

中国船舶和港口空气污染防治 白皮书

冯淑慧

朱祉熹

Renilde Becque

Barbara Finamore

致谢

首先，特别感谢洛克菲罗兄弟基金会对本项目的资助及支持。《白皮书》的编制得到了国内相关政府部门，环境保护部机动车排污监控中心和交通运输部水运科学研究院等研究机构，以及能源基金会中国的支持和协助，在此一并表示感谢。我们还要感谢对《白皮书》进行同行评议的内部专家：自然资源保护协会（NRDC）的 Diane Bailey 和施晓馨；以及外部专家：环境保护部机动车排污监控中心的丁焰副主任和 Gladstein, Neandross & Associates（GNA）的 Rich Kassel；以及对编写“岸电”章节提供资料和修改建议的 GNA 的 Patrick Couch 和 Rich Kassel。最后我们要感谢 NRDC 的 David Pettit、方健、Sean Song 等同事协助我们完成该《白皮书》；尤其感谢陈颖刚和 Christine Xu 在编制过程中提供的大力帮助。

关于 NRDC

自然资源保护协会（NRDC）是一家国际非营利环保机构，拥有逾 140 万会员及支持者。自 1970 年成立以来，NRDC 的环境律师、科学家及环保专家们一直在为保护自然资源、公众健康及环境而进行不懈努力。NRDC 在美国、中国、印度、加拿大、墨西哥、智利、哥斯达黎加、欧盟等国家及地区开展工作。请登录网站了解更多详情 www.nrdc.cn。

目录

图表目录	I
缩略语列表	II
名词解释一览表	III
摘要	1
1. 前言	3
1.1 我国的港口与航运	3
1.2 内容概述	4
2. 船舶及港口废气排放及其影响	5
2.1 船舶和港口废气排放	5
2.2 船舶废气排放的主要影响	12
3. 法规框架	15
3.1 国际公约	15
3.2 我国的法规和政策	16
4. 备选政策及措施	24
4.1 转用低硫油	26
4.2 岸电/冷熨烫	27
4.3 液化天然气	30
4.4 废气洗涤器	32
4.5 其他废气治理技术	33
4.6 降低船舶航速	33
4.7 扩展《乘风约章》	35
4.8 补贴与折扣	35
4.9 排放控制区	35
4.10 备选方案对我国大气污染物排放的影响	37
5 结论	38
附录. 岸电分析方法概述	40
尾注	43

图表目录

- 表 1: 2013 年全球 20 大集装箱码头及其吞吐量
- 表 2: 船舶废气排放控制的主要政策和措施
- 表 3: 不同船舶减速情况下污染物排放量 (单位: 吨/年; 2008 年数据)
- 表 4: 香港和珠三角地区四种船舶废气排放控制情景下的污染物减排潜力
-
- 图 1: 中国车用柴油、非道路机械用柴油及国际海事组织关于远洋船的燃油含硫量标准对比
- 图 2: 中国道路和非道路柴油机 NO_x 排放标准与 IMO 船用发动机排放标准对比
- 图 3: 船舶废气排放量占香港废气排放总量的比例, 2012 年数据
- 图 4: 香港船舶废气排放量, 2007 年数据
- 图 5: 香港水域远洋船二氧化硫排放分布 (单位: 吨/年), 2007 年数据
- 图 6: 2009 年香港集装箱港附近的葵涌区的二氧化硫排放的空间分布
- 图 7: 2007 年珠三角地区远洋船二氧化硫排放的空间分布 (单位: 吨/年)
- 图 8: 2020 年美国不实施排放控制区情景下船舶对 PM_{2.5} 年均浓度的贡献值
- 图 9: 全球船舶 PM_{2.5} 排放引发的心肺疾病过早死亡病例分布
- 图 10: 2008 年至 2025 年, IMO 船用燃料油含硫量标准及欧盟和美国加州海域燃油含硫量限值
- 图 11: 全球四个排放控制区覆盖范围: 波罗的海、北海、北美洲和美国加勒比海排放控制区
- 图 12: 泊岸船舶使用燃料油、柴油和岸电情景下生命周期内大气污染物排放量对比

缩略语列表

AQG	空气质量指南
AQI	环境空气质量指数
AQO	香港空气质素指标
CARB	美国加州空气资源委员会
CO	一氧化碳
CO ₂	二氧化碳
ECA	排放控制区
EGR	废气再循环
HAM	湿空气动力系统
HC	碳氢化合物
HFO	燃料油
IMO	国际海事组织
LNG	液化天然气
MARPOL	防治船舶污染国际公约
MDO	船用柴油
nm	海里
NO ₂	二氧化氮
NO _x	氮氧化物
O ₃	臭氧
PAH	多环芳烃
pH	酸度
POLA	洛杉矶港
POLB	长滩港
POSD	圣地亚哥港
PM	颗粒物
ppm	百万分率
RSP	可吸入颗粒物
RTG	轮胎式集装箱门式起重机
SCR	选择性催化还原
SO ₂	二氧化硫
SO ₃	三氧化硫
SO _x	硫氧化物
TEU	标准集装箱
WHO	世界卫生组织
VOC	挥发性有机化合物

名词解释一览表

转用低硫油

转用低硫油是指将船舶主机和/或辅机使用的船用燃料油（硫含量高达 35,000 ppm，即 3.5%）转换成低硫燃油（含硫量为 1,000 至 15,000 ppm，即 0.1% 至 1.5%）。

岸电

使用岸电是指船舶泊岸时关闭船上发动机，并接入港口岸上提供的电力，以保持靠岸时制冷、照明、水泵和其他设施的运转。

降低船舶航速

降低航速是指远洋船以远低于最大航速的速度巡航，这样可以节省燃料并减少废气排放。

摘要

全球十大集装箱港口有七个在中国，中国港口每年共处理全球三成的集装箱吞吐量。然而，每一艘进出港口的船舶和货车虽然带来了货物，促进了经济发展，但也加剧了港口和周边地区的空气污染。停泊在中国港口的大多数船舶使用的是燃料油，即渣油；多数港口机械和港区内货车仍使用柴油。上述船舶、机械和货车的发动机所排放的废气中，柴油颗粒物（PM）、氮氧化物（NO_x）和硫氧化物（SO_x）的含量极高。这些污染物均会致癌，也会引发呼吸系统和心血管疾病¹。柴油或燃料油燃烧产生的PM中还含有黑碳。黑碳是一种短期气候致暖物质，会加速冰川和极地冰盖融化，并加剧气候变化。发动机排放的NO_x会增加区域的臭氧（O₃）和PM浓度，威胁人类健康。此外，非清洁柴油和船用燃料油含硫量高，会对船舶和货车上安装的先进的尾气处理设备造成损害，使得硫酸盐（PM的一种成分）和二氧化硫（SO₂）排放量较大，破坏生态系统、加剧海洋酸化。

中国正为航运所造成的空气污染付出高昂的代价。国内外研究表明，2010年中国约有120万人因为空气污染而过早死亡，其中航运是导致空气污染和健康问题的重要因素之一。根据香港和深圳开展的研究，港口城市的问题尤为突出²。我国主要港口城市均属于人口密集地区，这就意味着船舶和港口带来的空气污染，对中国的港口城市所造成的公共健康风险和环境影响较之其他国家的港口城市可能更为严重。

北美、欧洲及亚洲一些国家和地区的政府（如新加坡和香港）意识到航运的空气污染对健康和环境的影响，已采取了相关措施来防治船舶和港口的空气污染。有的政府还推出自愿性计划以鼓励使用低硫燃料和清洁技术。对于远洋船，则由联合国机构“国际海事组织”（IMO）对其制定SO_x、PM和NO_x的排放标准¹。IMO还在全球设定了四个排放控制区（ECA）。其中，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。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10,000 ppm（1 ppm为百万分之一）（1%）。该标准在2015年将收紧至1,000 ppm（0.1%）。该限值远低于船用燃料油含硫量的世界平均值（26,000 ppm，2.6%）和全球船用燃料油含硫量的最大限值（35,000 ppm，3.5%）³。自2016年起，所有新建的远洋船在北美洲和加勒比海ECA（海岸线以外200海里内的海域）航行时，其NO_x排放必须比现在新建的远洋船低75%。欧盟的内河船和在美国航行的美籍非远洋船都必须执行比非道路发动机的燃油含硫量和NO_x排放标准更严格的限值⁴。香港和新加坡也推出了自愿转用清洁能源的激励政策：如果远洋船在香港泊岸时或在进入新加坡港水域后自愿转用清洁能源，则可以获得减免港口费用的优惠。⁵

i 国际海事组织（IMO）制定了环境保护相关的法规，即《防止船舶污染国际公约》（MARPOL）。该公约的附件VI是关于防治船舶空气污染的。本白皮书提到的国家和地区均签署了附件VI，并在附件VI的框架下实施法律法规。更多详细内容见4.9节。

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 执行低硫燃料的标准后，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。

上述法规和激励政策已推动了航运业的替代燃料和先进的船舶废气排放控制技术的发展与应用。尽管以含硫量低的船用燃料油替代高硫燃料油仍是满足燃油含硫量要求的最常用方法，但一些船公司也开始测试并应用末端尾气净化装置来降低尾气中的硫氧化物 (SO_x)。由于欧美多国实施了激励政策、北美执行了严格的 NO_x 排放标准，先进的 NO_x 排放控制技术（如选择性催化还原技术和废气再循环装置）也已在一些船只上应用。在美国、欧盟和中国，以液化天然气 (LNG) 代替船用燃料油的技术正逐渐受到重视。LNG 船舶的 NO_x、SO_x 和 PM 排放量比使用低硫燃料的船舶更低，而且 LNG 的价格在美国和欧盟比低硫船用油低。因此，越来越多的欧洲港口已开始建造 LNG 加注设施。另外，美国和欧盟的一些港口也鼓励、甚至强制要求远洋船靠岸时使用岸电、降低航速，以进一步减少船舶废气在港口区域的排放。

中国近年来严重的空气污染问题促使政府公布了新的空气质量标准并实施了大量提升空气质量的措施。部分沿海省市已经开始关注船舶和港口活动的空气污染问题。香港是国内首个执行严格的本地船用低硫油标准 (500 ppm，或 0.05% 含硫量) 的城市，并即将率先强制要求远洋船靠岸时使用低硫燃料油。继香港之后，深圳市公布了一系列相关措施，推动船舶、货车和港口设备使用清洁能源。其他港口城市和地区，如上海市、青岛市、广东省、江苏省和山东省，均已发布方案推广使用岸电、港口设备电气化以及电动或天然气动力货车。总体来说，由于国内对船舶和港口的大气污染防治的相关措施和研究尚处于起步阶段，船舶、货运车和港口设备还存在很大的减排空间，推动清洁化的船只、货运车辆和港口设备将能极大的促进国家和沿海的大气污染重点防控区域改善空气质量。

虽然上述规划、计划很令人鼓舞，但这些措施实施起来可能会面临许多挑战。由于缺乏足够的的数据，大多数措施在拟定时未充分根据港口特点进行具体分析。多数规划仅泛泛的提出了规划目标，因此，具体的罚则、补贴政策等实施细则只能由省级或市级负责机构与各利益相关方（包括港口和航运业）协商后确定。但如果没有足够的分析作支撑，这些规划将难以得到港口和航运业的全力支持。航运业竞争激烈，如果邻近地区的港口不能共同推行地区性的减排政策，船舶有可能转向监管力度宽松的港口，这势必导致污染转移，并大大削弱港口已实施的防治措施的减排效果。

为了应对上述挑战和研究的不足，港口或港口区域需进行更多的研究，以建立港口大气污染物排放清单，评估一个港口或一个地区采取不同的污染控制措施所需的成本和可能的效益。例如，岸电或 LNG 船舶等措施的成本和效益可能会因港口的具体情况而具有很大差异，这种分析将有助于港口制定最优的减排方案以达到最佳控制效果。随后，可以在防治措施成本效益分析的基础上制定“港口清洁空气行动计划”，以指导如何削减船舶和港口的废气排放。政府也应评估相关的减排政策对港口竞争力的影响，并制定应对方案，这将能够为船舶和港口空气污染防治政策争取更多的支持。最终，实施区域性的、甚至全国性的废气减排方案，例如设立排放控制区 (ECA)，将能够有效地防止船舶转移到环保要求较宽松的港口，并确保拟定的减排方案能够实现最佳减排效果和健康效益。

1.前言

1.1 我国的港口与航运

2012年，全球港口集装箱吞吐量总计为6亿TEUs（一个标准集装箱（TEU）长20英尺，宽8英尺）ⁱⁱ，其中我国港口集装箱吞吐量占全球的三成，接近1.78亿TEUsⁱⁱⁱ。目前，世界十大港口有七个在中国，而世界前二十大港口中我国占十席⁶，这十大港口的吞吐量占全球吞吐量的26%（超过1.68亿TEUs，见表1）。与全球其他重要的港口地区相比，我国前七大港口所处地区人口密集度高，船舶活动频繁，船舶造成的空气污染可能对国内港口城市居民的健康影响更大。

35年前，中国大陆还没有大规模的集装箱港口，那时香港是中国主要的集装箱港，满足我国的进出口运输需求。如今，中国已建立的集装箱港口，如上海港，不仅促进了中国的进出口贸易，还成为东北亚地区的进出口枢纽⁷。珠三角地区的三大集装箱港口（深圳港、香港港口和广州港）分别是世界第三大、第四大和第八大集装箱港口，也成为了中国南方主要的制造业基地和消费基地的门户⁸，详见表1。

表 1: 2013 年全球 20 大集装箱码头及其吞吐量⁹

排名	港口名	国家	吞吐量 (百万 TEU)	占世界总吞吐量比例
1	上海	中国	33.6	5%
2	新加坡	新加坡	32.6	5%
3	深圳	中国	23.3	4%
4	香港	中国	22.3	3%
5	釜山	韩国	17.7	3%
6	宁波舟山	中国	17.4	3%
7	青岛	中国	15.5	2%
8	广州	中国	15.3	2%
9	迪拜	阿拉伯联合酋长国	13.5	2%
10	天津	中国	13.0	2%
11	鹿特丹港	荷兰	11.6	2%
12	巴生港	马来西亚	10.2	2%
13	大连	中国	10.0	2%
14	台湾高雄	中国	9.9	2%
15	汉堡	德国	9.2	1%
16	安特卫普	比利时	8.6	1%
17	厦门	中国	8.0	1%
18	洛杉矶	美国	7.90	1%
19	丹戎帕拉帕斯港	马来西亚	7.5	1%
20	长滩	美国	6.7	1%
中国前 20 港口			168.3	26%
世界前 20 港口			293.8	46%
世界总量			641.0	100%

ii 标准集装箱（TEU）未考虑集装箱的高度，其高度从4英尺至9英尺不等。

iii 包括中国大陆、香港和台湾的所有港口。

从2002年到2012年，广州港（18%）、上海港（18%）和深圳港（16%）的货运量年平均增长率都超过了香港（4%）¹⁰。由于香港缺乏充足的土地对港口进行升级和扩展，使得香港集装箱码头的运输成本和装卸成本较高，这也是其竞争力弱于区域内其他港口的重要原因¹¹。由于预期增长速度将进一步放缓，香港政府认为开发第十号集装箱码头的计划尚不具有经济可行性，已将计划推迟¹²。相比之下，中国大陆的沿海地区，如广东、上海和浙江，已经制定了宏伟的发展规划，并投入了大量的资源用于港口扩建、铁路和内河航道的网络布局，旨在增强连通性、提高效率，进而提高珠三角和长江三角洲地区港口的竞争力¹³。

1.2 内容概述

中国港口和航运业的持续发展虽然推动了经济发展，但也为国内日趋严重的空气污染带来了新污染源。国内现在尚缺乏控制船舶废气排放的法规，但一些地方政府已经开始寻找减缓船舶和港口空气污染的方案。本白皮书旨在为关注船舶和港口废气排放的监管机构和利益相关方提供相关的背景知识，包括船舶、港口废气排放对环境和健康的影响，以及欧美国家治理港口空气污染和控制船舶废气排放的各类措施和解决方案。我们希望本白皮书所提供的基础信息有助于政府机构更好的设计船舶和港口空气污染的防治政策和措施。由于每一个港口均有其特点，因此，本白皮书并未推荐国内港口应当采取的具体策略。国内的主要港口需开展详细的、针对每个港口的分析，因地制宜的选择经济、高效的措施；全国范围也需开展相关研究和分析。

白皮书第一章为前言，介绍了我国的港口和航运业的概况。第二章概述了船舶和港口大气污染物的主要来源、对空气污染的贡献，以及相关的健康和环境影响。第三章介绍了香港及中国大陆空气质量管理及船舶港口空气污染防治的法规规定，以及控制废气排放的激励政策和自愿性政策。第四章对各类控制船舶废气排放的政策和技术措施进行了综述，并分析了这些政策和措施的效果以及实施中可能面临的挑战。第五章总结了现存的问题，着重探讨未来的计划和建设。

