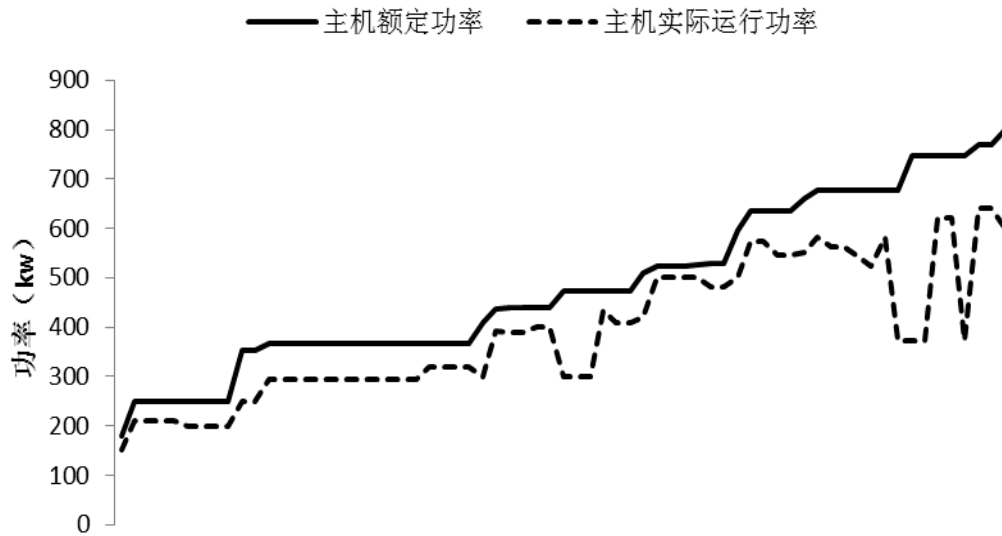


图 3-3 内河船舶主机额定功率与实际运行功率

100 余艘内河船舶的航行速度分布如图 3-4 所示，主要集中于 6.0~8.0 海里/小时，平均航行速度为 6.8 海里/小时。

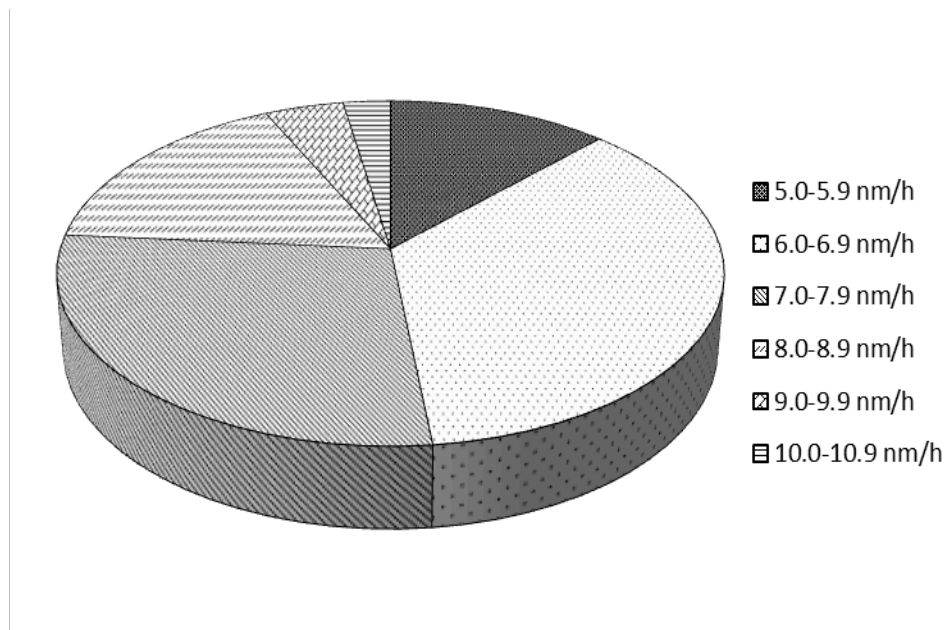


图 3-4 内河船舶实际运行速度分布

调查问卷同时获取了主机的油耗水平，小时油耗量与功率大小有直接关系，将主机额定功率进行区间划分，统计得到每个区间范围内的油耗水平，如图 3-5 所示。

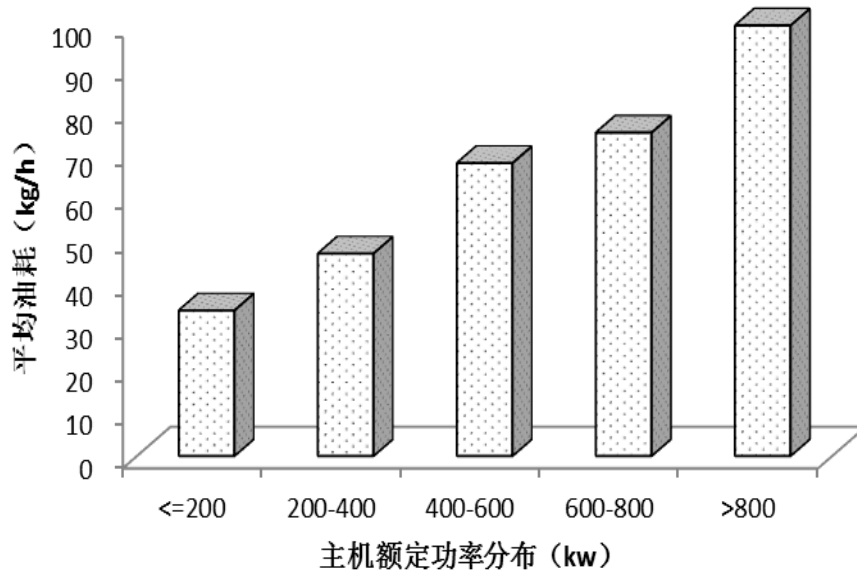


图 3-5 不同功率等级内河船舶平均小时油耗量

课题组在上一年度的项目研究中曾采回 15 份船用柴油油样，并进行了船用柴油的硫含量分析。结果表明，船用柴油的硫含量质量分数在 0.1%以下的占 27%，在 0.1%~0.2%之间的占 56%，在 0.2%以上的占 17%。

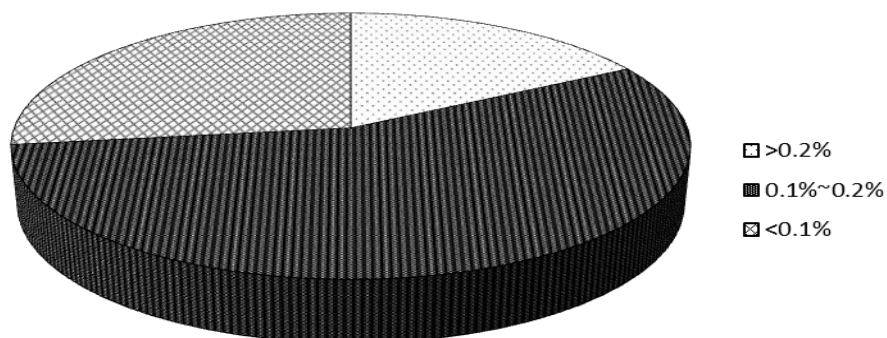


图 3-6 内河船舶燃油含硫量分布

调查获取了典型时段（一个自然月）内，三个内河港 B1、B2 和 B3 的逐艘次到港船舶基本信息以及沿海港口 A 的逐艘次到港沿海和内河船舶基本信息，依据内河船舶活动水平调研结果中燃油消耗统计对应的额定功率划分方法进行实际到港船舶划分和数据统计。三个内河港 B1、B2 和 B3 实际到港船舶的功率分布及平均值如表 3-7 所示，由于 A 港为沿海港口，将国内到港船舶分为沿海和内河两种，船型相对较大，尤其是沿海船舶，因此，将额定功率在 800kw 以上的船舶进行了详细划分，沿海港口 A 的统计结果如表 3-8 所示。

表 3-7 三个内河港口到港船舶额定功率分布

额定功率分布	B1 港		B2 港		B3 港	
	百分比	平均功率(kw)	百分比	平均功率(kw)	百分比	平均功率(kw)
<=200	31.0%	91	1.5%	181	17.1%	115
200-400	33.1%	323	4.6%	292	13.7%	302
400-600	18.6%	435	20.4%	476	24.7%	432
600-800	4.8%	717	71.2%	699	41.1%	688
>800	12.4%	919	2.2%	866	3.4%	823

表 3-8 沿海港 A 到港内河及沿海船舶额定功率分布

内河船舶			沿海船舶		
额定功率分布	百分比	平均功率(kw)	额定功率分布	百分比	平均功率(kw)
<=200	28.7%	127	<=200	2.0%	136
200-400	38.2%	332	200-400	18.5%	347
400-600	23.8%	429	400-600	18.5%	435
600-800	7.4%	715	600-800	26.5%	701
800-1000	0.3%	883	800-1000	7.9%	887
1000-1500	1.2%	1215	1000-5000	9.9%	1851
1500-2000	0.1%	1883	5000-10000	11.9%	7914
2000-2500	0.1%	2426	>10000	4.6%	11239
>2500	0.1%	7710			

调查获取了典型时段内 A 港区逐艘次到港远洋船舶基本信息，到港船型主要为滚装货船和散货船，在所有到港船舶类型中占比 56%和 34%，其次为散装化学品船/油船和滚装客船，分别占比 9%和 2%。进一步将不同船型按吨位进行划分，各吨位区间内船舶数量占比及主机平均额定功率如表 3-9 所示。

实际到港远洋船舶中，调查获取了 40 余艘不同船型的设计航速数据，滚装船、滚装客船、散货船、散装化学品船/油船的平均设计航速分别为 19.5 海里/小时、22 海里/小时、14 海里/小时、13.5 海里/小时。实际航行速度受航道等因素影响，平均航速并不高，各类船舶平均航速均约为 7.5 海里/小时。

本课题在调查中辅机和锅炉的信息获取量相对较少，因此利用调研结果，结合网络资源和相关研究结果给出了不同船型下辅机额定功率占主机额定功率的比例以及锅炉的实际运行功率。滚装船、滚装客船、散货船、散装化学品船/油船辅机额定功率占主机额定功率的比例分别为 0.259、0.278、0.191 和 0.211。锅炉数据直接用实际运行功率来表示，不同船型、不同吨位等级下锅炉的实际运行功率不同，表 3-9 给出了对应的数值，同时假设锅炉在船舶运行、装卸货和锚泊工况下的实际运行功率相同，其中油轮泊位使用蒸汽驱动泵卸载产品，认为油船在装卸货工况下实际运行功率不同于其他工况。

表 3-9 远洋船舶基本信息

船舶类型	吨位分布	艘次占比	主机平均功率 (kw)	设计航速 (nm/h)	辅机额定功率占主机比例	锅炉实际运行功率 (kw)
滚装货船	<10000t	0				
	10000-19999t	9%	8680	19.5	0.259	167
	>20000t	47%	13800	19.5	0.259	282
滚装客船	搭载人数					
	1400-2599	2%	15090	22	0.278	869
散货船	<10000t	0				
	10000-29999t	4%	9210	14	0.191	98
	>30000t	30%	9430	14	0.191	252
散装化学品船/油船	<10000t	7%	4610	13.5	0.211	48 (321)
	10000-29999t	2%	5700	13.5	0.211	144 (970)
	30000-59999t	0				

注：括号内数据为油船在装卸货工况下锅炉实际运行功率

表 3-10 给出了各工况运行时间及主、辅机负载率信息。对于沿海港远洋船舶的排放分别计算了距离港口 24 海里（本次能源基金会船舶排放研究课题组假定的港口船舶排放计算范围）和 58 海里（A 港港口泊位距离锚地的实际航道长度）范围内排放量，按平均航速 7.5 海里/小时计算，则进出港工况时间分为 6.4h 和 15.4h。船型不同，装卸货及锚泊时间规律也不同，利用本课题调研结

果，整合相关研究结果，给出了各船型装卸货工况及锚泊工况时间，具体如表 3-10 所示，总体来讲滚装船装卸货及锚泊时间较短，散货船及散装化学品船/油船的装卸货及锚泊时间较长。

主机航行工况负载率利用实际运行速度和设计航速间的关系来计算获取（见下式），滚装船、滚装客船、散货船、散装化学品船/油船航行期间的主机负载率分别为 6%、4%、15%、17%。主发动机在装卸货和锚泊工况下处于关闭状态。

$$LF = (Speed_{Act} / Speed_{Max})^3$$

其中， $LF$  为主机负载率， $Speed_{Act}$  为实际航行速度， $Speed_{Max}$  为最大航行速度，在这里取设计航速。

辅机在进出港、装卸货和锚泊工况下均处于开机状态，但各种状态下负载率不同，利用本课题调研结果，整合相关研究结果，给出了各船型在不同工况下的辅机负载率，具体如表 3-10 所示。

表 3-10 远洋船舶活动水平信息

船舶类型	进出港工况			装卸货工况		锚泊工况	
	运行时间 (h)	主机负载率	辅机负载率	运行时间 (h)	辅机负载率	运行时间 (h)	辅机负载率
滚装船	6.4(15.4)	6%	55%	5	35%	5	35%
滚装客船	6.4(15.4)	4%	60%			5	40%
散货船	6.4(15.4)	15%	24%	58	25%	12	13%
散装化学品船/油船	6.4(15.4)	17%	24%	40	25%	12	13%

### 3.4. 典型港口排放结果

#### 3.4.1. 沿海港

利用动力法分别计算了 A 港 2013 年到港远洋船舶在 24 海里、58 海里范围内的排放量，其中 24 海里的计算范围是按照本期能源基金会船舶总课题的统一要求界定的，58 海里的计算范围是按照 A 港港区与锚地的距离来界定的。应用

燃料消耗法分别计算了到港内河及沿海船舶的排放量，并用动力法进行对比验证，利用本地内河船舶燃油含硫率调研结果对文献排放因子进行修正，同时当主机负载率低于 20%时应用低负载校正因子进行修正。其中沿海船舶的排放量计算范围参照远洋船舶，即分别计算 24 海里和 58 海里范围内的排放；内河船舶的排放量计算范围按照 24 海里（与远洋和沿海船舶保持一致）和一个完整航程运行时间（内河船舶不同于远洋和沿海船舶，其航行路线主要集中于广东省内）分别进行计算。另外，由于 A 港为沿海港口，到港内河及沿海船舶船型相对较大，对于主机额定功率在 1000kw 以上的船舶，认为内河船舶活动水平调研结果中的燃油消耗率数据不再适用，对于该部分内河和沿海船舶用动力法计算结果代替。

### (1) 远洋船舶

依据香港船舶排放清单报告获取的排放因子、调查获取的 2013 年实际到港船舶艘次、典型时段内逐艘次到港船舶基本信息、活动水平调研结果等，应用动力法计算得到 A 港 2013 年到港远洋船舶大气污染物排放量。

2013 年 A 港到港远洋船舶 763 艘次，距港口 24 海里范围内及行政区范围内进港航道长度 58 海里范围内的各种大气污染物的排放量如图 3-7 所示。

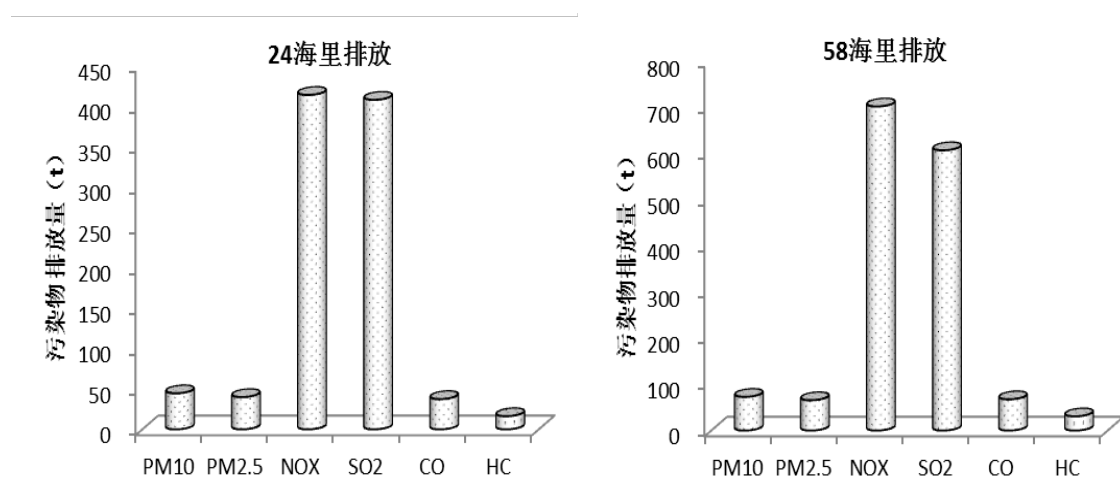


图 3-7 两种范围内远洋船舶大气污染物排放量

从不同设备类型（主机、辅机和锅炉）排放来看，由于船舶运行过程主机负载率较低，排放占比并不高，24 海里范围内各种污染物排放量占比分布于

12%~47%，辅机的排放贡献率最大，对各种污染物的排放分担率达48%~69%，锅炉的排放量最小。58海里范围内的排放由于增加了船舶航行的主机运行时间，主机各污染物排放占比有所增加（20%~60%），辅机和锅炉的排放占比略有下降，分别为20%~60%和3%~25%。

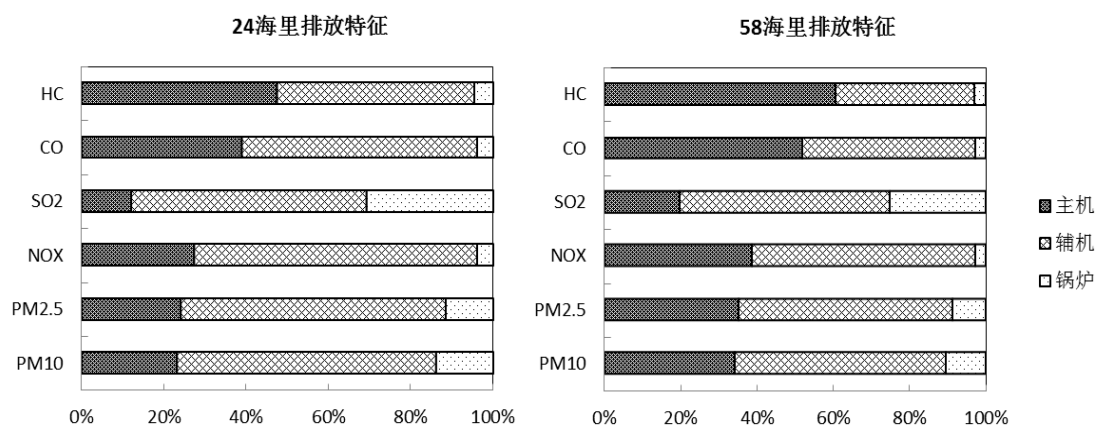


图 3-8 不同设备类型排放分担率

从不同船型排放来看，A 港到港远洋船舶排放主要来源于滚装货船和散货船，两种船型各种大气污染物排放量之和占比 90%以上，主要由于这两种船舶到港艘次数量较大。相对于 24 海里范围内排放，58 海里范围内滚装船各种污染物的排放贡献率有所提高，由于滚装船相对于其他类型船舶来讲，平均装卸货时间和锚泊时间较短，增加航行距离对于该部分船舶排放量的提高更为明显。

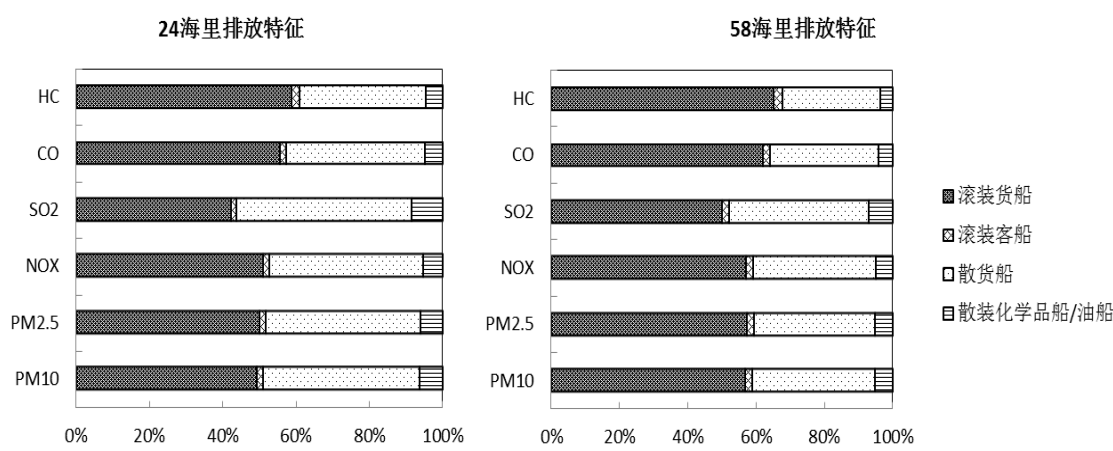


图 3-9 不同船舶类型排放分担率



从不同运行工况的排放来看，排在第一位的为进出港航行工况，24 海里范围内排放占比 35%~63%，58 海里范围内的排放更为明显，占比 56%~81%。同时也可以看出，船舶在港口内的排放（装卸货和锚泊工况）同样不容忽视，尤其是对于 24 海里范围内的排放，这部分的排放贡献率达 37%~65%，即便是在 58 海里范围的排放，该部分排放贡献率仍有 19%~44%。

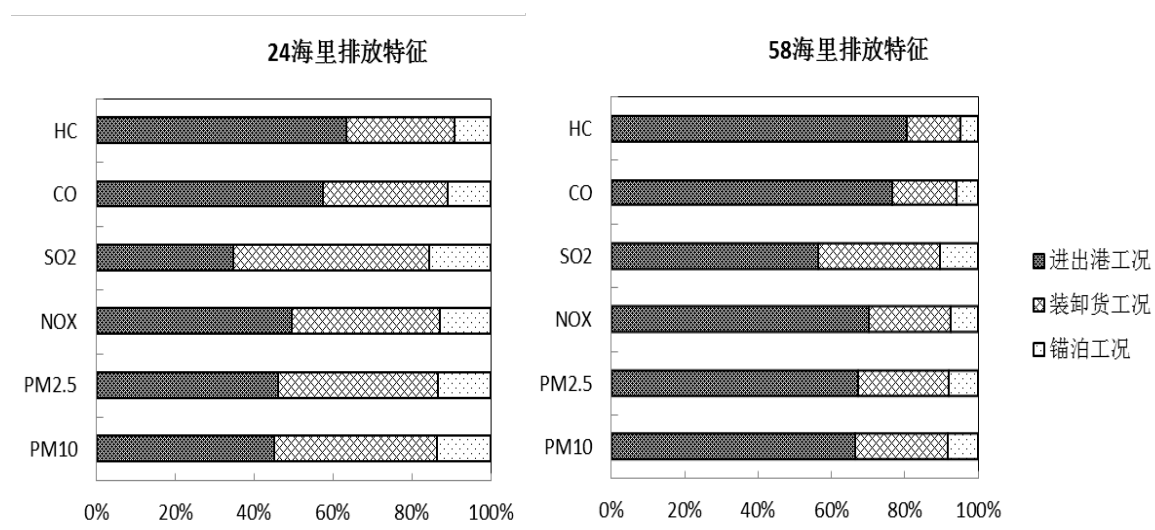


图 3-10 不同运行工况排放分担率

## (2) 沿海船舶

2013 年 A 港到港沿海船舶 1150 艘次，利用本地化实测船舶排放因子，通过燃油消耗量法计算到港沿海船舶大气污染物排放量，其中主机额定功率 1000kw 以上的船舶（占比 26.5%）利用动力法计算结果代替，排放量计算范围同远洋船舶，即 24 海里和 58 海里两种。采用部分本地船舶实际排放测试所得因子的燃油法计算结果与动力法计算结果具体如图 3-11 至 3-12 所示，应用本地船舶排放测试因子的燃油消耗法计算结果高于应用文献排放因子的动力法计算结果，认为是由于文献排放因子跟本地船舶排放水平的差异性造成，同时两种算法的结算结果并不存在数量级上的差距，认为使用本地实测船舶排放测试因子的计算结果更接近实际排放情况。

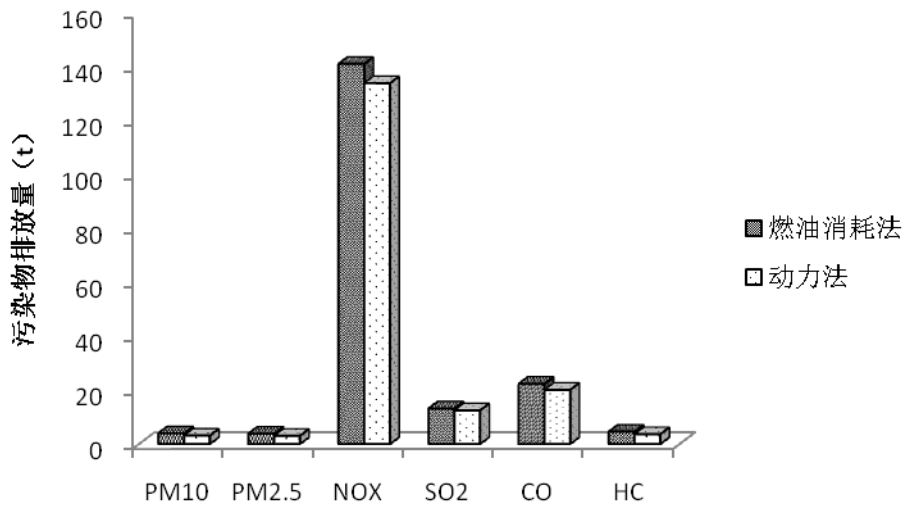


图 3-11 24 海里沿海船舶排放量对比

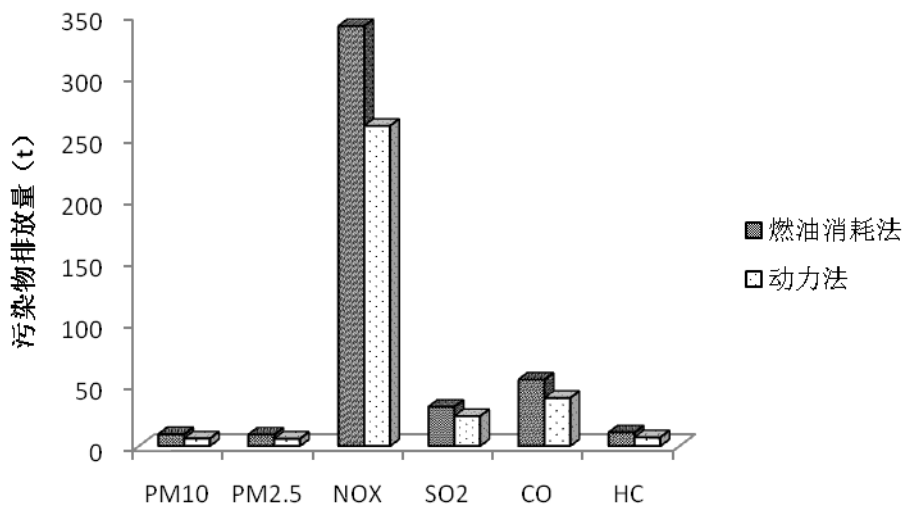


图 3-12 58 海里沿海船舶排放量对比

### (3) 内河船舶

2013 年 A 港到港内河船舶 11200 余艘次，利用本地化实测船舶排放因子，通过燃油消耗量算法分别得到 24 海里和 12 小时航行过程中的排放量（依据内河船舶活动水平调研结果，单次航程平均运行时间为 12 小时），其中主机额定功率 1000kw 以上的船舶（占比 1.6%）利用动力法计算结果代替。将计算结果与动力法计算结果进行对比，如图 3-13 至 3-14 所示，应用本地船舶排放测试因子的燃油消耗法计算结果明显高于应用文献排放因子的动力法计算结果，

认为是由于文献排放因子跟本地船舶排放水平的差异性造成，首先本地测试的船舶排放因子考虑了进出港低速航行及停泊前制动等机动情况下靠近码头泊位时的较高排放水平，而文献的因子主要考虑的是正常航行状态下的情况，其次，即便都是正常航行状态下的排放，文献因子也不能完全反应本地船舶的排放情况。计算结果显示两种算法的并不存在数量级上的差距，认为使用本地实测船舶排放测试因子的计算结果更接近实际排放情况，以下分析中均采用实测船舶排放因子的计算结果进行分析。

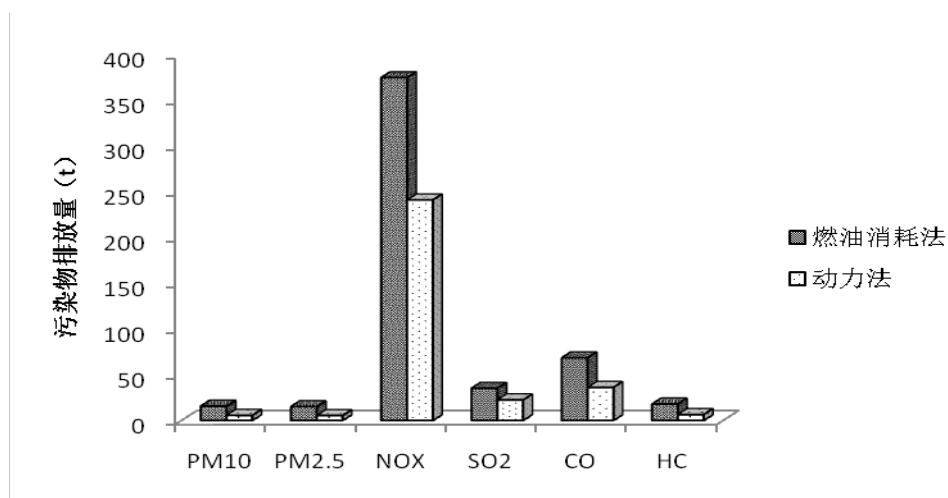


图 3-13 24 海里内河船舶排放量对比

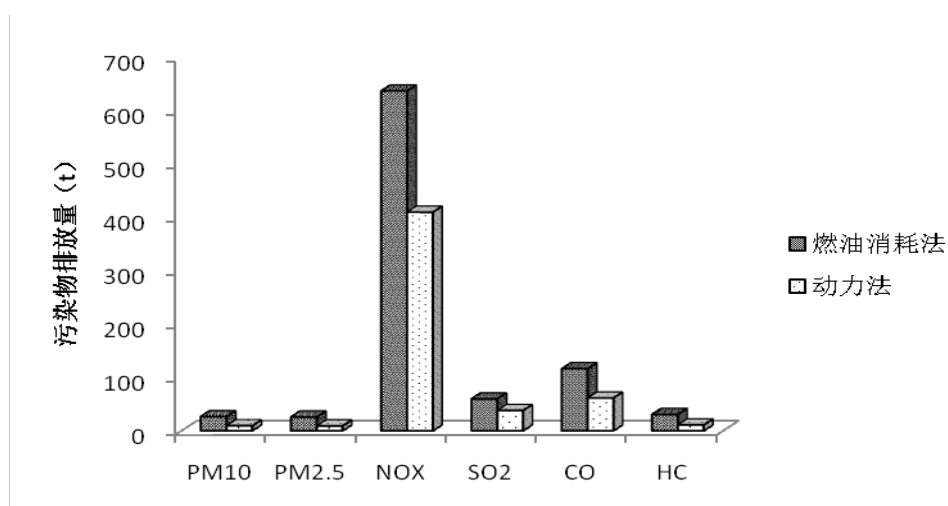


图 3-14 12 小时航行过程中内河船舶排放量对比

#### (4) 不同船舶类型排放分担率

分别分析两种情景下沿海港 A 到港船舶的排放分担率，情景一对三种船舶在 24 海里范围内排放量进行分析，从中可以看出船舶排放对港区周边局部小范围的影响；情景二对远洋、沿海在 58 海里范围内排放和内河船舶在 12 小时航行过程中的排放量进行分析，可以基本体现船舶排放对港区所在区域的影响。对于 SO<sub>2</sub> 的排放，主要来源于远洋船舶，24 海里范围内排放贡献率 89%，58 海里范围内排放贡献率 86%；对于 PM 的排放，远洋船舶同样为主要贡献源，两种情景下的排放贡献率分布于 60%~70%之间；对于 NO<sub>x</sub> 的排放，内河船舶和远洋船舶的排放贡献相当，两者排放了船舶 NO<sub>x</sub> 排放总量的 80%左右；对于 CO 和 HC 的排放，主要贡献源则为内河船舶，两种情景下排放贡献率都在 50%左右；沿海船舶由于到港船舶艘次较少，对各种污染物的排放贡献率在 20%以下。

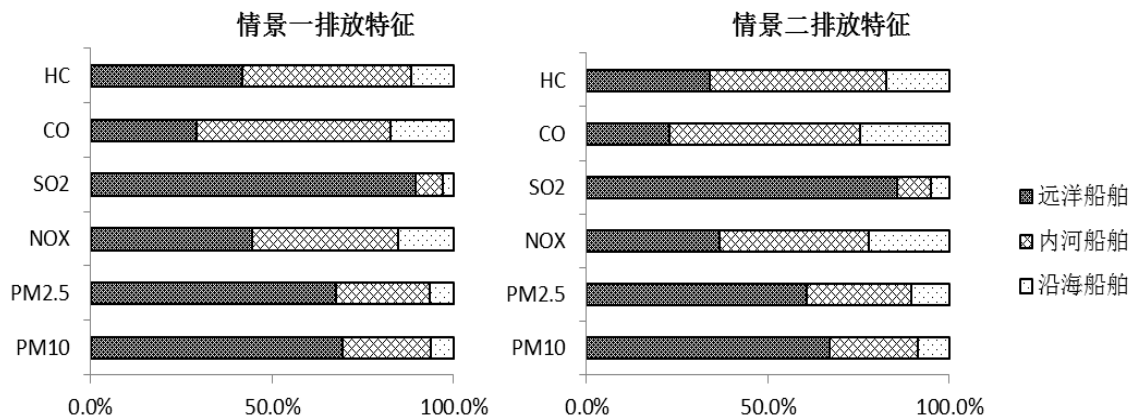


图 3-15 不同船舶类型排放特征

#### 3.4.2. 内河港

三个内河港口到港船舶 90%左右都在广东省范围内航行，以广州、佛山、深圳、东莞、江门和肇庆为主，占比接近 90%，具体分布如下图所示。省外主要目的地为广西，沿西江往上游航行，穿过珠三角和肇庆云浮，主要航行距离也在省内，其他省份和地区不足 1%。可以近似认为该部分船舶一个完整航程内的航行均在广东省范围内。