2.船舶和港口废气排放及其影响

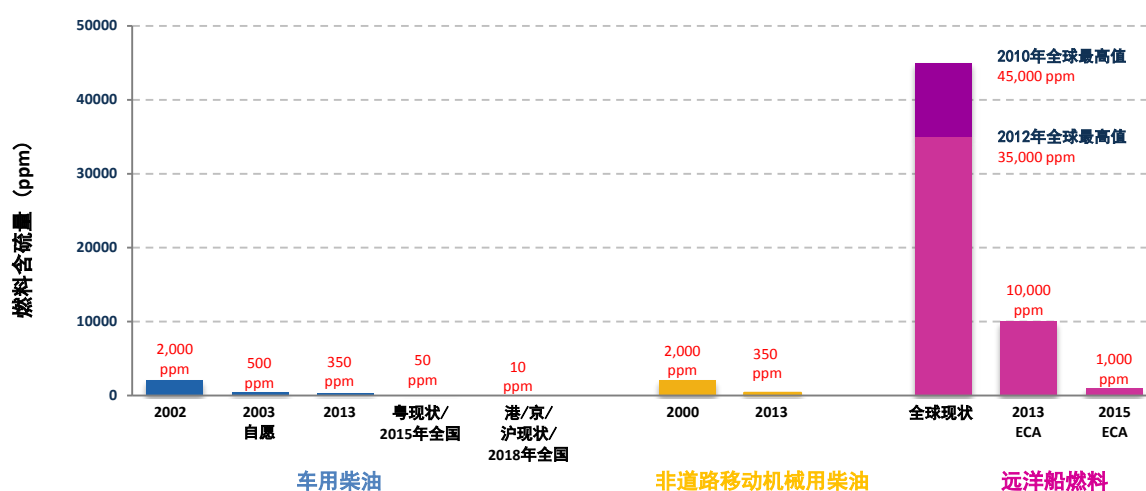
2.1 船舶和港口废气排放

2.1.1 主要的大气污染物

绝大部分远洋船是由大型压燃式发动机推动的，其颗粒物（PM）、硫氧化物（SO_x）和氮氧化物（NO_x）等大气污染物的排放量很高。远洋船主要使用燃料油（也称为渣油或重油）来提供动力、供热和电力。船用燃料油是炼油的残余产物，具有含硫量高、粘度高的特点，还含有重金属，如镉、钒和铅等。发动机内的燃料燃烧后，燃料油中的硫转化成二氧化硫（SO₂），一小部分被氧化为三氧化硫（SO₃），产生硫酸和硫酸盐气溶胶，直接以颗粒物形式排出。SO_x和NO_x的排放也加剧了副产物PM_{2.5}（粒径小于2.5微米的细颗粒物）的生成¹⁴。二氧化硫和以硫酸盐为主的颗粒物在发动机烟气中的浓度与燃油含硫量成一定比例。因此，即使没有任何排放控制设备，单靠转用低硫油也能够直接降低二氧化硫和颗粒物的排放量¹⁵。根据道路污染源的防控经验，将柴油含硫量控制在较低水平（<350 ppm (0.035%）；甚至更低，如<10 ppm (0.001%）），还有助于高效的排放控制技术的使用，例如控制氮氧化物的选择性催化还原（SCR）技术，以及颗粒物去除率高于90%的颗粒物捕捉器等¹⁶。

中国等发展中国家目前还没有出台船舶废气排放控制的法律法规。作为国际海事组织（IMO）的成员之一，中国签署了《防止船舶污染国际公约》（MARPOL），应执行其对国际船舶的环保要求，包括该公约的附件VI。附件VI是专门针对船舶空气污染防治的，该法规允许远洋船燃烧的船用燃料油含硫量高达35,000 ppm（3.5%）^{iv}。我国船舶的相关规范尚不完善，与之形成对比的是，道路车辆和非道路移动机械发动机（如农用拖拉机及建筑设备）使用的柴油含硫量已实施严格限值，即控制在350 ppm（0.035%）以内。在珠江三角洲和长江三角洲地区的主要城市，机动车用柴油和汽油的含硫量控制在50 ppm（0.005%）以下；北京、上海和香港的车用燃油含硫量标准更为严格，为10 ppm（0.001%），与美国、欧盟及日本的水平大致相同¹⁷。各类标准及要求参见图1。

图 1：中国车用柴油、非道路机械用柴油及国际海事组织关于远洋船的燃油含硫量标准对比¹⁸



注：车用柴油低含硫量限值已经在一些重点区域实施，如北京、上海、广东和香港。

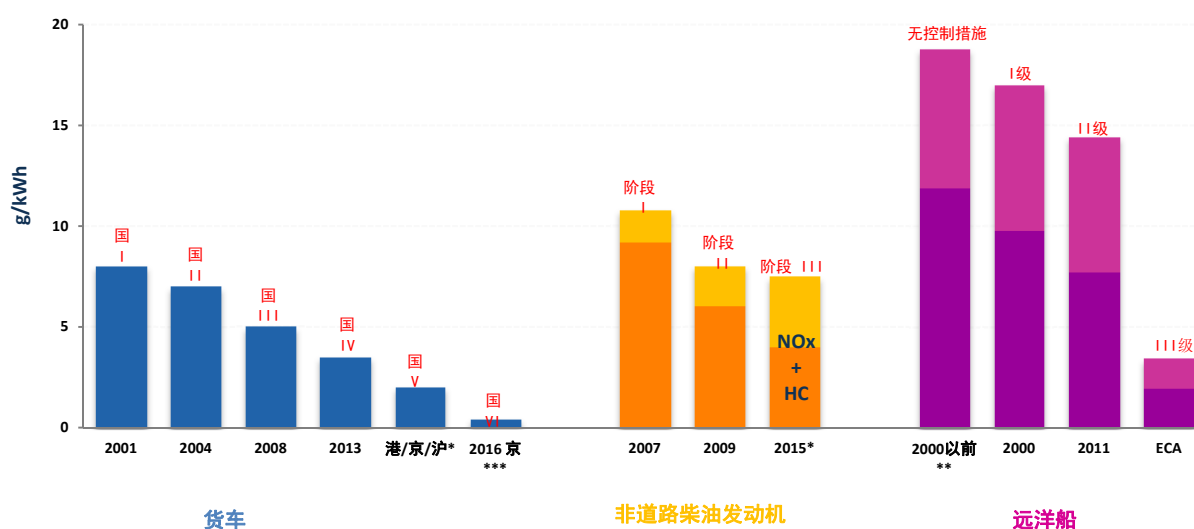
iv 已设立的排放控制区（ECA）除外。见尾注3。

如图所示，船用燃料油的含硫量是车用柴油的 100 至 3500 倍。因此，远洋船单位燃料的二氧化硫和颗粒物排放量远远超过道路车辆^v。假设一艘中型到大型集装箱船使用含硫量为 35,000 ppm (3.5%) 的船用燃料油，并以最大功率的 70% 行驶时，则其一天排放的 PM_{2.5} 总量最多相当于我国 50 万辆国 IV 货车同一天的排放量¹⁹。

就 NO_x 排放而言，航运业的废气排放法规一向比车辆和非道路移动机械的排放标准宽松。因为船用发动机在高温高压条件下运行，并且一般未采用有效的排放控制措施，因此，船舶单位燃料 NO_x 排放量远高于机动车²⁰。

图 2 比较了我国现在和未来几年机动车和非道路移动机械用柴油发动机的 NO_x 排放限值，以及 IMO 规定的远洋船 NO_x 排放限值。IMO 的 NO_x 排放限值（图中紫色柱）因发动机转速而异（图中较浅色的部分是因发动机转速不同而变化的标准范围）。2011 年之后新建的船用发动机适用 II 级标准，而该标准等同于 2013 年生效的新柴油车排放标准（图中标注“国 IV”的蓝色柱）的 2 到 4 倍，也是已在香港、北京和上海实施的柴油车国 V 标准的 4 到 7 倍、2016 年北京即将采用的柴油车欧 VI 标准的 17 到 31 倍（图中最短蓝色柱）。只有当船用发动机标准进一步强化至 III 级，即排放控制区（ECA）标准（图中紫色柱）时，其才能够与香港、北京和上海当前的柴油货车标准以及计划 2015 年在珠三角实施的柴油车标准相当。

图 2：中国道路和非道路柴油机 NO_x 排放标准与 IMO 船用发动机排放标准对比²¹



注：柱状图中颜色较浅的部分指不同发动机功率或转速的 NO_x 标准范围。我国非道路发动机的 NO_x 标准是根据输出功率设定的。IMO 远洋船 NO_x 标准则因发动机最大转速而异。

* 柴油货车的国 V 标准（即标有“港/京/沪”的蓝色柱）还未在全国范围内推行，具体实施时间尚未公布。目前仅香港、北京和上海实施了该标准。非道路柴油发动机的最新标准限制了 NO_x 和碳氢化合物（HC）的总排放量。该标准将于 2015 年 10 月 1 日实施。

** 无控制措施的远洋船排放水平基于 Eyring 等的集装箱货船的排放系数²²。

*** 北京已经承诺于 2016 年实施比国 V 标准更严格的排放标准，因此该图以国 VI 标准表示。

^v 美国和欧盟的小型船舶是例外，即欧盟的内河船和美国安装第 1 类和第 2 类发动机的船舶。有规定要求这些船舶使用的燃料含硫量不超过 10 ppm (0.001%)，该要求与车用柴油一样严格。

柴油发动机烟气中的柴油颗粒物已被世界卫生组织（WHO）的癌症研究所认定为致癌物质²³。柴油颗粒物毒性较强，体积非常小，包含了大约 40 种有毒污染物，其中 15 种被确认为致癌物质²⁴。颗粒物中的有毒物质多环芳烃（PAH）还可随着颗粒物进行远距离输送（最远可达 10000 公里）²⁵。此外，远洋船（尤其是运油船）还会排放挥发性有机化合物（VOC）和重金属等污染物。《白皮书》的 2.2 节中将详细讨论上述船舶大气污染物对健康和环境的影响。

2.1.2 我国的船舶和港口废气排放

上海和香港是国内最早意识到船舶和港口空气污染的两个港口城市。我国的第一份船舶港口大气污染物排放清单是上海市环境监测中心于 2003 年为上海港编制的²⁶。上海的船舶及港口大气污染物排放清单随后于 2011 年进行了修订。除了船舶活动，最新的排放清单中还罗列了多种港口活动，包括货车和货物装卸设备的废气排放以及油气码头的油气排放²⁷。

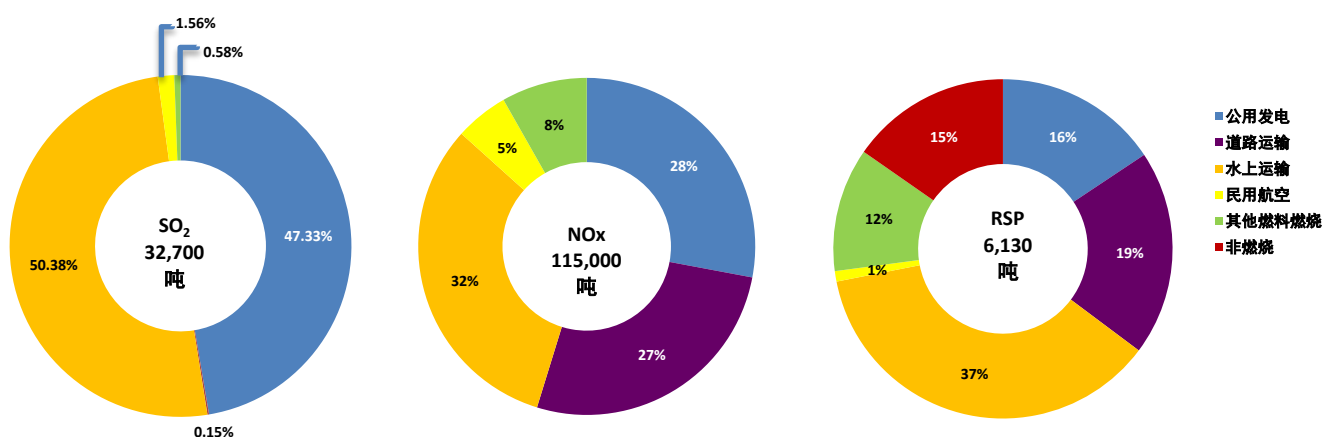
在香港，政府于 2007 年委托研究机构编制了一份全面的船舶大气污染物排放清单²⁸。根据清单研究结果，思汇政策研究所、香港科技大学和香港大学共同开展了一项研究，评估了珠三角地区船舶废气排放的健康影响和减排措施的效果²⁹。

2.1.2.1 香港船舶废气排放

随着机动车和发电厂的废气排放标准和燃油标准越来越严格，从 1990 年至 2007 年，香港陆上污染源的二氧化硫和颗粒物排放量分别减少了 53% 和 61%；而同期船舶污染源排放的二氧化硫和颗粒物却分别增长了 48% 和 41%³⁰。

根据香港环境保护署的最新数据，2012 年船舶是全市可吸入颗粒物（RSP，即粒径 10 微米以下的颗粒物，或称 PM₁₀）、NO_x 和二氧化硫的最大排放源，在全市排放总量中分别占 37%、32% 和 50%。2012 年，船舶的废气排放量在 VOC 排放总量和一氧化碳（CO）排放总量中各占 11% 和 17%（见图 3）³¹。

图 3：船舶废气排放量占香港废气排放总量的比例，2012 年数据³²



注：RSP 指可吸入颗粒物，即 PM₁₀。

香港 2007 年的船舶大气污染物排放清单详细分析了航运业的排放量³³。其中，远洋船的排放贡献率最大，其 SO_x 和 NO_x 排放量分别占有所有船舶废气排放总量的 79% 和 44%，而 RSP 排放量占 2/3 以上。本地船舶是 NO_x、RSP 和 VOC 排放的第二大来源（见图 4）。

从船舶活动模式来看，远洋船在泊岸过程中的废气排放量相对较大（40% 的 SO_x、30% 的 NO_x 和 1/3 的 RSP）^{vi}，其次是低速巡航（28% 的 SO_x、32% 的 NO_x 和 31% 的 RSP）和航道巡航（28% 的 SO_x、32% 的 NO_x 和 31% 的 RSP）时^{vii}。该结果说明有必要采取措施控制船舶在码头停靠时的排放量，如推行泊岸时使用岸电或转用低硫油；以及在船舶低速巡航或在航道内航行时采取减排措施，如降低船舶航速或在香港海域内转用低硫油（详见第 4 章）。

2007 年的船舶大气污染物排放清单还分析了船舶大气污染物沿香港水域主要航线的分布，以找出最易受船舶废气影响的区域（见图 5）³⁴。

集装箱船的废气排放集中区包括：

- 葵涌货柜码头（集装箱船的停泊点）；
- 东博寮海峡——西航道——马湾航道（从公海和深圳西部出发的远洋船的主要航线）；
- 香港东部和东南部（远洋船驶向或离开盐田）。

邮轮/渡轮（远洋船中的第二大排放源）的废气排放主要集中在：

- 远离九龙的海运码头和政府浮标（邮轮的停泊点）；
- 经过维多利亚港和蓝塘海峡的红磡航道和东航道、驶往东南部的停泊点。

显然，船舶靠近香港水域并驶向码头的过程中，大气污染物也随之扩散。香港维多利亚港附近的城市区域人口密集，尤其是葵涌和尖沙咀，可能是受船舶废气排放影响最大的地区，尽管目前尖沙咀地区尚未建立永久性空气质量监控站以监测空气污染程度³⁵。

葵涌区（图 5 中最大的暗红色斑点）非常靠近集装箱码头，该地区的二氧化硫浓度经常超过 WHO 建议的最高水平³⁶。2010 年，香港科技大学关于香港 18 个地区的路边环境空气质量的研究表明，集装箱码头的废气排放确实是葵涌区空气污染的重要来源，使荔景山路附近学校、医院及公共屋村内的易受影响人群（如儿童、病患者和老年人）面临健康威胁（见图 6）³⁷。