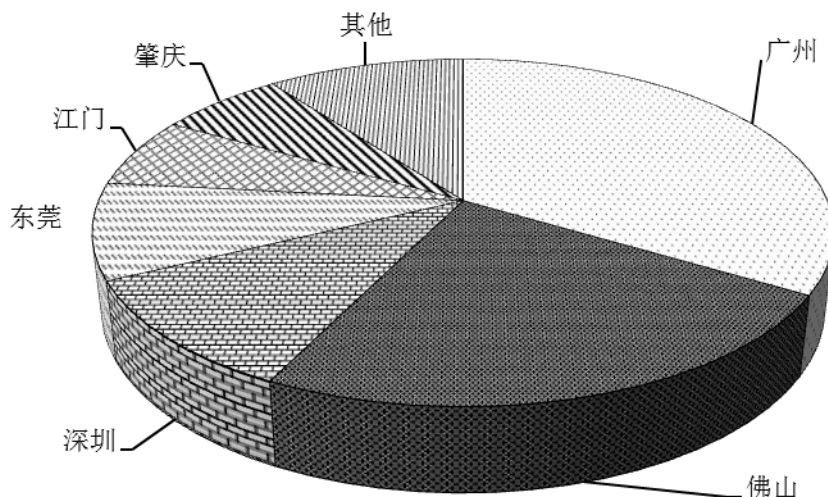


图 3-16 三个内河港到港船舶广东省内航行分布

利用本地化实测船舶排放因子，通过燃油消耗量算法分别得到三个内河港 B1、B2 和 B3 到港船舶在一个完整航程内排放量（依据内河船舶活动水平调研结果，单次航程平均运行时间为 12 小时）以及行政区范围航道内排放量，并用动力法计算结果进行对比验证。

### (1) B1 港

2013 年 B1 港到港船舶约 4400 艘次，船舶功率等级分布见本报告 3.3 节表 3-7，分别计算了单次航程（平均约 12 小时）航行时间、以及行政区范围航道长度 7km 范围内的排放量，燃油消耗量计算结果的 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、HC 排放量与动力法相应的计算结果具体如图 3-17 至 3-18，与动力法计算结果相比，基于本地测试的燃油法计算结果明显较高。

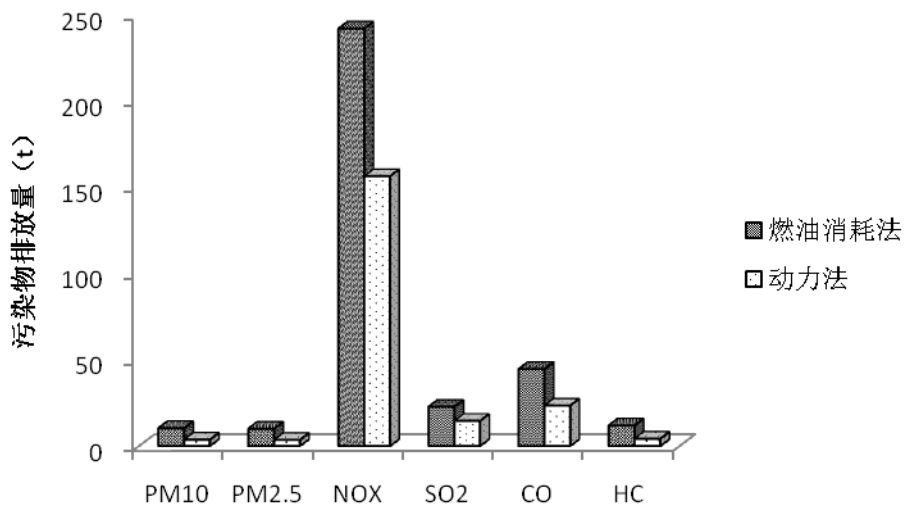


图 3-17 单次航程到港船舶排放量对比

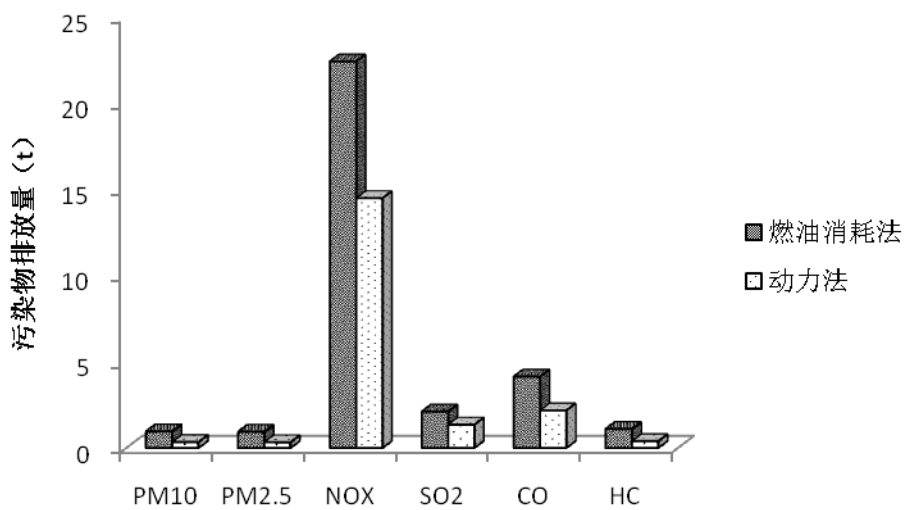


图 3-18 7km 范围到港船舶排放量对比

## (2) B2 港

2013 年 B2 港到港船舶 1250 艘次，船舶功率等级分布见 3.3.2 节表 3-7，分别计算了单次航程（平均约 12 小时）航行时间、以及行政区范围航道长度 8.7km 范围内的排放量，燃油消耗量计算结果的 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、HC 排放量与动力法相应的计算结果具体如图 3-19 至 3-20。

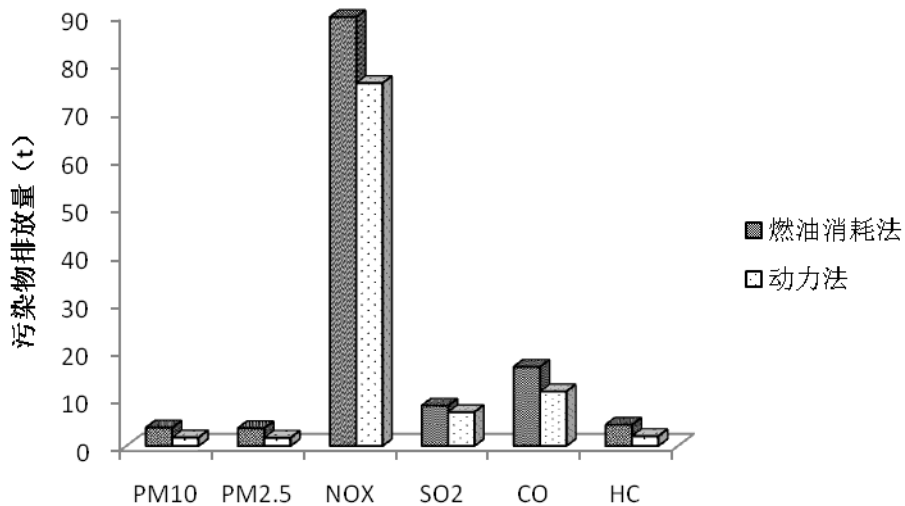


图 3-19 单次航程到港船舶排放量对比

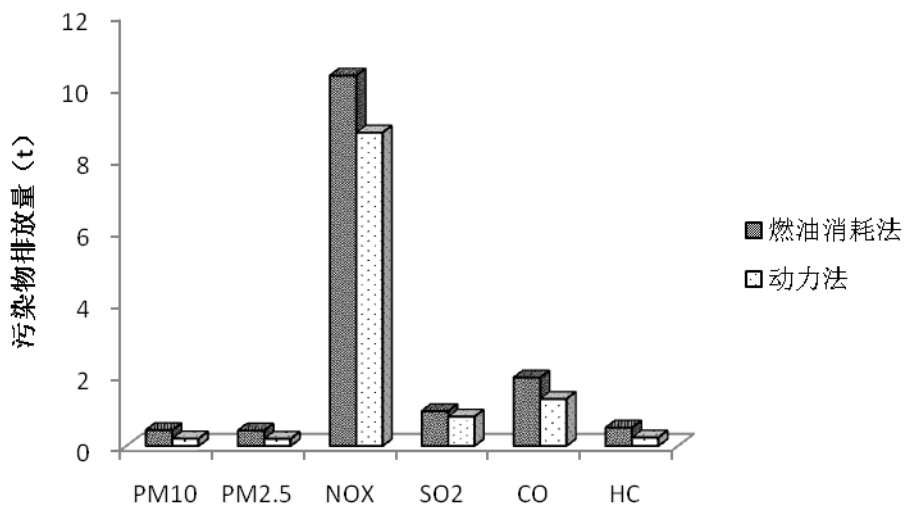


图 3-20 8.7km 范围到港船舶排放量对比

### (3) B3 港

2013 年 B3 港到港船舶 3328 艘次，船舶功率等级分布见 3.3.2 节表 3-7，分别计算了单次航程（平均约 12 小时）航行时间、以及行政区范围航道长度 17km 范围内的排放量，燃油消耗量计算结果的 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、HC 排放量与动力法相应的计算结果具体如图 3-21 至 3-22。

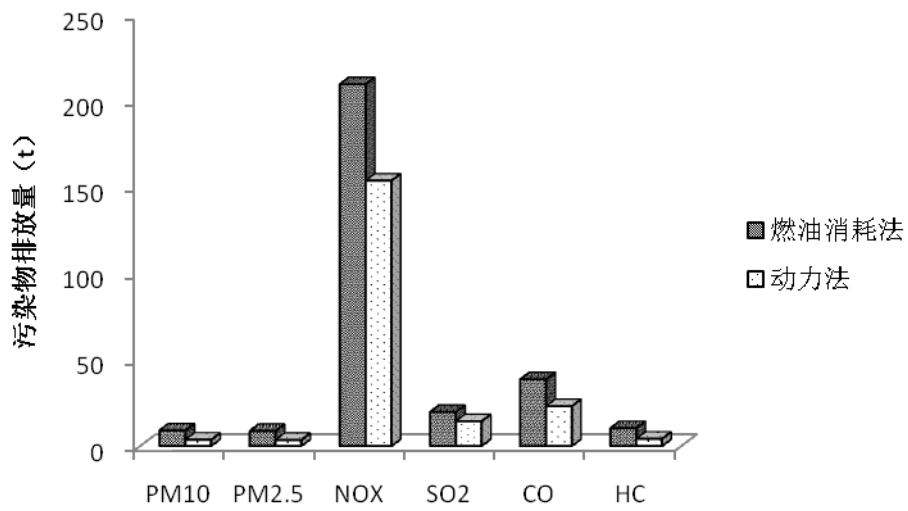


图 3-21 单次航程到港船舶排放量对比

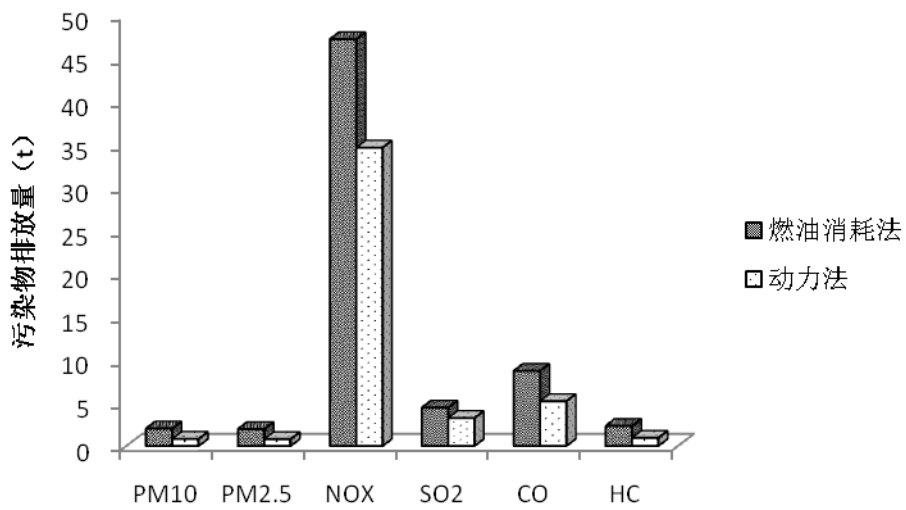


图 3-22 17km 范围到港船舶排放量对比



## 四、作业机械排放分析

### 4.1. 排放量计算方法

港区作业机械等非道路移动机械多采用燃油消耗量算法，即将燃油机械在一定时段内的燃料消耗总量乘以对应的各类大气污染物排放系数，得到该时段内各类大气污染物的排放量。燃油消耗量算法公式如下：

$$I_a = W \times E_{fa}$$

其中， $I_a$  为污染物 a 的基准年排放量，单位：t/a；W 为燃油消耗量，单位  $10^6$ L/a； $E_{fa}$  为污染物 a 的排放系数。

### 4.2. 排放因子数据确定

#### 4.2.1. NONROAD 模型

NONROAD 非道路移动源排放模型是计算各种非道路移动机械污染物排放量的程序，由美国环保署推荐使用。NONROAD 模型给出了不同发动机类型、燃料性质、排放控制阶段非道路机械的基本排放因子，并提供了各种机械的活动水平和使用状况的调查数据，提出了相关影响因素和环境温度对排放的影响。

NONROAD 模型中各污染物排放量计算核心计算公式为：

$$E = \sum \left[ Pop_{i,j,k,l} \times Power_{i,j,k,l} \times LF_{i,j,k,l} \times A_{i,j,k,l} \times (EF_{adj})_{i,j,k,l} \right]$$

式中，E 为污染物排放量，g；Pop 为非道路移动机械保有量；Power 为发动机功率，kw；LF 为发动机负载因子，即发动机平均使用功率与额定功率的比值；A 为年活动水平，h； $EF_{adj}$  为综合排放因子， $g \cdot (kw \cdot h)^{-1}$ ； $I_{j,k,l}=1、2、3、\dots$ ，分别代表非道路移动机械类型、燃料类型、发动机功率水平和机龄类型。

综合排放因子计算方法为：

$$EF_{adj}(NOx) = EF_{ss(NOx)} \times TAF \times DF$$

$$EF_{adj}(PM) = EF_{ss(PM)} \times TAF \times DF - S_{PMadj}$$

式中，EF<sub>ss</sub> 为新发动机稳态工况下排放因子，g · (kw · h)<sup>-1</sup>；TAF 为瞬态工况修正系数；DF 为排放劣化系数；S<sub>PMadj</sub> 为硫含量修正因子。模型中，瞬态工况修正系数受机械种类污染物种类和排放阶段影响，排放劣化系数受污染物种类排放阶段发动机机龄及使用寿命影响。

#### 4.2.2. 排放因子计算结果

本课题通过 NONROAD 模型获取基于燃油消耗的排放因子。首先对比我国与美国非道路移动机械发动机排放标准的实施时间确定模型模拟计算的基准年，再通过修改燃料蒸汽压、含硫率、含氧量等燃料信息，以及最高气温、最低气温、平均气温等环境信息进行本地化的修正，可得到不同机械种类、不同功率等级下基于燃料消耗的排放因子，同时，由于调研所得机械类型无法与模型进行完全匹配，特别计算获取了模型中所有建筑机械的平均排放因子，无法匹配到的机械类型用所有机械的平均排放因子来代替。以叉车和所有机械的排放因子计算结果为例，结果如表 4-1 和 4-2 所示。

表 4-1 叉车排放因子 (g/kg)

功率分布	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	HC
11HP≤16	2.9	2.9	28.0	0.8	24.3	3.7
16<HP≤25	2.8	2.8	27.8	0.9	24.5	3.7
25<HP≤40	3.5	3.4	27.9	0.7	17.5	2.5
40<HP≤50	3.5	3.4	27.9	0.8	17.5	2.5
50<HP≤75	3.5	3.4	30.5	0.8	23.2	3.1
75<HP≤100	3.5	3.4	30.5	0.8	23.2	3.1
100<HP≤175	2.2	2.1	31.2	0.8	9.4	2.4
175<HP≤300	1.8	1.8	30.6	0.8	8.1	2.2
300<HP≤600	1.6	1.5	32.6	0.8	11.8	1.4

表 4-2 所有机械排放因子 (g/kg)

功率分布	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	HC
50<HP≤75	6.5	6.3	37.9	0.8	39.7	8.6
75<HP≤100	5.9	5.7	36.3	0.8	35.9	7.2

100<HP≤175	3.0	2.9	38.0	0.8	16.4	3.8
175<HP≤300	2.1	2.0	34.6	0.8	10.1	2.5
300<HP≤600	2.3	2.2	39.5	0.8	16.7	2.4
600<HP≤750	2.3	2.2	37.7	0.8	18.1	2.0
750<HP≤1000	2.6	2.5	45.7	0.8	17.8	3.3
1000<HP≤1200	2.6	2.5	45.9	0.8	18.6	3.4
1200<HP≤2000	2.4	2.3	44.4	0.8	16.4	3.1
2000<HP≤3000	2.2	2.1	43.2	0.8	14.8	2.9

### 4.3. 活动水平数据确定

分别对所选典型港口进行了深入调研，得到了四个港口的机械保有量、种类、功率、运行时间、燃油消耗量等基础数据。

2013 年底，沿海港 A 共有作业机械 259 台，各类机械数量如图 4-1 所示，其中电力设备 51 台，燃油设备 208 台，燃油设备总额定功率 3.47 万千瓦，2013 年燃油消耗总量 2500 吨、总工作时间约 26400 小时。根据调研结果得出沿海港区主要燃油机械平均功率及其燃油消耗率如图 4-2 所示，载重汽车和牵引车燃油消耗率处于较低水平，推土机、集装箱正面吊运起重机、集装箱龙门吊起重机、推耙车、集装箱专用叉车燃油消耗率相对较高，超过 40g/kwh，尤以推土机为甚，燃油消耗率超过 80g/kwh。

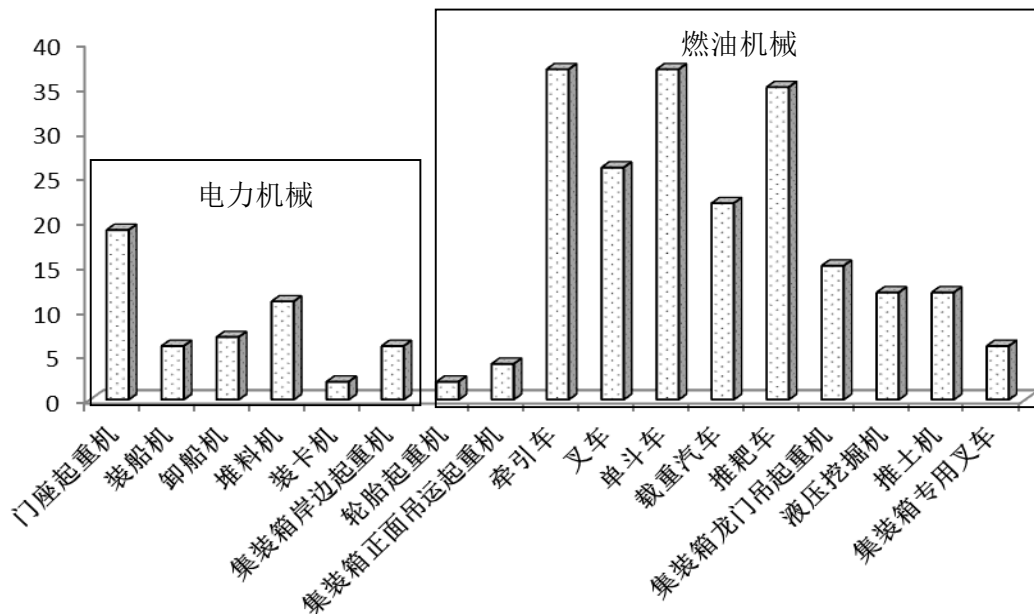


图 4-1 沿海港 A 作业机械保有量 (台)

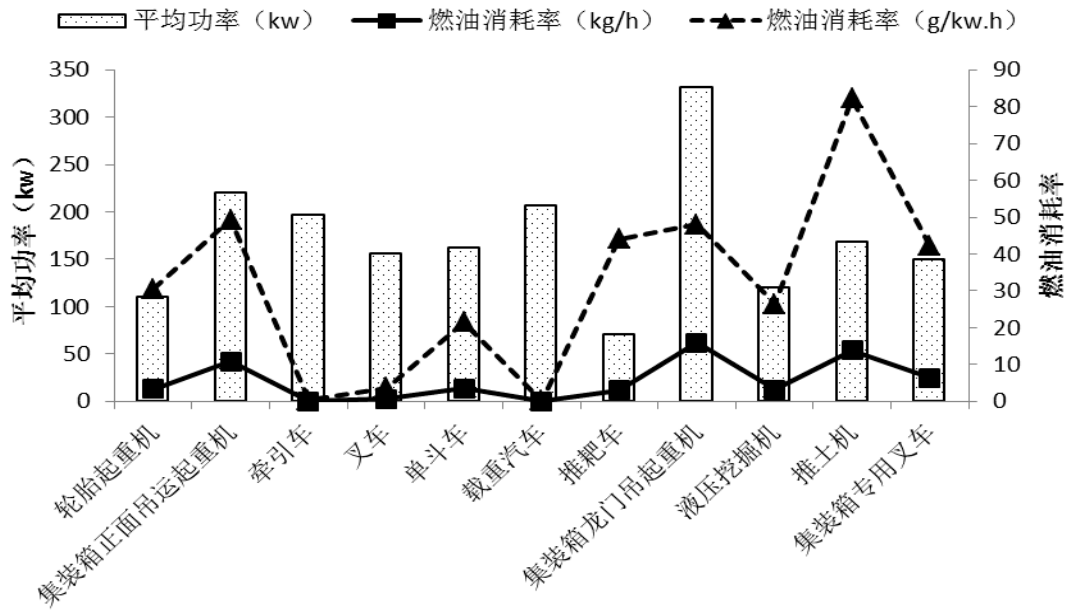


图 4-2 沿海港区燃油作业机械平均功率及燃油消耗率

内河港 B1 共有作业机械 47 台，各类机械数量如图 4-3 所示，其中电力设备 7 台，燃油设备 40 台，燃油设备总额定功率 7100 千瓦，2013 年燃油消耗总量 370 吨、总工作时间 66200 小时。B2 港燃油设备共 38 台，总额定功率 2900 千瓦，2013 年燃油消耗总量 270 吨，总工作时间 94200 小时，B3 港部分燃油消耗量数据缺失。根据调研结果得出内河港区主要燃油机械平均功率及其燃油消耗率如图 4-4 所示，以集装箱正面吊运起重机的燃料消耗率为最大（47g/kwh），其次为场地龙门吊和集装箱堆垒车，B3 港数据依据燃料消耗率进行补充完善。

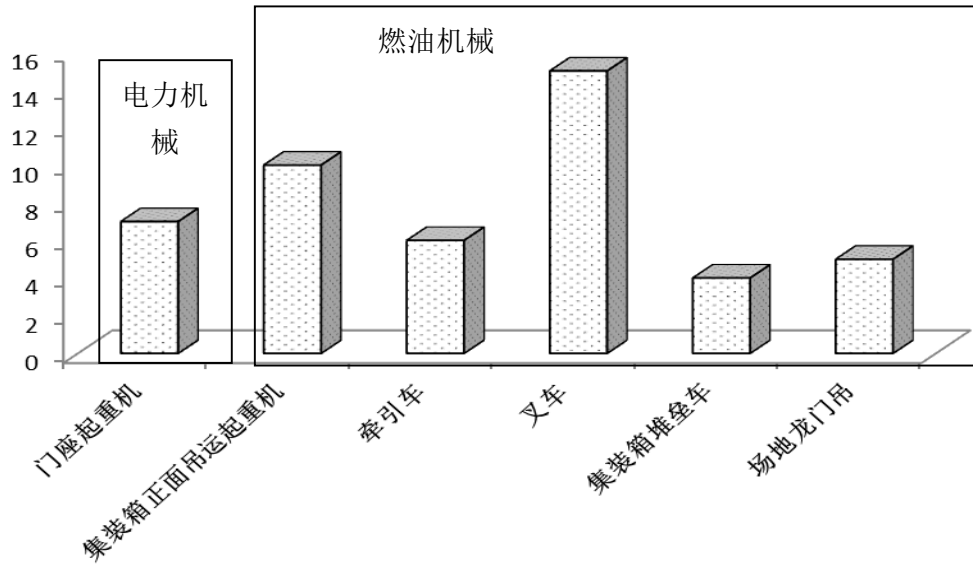


图 4-3 内河港 B1 作业机械保有量 (台)

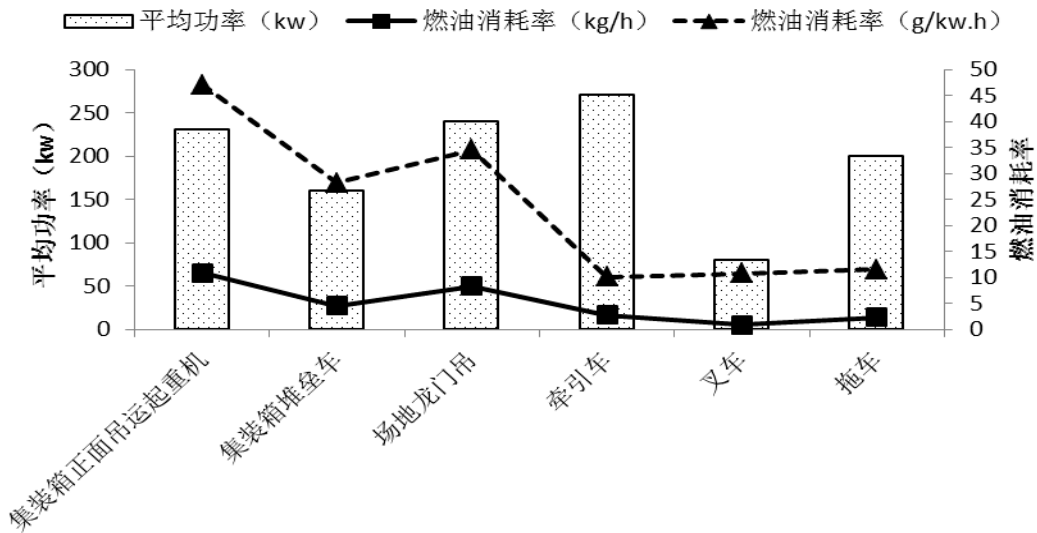


图 4-4 内河港燃油作业机械平均功率及燃油消耗率

#### 4.4. 典型港口排放结果

##### 4.4.1. 沿海港

2013 年沿海港 A 港区燃油类作业机械各类大气污染物排放量如图 4-5 所示。

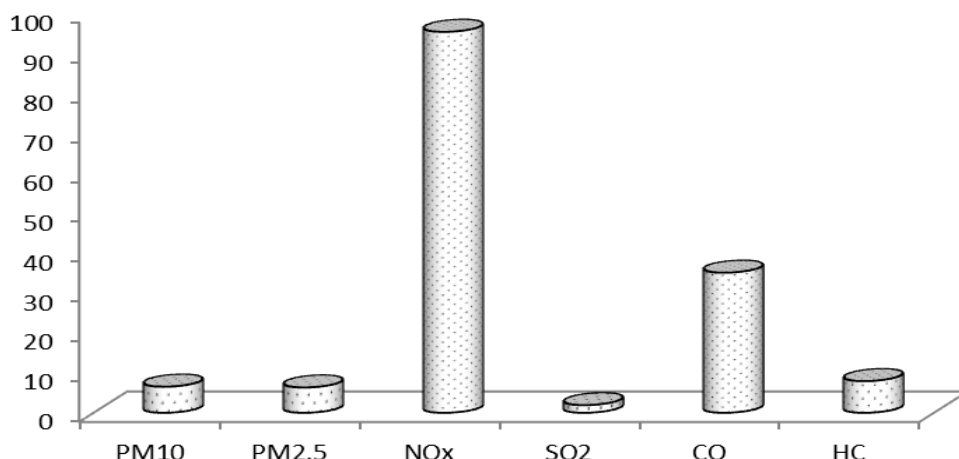


图 4-5 沿海港 A 作业机械大气污染物排放量

以 NO<sub>x</sub> 的排放量为例，分析了 A 港内单台机械在基准年内的排放量。就单台机械的排放量来看，集装箱龙门起重机的排放量最为突出，达 2600kg，因为集装箱龙门起重机的额定功率在 A 港所有燃油类机械中居最高（单台平均功率达 330 千瓦），且燃油消耗率也处于较高水平（48g/kwh）；其次为推土机，主要由于较高的燃料消耗率（82 g/kwh）；单斗车由于较高的年均工作时间排在第三（年均工作小时数在所有作业机械类型中位居第一）；然后为集装箱专用叉车和推耙机，主要由于相对较高的燃油消耗率（42 g/kwh 和 44 g/kwh）。

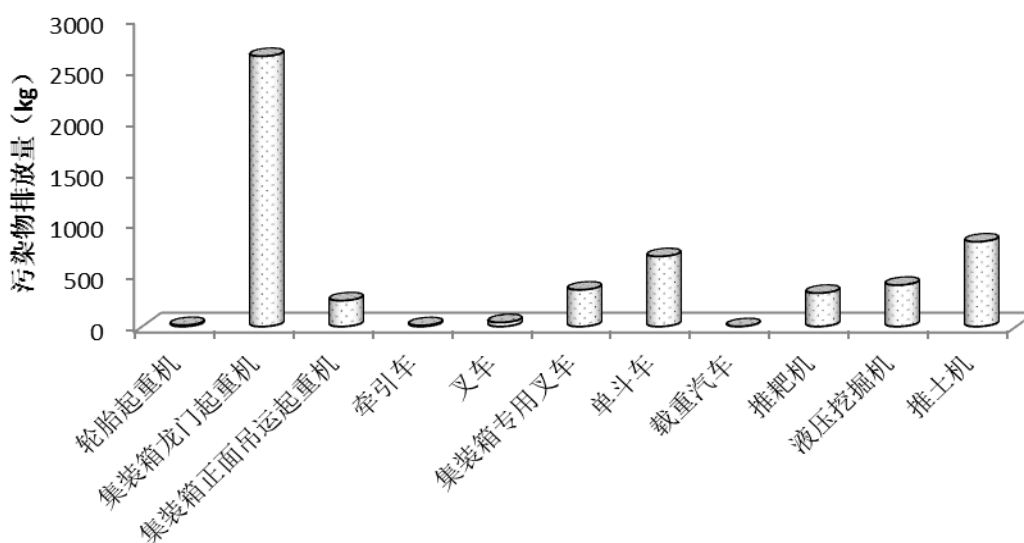


图 4-6 沿海港 A 单台机械基准年内 NO<sub>x</sub> 排放量

排放贡献率方面，各类机械差异较大，排放贡献率最大的为集装箱龙门起重机，对各污染物贡献率 30%-41%，主要由于单机额定功率大、且使用率（年运行 3720 小时）和燃油消耗率相对较高；其次为单斗车和推耙车，尾气排放贡献率分布于 21%-29%和 12%-32%，主要由于较大的保有量（分别为 37 台和 35 台）；然后为推土机，主要由于较高的燃料消耗率。以上 4 种作业机械贡献了该部分污染物排放量的 90%左右，其余机械仅贡献 10%左右，其中牵引车、叉车、载重汽车等虽然也有较大保有量，但由于燃油消耗率低的原因，废气排放量并不大。