邮轮的废气排放也开始引起关注。香港现有的邮轮码头位于尖沙咀，正处于市中心。于 2013 年开始运作的启德邮轮码头也靠近九龙东部和香港岛东部人口密集的地区，而该码头设计能力可停靠世界最大的邮轮。相对于其他远洋船，邮轮在泊岸过程中所需的能源最多。因此，虽然香港启德邮轮码头运营第一年各泊位废气排放总量低于所有远洋船废气排放总量的 0.02%，占香港所有邮轮泊岸时废气排放总量的 8-9%，但是当启德邮轮码头发展饱和时，其废气排放量可能会迅速增加³⁸。

vi 泊岸是指船舶在码头停靠时还需要电能来维持制冷、照明、水泵和其他设施运作的阶段。

vii 根据香港的船舶大气污染物排放清单，船舶航速为 8 至 12 节时，则定义为低速巡航/慢速航行；而当航速超过 12 节时，则为航道巡航模式。

图 4: 香港船舶废气排放量, 2007 年数据³⁹

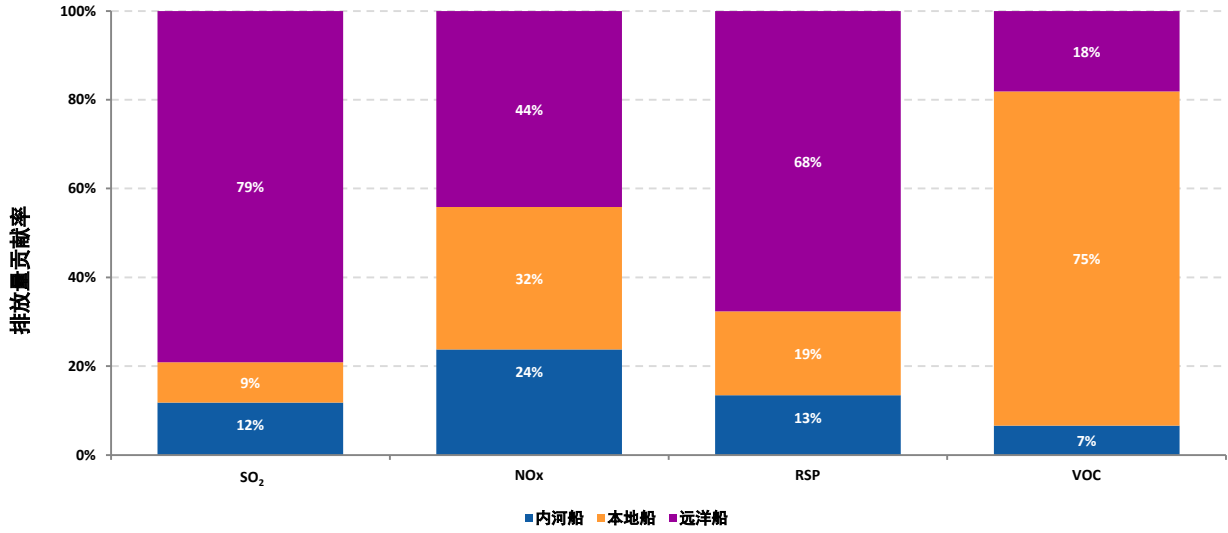


图 5: 香港水域远洋船二氧化硫排放分布 (单位: 吨/年), 2007 年数据⁴⁰

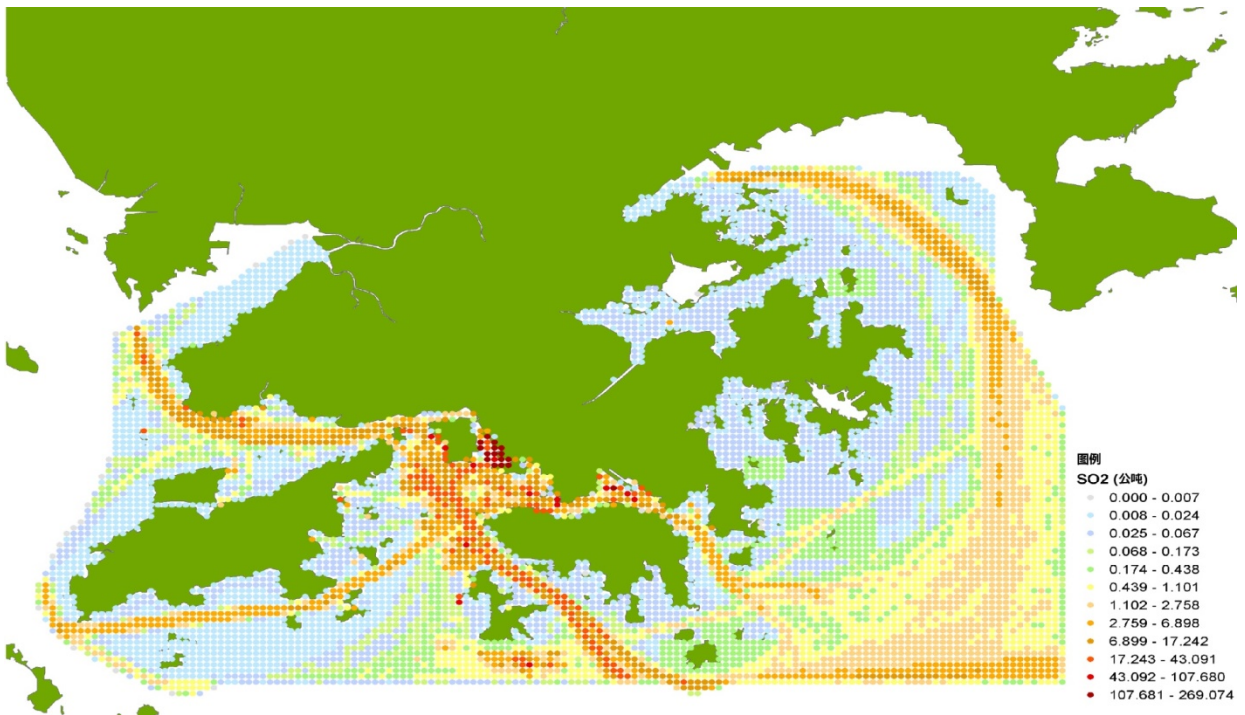
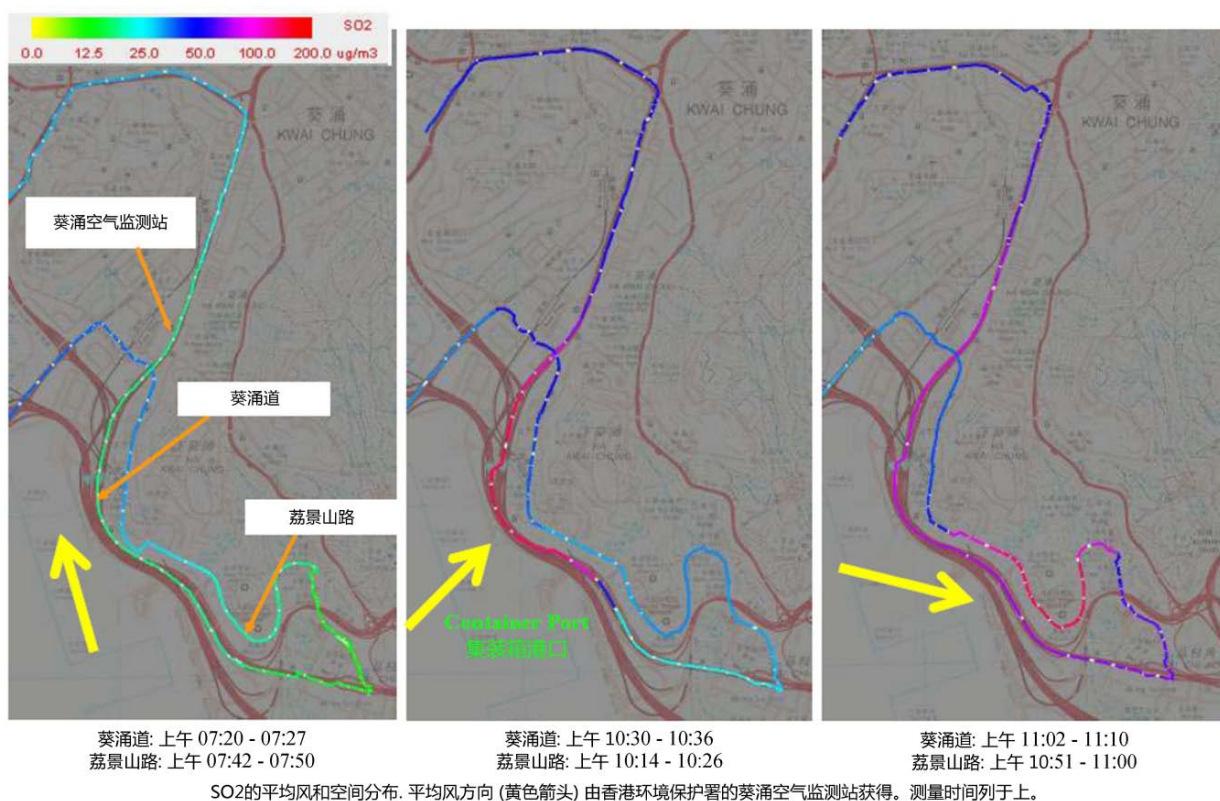


图 6: 2009 年香港集装箱港附近的葵涌区的二氧化硫排放的空间分布⁴¹

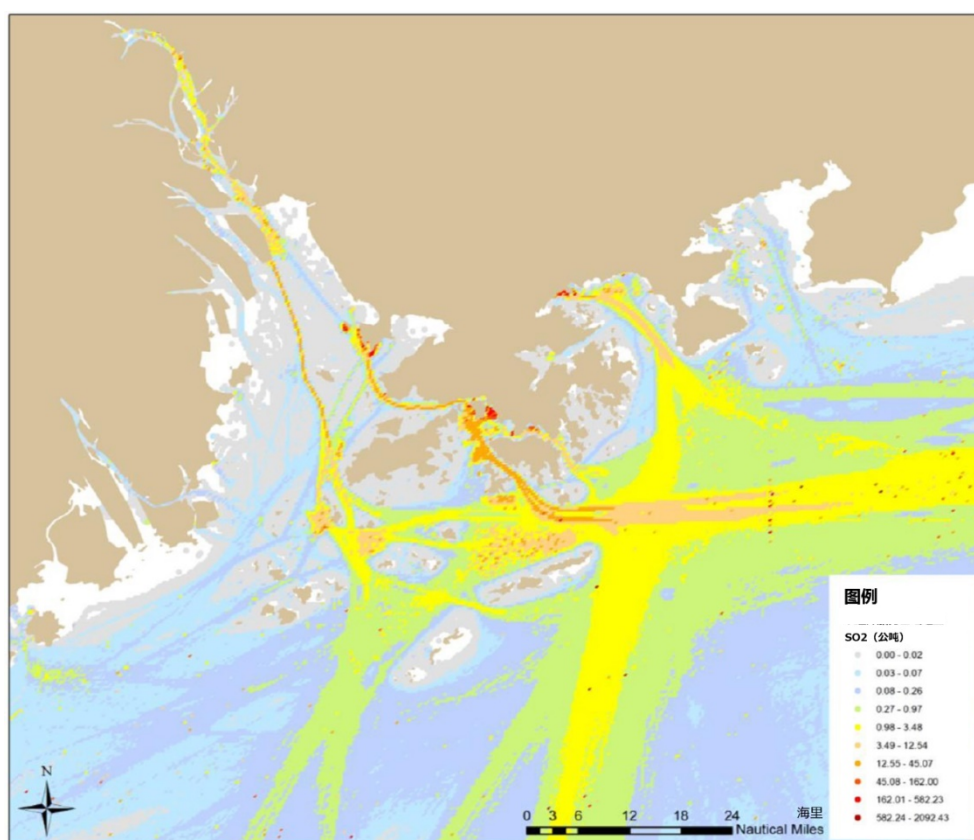


注: 香港空气质素指标(AQO)规定SO₂的24小时平均浓度限值为125 ug/m³, 而世界卫生组织(WHO)指南设定的限值为20 ug/m³. 香港AQO中SO₂的标准采用的是WHO的过渡目标1中的24小时平均浓度值. 有评论认为香港执行该标准显得过于宽松, 因为WHO的过渡目标1是为污染严重、已逐步采取控制措施的发展中国家所制定的.

2.1.2.2 中国大陆的船舶港口废气排放

思汇政策研究所、香港科技大学和香港大学联合对2007年香港船舶大气污染物排放清单进行了扩展, 研究了覆盖香港和珠三角海域内的远洋船大气污染物排放清单. 此外, 他们还对相关的健康影响进行了预测和评估⁴². 这是迄今为止发表的第一份涉及中国大陆船舶废气排放的健康影响的报告.

图7展示了远洋船排放的二氧化硫的空间分布, 排放量大的点(红色表示)与港口和停泊地点是吻合的, SO₂的空间分布也显示了船舶出入珠三角地区的常用航线⁴³. 越接近码头和香港及深圳航线的地方, 受船舶排放的二氧化硫的影响就越大. 反之, 距离越远受到的影响越小⁴⁴.

图 7：2007 年珠三角地区远洋船二氧化硫排放的空间分布（单位：吨/年）⁴⁵

根据颗粒物源解析研究的初步结果，深圳市远洋船的 SO₂ 排放量占全市排放总量的 67%，NO_x 占 14%，颗粒物占 6%⁴⁶。这与香港的研究结果基本相符。

根据上海市环境监测中心编制的最新排放清单，排名世界第一的上海港 2010 年船舶和港口活动（包括港口拖车^{viii}和货物装卸设备）的 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 排放量分别占上海污染物排放总量的 12.4%，11.6% 和 5.6%⁴⁷。

除了香港和上海，中国大陆其他港口城市仍缺乏综合性的大气污染物排放清单。然而，船舶污染这一问题自 2013 年以来受到越来越多的关注。全国性、区域性和地方层面的排放清单正在编制中，这些研究能填补中国大陆船舶废气排放数据的空白。

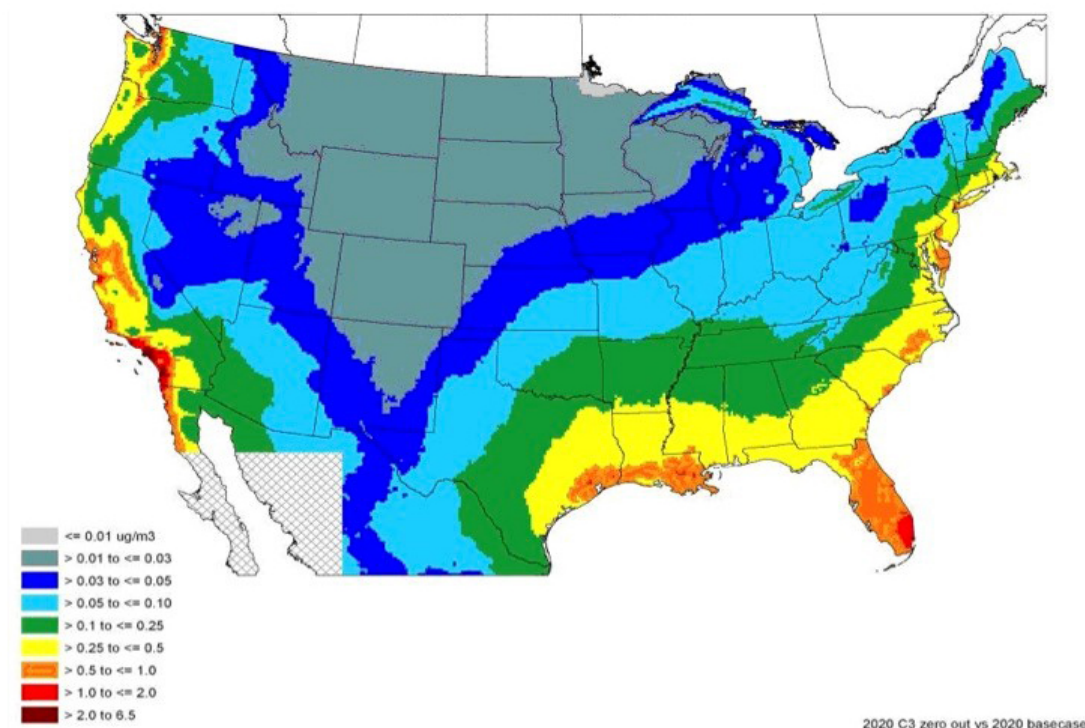
不过，我国大多数排放清单研究项目仍处于起步阶段。船舶和港口排放清单对于我国的研究机构来说还是一项较新的课题，国际经验和信息的交流将有助于研究的开展。

^{viii} 拖车运输指货物的短途运输，通常是长距离运输中的一部分，由拖车单独完成。港口拖车一般将需装卸的货物运至海港、内河港或同一城市区域内的综合交通枢纽边界。

2.2 船舶废气的重大影响

大约 70% 的船舶废气排放发生于距离海岸线 400 公里以内的海域内⁴⁸。根据模型模拟，海陆风能将船舶排放的废气向内陆输送几百公里，见图 8。显然，即使远洋船的废气排放主要发生在海上，其排放也能影响沿海和内陆地区的空气质量、人类健康和生态环境⁴⁹。

图 8：2020 年美国不实施排放控制区情景下船舶对 PM_{2.5} 年均浓度的贡献值⁵⁰



2.2.1 船舶废气对人体健康的影响

研究表明，船舶和港口陆上设备的废气排放（主要是柴油发动机的尾气）可导致过早死亡以及其他严重的健康问题，而受影响的人群主要是儿童和老年人⁵¹。船舶、货车、机车和货运装卸设备的柴油发动机直接排放的颗粒物、二氧化氮（NO₂）、SO₂，以及间接形成的臭氧易引发哮喘和中风。根据 WHO 的官方信息，柴油发动机排放的颗粒物会导致肺癌、引发膀胱癌⁵²。船舶和港区内的其他柴油机排放的废气还会加重心肺疾病患者的病情⁵³。因此，船舶和港口陆上排放的废气会直接影响到我国港口城市的居民，危害公众健康。

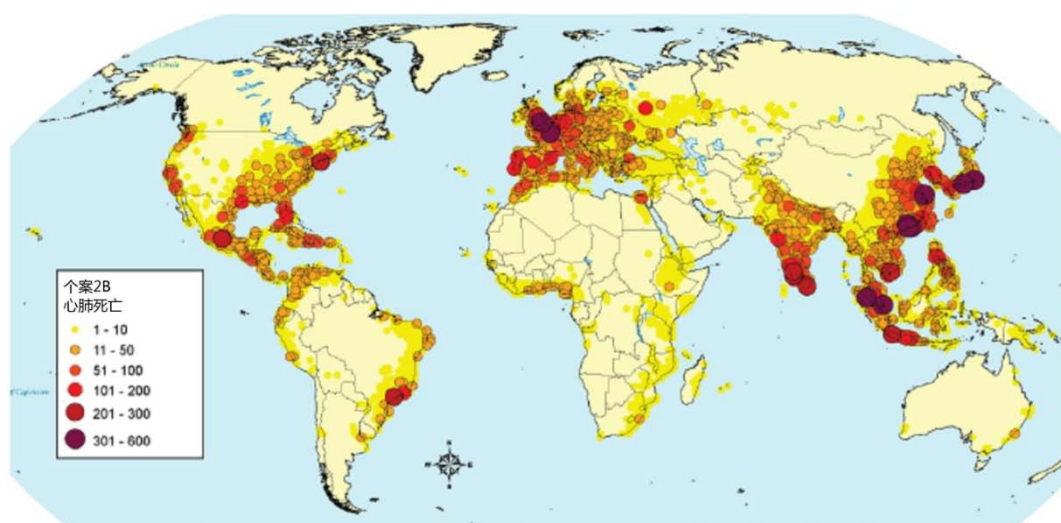
2.2.1.1 船舶废气导致的过早死亡

至今仍没有充分的数据说明世界各地的远洋船与过早死亡率之间的因果关系。一项开展于 2007 年的研究发现，根据 2001 年的数据，每年全球远洋船废气排放导致过早死于心肺疾病和肺癌的人数估计达 60,000 人。估计 2001 年在东亚（包括中国、日本和韩国），远洋船的废气

排放导致了超过 15,000 个心肺及肺癌死亡病例⁵⁴。同一项研究还指出，由于亚洲地区的航运活动日益频繁，估计远洋船废气排放对该地区造成的健康影响更为显著（如图 9）。

远洋船实际造成的过早死亡人数很可能比上述研究估计的要高。例如，美国环保署表示，如果在美国大部分海岸线近岸海域实施排放控制区方案，与不实施ECA的情景相比，2030 年的远洋船废气排放导致的过早死亡人数最多能减少 31,000 人⁵⁵。在欧盟，估计 2011 年国际航运导致了欧盟 46,000 人过早死亡⁵⁶。参照美国和欧盟的数据，对于中国这样一个人口更多、远洋船航运活动更频繁、污染情况更严重的国家来说，尤其是在缺乏地方或区域性燃料油管控和船舶废气排放控制政策（香港除外）的情况下，其过早死亡率应远高于前述的Corbett团队于 2007 年文献中报道的数据⁵⁷。

图 9：全球船舶PM_{2.5}排放引发的心肺疾病过早死亡病例分布⁵⁸



2.2.1.2 我国船舶废气的健康影响

如前所述，香港 2007 年的研究评估了香港及珠三角其他地区的远洋船废气排放的影响⁵⁹，这是首次公开出版的涉及中国大陆船舶污染对大气环境和健康影响的研究报告。然而，由于空气污染情况、人口和人群健康状况的相关数据不够全面，该研究低估了废气的健康影响^{ix}。

香港大学最近更新了上述研究，利用珠三角地区来往的远洋船和内河船舶的数据进行估算，研究指出 2008 年远洋船和内河船舶排放的SO₂、NO₂、O₃和PM₁₀仅在香港就造成了约 1202 人过早死亡，而在珠三角地区（包括香港和澳门）造成的过早死亡人数超过 1600 人^x。同时，该研究根据 2008 年全年因心血管疾病和呼吸系统疾病住院的总人数，以及船舶排放的SO₂、NO₂、O₃和PM₁₀引发两种疾病的风险，估算船舶废气排放在香港和珠三角地区造成的额外住院案例分

ix 该研究估计 2008 年珠三角地区船舶排放的 SO₂ 造成了 519 人过早死亡。但该健康影响仅考虑了 SO₂ 排放的影响，而不是所有污染物（包括 PM_{2.5}、臭氧、挥发性有机物和燃料中的有毒金属物质等）的影响。另外，该研究引用的香港以外珠三角地区的人口和健康状况的数据也不够全面（见尾注 44 中的 Hak-kan Lai 等, 2012）。

x 珠三角地区的过早死亡人数等于珠三角地区的总人口（2008 年为 3660 万）乘以总过早死亡率（每百万人口中有 45 人过早死亡）（见尾注 2 中文献 Hak-kan Lai 等, 2013 的表 4）。

分别为 8,262 件和 9,702 件。事实上,这些影响有可能被低估了,因为该项研究既没有考虑船舶空气污染的长期健康影响,也没有考虑其他大气污染物如 PM_{2.5}、金属物质、CO 和 VOC 的具体影响⁶⁰。

2.2.2 船舶和港口废气对生态系统的影响

船舶排放的废气主要是通过硫和氮化合物的沉积影响生态系统,如导致酸雨、富营养化和氮富集⁶¹。船舶废气间接产生的臭氧也会破坏植被和生态系统,减少作物产量⁶²。

国际航运对全球硫沉降和陆地硫沉降的贡献率分别为 5% 和 3%,但在船舶交通量大的地区,船舶排放导致的硫沉降的比重更高。例如在欧洲,船舶废气排放使得硫酸盐和硝酸盐沉降总量增加了约 15%⁶³。氮和硫沉降引起的酸化反应会改变生物地球化学,进而影响植物及水生生物的多样性,并且会导致对酸敏感鱼类和植物种群的减少⁶⁴。氮沉积物会导致生态系统氮富集和水体富营养化,造成有毒藻类大量繁殖和鱼类死亡,并改变物种间的竞争关系⁶⁵。

远洋船排放的 SO_x 和 NO_x 除了会影响陆地生态系统和淡水水体外,近期的研究发现其还会引起严重的海洋酸化,尤其是在北半球夏季船舶交通量大的区域。在这些水域,船舶废气对地表水体酸度 (pH) 的潜在影响和二氧化碳 (CO₂) 导致酸化的严重性是相类似的⁶⁶。有研究证实,海洋酸化会对海洋生态系统带来广泛的负面影响,如破坏贝类和珊瑚,干扰鱼类的嗅觉、大脑神经递质和视力等⁶⁷。

2.2.3 船舶废气对气候变化的影响

船舶废气对气候变化的影响很复杂,目前学术界对其理解还很不全面。最新的研究显示船舶废气排放会同时导致全球气候变暖和变冷。

CO₂ 是航运导致全球变暖的最主要因素,其次是臭氧(来自 NO_x 排放)和烟尘(又称黑碳,是导致温室效应的第二大重要因子^{xi})。另一方面,船舶排放的其他污染物,如硫酸盐气溶胶、NO_x 和有机气溶胶则会导致气候变冷^{68,xii}。

虽然最新的文献认为船舶废气在全球范围内的净影响体现为冷却效应,但该结论有很大的不确定性。随着国际航运越来越繁忙,CO₂ 和黑碳的排放量预计会持续增加,从而导致气候变暖⁶⁹。特别是在航运活动日益频繁的北极地区,气候变暖的作用将尤为显著。因为气候变暖,预计越来越多的船舶会经过新北极航道,使得更多的黑碳沉降到北极地区的冰雪表面⁷⁰。由于黑碳的致暖效应在冰雪附近特别显著,未来越来越多船舶穿越北极地区将会加速冰雪和海冰的消融,加剧气候变暖,包括中国在内的各个沿海国家将面临气候变暖带来的更多负面效应⁷¹。

xi 黑碳是一种不完全燃烧时产生的颗粒物中的吸光固体部分。黑碳是继 CO₂ 之后第二大人造的致暖物质。更多信息参见尾注 71 中的文献 Bond 等, 2013。

xii 船舶排放的废气中, CO₂ 是第一大致暖物质,其次是臭氧(来自 NO_x 排放)和烟尘(又称黑碳)。而航运使全球变冷的最主要因素是气溶胶的间接效应。船舶产生的气溶胶能够增强云层的反射性和持久性(从而反射更多的阳光)。能够引起全球变冷的船舶大气污染物包括能够反射阳光的硫酸盐气溶胶和颗粒有机物,以及 NO_x(这种物质会缩短温室气体甲烷的寿命)。关于船舶废气排放对气候变化的影响的更多信息请参见尾注 68 中的文献 Fuglestedt, J. S. 等, 2009 和尾注 49 中的文献 Eyring 等, 2010。

3.法规框架

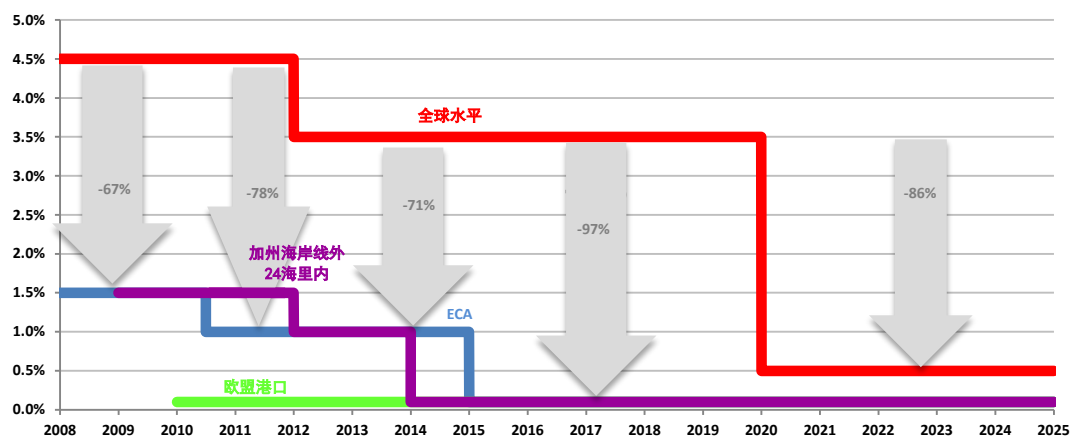
3.1 国际公约

国际海事组织（IMO）是一个旨在维护航运安全、防止海洋污染的联合国机构。IMO 制定的环保相关法规为《防止船舶污染国际公约》（MARPOL）⁷²。

该公约的附件 VI 是关于防治船舶带来的空气污染的。附件 VI 最新修订于 2008 年，内容包括防治船舶的 SO_x 和 NO_x 排放，并通过限制 SO_x 排放间接控制颗粒物的排放。SO_x 减排主要通过控制船用燃料油的含硫量来实现，目前的限值为 35,000 ppm（3.5%）。这一限值到 2020 年将降低至 5,000 ppm（0.5%），但 IMO 将在 2018 年完成对 2020 年限值的可行性审查，并确定是否如期实施（如图 10）。

此外，附件 VI 的签署国可以向 IMO 申请设立更严格的“排放控制区”（ECA），以加强船舶废气排放控制。驶入 ECA 水域的船舶使用的燃料含硫量不可超过 10,000 ppm（1%），该限值自 2015 年 1 月 1 日起将进一步缩紧至 1,000 ppm（0.1%）。附件 VI 的签署国也可以选择实施更严格的氮氧化物 III 级标准。氮氧化物 III 级标准比目前在全球实施的 II 级标准降低了 75%⁷³（IMO，2014）（见图 2）。为了满足严格的 NO_x 排放标准，在船上应用 NO_x 排放控制技术必不可少。这些技术主要包括选择性催化还原（SCR）、废气再循环（EGR）以及液化天然气（LNG）代替传统渣油等。中国是附件 VI 的签署国之一。

图 10：2008 年至 2025 年，IMO 船用燃料油含硫量标准及欧盟和美国加州海域燃油含硫量限值⁷⁴



注：上图中紫色色线指美国加州的燃油含硫量标准，图中所示为船用柴油 DMA（marine gas oil）的含硫量限值。加州对船用柴油 DMB（marine diesel oil）的含硫量要求更加严格：标准要求 2009 年 7 月 1 日起，DMB 含硫量不能超过 0.5%；2014 年 1 月 1 日起执行 0.1% 的含硫量标准。欧洲的北海 ECA 和波罗的海 ECA 分别于 2007 年和 2006 年正式生效。北美洲 ECA 于 2012 年 8 月 1 日起执行 ECA 的含硫量标准，加州近岸海域同时开始实施 1% 的含硫量限值。

值得注意的是，国际海事组织海洋环境保护委员会在 2014 年 3 月—4 月的会议上修订了 ECA 关于氮氧化物 III 级排放标准的规定。之前的标准规定任何 2016 年起建造的远洋船一旦进入氮氧化物排放控制区，就必须遵守氮氧化物 III 级标准。此次修订允许之前批准成立的北美洲

ECA 和加勒比海 ECA 可于 2016 年开始执行氮氧化物 III 级标准；然而，对于未来批准的 ECA，III 级标准仅适用于特定日期之后建造的船舶发动机。特定日期是指 IMO 批准该国的 ECA 申请之日，或该国提出的 ECA 申请获得批准后的一个时间点。例如，假设中国 2018 年提出 ECA 申请，该提案于 2020 年开始 IMO 的审批程序，2022 年批准，2025 年生效。则根据新修订的规定，2022 年以后建造的船舶如在中国 ECA 运行就必须满足氮氧化物 III 级标准。

目前全球有四个排放控制区（ECA），包括只执行 SO_x 排放控制（及间接控制颗粒物）的欧洲北海和波罗的海 ECA，以及同时控制 SO_x、PM 和 NO_x 排放的北美洲和美国加勒比海地区的 ECA。图 11 展示了四个 ECA 的范围。目前相关的欧洲各国正在讨论将欧洲波罗的海和北海的硫氧化物 ECA 也设置为 NO_x 排放控制区⁷⁵。

氮氧化物 III 级标准从 2016 年 1 月 1 日起在北美洲和加勒比海 ECA 生效。这意味着 2016 年起新建的，并且可能在这两个 ECA 水域航行的船舶必须配备 NO_x 控制技术。第 4 章介绍了保证船舶满足 ECA 排放标准的各类技术手段。

图 11：全球四个排放控制区覆盖范围：波罗的海、北海、北美洲和美国加勒比海排放控制区



注：在 SO_x 排放控制区中二次颗粒物（PM）的排放通过 SO_x 排放限值进行间接控制。

3.2 我国的法规和政策

由于香港和中国大陆的法律和政策体系不同，本节分别介绍了香港和中国大陆关于船舶和港口空气污染防治的法规与政策。

3.2.1 香港相关规划和标准

香港目前还没有立法规定在香港水域内或泊岸的远洋船需使用低硫油，但政府于 2012 年启动了为期三年的一项激励计划鼓励远洋船在泊岸时使用低硫油（含硫量为 5,000 ppm 或 0.5%）。截至 2014 年 6 月，仅有 12% 的远洋船登记参与该计划；船公司表示，政府补贴约只相当于换

油成本的 40%^{76,77}。香港政府现正在制定一项法规，拟强制规定远洋船在香港泊岸时使用含硫量为 5,000 ppm (0.5%) 的燃油，该法规预计 2015 年开始实施⁷⁸。相比 2011 年的污染物水平，泊岸时强制性转用低硫油估计能使香港全市的硫和 PM₁₀ 排放量分别减少 14% 和 6%⁷⁹。