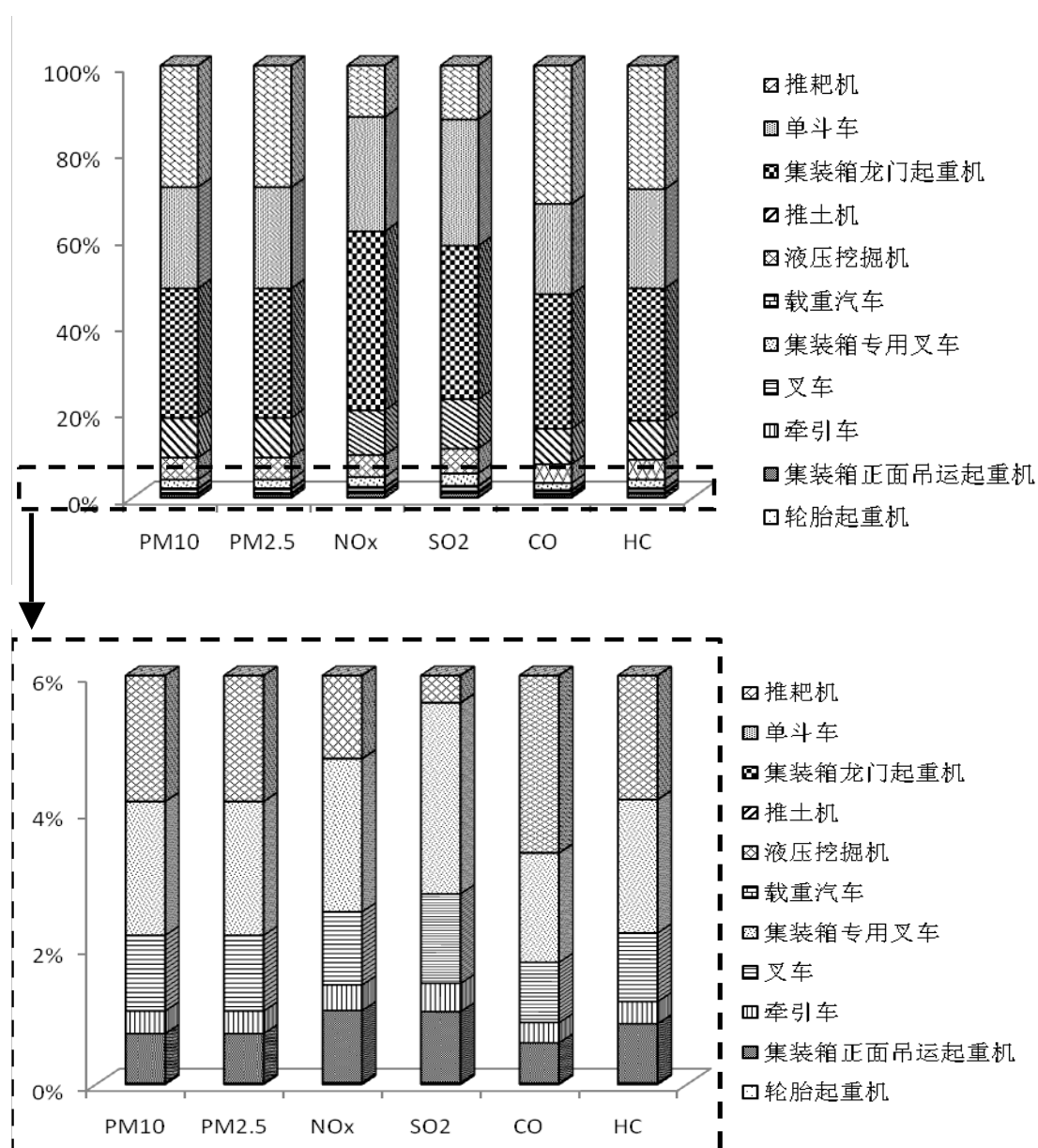


图 4-7 沿海港 A 不同种作业机械排放分担率

#### 4.4.2. 内河港

2013 年三个内河港 B1、B2 和 B3 港区内燃油类作业机械各类大气污染物排放量如图 4-8 所示。

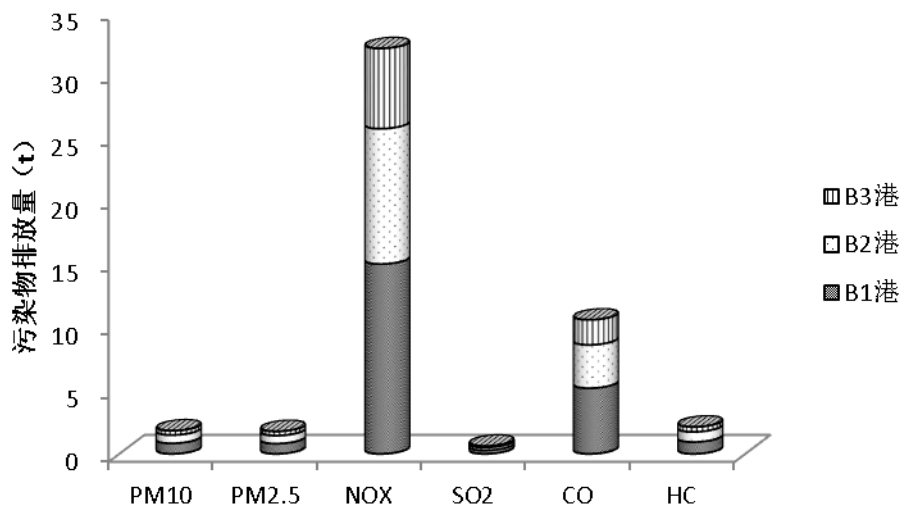


图 4-8 三个内河港区作业机械大气污染物排放量

以  $\text{NO}_x$  的排放量为例，分析了三个内河港口单台机械在基准年内的排放量。就单台机械的排放量来看，场地龙门吊和集装箱正面吊运起重机的排放量明显高于其他作业机械，主要由于较高的燃料消耗率（分别为  $35\text{g/kwh}$  和  $47\text{g/kwh}$ ）和较大的额定功率（单台功率都超过  $200\text{kwh}$ ）。

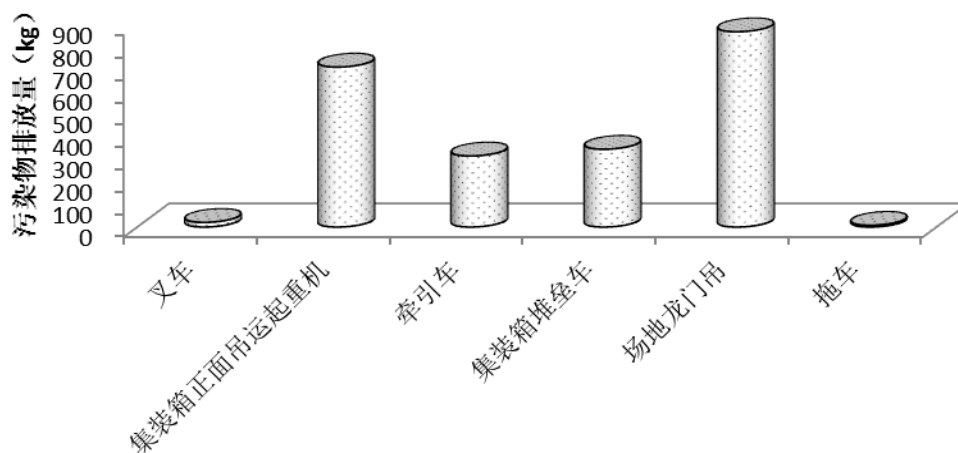


图 4-9 三个内河港口的单台机械基准年内  $\text{NO}_x$  排放量



排放贡献率方面，综合分析了三个内河港口内的作业机械排放量。污染物排放主要来源于集装箱正面吊运起重机和场地龙门吊，两者排放了作业机械各污染物排放量的 62%~74%。主要由于较高的燃料消耗率和较大的额定功率。

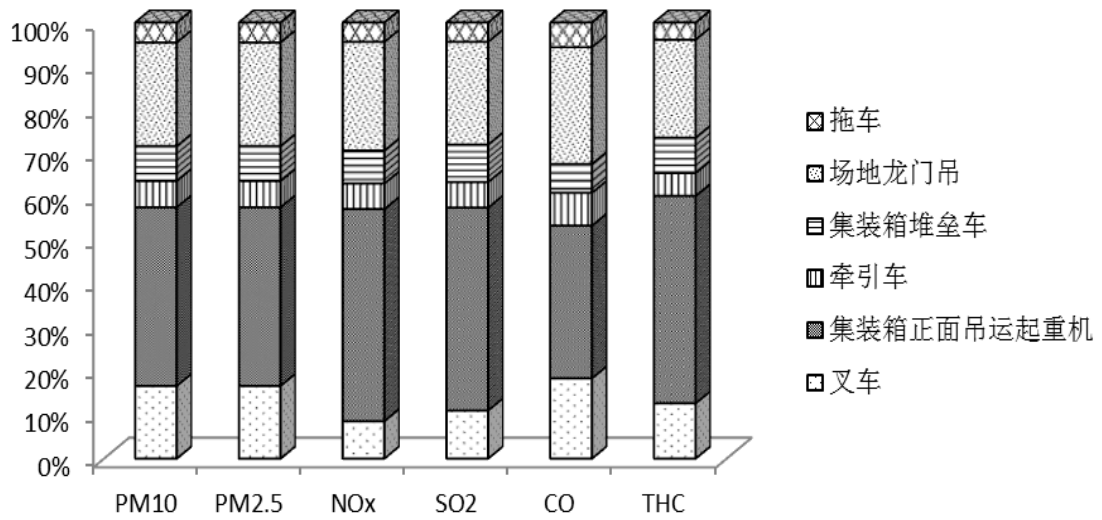


图 4-10 三个内河港口的作业机械排放分担率

## 五、运输车辆排放分析

### 5.1. 排放量计算方法

运输车辆部分来自港区外，燃料消耗量无法有效统计，本文采用源强法进行计算，计算公式如下。将运行工况分为两种，一种为怠速工况（开机等待装货状态），一种为运行工况（载货行驶状态）。

$$E = A \times Pop \times Act_i \times EF_i$$

其中 A 为年均作业天数，天；Pop 为每天港区内运输车辆作业次数，台次；i=1,2，1 代表怠速工况，2 代表运行工况；Act 表示活动水平，怠速工况下用单次作业平均开机等待时间表示，h，运行工况下用港区内运行距离表示，km；EF 为排放因子，怠速工况下为 g/h，运行工况下为 g/km。

### 5.2. 排放因子数据确定

#### 5.2.1. COPERTIV 模型

COPERT 模型由欧洲环境署（EEA）资助开发，是欧洲使用最广泛的计算道路排放的模型，COPERT 模型相比其他模型的优势在于它的开发地欧洲与我国有相同的测试工况，相近的发动机技术，并能够兼容我国目前和未来一段时间内的机动车排放控制标准。相关研究结果表明，在车辆总行驶周期内，COPERT 模型的排放因子计算值较 MOBILE 模型的计算结果更接近于我国台架实测值，在计算我国机动车尾气排放时，COPERT 模型有更好的适用性。

COPERT 模型将机动车划分为小客车、轻型货车、重型货车、公共汽车或长途汽车、摩托车等五大类，每大类有按照发动机排量、车辆总质量、燃料类型和排放控制标准等进一步划分为若干小类。认为机动车排放的污染物来自于发动机热稳定运行排放、冷启动排放和燃料蒸发 3 个排放源，并分别计算其排放因子。

本项目应用 COPERTIV模型计算排放因子，需要的输入参数主要包括车队组成（车型和各排放标准占比）、平均行驶速度、累计行驶里程、车辆负载、道路类型、道路坡度、是否执行 I/M 制度、气候参数、燃料参数等等。

### 5.2.2. 排放因子计算结果

根据我国车辆管理所的车辆分类方法，结合 COPERTIV模型中车辆类型的设置方法，进行车型匹配，通过修正机动车组成、运行条件、气象信息及油品组分等参数，获取不同行驶速度（5-100km/h，以 5 km/h 为间隔）、不同功率等级（轻型、重型）下的排放因子，如表 5-1 所示。COPERT 模型无法计算怠速（速度为 0）下的排放因子，本文采用修正后的加州空气资源管理局（CARB）公布的怠速工况下排放因子，修正后结果如表 5-1 所示。

表 5-1 进出港运输车辆综合排放因子

工况及车型	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	VOC	单位
怠速	0.649	0.621	32.971	0.753	21.991	6.931	g/h
10km/h(轻柴)	0.194	0.178	2.365	0.085	0.989	0.177	g/km
10km/h(重柴)	0.895	0.857	16.259	0.325	6.077	2.744	g/km
20km/h(轻柴)	0.171	0.156	1.925	0.071	0.806	0.155	g/km
20km/h(重柴)	0.545	0.507	11.463	0.222	3.554	1.501	g/km
40km/h(轻柴)	0.145	0.130	1.286	0.051	0.562	0.122	g/km
40km/h(重柴)	0.342	0.305	8.065	0.150	2.032	0.786	g/km

## 5.3. 活动水平数据确定

调查获取了四个港口 2013 年全年的进出港货运车辆台次，以及吨位分布、装卸货等待时间、港区内平均行驶速度和距离、港区外行政区范围内行驶速度和距离等活动水平信息。

### 5.3.1. 沿海港

A 港 2013 年进出港运输车辆达 28.5 万台次，其中轻型货车（基准质量 <4.5t）占比 1%，重型货车占比 99%，主要以车用柴油为燃料，依据港口所在地市相同车型保有情况进行车型排放标准划分，结果如图 5-1 所示（2013 年 7 月 1 日广东省执行轻型柴油车和重型柴油车第四阶段排放标准，但现有车型数

据库相对滞后，本项目暂不考虑车队中的第四阶段排放标准柴油车），港区内单次平均运行距离 800 米，平均行驶速度 20km/h，单次等待时间平均 30 分钟，港区范围外行驶速度以 40km/h 计。

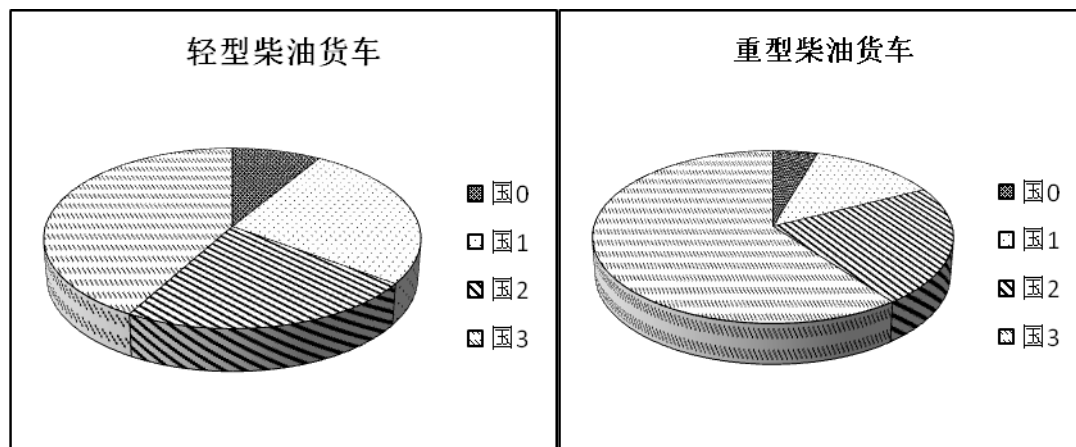


图 5-1 沿海港 A 运输车辆排放标准分布

### 5.3.2. 内河港

通过实地调研和数据收集对运输车辆类型及活动水平进行调研。进出港轻型车主要为社会车辆，车型复杂多样，重型车主要为港区自有车辆，以 18 吨级左右集装箱拖车为主，同样主要以车用柴油为燃料。收集了近一个月时间范围内进港车辆车牌历史数据显示，88%的重型货车和 85%的轻型货车归属内河港所在区级行政范围，依据车牌信息对运输车辆进行排放标准划分（轻型货车车牌数据获取量较少，没有对该部分数据进行相应划分），结果如图 5-2 所示，同时结合内河港所在区相同车型保有情况，获取排放标准分布，如图 5-3 所示，该段时间实际进港作业的重型运输车辆排放水平略低于港口所属行政区的平均水平。活动水平方面通过实地调查获取，B1 港轻型运输车日均作业 35 台次，重型运输车日均作业 600 台次，港区年作业天数 296 天。单次等待时间平均 20 分钟，港区内运行距离约 400m，限速 10 km/h。港区范围外行驶速度以 40km/h 计。

B2 港 2013 年进出港运输车辆 13.2 万台次，其中重型货车 13.0 万台次，B3 港 2013 年进出港运输车辆 14.3 万台次，其中重型货车 13.5 万台次。

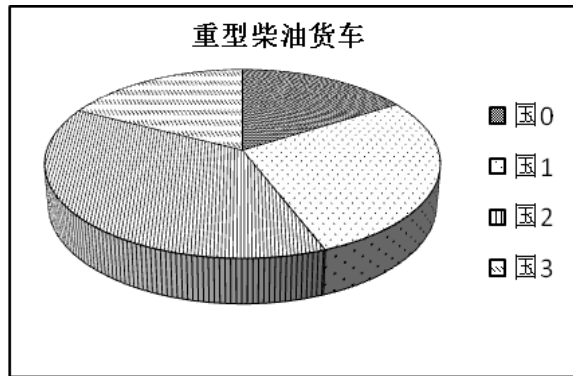


图 5-2 进出港重型运输车排放标准分布

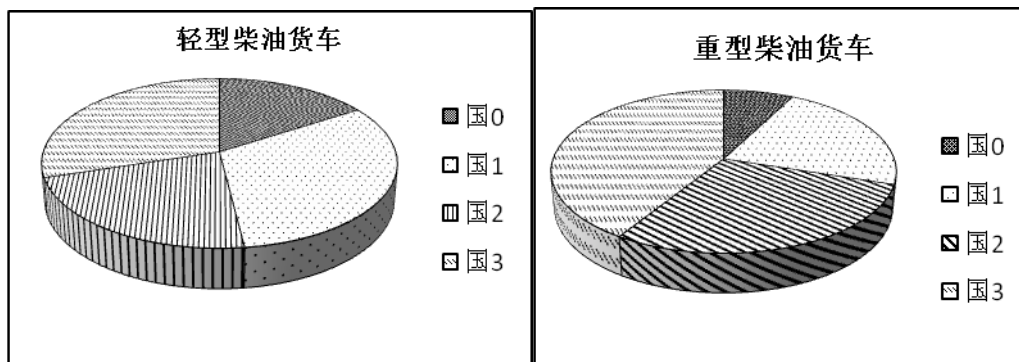


图 5-3 内河港所在区运输车辆排放标准分布

## 5.4. 典型港口排放结果

### 5.4.1. 沿海港

分别计算了沿海港 A 港 3 种界限范围内进出港运输车辆的排放量，结果如表 5-2 所示。第一种为港区范围内排放，即运输车辆在港区内行驶状态（以 800 米计）以及怠速状态下的排放量之和，第二种为在港口所属市级行政区内排放，即运输车辆在港区内排放与港区外市级行政区范围内（以 65km 计）行驶过程中的排放量之和，第三种考虑对区域范围的影响，将运输车辆计算范围扩展至省域范围，即为港区内排放与平均单次运行距离范围内（单次运行距离依据广东省 2013 年公路货物周转量与货运量的比值获取，以 130km 计）行驶过程中的排放量之和。

表 5-2 沿海港 A 不同界限范围内运输车辆排放量 (t)

排放量	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	HC
1.港区内	0.3	0.3	9.9	0.2	4.7	1.7
2.行政区内	6.6	5.9	158.0	3.0	42.1	16.1
3.单程运行距离	13.0	11.5	306.2	5.7	79.5	30.5

#### 5.4.2. 内河港

分别计算了内河港 B1、B2 和 B3 在 3 种界限范围内进出港运输车辆的排放量，结果如表 5-3 所示。对于港区范围内排放，计算了运输车辆在港区内行驶状态（以 400 米计）以及怠速状态下的排放量之和，对于行政区内排放，计算了运输车辆在港区内排放与港区外行政区范围内（由于港口地理位置不同，B1 港以 37km 计，B2 港以 36km 计，B3 港以 40km 计）行驶过程中的排放量之和，对于单次运行距离排放，同样计算了港区内排放与平均单次运行距离范围内（以 130km 计）行驶过程中的排放量之和。

表 5-3 三个内河港口不同界限范围内运输车辆排放量 (t)

排放量	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	HC
1.港区内	0.4	0.4	10.9	0.2	5.6	2.1
2.行政区内	6.3	5.6	146.9	2.8	40.0	15.3
3.单程运行距离	20.6	18.4	480.8	9.0	124.6	47.8