除了拟议的关于减少远洋船排放的法规，香港立法会今年刚通过了一项条例：将香港出售的船用轻柴油的含硫量限值从 5,000 ppm (0.5%) 降低到 500 ppm (0.05%)^{80,xiii}。新条例于 2014 年 4 月 1 日起生效⁸¹。香港水域内航行(以及在香港加油)的船舶开始使用含硫量 500 ppm(0.05%) 的燃油后，其排放的 SO₂ 和 PM₁₀ 预计将比之前使用含硫量 5,000 ppm (0.5%) 的燃油时分别减少 90% 和 30%⁸²。

如果船舶排放的黑烟过量，说明发动机运行或保养不当。为了促使船东正确、及时的保养发动机，香港很早便出台了法规，开始监管船舶黑烟排放。但是原法规对黑烟排放限值未进行明确、客观的定义；而且，无论何种船型、不管船舶是否屡次违规，原法规所规定的最大罚款额都是一样的。因此，香港政府最近又推出了一项条例，规定若船舶连续三分钟以上(含三分钟)排放的气体与林格曼黑度(一种用于测量烟气黑度的方法)二级的颜色一样深或更深，则视为违法，需进行罚款⁸³。该条例还提高了违法罚款金额。本地船舶的最高罚款为 10,000 至 25,000 港币，远洋船为 25,000 至 50,000 港币⁸⁴。

香港还没有颁布针对非远洋船发动机的 NO_x 排放标准。由于缺乏排放标准，许多本地船舶(如渡轮、渔船或拖船)仍在使用的、对 NO_x 或其他污染物没有任何控制措施的国产发动机。对于远洋船，香港政府有权检查香港水域内的远洋船，以确保它们符合 IMO 的 NO_x 排放标准和燃料含硫量要求⁸⁵。

香港政府出台上述政策控制本地船舶和远洋船废气排放的主要原因是意识到船舶排放是当地空气污染的主要来源(见 2.1.2 节)。这些政策措施有助于香港政府达到 2020 年的“空气质量指标”(AQO) 和 2012 年出台的《粤港区域空气污染减排计划》(见专栏 1) 中香港对减排目标的承诺。

除了新出台的和拟议的法规，香港政府还推出了多项自愿性措施来推动船舶和港口废气减排，详见 3.2.3 节。

xiii 香港本地出售的船舶轻柴油主要用于港作船，如渔船、渡轮、拖船和集装箱补给船。

专栏 1: 《粤港澳大湾区空气污染物减排计划》与香港 2020 年空气质素指标

香港设定了一系列的空气质素指标 (AQO, 即空气质量目标) 和大气污染物减排目标, 后者是与广东省 (包括珠三角的内陆部分) 合作制定的。

2012 年底, 2015-2020 年减排目标在粤港可持续发展与环境保护合作小组会议上通过审批。该减排目标将在 2015 年进行中期审查。基准年为 2010 年⁸⁶。

下表列出了 2010 年香港和珠三角地区 SO₂、NO_x、PM₁₀ 和 VOC 的基准排放量, 2012-2015 年的减排目标以及 2020 年的目标范围⁸⁷:

污染物	地区	2010 年排放量 (吨)	2015 年减排目标 (对比 2010 年)	2020 年减排目标范围 (对比 2010 年)
SO ₂	香港	35,500	25%	35% ~ 75%
	珠三角经济区	507,000	16%	20% ~ 35%
NO ₂	香港	108,600	10%	20% ~ 30%
	珠三角经济区	889,000	18%	20% ~ 40%
RSP (PM ₁₀)	香港	6,340	10%	15% ~ 40%
	珠三角经济区	637,000	10%	15% ~ 25%
VOC	香港	33,700	5%	15%
	珠三角经济区	903,000	10%	15% ~ 25%

此外, 香港政府还设定了新的空气质素指标来取代 1987 年设定的目标, 以推动香港的空气质素指标逐步与世卫组织的《空气质量指南》中设定的目标保持一致。

下表概述了以往的和新的空气质素指标, 并与世卫组织的《空气质量指南》(AQG) 进行比较。灰色高亮部分表示自 2014 年 1 月 1 日起生效的新的空气质素指标。2013 年 3 月发布的《香港清洁空气计划》提到, 政府计划到 2020 年实现新的 AQO⁸⁸。

污染物	平均时间	以往的 AQO (ug/m)	世卫组织 AQG (阴影部分表示香港新的 □AQO) (ug/m ³)				超标数目
			IT-1	IT-2	IT-3	AQG	
二氧化硫 (SO ₂)	10 分钟	--		--		500	3
	24 小时	350	125	50		20	3
RSP (PM ₁₀)	24 小时	180	150	100	75	50	9
	年均	55	70	50	30	20	N/A
PM _{2.5}	24 小时	--	75	50	37.5	25	9
	年均	--	35	25	15	10	N/A
氮氧化物 (NO _x)	1 小时	300		--		200	18
	年均	80		--		40	N/A
臭氧	8 小时	240 (1 小时)		160		100	9
一氧化碳	1 小时	30,000		--		30,000	0
	8 小时	10,000		--		10,000	0
铅	年均	1.5 (3 个月)		--		0.5	N/A

IT-1, IT-2 和 IT-3 指的是世卫组织设定的过渡空气质量指标(IT)的三个等级, 旨在帮助各国逐步进步, 而 AQG 是 WHO 建议的最严格的空气质量标准。

注: SO₂ 过渡目标 1 (IT-1) 的是 WHO 建议的 AQG 的 6 倍; PM_{2.5} 的过渡目标 1 (IT-1) 为 WHO 建议的 AQG 的 3 倍。WHO 的过渡目标是为污染严重且缺乏资源和技术的发展中国家所设置的, 相当于入门水平, 有评论认为香港政府将 IT-1 设置为目标 (主要污染物, 如 PM_{2.5} 和 SO₂), 将不利于推动有效措施来改善香港的空气质量^{89,90}。

3.2.2 中国大陆法规和规划

3.2.2.1 国家相关法规和规定

1. 标准和规范

自《国家环境保护“十二五”规划》颁布以来，环境保护部发布了一系列规范、规划和行动方案以解决空气污染问题。2012年2月颁布的《环境空气质量标准（GB 3095—2012）》取代了1996年标准。新标准将PM_{2.5}列为环境空气污染物六大基本项目之一，并要求全国所有主要城市自2016年1月起实施监测⁹¹。上海、天津、深圳和广州等港口城市均属于第一批强制要求完善监测系统的城市。这些建立监测系统的城市除了要率先实施新的空气质量标准，还需公布环境空气质量指数（AQI）数据。该指数由SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、O₃和CO的小时平均浓度和日均浓度计算得到⁹²。

就船舶排放标准而言，我国1983年颁布的《船舶污染物排放标准（GB 3552-83）》是迄今关于船舶污染防治的唯一标准，但其只针对船舶废污水和垃圾的排放和处置。《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值和测量方法（GB 20891-2007）》只涵盖了小型船用柴油发动机（37kW以下），其他类型的船舶仍然缺乏相应的废气排放标准⁹³。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。

为了贯彻落实国家战略，交通运输部制定了一系列技术标准和绿色港口规范，如中国船级社制定的《绿色船舶规范》、《船舶能效管理认证规范》和《内河绿色船舶规范》，以及交通运输部水运科学研究院研究的交通领域绿色技术。然而，这些绿色港口、船舶相关计划主要是针对节能和温室气体减排制定的。

2. 相关规划

根据国务院发布的《国家环境保护“十二五”规划》以及《节能减排“十二五”规划》，船舶和港口的废气减排主要通过以下两种途径实现：

- 逐步淘汰落后且污染严重的船舶；
- 利用绿色技术提升港口基础设施，包括门式起重机“油改电”技术和为泊岸船舶提供岸电的设施；港口运输车辆和货物装卸设备升级；油气回收等。

2013年9月12日国务院颁布了《大气污染防治行动计划》，为全国预防和控制空气污染提供了指导^{94,95}。该行动计划制定了我国空气污染控制的路线图，重点关注三个关键地区：京津冀、长三角和珠三角地区。其主要目标是2017年全国地级及以上城市可吸入颗粒物（PM₁₀）浓度比2012年下降10%以上；京津冀、长三角、珠三角等区域细颗粒物（PM_{2.5}）浓度分别下降25%、20%、15%左右。2009年提出的《环境保护的“十二五”规划》仅设定了“十二五”期间SO₂和NO_x的减排目标，而《大气污染防治行动计划》中增加了颗粒物减排目标，这是解决空气污染问题的一大进步。

该行动计划制定了有史以来最严厉的空气污染防治措施⁹⁶，包括船舶废气排放的控制。省级和地方政府须负责监控各自行政区域内的环境空气质量；地方政府也必须制定自己的实施方案，包括重点任务、年度目标、政策措施等。

3.2.2.2 省级和市级法规和规划

继国家行动计划出台后，部分省市出台了地方的大气污染防治行动计划。其中，上海市、江苏省、山东省和广东省发布的计划中包括了船舶和港口大气污染控制的相关规定。例如，江苏和山东的行动计划鼓励或强制要求轮胎式集装箱门式起重机（RTGs）及其他货物装卸设备、货运车辆和内河船舶转用清洁能源，如以电能或天然气代替柴油，即“油改电”或“油改气”，并加快启动绿色港口试点项目。江苏省还着力建设岸电供应设施^{xiv}，而山东省将开始船舶大气污染物排放清单相关研究。

上海市政府颁布《上海市清洁空气行动计划（2013-2017）》后，上海市人大常委会于2014年7月出台了《上海市大气污染防治条例》。该条例规定了一系列控制船舶港口大气污染的强制性措施，并明确了相关政府机构的监管职责。条例要求“在本市行驶的机动车、船向大气排放污染物，不得超过国家和本市规定的排放标准”，并强调上海港应“推进建设码头岸基供电设施和低硫油供应设施”。该条例还包括处罚条款，例如，“在本市行驶的机动船向大气排放污染物超过规定的排放标准或者排放明显可见黑烟的”，可以处以罚款。上海市环境保护局负责该条例的组织实施。可以预见，未来“岸电”将是上海发展的重点。根据《上海市清洁空气行动计划（2013-2017）》，上海计划在吴淞口国际邮轮码头和洋山冠东国际集装箱码头推行岸电试点。同月，上海港还与洛杉矶港在中美能源和环境十年合作框架下建立了“绿色合作伙伴关系”，计划通过两个港口之间的信息交流、技术和经验共享等推动上海港的岸电发展⁹⁷。

2014年2月7日广东省公布了由广东省环境保护厅提交、广东省环境科学研究院起草的《广东省大气污染防治行动方案》，为全省建立了空气质量和污染减排目标。同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）》，该计划设定了能效和CO₂减排目标。这两份行动方案均要求发展绿色运输并减少船舶和港口设备的废气排放；并呼吁加强广东、香港和澳门之间的合作以控制远洋船废气排放。《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；所有新建的10万吨级以上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。此外，原油和成品油码头油气综合治理、能源结构优化，以及船舶、货车和货物装卸设备的“油改电”与“油改气”等措施均包含在两份行动方案中。《广东省绿色港口行动计划（2014-2020）》还提出到2015年，全省有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；计划研究在珠江口、崖门口和汕头湾水域内实施船舶限速。值得一提的是，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，该港区将会推动实施岸电、LNG拖车及LNG拖船等措施。

以上提到的由各省/直辖市政府公布的大气污染防治行动方案即将逐步落实。然而，这些方案虽部分涉及了船舶港口废气排放控制措施，但总体来说各地还未公布这些措施的实施细则，

xiv 岸电指船舶泊岸时使用岸上电力。这样船舶便可以关闭主发动机和辅机，从而减少大气污染物的排放。详细内容见4.2节。

且未出台强制性规定。船舶、货车和港口设备的“油改电”或“油改气”目标及岸电设施的实施计划尚未明确。事实上，这些省市并没有设定具体的船舶港口空气污染减排目标。以广东省为例，广东省交通厅对各市交通局提供业务指导，而市级交通局（或交通委员会）隶属于所在市市政府，并向市政府汇报。省交通厅虽然可对相关研究提供资金支持，但这些资金非常有限且不涉及港口基础设施建设。这些制度及财政上的障碍将可能使得广东省难以全面实施上述行动方案中所列明的各项措施。

由于省级行动方案的约束力有限，市级方案对于船舶港口废气排放控制尤为重要。青岛市政府于2013年6月（即国家行动方案出台之前）发布了《青岛市大气污染防治2013年行动计划》，建议对港口作业机械、其他港口设备和运输车辆实施“油改电”技术改造。

深圳市政府于2013年9月20日发布了《深圳大气环境质量提升计划》，这是首个发布行动计划、响应国务院新的《大气污染防治行动计划》的城市。该计划包括若干加强船舶港口大气污染控制的措施，其主要内容包括：

- 加强港口岸电建设。2014年底前，全市港口提供岸电的泊位数量不少于8个。2015年底前，全市港口提供岸电的泊位数量不少于15个，靠港集装箱船使用岸电比例不低于15%。市政府将研究制订鼓励船舶使用岸电的政策，在目前交通运输部节能减排补贴的基础上制定货运码头岸电建设地方补贴和奖励政策，合计补贴和奖励金额达到码头岸电建设费用50%；
- 减少港口设施污染排放。2013年9月起，所有集装箱港口新增港口内拖车使用天然气，轮胎式龙门起重机使用电能；2015年底前，除应急设备外，全市集装箱港口内拖车全部完成“油改气”，轮胎式龙门起重机全部实现“油改电”；
- 加强船用燃料硫含量控制。协调交通运输部，力争在珠三角水域率先创建硫排放控制区，要求远洋船在进入近岸24海里范围内及停泊期间，使用含硫量低于0.1%的低硫燃料。制定低硫燃油补贴政策。力争2015年85%以上的靠港船舶使用低硫燃料；
- 推广使用LNG燃料。2014年7月底前，试点应用“柴油-LNG”混合动力船舶技术，完成内河货船“柴油-LNG”混合动力改造示范项目立项，率先在西部港区进行示范试点。在国家相关标准正式颁布后，每年10%以上的内河和近海货船、渔船改造为LNG动力或“柴油-LNG”混合动力，并配套建设足量的船用LNG加注站；
- 限制船舶航速，鼓励港口多式联运。2013年底前，在深圳水域内实施最高航速限制，除高速客船外，将深圳水域内船只航行速度限制在12节以内。

为了实现污染物减排目标，该《大气环境质量提升计划》不仅阐明了污染控制措施，而且还指出了负责实施每一项措施的政府机构。所以大气污染防治的责任不仅在于深圳市人居环境委员会（人居环境委），其他政府机构也肩负一定的责任。大多数船舶港口废气排放控制的相关政策都要求深圳市交通运输委员会（深圳交委）与各大港口共同努力完成，人居环境委将评估计划是否顺利推行以及目标是否实现，以确保所有利益相关方（政府机构和港口企业）能够实施相应措施，以实现拟定的目标。

继提升计划之后，深圳人居环境委、深圳交委及深圳市财政委员会等部门联合制定了《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》（以下简称《补贴办法》）。

根据《补贴办法》，在深圳港泊岸时转用含硫量不高于 5,000 ppm (0.5%) 燃料的船舶，市政府可提供 75-100% 的用油差价补贴。对于岸电设施建设，市政府还将按不超过岸电建设项目费用 30% 的标准对港口进行补贴；使用岸电的航运企业也可享受优惠电价，而差价费用也将全额补贴给相应港口企业⁹⁸。此外，五大集装箱码头即蛇口、盐田、妈湾、赤湾，以及大铲湾港区正在研究机构的支持下开始研究安装岸电设备的可行性。深圳交委也委托了研究机构对转用低硫油进行相关研究。

本白皮书撰写时深圳市政府仍在与各利益相关方讨论《大气环境质量提升计划》和《补贴办法》的实施细则。根据与深圳人居环境委的沟通⁹⁹，深圳港建设岸电设施的进程将比原计划放缓：目前计划于 2015 年底完成两套岸电设备的安装。截止 2014 年 7 月，深圳港所有的 RTG 均已完成“油改电”，并将于 2014 年底完成拖车改用 LNG。泊岸转用低硫油的计划将在前述的《补贴办法》的实施细则出台后开始实施。原计划推动柴油-LNG 混合动力船的计划有所改变，现计划实施纯 LNG 船的试点。深圳目前还没有限制船舶航速，根据深圳人居环境委与海事局的讨论，有望将深圳海域内的船速限制在 15 节以内（与香港相同），但具体实施时间未定。