## 六、典型港口污染排放特征及影响分析

### 6.1. 沿海港

依据前述大气污染物排放量计算结果，船舶及进出港运输车辆计算范围的界定将在很大程度上影响各类排放源对港口周边地区的排放贡献。为此，分别分析了四种情景下沿海港 A 的大气污染物排放组成特征，其中作业机械只在港区范围内活动，只计算了一种排放量，将船舶和运输车辆在不同范围内的排放进行组合，得到如下四种情景下的排放特征：

第一种情景——港口相关移动源排放对广东省区域大范围的影响：远洋和沿海船舶在距港口 58 海里范围内的排放量，内河船舶在 12 小时航行过程中的排放量，运输车辆运行 130 公里的排放量（广东省货物平均运距长度），各污染物排放量如图 6-1 所示。各污染源排放贡献率如图 6-2 所示，主要贡献源为远洋船舶（SO<sub>2</sub> 排放贡献率 85%），其次为内河船舶（除 SO<sub>2</sub> 外各污染物排放占比 21%~35%），包括沿海船舶（排放贡献率低于运输车辆）在内的三种船舶共排放了 SO<sub>2</sub> 总量的 99%，PM 和 NO<sub>x</sub> 的 80%以上，CO 和 HC 的 65%左右。运输车辆对于 PM 和 NO<sub>x</sub> 的排放贡献率在 10%以上，对于 CO 和 HC 的排放贡献在 20%以上。由于船舶和运输车辆的计算范围相对较大，作业机械排放占比最低，各污染物排放贡献率不足 10%。

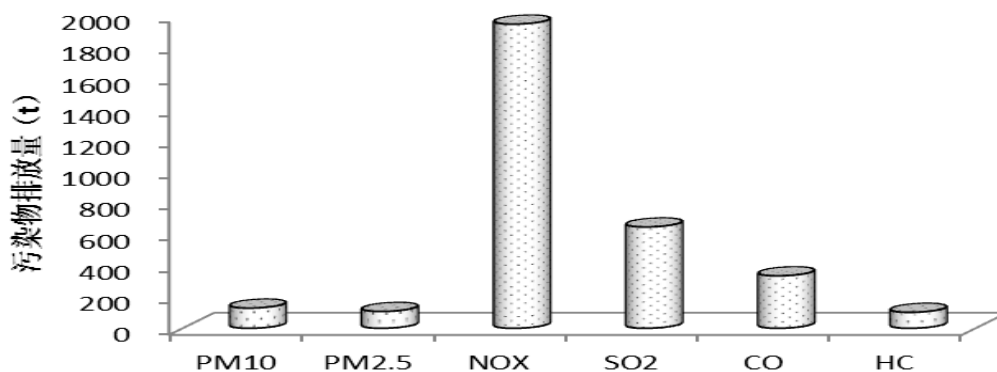


图 6-1 情景一中沿海港各污染物排放量

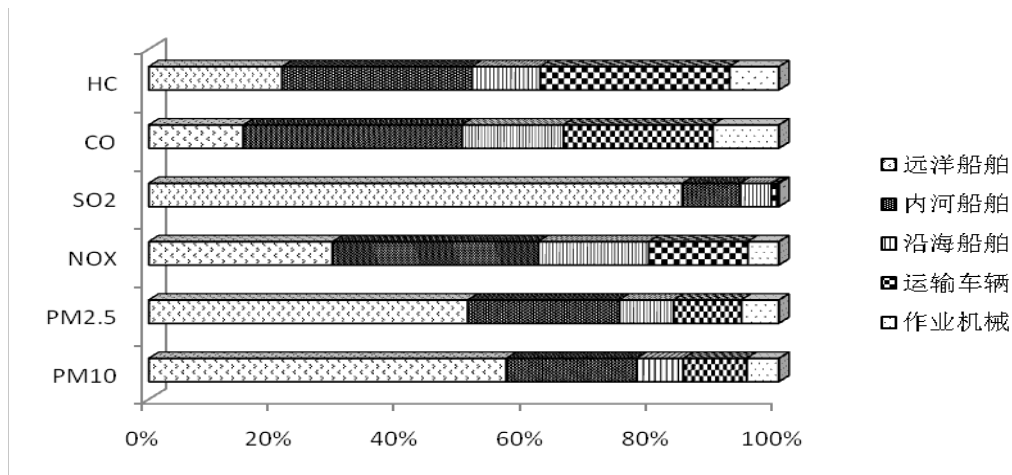


图 6-2 情景一中沿海港口船舶大气污染物排放特征

第二种情景——港口相关移动源排放对所在城市及周边地区的影响：远洋和沿海船舶在距港口 58 海里范围内的排放量，内河船舶在 12 小时航行过程中的排放量，运输车辆运行 65 公里的排放量（行政区范围内平均行驶距离），各污染物排放量如图 6-3 所示。各污染源排放贡献率如图 6-4 所示，主要贡献源为远洋船舶（SO<sub>2</sub> 排放贡献率 85%），其次为内河船舶和沿海船舶（除 SO<sub>2</sub> 外各污染物排放占比 22%~39%），三种船舶共排放了 SO<sub>2</sub> 总量的 99%，PM 和 NO<sub>x</sub> 的近 90%，CO 和 HC 的 70%以上。运输车辆由于计算范围缩小，排放占比有所下降，除 CO 占比 14%、HC 占比 18%外，其他污染物贡献率均低于 10%，作业机械排放占比仍为最低，各污染物排放贡献率在 10%左右（除 CO）及以下。

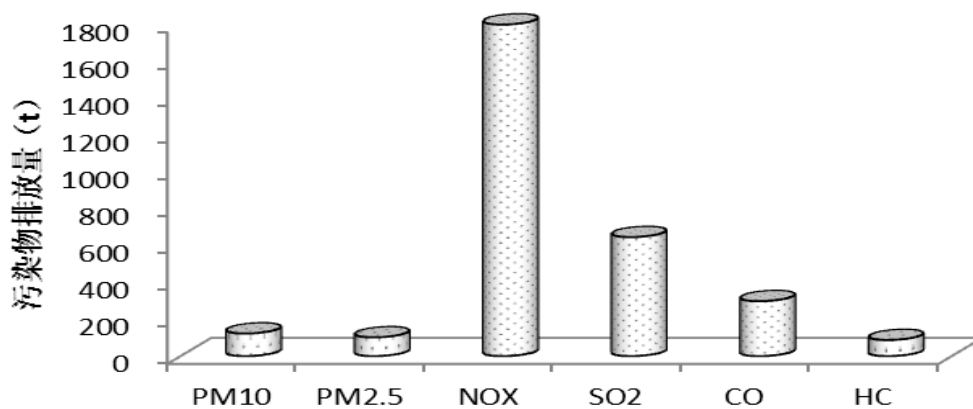


图 6-3 情景二中沿海港各污染物排放量



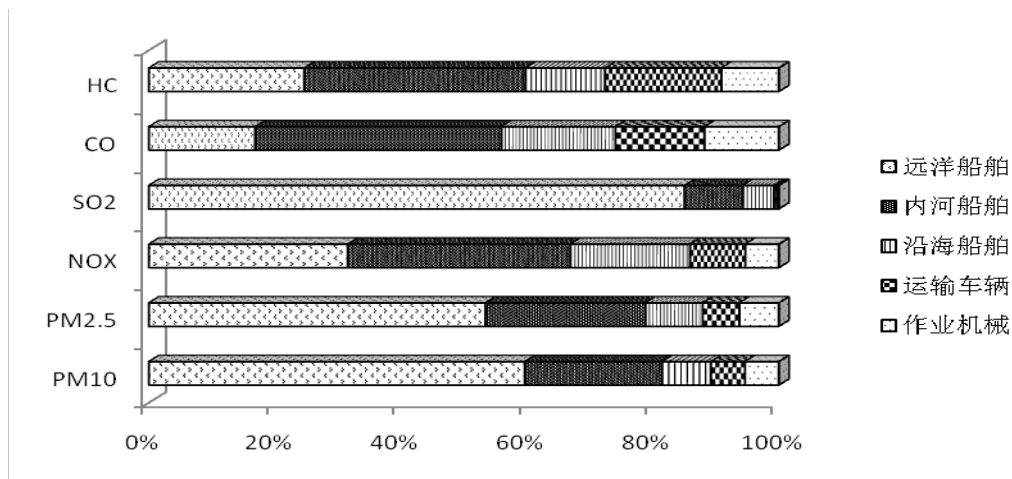


图 6-4 情景二中沿海港口船舶大气污染物排放特征

第三种情景——港口相关移动源排放对所在城市的影响：船舶（包括远洋、沿海和内河）在距港口 24 海里范围内的排放，运输车辆运行 65 公里的排放量（行政区范围内平均行驶距离），各污染物排放量如图 6-5 所示。各污染源排放贡献率如图 6-6 所示，主要贡献源为远洋船舶（SO<sub>2</sub> 排放贡献率 88%），其次为内河船舶（除 SO<sub>2</sub> 外各污染物排放占比 20%~33%），包括沿海船舶在内的三种船舶共排放了 SO<sub>2</sub> 总量的 99%，PM 和 NO<sub>x</sub> 的 80%以上，CO 和 HC 的 60%以上。运输车辆为继内河船舶后的第三大排放源，对于 PM、NO<sub>x</sub>、CO 和 HC 的排放贡献分别为 8%、13%、20%和 26%。由于船舶排放计算范围缩小，作业机械排放贡献率超过沿海船舶（除 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub>），PM 和 NO<sub>x</sub> 贡献率超过 8%，CO 和 HC 分别为 17%和 13%。

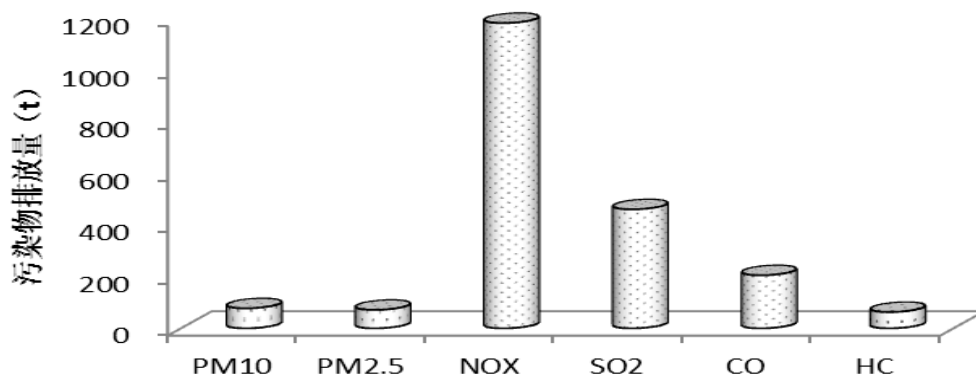


图 6-5 情景三中沿海港各污染物排放量

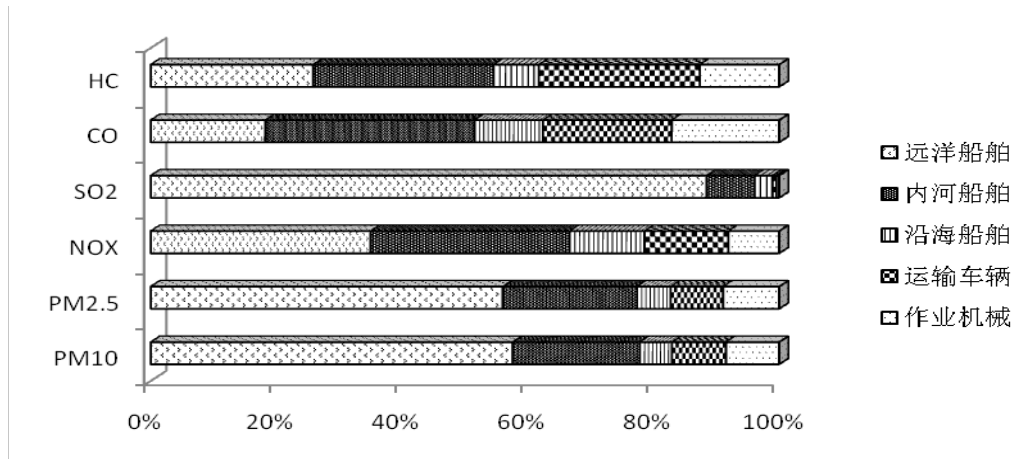


图 6-6 情景三中沿海港口船舶大气污染物排放特征

第四种情景——港口相关排放源对港口周边局部小范围的影响：船舶（包括远洋、沿海和内河）计算距港口 24 海里范围内的排放量，运输车辆计算在港区范围内（沿海港 A 入口及装卸货点之间平均距离 800 米）作业期间的排放量，如图 6-7 所示。各污染源排放贡献率如图 6-8 所示，主要贡献源为远洋船舶（SO<sub>2</sub> 排放贡献率 89%），其次为内河船舶（除 SO<sub>2</sub> 外各污染物排放占比 22%~41%），包括沿海船舶在内的三种船舶共排放了 SO<sub>2</sub> 总量的 99.5%，PM 和 NO<sub>x</sub> 的 90%左右，CO 和 HC 的 80%左右。由于船舶和运输车辆计算范围基本限定在港口周边局部小区域，作业机械排放贡献率超过沿海船舶和运输车辆成为第三大贡献源，PM 和 NO<sub>x</sub> 贡献率在 9%以上，CO 和 HC 的贡献率分别升至 21%和 16%，运输车辆各污染物排放贡献率不足 5%。

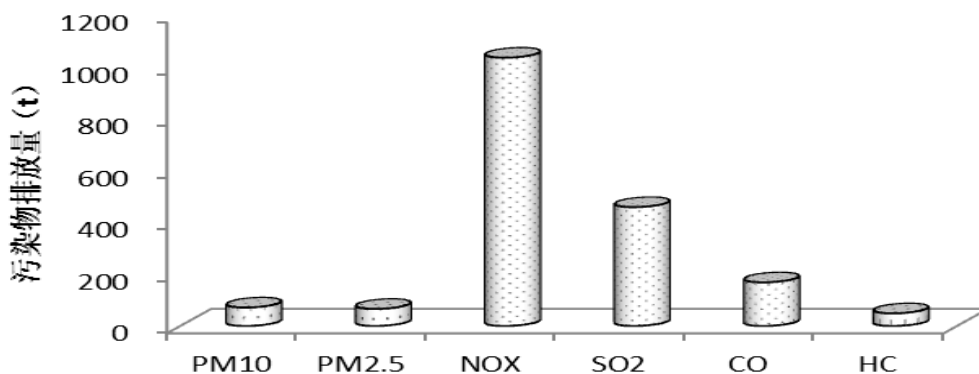


图 6-7 情景四中沿海港各污染物排放量

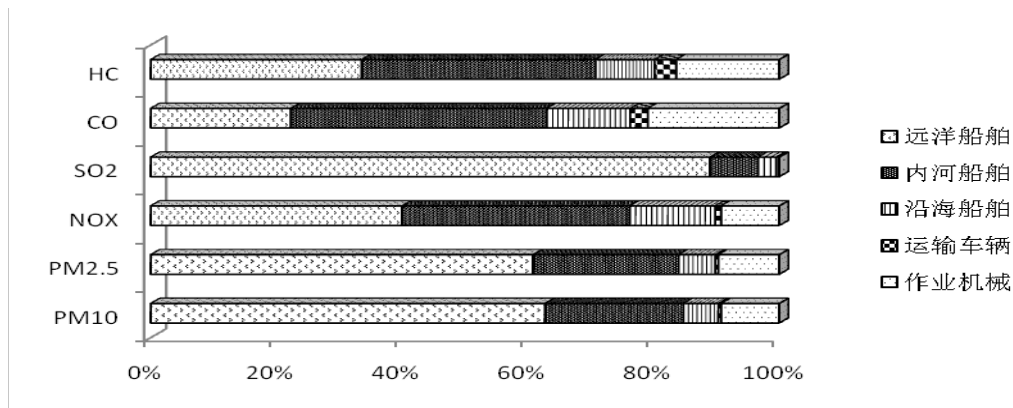


图 6-8 情景四中沿海港口船舶大气污染物排放特征

综上四种情景下排放量计算结果及排放特征分析，船舶及进出港运输车辆计算范围的界定在很大程度上影响着港口大气污染物排放量的计算结果，但对于沿海港口来讲，各类排放源的贡献率没有发生较大变化，远洋船舶都为主要排放源，尤其对于  $\text{SO}_2$  和 PM 的排放更为明显（ $\text{SO}_2$  排放贡献率在 85% 以上，PM 排放贡献率在 50% 以上），其次为内河船舶，各情景下对于  $\text{NO}_x$  的排放贡献率和远洋船舶处于均等水平（30%~40%），对于 CO 和 HC 的排放贡献在各情景下均高于远洋船舶成为第一排放贡献源。包括沿海船舶在内的船舶对各种污染物的排放贡献率在 60%~90%（除  $\text{SO}_2$ ，对  $\text{SO}_2$  贡献率达 99%），是沿海港口的主要排放贡献源。随着四种情景排放量计算范围的逐步缩小，运输车辆的排放贡献率不断下降，港区作业机械的排放贡献率逐步提高，在第四种情景，港口相关排放源对港口周边局部小范围的影响分析中，作业机械超过沿海船舶和运输车辆，成为第三大排放贡献源。