3.2.3 自愿性激励制度和其他废气排放控制措施

除了第 3.2.1 节提到的法规和政策，香港政府还采取了以下激励性措施来控制船舶和港口废气排放¹⁰⁰：

- 泊岸时自愿转用低硫燃油。自 2011 年 1 月起，各大船公司签署了名为《乘风约章》的自愿性规定，同意在香港港口泊岸时转用低硫油（含硫量不超过 5,000 ppm 或 0.5%）。《乘风约章》有效期至 2014 年 12 月 31 日（详见专栏 2）。在《乘风约章》的推动下，2012 年 9 月下旬，香港环保署推出了一项为期三年的激励计划，鼓励船舶泊岸时改用含硫量 5,000 ppm (0.5%) 的燃油。该计划将泊岸换油的远洋船使用港口设施和灯标的费用减免了一半，其有效期至 2015 年 9 月截止。在时间上，前面提到的香港正在拟定的、预计于 2015 年生效的强制性泊岸转用低硫油的法规正好能与《乘风约章》和该激励计划相衔接。
- 限制船舶航速。尽管在指定的码头区执行这项措施主要的目的是控制交通量和确保航行安全，但该措施确实能够削减大气污染物的排放。
- 港口机械废气减排。几乎所有的码头起重机和 70% 的门式起重机已改用电力，集装箱码头内的所有机械设备必须使用含硫量为 10 ppm (0.001%) 的超低硫燃油；这些燃料与香港车辆所使用的燃料含硫量基本相同。
- 政府船舶使用超低硫燃油。800 艘政府船舶中有 114 艘自 2001 年起开始改用含硫量为 10 ppm (0.001%) 的超低硫燃油。
- 区域合作。香港政府一直在与珠三角其他地区商讨能否规定整个区域内的船舶泊岸时转用低硫油，并探讨远期在珠三角水域设立排放控制区的可行性。

专栏 2：乘风约章和转用低硫油的补贴

《乘风约章》是航运业自发签署的倡议，于 2010 年 11 月发布。自 2011 年 1 月 1 日起，签署倡议的船公司^{xv}承诺在香港泊岸的旗下船舶转用含硫量为 5,000 ppm (0.5%) 的燃油。该倡议主要针对远洋船，如集装箱船和邮轮。研究估计，若所有船公司均实施这一措施，香港可以减少近一半因船舶废气导致的过早死亡人数，约为年均 197 人¹⁰¹。

《乘风约章》刚发布时，签署的航运公司同时呼吁香港政府制定激励政策以支持航运公司泊岸转用低硫油，并呼吁香港政府与广东政府合作，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。

2012 年 9 月 26 日，香港政府同意启动为期三年的激励计划以促进船舶在香港泊岸时转用低硫油。然而，政府的激励计划只覆盖了 40% 的换油成本。如果没有强制性的立法规定，参与激励计划的船公司须承担比未换用低硫油的竞争对手更高的运营成本。面对激烈的市场竞争，这些额外的成本对参与激励计划的船公司并不公平。截至 2014 年 9 月，燃料油的成本大约是 604.5 美元/吨，而低硫油成本高达 897.5 美元/吨¹⁰²。

根据香港环保署的统计，截至 2014 年 6 月，只有 12% 的远洋船参与了香港环保署的激励计划。较低的参与率表明该激励计划的减排效果有限¹⁰³。面对来自各大船公司的压力（如马士基曾宣布若泊岸转用低硫油不具有法律强制性，他们将不再使用低硫油），政府于 2013 年年中提出了立法计划。该法规计划于 2014 年下半年由立法会表决，2015 年生效¹⁰⁴。

xv 十七家船公司签署了《乘风约章》，包括马士基 (Maersk Line)、长荣 (Evergreen)、东方海外 (OOCL)、台湾阳明海运 (Yang Ming (Taiwan))、美国总统船公司 (APL)、法国达飞船公司 (CMA CGM)、中国远洋运输 (COSCO)、商船三井 (MOL)、赫伯罗德海运 (Hapag Lloyd)、韩进 (Hanjin)、现代船公司 (Hyundai)、日本邮船 (NYK)、汉堡南美 (Hamburg Sud)、亚利安莎 (Alianca)、挪威礼诺 (Hoegh)、水晶邮轮 (Crystal Cruises)、Prestige 邮船 (Prestige Cruise Holdings)。

4. 备选政策及措施

为了减少各大港口的船舶废气排放，国际上已实施了不同的政策和措施。表 2 筛选了主要的政策措施，可为我国选择恰当的政策提供参考。

欧美的主要港口城市或区域已实施了表 2 中所列的部分措施，这些措施有的是强制实施的，有的通过鼓励性政策推动，也有些地区通过“港口清洁空气行动计划”来实施一揽子防治措施。美国加州的《圣佩德罗湾港口清洁空气行动计划》就是一个成功的例子。该计划由洛杉矶港和长滩港联合编制并实施，其拟定了实施各类废气控制措施的路线图。本章将对这些措施一一进行介绍。

欧美港口地区为实现绿色港口而采取的另一手段是建立排放控制区，ECA 所设定的 NO_x 和 SO_x 标准是“技术中立”的，因此有助于推动实施各种控制远洋船废气排放的措施和政策。由于 ECA 所涵盖的区域可超越一个地区或国家所管辖的范围，所以建立 ECA 能达到的减排效果远大于一个“港口清洁空气行动计划”的成效，也大于一个地区或国家的相关法律规定的实施效果。本章将详细介绍各项防治措施，并论述这些政策如何能够满足 ECA 的要求。

应当指出的是，除了船舶，港口还有很多陆上大气污染源，如货车、货物装卸设备、机车和油气码头（碳氢化合物排放）。虽然港口岸上的污染也可能很严重，但本章重点叙述船舶废气排放的控制措施。需注意的是，本章所提到的各项措施、政策的成本均源于美国和欧盟的项目，因此可能会高于同类项目在中国施行的成本。另外，这些成本是针对远洋船而言的，相同技术应用于小型船舶，如内河船、港作船或沿海船上的成本应更低。因此，本章所列数目只能作大致参考，使用时还需根据我国的具体情况进行验证。

表 2：船舶废气排放控制的主要政策和措施¹⁰⁵

政策/措施的类型	政策/措施	污染物		成本（示例）	实施需考虑的因素	已实施的地区
		颗粒物 / SO _x	NO _x			
提高船舶发动机及废气后处理装置的设计标准	发动机标准（国内船舶和远洋船）		✓	选择性催化还原 SCR： 单位成本： US\$ 40-135/kW 运营成本： 燃料成本的 7—10%	●燃料含硫量为 1,000 ppm (0.1%) 时使用最佳	美国和欧盟； 中国正在拟定船舶发动机排放标准
			✓	废气再循环 EGR： 单位成本： US \$60-80/kW 运营成本： 燃料成本的 4—6%	●可能需要同时安装 SO _x 废气洗涤器以去除再循环废气中的硫和其他污染物	
		✓		废气洗涤器： 单位成本： US \$ 70 万-400 万 运营成本： 燃料成本的 1—3%，以及维	●占用空间大 ●湿式废气洗涤器排放的废水可能导致海洋酸化	

中国船舶和港口空气污染防治白皮书

政策/措施的类型	政策/措施	污染物		成本 (示例)	实施需考虑的因素	已实施的地区
		颗粒物 / SOx	NOx			
				护费用和其他消耗品的费用, 如氢氧化钠 (如果使用)		
燃油转换	全国或区域性燃油含硫量限值	✓		低硫油成本: 比船用燃料油价格高 US\$ 293/吨*; 必要时还需加上新增油箱的安装成本	<ul style="list-style-type: none"> ●新建少量基础设施 ●是否有燃油供应 ●监控燃油质量面临挑战 	美国、欧盟和香港
	远洋船舶岸时使用的燃料含硫量限值	✓ (仅在泊岸时)			<ul style="list-style-type: none"> ●新建少量基础设施 ●对竞争力的担忧 ●是否有燃油供应 ●政策实施的挑战^{xvi} 	强制性: 美国和欧盟 自愿性: 香港和新加坡
	液化天然气 (LNG)	✓	✓	发动机和燃油系统所需成本相当于购买一艘船的费用费用的10-20%; 但如果可购买到低价的LNG, 投资回收期约为2.6-7.4年, 而且在回收期后能节省很多运营成本**	<ul style="list-style-type: none"> ●高昂的前期投入: 新建船上储气设备和供气基础设施; ●船上需安装较大的储气罐, 因此旧船改造难度大 ●目前LNG加注设备不足 ●LNG供应情况, 价格变化大 	目前主要在挪威; 在欧盟和北美发展迅速
	岸电	✓ (仅在泊岸时)	✓ (仅在泊岸时)	岸上: 每个泊位安装成本为 US\$ 100 万-1,500 万 (美国); US\$ 17 万-800 万 (欧洲) 船上: 每艘船 US\$ 30 万-200 万	<ul style="list-style-type: none"> ●高昂的前期投入, 包括码头电源供应, 船上岸电系统 	在美国加州强制执行; 美国和欧盟各大港口建设有岸电设施; 深圳港蛇口集装箱码头、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
改变操作方式	降低船舶航速	✓	✓	节约燃油	<ul style="list-style-type: none"> ●延长航行时间 ●若出于安全因素已实施限速, 可以进一步带来的效益不大 	美国加州、纽约和新泽西港

注: *燃料成本基于 Bunkerworld 指数, 更新于 2014 年 9 月 12 日

** LNG 成本基于 American Clean Skies Foundation¹⁰⁶和 Gladstein Neandross & Associates (GNA) 公司的行业调查分析。

^{xvi} 实施燃料含硫量限值的最大挑战是监管燃料质量。由于远洋船在港停泊时间多少于一天, 在其离港前可能无法完成燃料的采样和检测。这导致难以对违规行为进行处罚。

4.1 转用低硫油

控制船舶废气排放的措施很多，应用最普遍的是将船用燃料油转换成低硫燃油。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 1,000 ppm (0.1%)。加州的换油规定更为严格，要求远洋船从驶入距离加州海岸 24 海里水域范围内开始执行。目前全球共建立了四个排放控制区，规定所有远洋船在排放控制区内都要使用含硫量低于 10,000 ppm (1%) 的燃油。该限值将于 2015 年 1 月降低至 1,000 ppm (0.1%)。作为世界最繁忙的集装箱港口之一，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 1,000 ppm (0.1%) 的燃料或其他经审批的减排技术，港口减免其 25% 的费用。从 2013 年中开始，该绿色港口计划的补贴范围拓展至包括所有只在泊岸时使用低硫油或使用其他减排技术的远洋船，这些船只的港口费用将获得 15% 的减免¹⁰⁷。

如前所述，香港已实施泊岸时转用低硫油的激励计划，深圳也刚公布了类似的方案，但我国其他港口城市尚未出台此类政策。在香港，签署《乘风约章》的船公司自愿改用含硫量为 5,000 ppm (0.5%) 的燃油。香港政府为泊岸时改用这种低硫燃油的远洋船提供补贴，并计划从 2015 年开始将该自愿性政策改为强制实施。

香港强制转用燃油的政策和刚出台的深圳转用低硫油补贴方案仅针对船舶泊岸阶段，远洋船在珠三角水域或接近城市区域航行时使用的燃料油含硫量仍可高达 35,000 ppm (3.5%)。若建立一个排放控制区，自生效之日起船舶不仅要在泊岸时，还要在经过指定的控制区水域时就使用含硫量低于 1,000 ppm (0.1%) 的燃油（或采取其他可实现 SO_x 等量减排的措施，如废气洗涤器）。

政策可行性——燃料供应问题

全球航运业和各地政府经常提出需要推迟实施 ECA 的燃油含硫量规定，其中一个重要理由是担心世界各地低硫燃油的供给能力不足。航运业都期望目前含硫量不高于 1,000 ppm (0.1%) 的燃油的产量应能满足现有排放控制区的需求。由于船舶只需要在经过排放控制区时改用低硫油，预计对这种燃油的需求增长有限¹⁰⁸。美国加州强制要求所有远洋船从 2014 年 1 月开始在加州海岸 24 海里 (nm) 以内水域（即加州管辖海域内）使用含硫量不超过 1,000 ppm (0.1%) 的燃油。这是全球首个对进港的远洋船执行最严格的燃料标准的地区。截止到 2014 年 5 月，仅有十几艘船进入加州管辖海域时没有按照规定转用燃油¹⁰⁹。对于加州港口每年成千上万的船舶到港量来说，如此低的违规率（不到 1%）表明在进入加州海域前购买到符合要求的燃料是不成问题的¹¹⁰。

2015 年 1 月起，ECA 的燃料含硫量 1,000 ppm（即 0.1%）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 1,000 ppm (0.1%) 的燃油。因此，预计届时我国船用燃油市场上低硫燃油的需求将显著增长。目前，上海洋山港和江苏舟山港均已供应含硫量 1,000 ppm (0.1%) 的低硫油¹¹¹。香港也可能成为拟进入 ECA 的船舶的“加油站”，因为根据法规，香港船用燃料供应商在香港只能出售含硫量不超过 500 ppm (0.05%) 的船用轻柴油，而这些燃料能够满足未来排放控制区 1,000 ppm (0.1%) 的含硫量限值。

如果在中国也建立排放控制区，对符合 ECA 规定的燃油的需求将在全球范围内出现增长。从以往欧美成立 ECA 的经验来看，我们有理由相信从提出 ECA 申请到最终通过批准期间，炼油厂有充足的时间来提升其设备，生产足够量的、符合 ECA 规定的燃油。

技术问题

一些运营商担心，因为远洋船的发动机、锅炉和燃油系统是专门为使用渣油设计的，从渣油转换到低硫油可能会引发船舶操作和安全问题。为了解决这些问题，船用发动机制造商、油品公司和船级社发布了“转用燃油指南”，详细阐述了燃油转换的操作程序，这有助于最大限度地减少技术和安全问题¹¹²。很多港口如洛杉矶港已经实施了转用燃油计划，并组织了船公司研讨会，分享各公司在换油方面的经验。如今，欧盟和北美洲的排放控制区已顺利落实¹¹³。少数船舶曾在换油时遇到操作问题，例如换油期间损失动力，但只要提前准备、对船员进行培训并加强实践操作、替换老旧的供油设备，这些问题均可以轻易解决¹¹⁴。在我国港口停靠的各种远洋船中，只在亚洲运营的船队的换油经验可能最少，但他们可以借鉴在欧盟和美国港口定期停靠的船公司的经验¹¹⁵。

成本

2014 年 9 月 12 日，含硫量 0.1% 的低硫油价格比燃料油价格高 293 美元/吨，即低硫油贵 48% 左右¹¹⁶。但是，船舶只在接近港口和/或泊岸时才转用低硫油，使用两种燃料的成本需在航行全程的尺度上进行比较。北美排放控制区的提案对工程和运营成本进行了详细分析，主要结论如下¹¹⁷：

- 为使用低硫油而安装燃油转换设备并进行其他改造（例如安装额外的储油罐）的价格^{xvii}，根据不同船型，成本将增加 0.5-2%；
- 运营成本增加的幅度将依据船舶在排放控制区内行驶的路线和时间而变化。对于航行范围包括新加坡、美国西雅图和洛杉矶/长滩的船舶来说，其在排放控制区水域的活动范围约为 1700 nm，运营成本预计增加 3%；
- 若按每艘船的运营成本来算，一艘集装箱船的每个集装箱的总航运成本将增加 18 美元，而一艘在排放控制区内航行 7 天的邮轮，每名乘客的价格大约增加 7 美元/天。

值得注意的是，若在珠三角设立排放控制区，很多环节的成本会因中国的具体情况而与上述的情况有所差别。在 ECA 提案完成前，申请的地区必须针对当地情况估算实施 ECA 方案的成本。

4.2 岸电/冷熨烫

岸电或冷熨烫是指船舶泊岸时使用岸上电力而不是使用船用燃料。靠岸时，船舶会关闭主发动机，使用辅助发动机以维持制冷、照明、水泵等设备的运转^{xviii}。若船舶连接到岸上电源，

xvii 船舶的改造包括新增的燃料罐、燃料分离和混合装置、粘度计、过滤器等。详见尾注 19 中的文献 USEPA, 2009。

xviii 船舶泊岸时需用电力的设备和环节包括水泵、储油罐加热装置、发动机冷却水预热、冷冻集装箱制冷、通讯和航海仪器、甲板机械或吊车、空调、邮轮的各种设施（如照明、厨房设备等）、甲板上储罐的装卸泵、油船上的惰性气体发生装置等。

船员可关掉船舶辅机，船只的辅机将不再排放废气^{xix}。然而，电力需求的增长可能会导致发电厂的废气排放量增加。当然，这取决于发电的方式（如燃煤或天然气发电）。

使用岸电的效益还取决于入港船舶是否具有连接岸电的设备、泊岸时间和泊岸期间消耗的能源。相对来说，邮轮码头更应该安装岸电供应设施，因为邮轮泊岸时消耗的能源比远洋船高，而且很多邮轮都有固定的定期停靠的母港。但是，由于邮轮耗电量高，因此在邮轮码头安装岸电设施比其他泊位更具挑战性。