## 6.2. 内河港

将 B1、B2 和 B3 共三个内河港的排放进行整合来分析内河港口船舶大气污染物排放特征。同样地，将内河港区内船舶和运输车辆在不同范围内的排放进行组合，得到四种情景下的排放特征，具体如下所示：

第一种情景——港口相关移动源排放对广东省大区域的影响：到港船舶航行 12 个小时（内河船舶活动水平调研结果中一个航程平均航行时间）期间的排放，运输车辆运行 130 公里的排放量（广东省货物平均运距长度），结果如图

6-9 所示。各污染源排放贡献率如图 6-10 所示，主要贡献源为到港船舶，SO<sub>2</sub> 排放贡献率 84%，PM 和 NOX 排放贡献 50%以上，CO 和 HC 在 40%左右。其次为进出港运输车辆，SO<sub>2</sub> 排放贡献率 15%，PM 和 NO<sub>x</sub> 排放贡献 40%以上，CO 和 HC 在 60%左右。由于船舶和运输车辆的计算范围相对较大，作业机械排放占比最低，各污染物排放贡献率不足 5%。

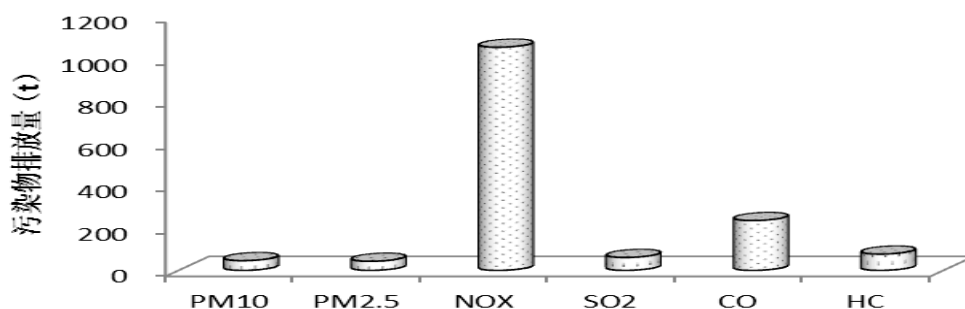


图 6-9 情景一中内河港区各污染物排放量

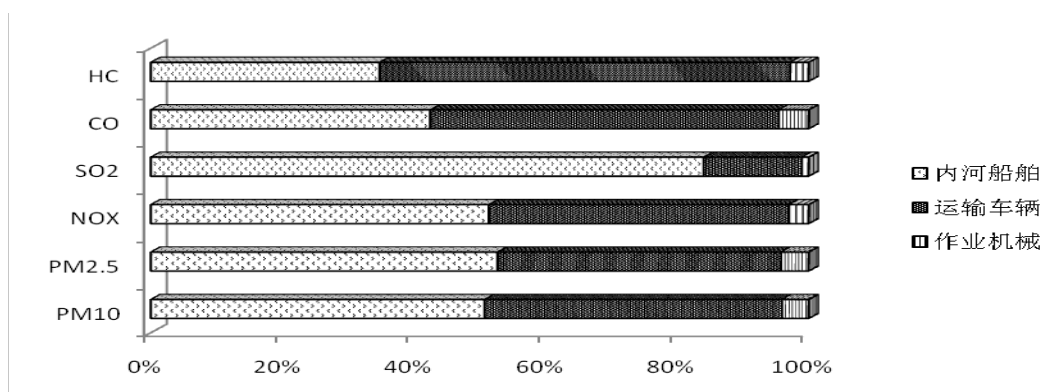


图 6-10 情景一中内河港口船舶大气污染物排放特征

第二种情景——港口相关移动源排放对所在城市及周边地区的影响：到港船舶航行 12 个小时（内河船舶活动水平调研结果中一个航程平均航行时间）期间的排放，运输车辆在行政区范围内（B1 港 37km、B2 港 36km、B3 港 40km）行驶的排放，结果如图 6-11 所示。各污染源排放贡献率如图 6-12 所示，由于运输车辆计算范围缩小，到港船舶排放占比明显上升，SO<sub>2</sub> 排放贡献率 94%，PM 和 NOX 排放贡献 75%左右，CO 和 HC 在 65%左右。进出港运输车辆排放占比仍高于作业机械，SO<sub>2</sub> 排放贡献率 5%，PM 和 NOX 排放贡献

20%左右，CO 和 HC 在 30%左右，作业机械排放占比略有增加，各污染物排放贡献率低于 10%。

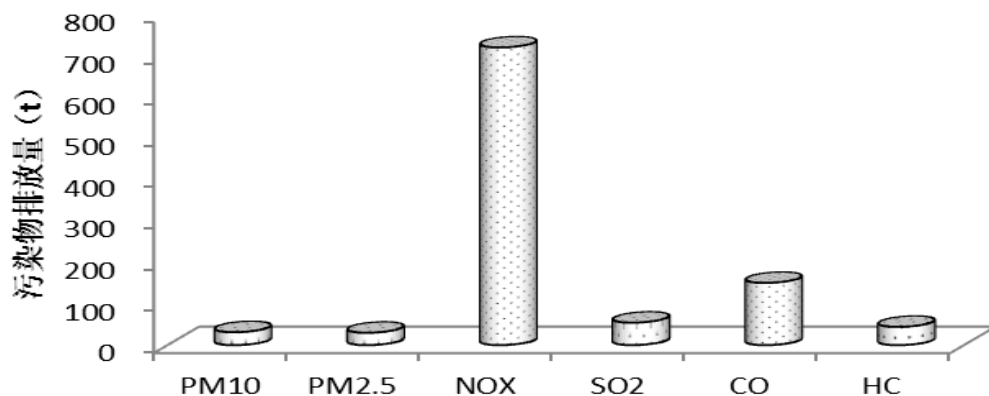


图 6-11 情景二中内河港区各污染物排放量

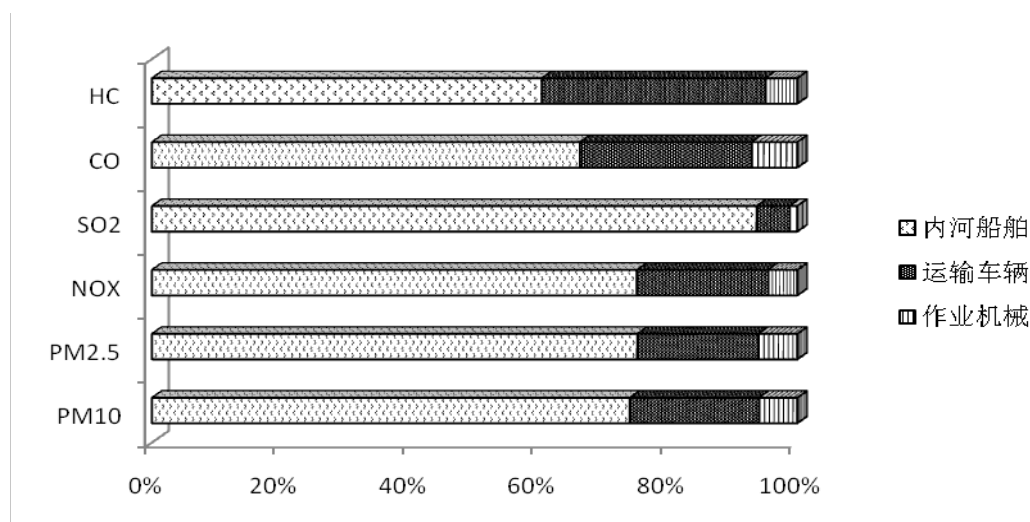


图 6-12 情景二中内河港口船舶大气污染物排放特征

第三种情景——港口相关移动源排放对所在城市的影响：到港船舶在行政区范围航道内航行（B1 港 7km、B2 港 8.7km、B3 港 17km）期间的排放，运输车辆在行政区范围内（B1 港 37km、B2 港 36km、B3 港 40km）行驶的排放，结果如图 6-13 所示。各污染源排放贡献率如图 6-14 所示，运输车辆代替到港船舶成为主要排放贡献源，SO<sub>2</sub> 排放占比 25%，PM 和 NO<sub>x</sub> 排放占比 55%左右，CO 和 HC 排放占比 60%和 70%。到港船舶 SO<sub>2</sub> 排放占比 69%，其他污染

物排放占比分布于 18%~31%。作业机械各污染物排放贡献率增至 15%左右（不包括 SO<sub>2</sub>）。

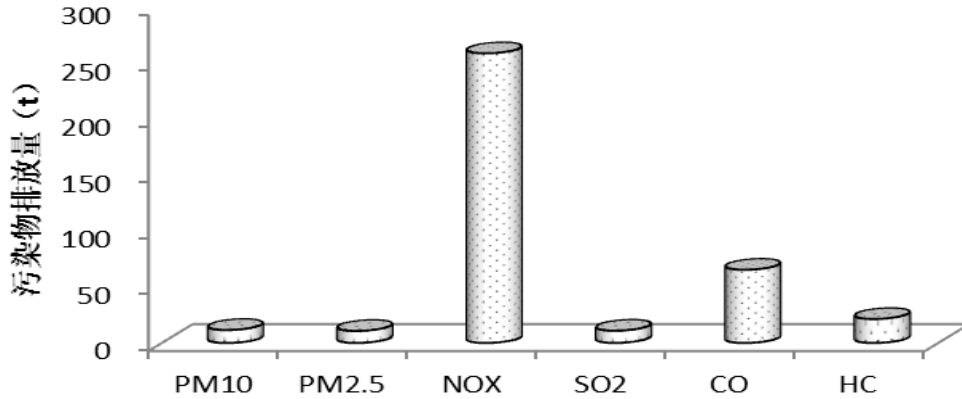


图 6-13 情景二中内河港区各污染物排放量

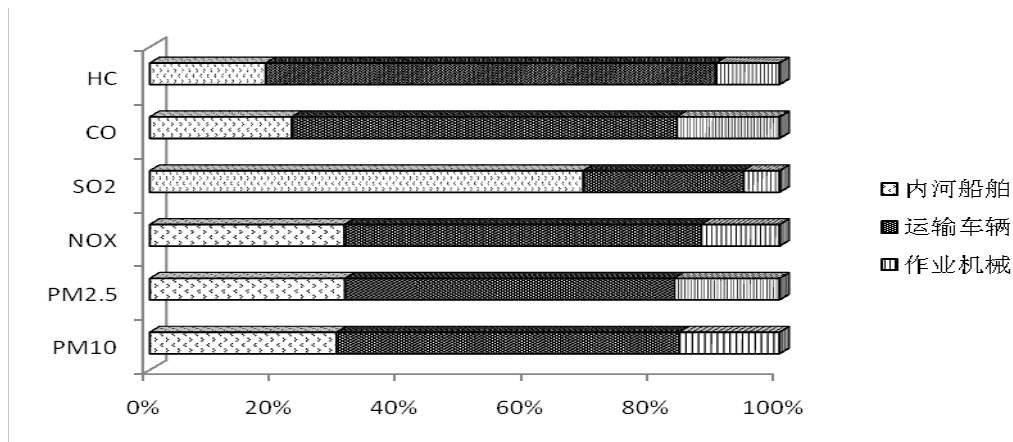


图 6-14 情景三中内河港口船舶大气污染物排放特征

第四种情景——港口相关排放源对港口周边局部小范围的影响：到港船舶在行政区范围航道内航行（B1 港 7km、B2 港 8.7km、B3 港 17km）期间的排放，运输车辆计算在港区范围内（港入口及装卸货点之间平均距离 400 米）作业期间的排放量，结果如图 6-15 所示。各污染源排放贡献率如图 6-16 所示，到港船舶为主要排放贡献源，SO<sub>2</sub> 排放占比 90%，PM 和 NO<sub>x</sub> 排放贡献率在 60%以上，CO 和 HC 排放贡献率在 45%以上。由于船舶和运输车辆计算范围基本限定在港口周边局部小区域，作业机械排放贡献率大幅提高，PM、NO<sub>x</sub>、

CO、HC 和 SO<sub>2</sub> 的贡献率分别升至 32%、26%、34%、26%和 7%，运输车辆 PM 和 NO<sub>x</sub> 的排放贡献率在 8%左右，CO 和 HC 占比分别为 34%和 26%。

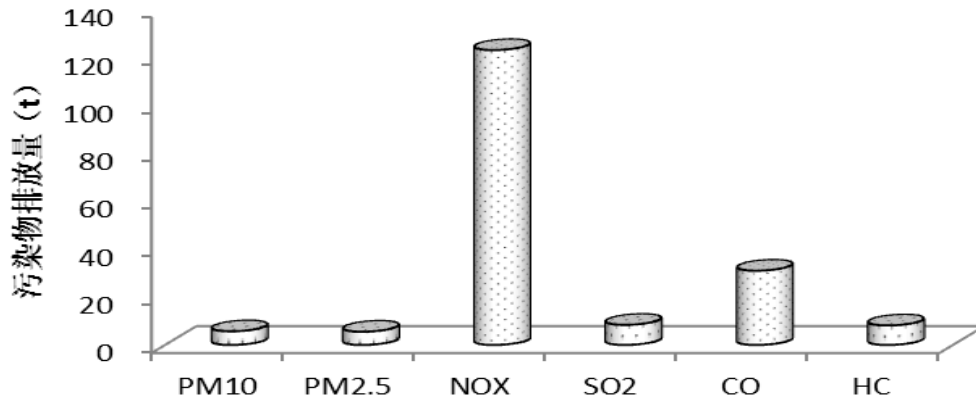


图 6-15 情景二中内河港区各污染物排放量

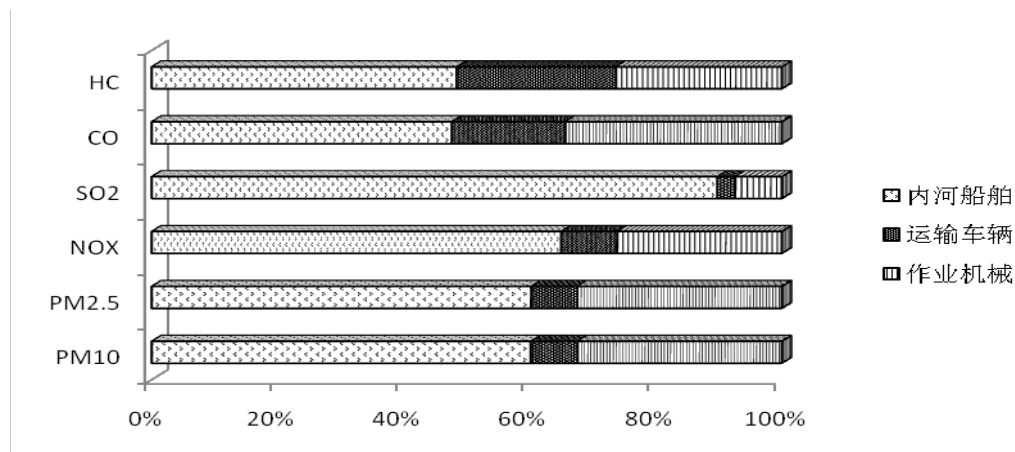


图 6-16 情景四中内河港口船舶大气污染物排放特征

综上四种情景下排放量计算结果及排放特征分析，船舶及进出港运输车辆计算范围的界定在很大程度上影响着内河港区大气污染物排放量的计算结果及排放分担率分布。在情景一到情景三中，由于船舶及运输车辆的计算范围较大，两者的排放分担率较高，随着排放量计算范围的逐步缩小，至在第四种情景只计算港口相关排放源对港口周边局部小范围的影响时，港区作业机械的排放分担率大幅提升，对各种污染物排放占比升至 26%~34%（不包括 SO<sub>2</sub>），对于内河港局部范围内排放，港区作业机械的排放量不容忽视。

### 6.3. 小结

在本章中总结了沿海和内河港口的船舶、作业机械和运输车辆在四种情景下的大气污染物排放总量，并分别分析了排放特征。分析结果可以得出，对于沿海港口来讲，不论是从对广东省区域大范围的影响、港口所在城市及周边地区范围内的影响、港口所在城市的影响以及对港口本身及周边局部小范围的影响来讲，船舶的尾气排放都是污染控制的重点对象，尤其是远洋船舶和内河船舶。内河港区各类污染源对大气污染物的排放贡献率受研究范围的影响比较大，从广东省及城市范围来讲，到港船舶和运输车辆是主要的污染控制对象，而对于港口本身及周边局部小范围内的排放来讲，到港船舶和作业机械成为主要的污染控制对象。



## 七、广东省港口船舶排气污染控制建议

结合国内外港口船舶大气污染控制所采取的主要措施以及广东省港口船舶大气污染控制管理现状及存在问题，依据港口船舶大气污染物排放量计算结果及排放特征，分别就远洋船舶、沿海及内河船舶、作业机械和进出港运输车辆的尾气排放控制提出如下措施建议：

### 7.1. 远洋船舶排气污染控制措施建议

以 A 港为代表的沿海港排放特征来看，主要大气污染物排放贡献源为远洋船舶，远洋船舶是沿海港区大气污染控制的重点对象，针对远洋船舶的尾气排放控制措施提出如下建议：

#### (1) 泊岸转换低硫油

由于将船用燃料油转换成低硫燃油只需要新建少量的基础设施，费用相对较低，在降低船舶大气污染物排放中得到了普遍应用。美国加州和欧盟均执行了严格的泊岸换油的规定，强制要求远洋船停靠码头时使用的燃油含硫量不得超过 1000ppm。新加坡港自 2011 年起推出了自愿的“绿色港口计划”，根据该计划，若远洋船在新加坡海域内和泊岸时使用含硫量不高于 1000 ppm 的燃料或其他经审批的减排技术，港口可减免其 25% 的费用。香港从 2012 年 9 月 26 日启动船舶泊岸转用低硫油的激励计划，政府为泊岸时改用低硫燃油的远洋船提供补贴，但该补贴只覆盖了 40% 的换油成本，面对较低的参与率香港政府计划从 2015 年开始将该自愿性政策改为强制实施。深圳也于近期公布了《深圳市港口、船舶岸电设施和船用低硫油补贴资金管理暂行办法》，拟对在深圳港泊岸时转用含硫量不高于 5000 ppm 燃料的船舶，提供 75-100% 的用油差价补贴。

2015 年 1 月起，ECA 的燃料含硫量 1000 ppm 的限值将生效，部分驶向四大排放控制区内港口的船舶可能会在出发前添加含硫量低于 1000 ppm 的燃油，同时临近的新加坡、韩国，以及国内的上海、江苏、香港等地均有 1000 ppm 及以下的船用燃油供应，在广东省实施远洋船舶泊岸转换低硫油具备一定的可行性。同时签署了《乘风约章》的航运公司呼吁香港政府与广东政府合作，建议

规定在珠三角地区泊岸的船舶均需转用低硫油，以营造一个公平的竞争环境。广东省可以借鉴国际经验，初期可实施资金补贴的激励性政策，逐渐转向强制实施，泊岸转用的低硫油可由 5000ppm 逐渐向 1000ppm 甚至更低的含硫量转变。

在沿海港 A 港 2013 年远洋船舶的排放量计算结果中显示，远洋船舶在港口内的排放，包括装卸货工况和锚泊工况，是不容忽视的重要部分，尤其是对于 24 海里范围内的排放，这部分的排放贡献率达 37%~65%，即便是 58 海里范围的排放量计算结果，该部分排放贡献率仍有 19%~44%，广东省实施远洋船舶泊岸转换低硫油可有效降低该部分污染排放，尤其是 SO<sub>2</sub> 和 PM 的排放，鉴于相对低的成本和成熟的技术，是近期开展远洋船舶大气污染减排可优先考虑的措施。

## （2）加强港口岸电建设

使用岸电是指船舶泊岸时关闭船上发动机，接入港口岸上电力，保持靠岸期间制冷、照明、水泵和其他设施的运转。目前，美国和欧洲各大港口建设有岸电设施，其中在美国加州船舶靠港使用岸电属于强制执行。在国内，上海外高桥码头、山东青岛港和江苏省连云港正在试点应用岸电，广东省的深圳港区在岸电建设及研究方面起到了示范作用，政府对于实施岸电设施建设的港口进行补贴，深圳西部港区，包括蛇口和赤湾两个集装箱码头已纳入了交通运输部绿色低碳港口主题性试点范围，其他较大的集装箱码头也在研究机构的支持下开始研究安装岸电设备的可行性。

《广东省大气污染防治行动方案》提出在珠三角所有新建的邮轮码头需建设岸电设施（相对于其他远洋船舶，邮轮在泊岸过程中所需的能源最多），所有新建的 10 万吨级以上的集装箱码头必须安装岸电供应设施或预留建设岸电设施的空间和容量。在沿海港 A 港远洋船舶调研和排放量计算结果中显示，像散货船、散装化学品船/油船等由于装卸货和锚泊平均时间较长，导致在港口内排放量较大，该部分船舶的靠港泊位也应成为以后港口岸电建设需要考虑的对象。

船舶靠港使用岸电，需要在船舶上安装大量的船载设备和建设岸上电源供应系统，前期投入费用高昂。以美国和欧盟的建设经验为例，在船只上安装岸电设备投资成本在每艘船 30 至 200 万美元之间，美国修建一套岸电设施所需成本在 100 万至 1500 万美元之间，欧洲为 17 万至 800 万美元。岸电的使用，可有效降低各种污染物排放，鉴于昂贵的成本和先进的技术要求，广东省应在有条件的港区积极推进港口码头岸电设施建设的试点工作，积累丰富经验，制定货运码头岸电建设地方补贴和奖励政策，逐步推进邮轮泊位、集装箱泊位以及散货泊位、散装化学品泊位、油泊位等其他类型泊位的岸电设施建设工作。

### （3）探索珠三角地区设立排放控制区的可行性

IMO 在全球设定了四个排放控制区（ECA），分别为波罗的海、北海、北美洲和美国加勒比海排放控制区。在欧洲北海和波罗的海的 ECA 范围内的船舶必须满足比在非 ECA 海域航行时更严格的  $SO_x$  排放限值（同时间接控制 PM 排放）；在北美洲和加勒比海 ECA 中航行的船舶则必须同时执行比在非 ECA 海域航行时更严格的  $SO_x$  和  $NO_x$  排放标准。目前全球船用燃料油含硫量的最大值为 35000ppm，世界平均值也有 26000ppm，而在北美和欧洲的 ECA 范围内航行和停靠的船舶，其使用的燃油含硫量不可超过 10000ppm，该标准在 2015 年将收紧至 1000ppm，远低于世界平均值。

多项研究预计 ECA 政策具有较高的经济性。据估计，欧洲的北海和波罗的海 ECA 执行低硫燃料标准后，其健康和环境效益将是达标所需费用的四倍。而北美洲 ECA 执行严格的  $NO_x$ 、 $SO_x$  和 PM 排放标准，其所带来的效益高于达标所需费用的 10 倍。同时减排带来的环境效益也十分可观，尤其对于  $SO_x$  排放控制区，限定的燃料含硫量标准适用于所有船舶，将有助于减少包括新船和旧船在内的所有船舶在排放控制区内的  $SO_x$  和颗粒物的排放。 $NO_x$  排放控制区内对于  $NO_x$  排放的全面有效控制也将在今后一定时间内得到体现。

以 A 港为代表的沿海港区排放来看，进出港过程的排放量位居第一，距港口 24 海里范围内该工况的排放占比为 35%~63%，并且随着计算范围的扩大，该比例也在上升，近海岸航行过程中的排放控制十分必要。而排放控制区的建

立是一项复杂的工作，前期还有很多可行性的论证工作需要开展，目前应当加强粤港澳地区的合作，积极探索远期在珠三角水域设立排放控制区的可行性。

## 7.2. 内河及沿海船舶排气污染控制措施建议

### (1) 加强燃油硫含量控制以及 LNG 等新能源的推广

按照国际公约，ECA 水域的船舶使用的燃料含硫量不可超过 10000 ppm，该限值自 2015 年 1 月 1 日起将进一步缩紧至 1000 ppm，同时欧美等发达国家和地区对内河船用柴油的油品质量要求经过几个阶段的过渡，已经达到与车用柴油相同的水平。香港是国内首个执行严格的本地船用低硫油标准（500ppm）的城市，自 2014 年 4 月 1 日起，香港出售的船用轻柴油的含硫量限值从 5000ppm 降低到 500ppm，香港水域内航行（以及在香港加油）的船舶开始使用含硫量 500ppm 的燃油后，其排放的  $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}_{10}$  预计将比之前使用含硫量 5000ppm 的燃油时分别减少 90%和 30%。

但由于广东省对船用柴油的油品质量要求较为宽松、管理不够严格等原因，目前船用柴油的油品质量处于相对较差的水平（抽样分析表明平均含硫量 0.39%），船用柴油的硫含量等指标远高于目前珠三角地区车用柴油含硫率 50ppm（0.005%）的限值要求，甚至还有相当数量的船用柴油达不到国家普通柴油的油品质量标准（20%~40%），是造成内河船舶污染物排放量大的重要因素（尤其是  $\text{SO}_2$  的排放，内河港区船舶的  $\text{SO}_2$  排放占比在 70%~90%之间）。加强省内船用燃油硫含量控制和低硫化进程，加大对船舶供油企业、油库和加油船的管理和对船舶用油记录的检查力度，加快我国制定针对船舶的油品质量标准已迫在眉睫。

在加强船用燃油硫含量控制的同时加快推广船舶使用 LNG 燃料（含硫量几乎为零），LNG 代替船用燃料油可以减少 80%以上  $\text{NO}_x$  和颗粒物的排放，且几乎无  $\text{SO}_x$  排放。目前，LNG 船主要在挪威，北美和欧洲天然气价格低廉，发展迅速，已有越来越多的船舶将 LNG 作为燃料，在很多情况下，即使将船舶改造的费用都包括在内，船舶使用 LNG 的成本仍低于使用低硫油。

因为其环境影响较小，我国航运业亦越来越关注 LNG 船，目前国内关注的焦点主要是内河船使用 LNG，2013 年交通部出台了《推进水运行业应用液化天然气的指导意见》，旨在有序推进 LNG 的应用，并设定了具体目标，《广东省大气污染防治行动方案》也提出鼓励开展船舶 LNG 燃料动力改造试点。加快新 LNG 船建设、现役船舶改造为使用 LNG 的技术研究及应用试点、以及 LNG 加注站建设方案研究等在满足未来船舶排放标准及环境大气污染减排任务方面具有前瞻性。

## **(2) 加快船型标准化建设和老旧船舶报废更新**

加快内河船舶的系列化、标准化，有利于提升船舶的大型化、现代化水平，优化内河船舶的运力结构，提高内河船舶的发动机技术水平，是从源头上削减和控制内河船舶大气污染物排放的根本。应加快落实《珠江水运发展行动方案（2011-2015 年）》、《“十二五”期推进全国内河船型标准化工作实施方案》、《“十二五”期推进珠江和闽江水系船型标准化工作方案》等政策方案，严格执行《内河船型标准化补贴资金管理办法》，推动标准化船舶发展，限制非标准船型进入水运市场，力争到 2015 年西江航运干线和珠江三角洲货运船舶标准化率达到 70%，船舶平均吨位达到 1000 载重吨，基本实现干散货、液货船、集装箱船等重点船型的标准化，优化内河船舶运力结构，落实节能减排措施，大幅降低营运船舶单位运输周转量能耗水平，切实削减船舶废气污染物排放。

加强对老旧船舶的检验和管理，推动老旧船舶的淘汰更新，是推动内河船舶技术水平进步和削减船舶污染排放的有效措施。近年来，随着交通领域节能减排逐步受到重视，加上水路运输安全保障的需要，老旧运输船舶的管理和淘汰正日益受到重视。2010 年国家《促进老旧运输船舶和单壳油轮报废更新实施方案》更是采取中央财政补贴方式鼓励老旧运输船舶和单壳油轮提前报废更新。交通运输部 2011 年发布《公路水路交通运输节能减排“十二五”规划》和《建设低碳交通运输体系指导意见》，明确提出要加快淘汰能耗高、污染大的老旧船舶与落后船型，到 2015 年营运船舶单位运输周转量能耗比 2005 年下降 15%。广东省要严格执行国家对老旧运输船舶的分类监督管理要求，对已达到

强制报废船龄的运输船舶，坚决予以强制报废，加快推动现有非标准船型和安全隐患设施达不到规范要求的老旧船舶进行更新改造或淘汰，重点发展节能环保的新型船舶。同时，可以考虑在珠江三角洲地区进一步提高水运市场的门槛，禁止或限制老旧运输船舶的营运。

### （3）推进先进技术应用及船舶排放黑烟监管

就船舶排放标准方面，目前，环保部环境标准研究所已完成了《船舶压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法（中国第一、二阶段）（征求意见稿）》的编制，环保部于 2014 年 8 月 15 日完成了意见征集，意味着我国第一部较完整的针对船舶大气污染的排放标准即将问世，对船舶的尾气污染控制水平提出了更高的要求，促进了一些先进的船舶废气排放控制技术的应用。如目前应用比较广泛的催化还原技术（SCR）、废气再循环技术（EGR）、颗粒捕捉器（DPF）等。其中 SCR 是一种安装在发动机末端的 NO<sub>x</sub> 控制技术，船舶上 SCR 设备的 NO<sub>x</sub> 去除率一般为 70%至 90%，但理想情况下可超过 90%。现在全球已有几百艘船安装了 SCR 设备，在单独应用该技术的情况下便可使船舶排放的废气达到 IMO 的氮氧化物 III 级标准，是目前公认的唯一一项可用于各类船舶发动机和船型的 NO<sub>x</sub> 减排技术，大型船舶的 SCR 设备的单位投资约为 40-135 美元/kW。EGR 通过将部分尾气重新导入燃烧室的方法去除 NO<sub>x</sub>，实践证明即使是使用高含硫量的燃料油，EGR 对于 NO<sub>x</sub> 的去除率也可达到 75%，在单独应用该技术的情况下也可使得船舶排放的废气达到 IMO 的氮氧化物 III 级标准，根据欧盟的经验，EGR 设备的单位成本一般为 60-80 美元/kW。DPF 是一种安装在柴油发动机排放系统中的过滤器，它可以在微粒排放物质进入大气之前将其捕捉，能够减少柴油发动机所产生的烟灰达 90%以上。

船舶排放黑烟过量是由于气缸燃烧不完全所致，说明发动机运行或保养不当，这种情况下船舶的尾气污染物排放更为严重。2014 年 7 月 18 日，香港海事处对《船舶及港口管制条例》和《商船（本地船只）条例》进行的立法修订进行公告，即刻生效，该修订旨在加强控制船舶黑烟排放，对违反规定者进行严厉处罚。广东省对在用内河船舶柴油机废气的排放监控和管理一直存在空白，既缺乏标准，也缺乏法律、规章约束，导致海事等管理机构既无从管理，

也缺乏有效的监管手段。广东省内河航运发达，船舶数量众多，广东省负责内河船舶管理的政府部门较多，部分职能存在交叉，对船舶排气缺乏统一严格的监督和管理。同时，由于船舶运输行业不景气，企业经营利润不高，加上船舶污染治理成本较高，企业普遍缺乏进行污染治理的主动性和积极性，导致船舶经常出现冒黑烟现象。在用内河船舶黑烟排放的监管条例和办法的制定可以为相关管理部门提供监管依据，也可以督促船东、代理人和营运商等保证船舶燃油系统运行良好，避免过量的黑烟排放。

### 7.3. 港口作业机械污染排放控制

港区作业机械具有额定功率大、运作时间长的特点，在较大范围内的排放结果来看，作业机械排放量相比船舶和运输车辆等长距离行驶的移动机械来讲排放量并不大，但就港区范围内的排放（对应第四种排放情景）来讲，作业机械排放贡献率大幅提高，尤其对于内河港的排放，作业机械 PM、NO<sub>x</sub>、CO、HC 和 SO<sub>2</sub> 的贡献率分别升至 32%、26%、34%、26%和 7%。在作业机械排放中，又尤以沿海港口额定功率较大的集装箱龙门起重机（占作业机械各污染物排放总量的 30%-41%）、保有量较大的单斗车和推靶车、燃料消耗率较高的推土机为最大，4 种作业机械贡献了该部分污染物排放量的 90%左右；以及内河港口额定功率较高的集装箱正面吊运起重机和场地龙门吊（两者排放了作业机械各污染物排放量的 70%以上）等的排放量为最大。

改善港口用能结构，加快流动机械和港口内拖车“油改电”、“油改气”进程，以额定功率较大的起重机为重点，兼顾保有量较大的单斗车、推靶车以及燃料消耗率较高的推土机，全面推进港口装卸机械“油改电”和“油改气”工作。到 2015 年，完成主要港口集装箱轮胎式门式起重机（RTG）的“油改电”改造。对于因为电力供应或者堆场平面布置制约不具备改造条件的 RTG，引导企业开展混合动力或者可基于负载调整柴油机转速的技术改造。2017 年底前，基本完成沿海和内河主要港口轮胎式门式起重机（RTG）的“油改电”工作。到 2020 年，完成全省港口的 RTG“油改电”改造，鼓励开展其他港口装卸机械设备“油改电”改造。

## 7.4. 进出港运输车辆排放控制措施建议

运输车辆由于具有行驶距离长、作业次数多的特点，在内河港口的大气污染物排放贡献率很高，在情景一种，对  $\text{SO}_2$  排放贡献率 15%，PM 和  $\text{NO}_x$  排放贡献 40%以上，CO 和 HC 在 60%左右，在情景二中运输车辆代替内河船舶成为主要排放贡献源， $\text{SO}_2$  排放占比 25%，PM 和  $\text{NO}_x$  排放占比 55%左右，CO 和 HC 排放占比 60%和 70%。即便在以远洋船舶为重要排放来源的沿海港口其排放占比仍不容忽视（在情景一和情景三种运输车辆对于 PM、 $\text{NO}_x$  排放贡献率为 10%左右，对于 CO 和 HC 的排放贡献率在 20%以上）。

调研结果显示，港区运输车辆主要为柴油车，我国对于国 II 排放标准及以前的柴油车发放黄色环保标志，称其为“黄标车”，“黄标车”具有排放量大、浓度高、稳定性差等特点。COPERT 模型计算结果显示，以国 0 和国 IV 阶段重型柴油货车的排放因子作对比可以得出，一辆国 0 柴油车车行驶一公里其 CO、VOC、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  的排放量分别是国 IV 柴油车行驶一公里排放量的 18 倍、42 倍、3 倍、7 倍、5 倍和 1.2 倍。提升港区内运输车辆排放标准、禁止港区外老旧车及“黄标车”进港作业，可实现有效减少该部分污染物排放量的目的。

同时，严格执行《广东省绿色港口行动计划》推进港区内运输车辆的“油改气”，在深圳港试点应用 LNG 拖挂车的基础上，推动广州、珠海、湛江、汕头、东莞、惠州、中山等港口，实施运输车辆的“油改气”改造工作。