岸电生命周期的环境效益会因发电方式的不同而有差异。受 NRDC 委托，Gladstein, Neandross & Associates (GNA) 公司对船舶泊岸时使用岸电和转用低硫油两种情况下生命周期内的大气污染物排放量进行了初步的分析和比较。该分析设置了两种能源结构情景，即美国 2020 年电力能源结构情景，以及发电厂全部使用天然气的情景，并在两种情景下评估岸电生命周期内的废气排放量。该研究的更多资料请见附件 1。

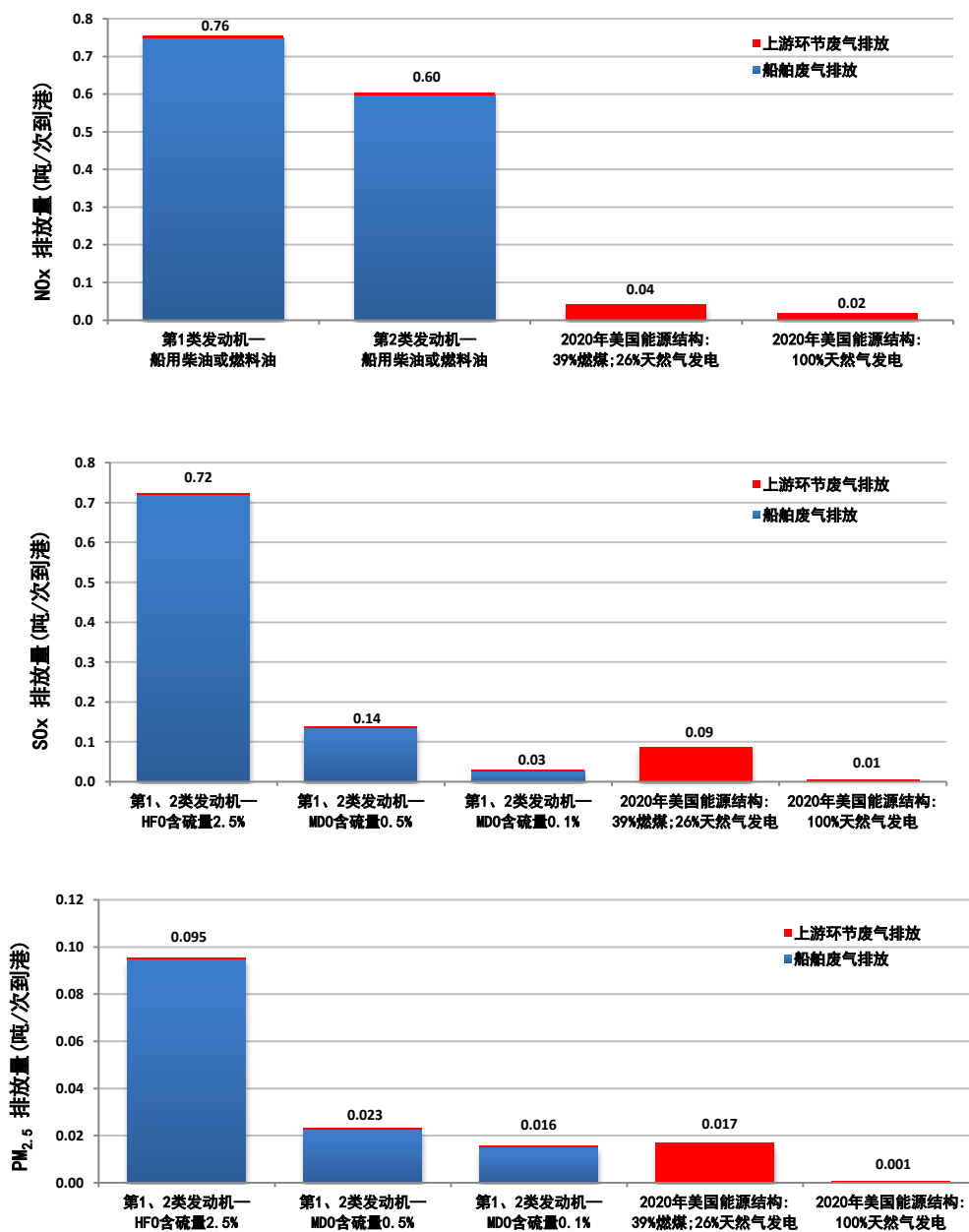
如图 12 所示，船舶泊岸时生命周期内的废气排放量包括两个部分：上游环节废气排放量（见图中柱状体的红色部分，标有“上游环节废气排放”），以及船舶泊岸时的直接排放量（见图中柱状体的蓝色部分，标有“船舶废气排放”）。上游环节的排放量指岸电所需电力在发电过程中所产生的污染物，以及船用燃料油或柴油在开采、炼油和运输过程中所排放的大气污染物。使用岸电时，船舶直接排放的 NO_x、PM 和 SO_x 为零。与使用高含硫量（25,000 ppm，即 2.5%）的燃料油（简称“HFO”）相比，岸电生命周期内的大气污染物排放总量明显较低。若船舶使用的是柴油，不论其安装的是满足 IMO 的氮氧化物 I 级排放标准还是更先进的 II 级排放标准的发动机，其排放的 NO_x 均比使用岸电时的排放量高，见第一个图。与 HFO 相比，使用岸电或低硫油均能显著削减 SO_x 和 PM；但如果按照美国 2020 年的电力能源结构预测岸电发电时的污染物排放量，与之相比，船舶使用含硫量为 0.1% 的低硫油（船用柴油，简称“MDO”）时排放的污染物更少。如果岸电所需电力全部由天然气发电产生，这种情景下船舶使用岸电的废气排放量最低。这说明生产岸电的能源越清洁，岸电的环境效益越高、减排效果越好。

在我国，将近 70% 的电力来自燃煤发电，而该比重将要下降到 65%¹¹⁸。香港的这一比例略高于 50%¹¹⁹。在按照上面介绍的方法评估国内岸电在生命周期内的效益时，需根据大陆和香港的实际情况估算参数，如电力能源结构、发电厂废气治理情况等。另外，还必须考虑国内船舶周转时间与美国的差异，例如，珠三角港口的船舶周转时间通常是美国港口的一半。

我国目前至少有四个集装箱码头已安装了岸电设施，包括江苏连云港、深圳港蛇口码头、山东青岛港和上海港外高桥码头。尽管高压岸电连接技术要求的国际标准已于 2013 年发布，但是岸电的广泛应用仍面临一些技术挑战¹²⁰。例如，目前尚未明确应由哪一方负责制定和实施港口和船上人员使用岸电时的安全规定，以及由谁负责安装和操作岸电设施等¹²¹。

xix 由于船舶需锅炉产生蒸汽，因此即使使用岸电，除非船舶还连接了岸上的电蒸汽发生器，否则船上的锅炉仍会排放废气。

图 12: 泊岸船舶使用燃料油、柴油和岸电情景下生命周期内大气污染物排放量对比



船舶的技术/设备要求

若要使用岸电，船舶需要安装大量的船载设备，包括¹²²：

- 电源线；
- 开关设备；
- 电源变压器；

- 新增交换机；
- 通信系统；
- 电缆和基座；
- 适度改装电压控制器和板载发电机组调速器；
- 现役船舶需有充足的船载空间以满足操作和安全要求。

港口泊位的技术/设备要求

对于入港船舶来说，港口岸电是否能顺利连接尤为重要，而岸电设备的连接要求具备以下条件¹²³：

- 变压器，用于船舶电压调控（440V，6,600V 至 11,000V）；
- 交流电转换器，用于 60Hz 和 50Hz 机载系统；
- 连接电缆，满足不同功率和电压的要求；
- 起重装置，用于调控电缆；
- 编制预案，以备船舶出于安全原因须随时迅速断开电缆连接。

根据港口的情况，电力供应还需具备以下条件：

- 扩展高压电源供电干线；
- 提高发电能力，以应对峰值负荷；
- 提高控制能力，以防止船舶在开启和关掉船上高能耗设备时会影响电网的稳定性。

岸电对技术和船上、岸上设备的要求较多，因此，各港口十分有必要详细分析岸电的成本效益、评估哪些泊位适合安装岸电。

成本

中国实施岸电的具体成本尚不清楚，而美国和欧盟在船只上安装岸电设备投资成本在每艘船 30 万至 200 万美元之间，成本根据不同的船型、吨位、船舶设计、是否需要船上变压器等也有差异¹²⁴。

在美国港口的泊位修建一套岸电设施所需成本在 100 万至 1,500 万美元左右，欧洲的成本约为 17 万-800 万美元。根据泊位需改造的工程量、高功率电力供应站的距离和固定岸电设施的难易程度，这些成本可存在很大差异¹²⁵。

4.3 液化天然气

船舶可以采用含硫量几乎为零的液化天然气（LNG）来提供动力。LNG 代替船用燃料油可以减少 80% 以上 NO_x 和颗粒物的排放，且几乎无 SO_x 排放¹²⁶。根据天然气来源不同，使用 LNG 还可能降低燃料生命周期内温室气体的排放量；若采取最佳方案减少甲烷泄漏量，温室气体排放量将更小。然而，通过页岩气水力压裂法或煤气化方式提取 LNG 对环境的影响至今仍存在很大争议¹²⁷。不容忽视的是，在没有充分安全保障的情况下通过水力压裂法提取天然气或生产煤制天然气，会对环境和健康造成负面影响。

北美和欧洲天然气价格低廉，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¹²⁸。由于 LNG 船能够满足排放控制区对 SO_x、PM 和 NO_x 的排放要求，北美和欧盟已有越来越多的试点项目，以评估 LNG 船的可行性和成本效益。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 LNG¹²⁹。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¹³⁰。

技术要求

相对将现役船舶改造为使用 LNG 的船舶来说，新建 LNG 船更加经济，可行性更高。液化天然气所需的燃料储备罐体积至少是产生相同热量的传统燃油储备罐的 2 倍；同时，燃料罐需有良好的绝缘性能，以及安全的储备空间以防泄漏，这使得 LNG 船整个燃料系统所占空间是使用传统燃油船舶的 4 倍¹³¹。天然气存储空间的扩充可能会影响船舶的载货量，而一些现役船舶可能没有足够的空间用于加装 LNG 罐。

对 LNG 船来说，罐体装置以及 LNG 发动机系统有多种备选方案。其中一个方案为低速行驶以及使用 LNG 注气发动机。相对于通过燃料罐输送高压天然气、使其在进入发动机前气化的方式，LNG 注气发动机让燃料在发动机内被气化，使得安装和操作更加安全和便利。

第二种备选方案是使用低压二冲程双燃料发动机。低压 LNG 气体经过冲程底部的气缸附近的阀门，压缩后继而被辅助燃料引燃。另一种方案是在 LNG 运输船上建立双燃料柴油机电系统，这种方案也适用于客渡船。若邮轮使用 LNG 作为燃料，挥发的燃料还可用于空调系统制冷¹³²。

LNG 加注设施

目前挪威和瑞典均已建设了小型的 LNG 加注站，欧洲其他地区、美国和加拿大亦规划建设几十座加气站。但目前已建的 LNG 加注设施布局仍比较分散，而规划建设的多数 LNG 加注站又都是为内河船或沿海船服务的^{133,xx}。因此，总体来说，LNG 加油设施仍不完善，尤其是在北美和欧洲以外的地区。短期内，这会阻碍将 LNG 作为长途运输的燃料。

此外，IMO 关于船舶使用 LNG 的安全协议尚未通过，这将阻碍 LNG 作为真正可替代馏分油的燃料，也使得 LNG 无法在短期内应用于远洋航运¹³⁴。因此，该问题有待进一步观察。

安全泊岸

若一艘 LNG 船抛锚或在港口遇到延迟（所有操作停止），且该船没有安装再液化装备的话，船员可能不得不排放掉或烧掉甲烷以维持正常的燃料罐压强。这会降低运作效率，增加温室气体排放量¹³⁵。

xx 例如，北美（包括塔科马、洛杉矶，密西西比河沿岸和五大湖区）（见尾注 133 中的 Deal, 2013）和北欧（包括挪威、丹麦、瑞典、德国、荷兰、比利时、法国和英国）（见尾注 105 中的 Bilkom, 2013）已经规划建设了天然气液化和加注的基础设施。

4.4 废气洗涤器

废气洗涤器能够清除发动机尾气中的 SO_x 、颗粒物和其他污染物。多年来该技术已成功地应用于工业领域，但在船舶上的普及率仍很有限。

主要的两种废气洗涤器为干式和湿式洗涤器。湿式废气洗涤器又包含两种技术：一种是开放式废气洗涤器，该技术利用海水作为“洗涤剂”；另一种是封闭式废气洗涤器，该技术利用新鲜淡水加入碱性物质（如氢氧化钠，俗称烧碱）作为“洗涤剂”¹³⁶。对于海水废气洗涤器而言，当船舶废气中的 SO_x 排入海水后，会迅速与海水中的碳酸钙发生强烈的化学反应，生成硫酸钙和二氧化碳，从而中和 SO_x 的酸度。洗涤的废水在去除固体、调节 pH 值后直接排入海洋¹³⁷。淡水废气洗涤器的操作与海水洗涤器类似，只是不用海水，而是用加了碱性物质的淡水去除废气中的 SO_x 。淡水废气洗涤器可以直接控制“洗涤剂”的碱度， SO_x 去除率要求较高时常使用此方法；或者在一些海水碱度不稳定的地区，无法使用海水洗涤时，也会使用该方法。因淡水废气洗涤器可以做到废水“零排放”，在生态敏感或脆弱的海域（如波罗的海）航行的船舶适用该技术¹³⁸。干式废气洗涤器则是指直接向船舶废气喷淋石灰石，而不是用“洗涤剂”去除废气中的 SO_x ¹³⁹。

试验结果表明，废气洗涤器可以大幅降低 SO_x 排放量（去除率高于 90%），并可适量甚至高效的减少颗粒物排放（去除率约 30%~98%，这取决于采用的何种废气洗涤技术及其具体设计）¹⁴⁰。因此，只要设计得当，使用高含硫量燃料的船舶可以通过废气洗涤器实现 ECA 对含硫量 0.1% 的要求，但废气洗涤器无法控制 NO_x 的排放¹⁴¹。

成本

在美国和欧盟地区，根据船型、船舶吨位和所采用的洗涤器技术不同，购买和安装废气洗涤器的价格在每艘船 70 万到 400 万美元之间¹⁴²。洗涤器的运营成本包括运行洗涤器所需的额外燃料（约为燃料成本的 1-3%），以及洗涤器的养护成本¹⁴³。对于淡水废气洗涤器和干式废气洗涤器来说，其费用还包括购买氢氧化钠或石灰石的成本¹⁴⁴。

根据欧洲海事安全局的研究结果，由于低硫油和燃料油价格的差异，船舶安装废气洗涤器可能比使用低硫油更经济，其投资回收期不到一年¹⁴⁵。世界上最大的邮轮公司“嘉年华邮轮公司”最近宣布在 70 艘邮轮（即该公司 70% 的船舶）上安装废气洗涤器以满足 ECA 对 SO_x 排放的要求。这是对废气洗涤器的技术和经济可行性的认可¹⁴⁶。

湿式废气洗涤器的环境影响

虽然废气洗涤器是一项经济可行的技术，可使船舶满足 ECA 的要求。然而，废气洗涤后排放的酸性洗涤废水会成为一个环境问题，阻碍开放型湿式洗涤器的进一步普及¹⁴⁷。目前 IMO 的排放标准要求废气洗涤废水的 pH 值不得低于 6.5，而开环洗涤器的废水 pH 值通常在 3.5 左右。要达到 IMO 的废水排放标准，需要在船上进行大量的稀释工作（因此需要消耗更多能源）。假设一台船舶辅助发动机的输出功率为 1 兆瓦，其使用的燃料含硫量为 3%，若基本全部依靠废气洗涤器来处理废气，则平均每小时需 82 吨海水，每天共计产生 460kg 硫酸钙或类似的其他盐化合物¹⁴⁸。

4.5 其他废气治理技术

除了上述技术，航运业还引进了其他一些技术来控制船舶废气排放，包括选择性催化还原（SCR）、废气再循环（EGR）、直接注水法、空气加湿法、可变气门正时和升程系统、换用二甲醚作为燃料等。本节重点关注 SCR 和 EGR 技术，因为这两种技术在船舶上的应用比其它减排技术更广泛。其他技术的相关信息可参阅 IMO 的相关文献¹⁴⁹。

选择性催化还原技术（SCR）

SCR 是一种安装在发动机末端的 NO_x 控制技术。该技术在催化剂和氨水（常用的还原剂）的作用下，将 NO_x 转化为 N₂ 和水。该技术已广泛应用于火电厂和重型柴油车中，其 NO_x 削减率可超过 90%。根据运营状况不同，船舶上 SCR 设备的 NO_x 去除率一般为 70% 至 90%，但理想情况下可超过 90%¹⁵⁰。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。目前公认该技术是唯一一项可用于各类船舶发动机和船型的 NO_x 减排技术¹⁵¹。为更好的控制废气排放、延长催化剂的寿命，使用 SCR 技术的船舶应使用含硫量低于 1,000 ppm 的燃料¹⁵²。

SCR 设备的单位成本依据船型和发动机的功率不同而变化，运营成本（主要指尿素和催化剂再生的费用）则由船舶在 ECA 内航行的时间所决定。大型船舶的 SCR 设备的单位投资约为 40-135 美元/kW；运营成本取决于尿素的使用量，约为在 ECA 中航行时燃料费用的 7-10%¹⁵³。

废气再循环（EGR）

EGR 通过将部分尾气重新导入燃烧室的方法去除 NO_x。导入燃烧室的废气在燃烧过程中吸热，降低最高燃烧温度，从而减少 NO_x 的产生。该技术的原理是利用不可燃气体来稀释进入燃烧室的空气，降低燃烧气体中氧气的含量，从而抑制 NO_x 的生成¹⁵⁴。

与 SCR 一样，EGR 技术成功应用于机动车的 NO_x 减排已有几十年的历史。实践证明即使是使用高含硫量的燃料油，EGR 对于 NO_x 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^{155,156}。如果使用含硫量较高的燃料，则船舶适于安装 EGR—废气洗涤器组合设备，在将船舶尾气导回发动机前先去除废气中的硫酸盐和颗粒物，以同时达到 ECA 的 NO_x 和 SO_x 标准¹⁵⁷。

根据欧盟的经验，EGR 设备的单位成本一般为 60-80 美元/kW，其运营成本约为船舶在 NO_x 排放控制区中航行的燃料成本的 4-6%¹⁵⁸。

4.6 降低船舶航速

降低船舶航速是指远洋船以较低的速度航行。目前全球大多数船公司都采用在公海内慢速航行的方案，以减少燃料消耗，在燃油价格迅速上升的情况下可节省成本。随着燃料消耗量的减少，废气排放量也会下降。

通过降低船舶航行速度来实现减排目标，一定程度上取决于减速幅度、燃料种类和发动机型号。其中的规律是船舶速度每下降 10%，可降低 15-20% 的燃油消耗量（废气排放量也相应减少）¹⁵⁹。大多数集装箱船的航速通常在 20-25 节。慢速航行一般是指速度在 18-20 节左右，即

33.3-37.0 km/hr。超慢速航行（15-18 节；27.8-33.3km/hr）是指为了最大限度地减少燃油消耗量而大幅降低航速，这尤其适用于短途航运。最低速度航行（12-15 节；22.2-27.8km/hr）的成本最低，在技术上通常适用于远洋船，尽管这样并不能大幅节约燃料¹⁶⁰。马士基船公司于 2009 年开始推行慢速航行。该公司表示，船舶减速航行的航速一般为 18 节或更低，而低于 18 节则被称为超慢速航行。船用发动机制造商瓦锡兰估计，通过将货船的航速从 27 节降到 18 节，可减少 59% 的燃油消耗，而亚欧航线的航行时间会因此延长一周¹⁶¹。

美国的四大港口，包括洛杉矶港（POLA）、长滩港（POLB）、圣地亚哥港（POSD）和纽约/新泽西港，均纷纷推出自愿性减速计划，以减少港口附近的废气排放¹⁶²。洛杉矶港和长滩港是美国最早实施自愿性减速计划的港口。该计划第一次启动时，要求停靠 POLA 或 POLB 的船舶在距离港口 20 nm 范围内将航速控制在 12 节以下。遵守该规定的船公司每艘船可在泊岸第一天享受 15% 的码头费折扣。2009 年 9 月，船舶减速范围扩大到洛杉矶港和长滩港外 40 nm。当某船 12 个月内减速的达标率达到或高于 90% 时，其全年的码头费均可享受折扣。在距离洛杉矶港 40 nm 范围内将航速控制在 12 节以下的船舶可享受 30% 的码头费折扣，相同情况下长滩港提供的折扣是 25%。而如果在距离港口 20 nm 范围内减速的，则在两个港口均可享受 15% 的码头费折扣¹⁶³。

除了提供码头费折扣外，POLB 还实施了“绿旗计划”来推广自愿性船舶减速。根据该计划，若 POLB 到港船舶的达标率达到 90% 或以上的，便可荣获“绿旗环保成就奖”¹⁶⁴。

2008 年，POLB 估计其自愿性减速计划每年平均减少了 678 吨 NO_x、453 吨 SO_x、60 吨柴油颗粒物和超过 26,000 吨 CO₂ 的排放。从 NO_x 减排角度看，绿旗计划下每吨 NO_x 减排成本为 2,360 美元，低于排放控制区的单位减排量的估算成本¹⁶⁵。

美国加州空气资源委员会（CARB）分析了加州港口在 24 nm 和 40 nm 范围内开展船舶减速的效益。若所有船舶在距离港口 40 nm 处将航速减到 12 节，据估计颗粒物、NO_x、SO_x 和 CO₂ 的排放量可分别减少 31%、36%、29% 和 29%（见表 3）。

表 3：不同船舶减速情况下污染物排放量（单位：吨/年；2008 年数据）¹⁶⁶

	船舶不减速* (24 nm)	所有船舶减速** (24 nm)	仅港作船舶减速 (24 nm)	船舶不减速 (40 nm)	所有船舶减速 (40 nm)	仅港作船舶减速 (40 nm)
颗粒物	5.1	4.2 (-18%)	4.6 (-10%)	8.9	6.1 (-31%)	7.8 (-12%)
NO _x	53	42 (-21%)	48 (-9%)	98	63 (-36%)	83 (-15%)
SO _x	45	39 (-13%)	42 (-7%)	73	52 (-29%)	64 (-12%)
CO ₂	3,130	2,720 (-13%)	2,930 (-6%)	4,810	3,430 (-29%)	4,250 (-12%)

注：* 船舶减速：假设所有船舶减速到 12 节。

** 所有船舶包括离开和抵达港口的船舶以及过境船舶。

4.7 扩展《乘风约章》

珠三角地区防治船舶空气污染的备选方案包括将香港实施的《乘风约章》扩展至深圳和广州的港口。许多船舶在停靠香港的港口之前或之后可能到访深圳港或广州港，有的船舶还可能既在深圳港又在广州港泊岸；而有些船舶可能不停靠香港，而沿着其它航线直接前往深圳港或广州港。例如，17家定期在香港港口停靠并签署了《乘风约章》的大型船公司中有10家公司的船舶也常在深圳盐田港停泊(包括马士基(Maersk Line)、长荣(Evergreen)、东方海外(OOCL)、美国总统船公司(APL)、法国达飞船公司(CMA CGM)、中国远洋运输(COSCO)、商船三井(MOL)、赫伯罗德(Hapag Lloyd)、日本邮船(NYK)以及汉堡南美(Hamburg Sud)等)¹⁶⁷。此外，14家船公司运营的航线中至少有一条经过香港和广州港集装箱码头(包括中国远洋运输(COSCO)、中海集装箱(CSCL)、法国达飞船公司(CMA-CGM)、长荣(Evergreen)、韩进海运(Hanjin)、兴亚海运(Heung-A)、川崎汽船(K Line)、高丽海运(KMTC)、马士基(Maersk Line)、南星海运(NAMSUMG)、太平船务(Pacific International)、海南泛洋航运(POS)、万海航运(Wanhai)和梧州航运(Wuzhou)等)¹⁶⁸。

深圳市刚出台的《补贴办法》包含了针对远洋船舶岸时转用低硫油的激励措施，部分船公司还签署了“深圳港绿色公约”，类似于涵盖深圳水域的、扩展的《乘风约章》(深圳计划详见3.2.2.2节)。为了鼓励船公司将自愿性的《乘风约章》扩展至广州港和国内其他港口地区，如长三角，有必要探讨是否应该仿效香港和深圳在这些港口地区也实施转用燃油的激励计划。

4.8 补贴与折扣

欧盟出台了很激励计划鼓励船舶采用各类减排技术，这些方案最初的目的并不是为了要求船舶遵守排放控制区的规定。

瑞典实施的是差别化的“航道费”方案，船舶需支付的航道费因NO_x排放量和燃油含硫量而异¹⁶⁹。瑞典的大型港口均按照差异化的“航道费”方案的要求，根据船舶的环保绩效收取港口费。例如，哥德堡港对转用含硫量不超过1,000 ppm (0.1%) 燃油的入港船舶收取差别化的港口费，并为改用LNG或类似的清洁燃料的船舶提供资金支持。相对而言，那些使用含硫量超过5,000 ppm (0.5%) 的燃油的船舶则必须支付额外的费用，而这笔附加费带来的收益被用于投资使用清洁燃料的船舶¹⁷⁰。

瑞典的“航道费”方案促使很多船公司在SO_x排放控制区建立之前就改用了低硫油，这一方案有助于船公司遵守波罗的海排放控制区的相关规定¹⁷¹。该方案还促进了NO_x减排技术的应用，如SCR和湿空气动力系统(HAM)，尽管目前北海和波罗的海还未建立NO_x排放控制区¹⁷²。

4.9 排放控制区

为了减少远洋船的废气排放量，一国(或多国)可以根据MARPOL附件VI，向IMO申请设立SO_x(及颗粒物)、NO_x的排放控制区。在排放控制区，SO_x和NO_x排放标准要比现行的国际标准更加严格。

排放控制区并不强制要求使用特定的污染物减排技术。MARPOL 附件 VI 第 4 条允许船舶使用任何“等效的”减排方案以满足 SO_x 或 NO_x 排放要求，因此 NO_x 和 SO_x 的排放标准都具有技术中立性。

正如 4.1 节所述，SO_x 排放控制区目前要求所有船舶在排放控制区内使用的燃油的含硫量不得高于 10,000 ppm (1%)，这一标准到 2015 年将会收紧至 1,000 ppm (0.1%)。燃料含硫量标准适用于所有船舶，这有助于减少船舶（无论新旧）在排放区内的 SO_x 和颗粒物排放量。在 NO_x 排放控制区，相对严格的 NO_x 排放标准仅适用于新建船舶；所有船舶的 NO_x 排放均得到有效控制还需要一定时间。

专栏 3：波罗的海和北海排放控制区简介

全球最初设立的两大排放控制区分别是 2006 年的欧洲波罗的海排放控制区和 2007 年建立的欧洲北海排放控制区。

这两大硫排放控制区设定了燃油含硫量标准，因此，该政策仅能够限制船舶 SO_x 的排放量。通过分析建立北海和波罗的海排放控制区的成本和效益，发现 ECA 带来的健康和环境效益（包括降低健康风险、提高作物产量和减轻环境危害等）远远超过了 ECA 的“合规成本”。

这两大 ECA 每年创造的健康和环境效益估计为¹⁷³：

- 2015 年：€80 亿至 €160 亿（欧元）
- 2020 年：€100 亿至 €230 亿（欧元）

而满足 ECA 要求所增加的成本为：

- 2015 年：€6 亿至 €37 亿（欧元）
- 2020 年：€9 亿至 €46 亿（欧元）

如果要在我国海域或部分海域内建立排放控制区，中国政府需向 IMO 提交设立 ECA 的申请。设立 ECA 的申请书中至少应包括以下信息：

- 清晰的 ECA 范围；
- 拟控制的污染物（如 NO_x、SO_x 和颗粒物）；
- 受影响的居民和区域；
- 评价船舶对区域大气环境污染的贡献率或对排放控制区环境的负面影响；
- 拟议的排放控制区的气象条件；
- 拟议的排放控制区内船舶的交通模式、密度和特点；
- 已实施的控制陆上大气污染源（主要针对 NO_x、SO_x 和颗粒物）的措施，以及排放控制区内正在实施的减排措施
- 对比船舶废气控制措施与陆上污染源减排措施的成本，分析措施对国际航运贸易的经济影响。

香港和珠三角地区的相关部门正在讨论远期在珠三角水域设立排放控制区。

专栏 4：北美洲排放控制区简介¹⁷⁴

北美排放控制区（海岸线以外 200 nm 以内的区域）是唯一全面的 ECA，同时限制 SOx 和 NOx 的排放¹⁷⁵：

到 2020 年，预计 ECA 内船舶的废气排放量比无 ECA 方案的排放量减少 23% 的 NOx、74% 的 PM_{2.5} 和 86% 的 SOx；到 2020 年，预计可减少过早死亡病例 5500 至 14000 人、急诊数 3800 人次和急性呼吸系统病例 490 万个；到 2030 年可减少过早死亡病例 31,000 人；总体健康效益预计约为 470 亿至 1100 亿美元；到 2020 年，北美洲 ECA 的总成本预计为 32 亿美元。

4.10 备选方案对我国大气污染物排放的影响

在香港 2007 年船舶大气污染物排放清单研究的基础上，思汇政策研究所、香港科技大学和香港大学进一步深入评价了在香港和珠三角其他区域行驶的远洋船的废气排放影响¹⁷⁶。该研究对比分析了香港和珠三角地区四种不同的船舶废气排放情景：

- 泊岸远洋船强制性转用低硫油，燃油含硫量不得超过 5,000 ppm (0.5%)；
- 香港水域内行驶的远洋船强制性转用低硫油，燃油含硫量不得超过 1,000 ppm (0.1%)；
- 设立 ECA，覆盖距香港海岸线外 100 nm 的水域，包括部分珠三角水域；
- 限制远洋船在香港水域的速度至 12 节。

表 4 总结了该研究的结果。结果表明船舶在香港近岸海域限速至 12 节这一低成本方案能够减少 1.4% 的 SO₂ 排放量，在珠三角水域（距香港海岸 100 nm）建立排放控制区可显著减少珠三角地区的废气排放量，其中 SO₂ 减排量约 95%。

因此，该研究提出：珠三角地区船舶废气排放控制的远期方案是在珠三角水域建立排放控制区。此建议在香港环保署发布的《香港清洁空气计划》中得到了响应¹⁷⁷。本章前面各节所讨论的各项减排措施、技术都可以在 ECA 这一大框架下进行推广和实施。

表 4：香港和珠三角地区四种船舶废气排放控制情景下的污染物减排潜力¹⁷⁸

措施	减排量	
	SO ₂	颗粒物
(a) 远洋船泊岸转用低硫油，含硫量 0.5%	3.9%	2.9%
(b) 远洋船在香港水域转用低硫油，含硫量 0.1%	9.6%	8.3%
(c) 建立排放控制区（距香港海岸线 100 nm）	95%	85.3%
(d) 远洋船在香港水域减速至 12 节	1.4%	1.3%
基准排放量	141,920 吨/年	16,433 吨/年

5 结论

中国目前是世界最大的制造业基地和第二大消费市场。随着进出口贸易的强劲发展，我国的港口体系也在迅速完善。香港的研究表明，港口的船舶、货车和港口设备可能是国内日益加剧的大气污染问题的重要因素之一。此外，我国集装箱港口多位于或靠近人口密集的城市区域。这些港口城市的船舶活动极为频繁，其废气排放对在港口和附近人口密集地区的居民健康产生的影响可能远远高于其他国家的船舶污染对人体健康的影响。

公众对改善空气质量的诉求不断加大，推动香港成为我国第一个监管船舶废气排放的城市。我国其他沿海城市也开始关注船舶和港口活动对大气环境的影响，上海、深圳、青岛、广东、江苏和山东等地已开始陆续推出防治船舶空气污染的措施，如促进船舶泊岸换油和使用岸电。

本白皮书综述了多种控制船舶和港口废气排放的方案，包括新技术、燃油政策（如转用低硫油、使用 LNG、岸电、SCR、EGR 和废气洗涤器等）以及政策措施（如 ECA 和激励政策），这些措施和政策已在美国和欧盟取得成效。国内港口城市和地区发布的空气污染防治方案涵盖了其中一部分措施和政策，但未来监管机构在实施中可能会面临一系列严峻的挑战，包括：

1. 我国目前对减缓船舶和港口空气污染的研究还在起步阶段，除香港的港口和上海港外，各地仅有船舶和港口设备的类型、运作情况和废气排放水平的初步数据。总体来说，数据十分有限。各地拟定的许多减排措施所需费用庞大，并且缺乏详细的数据和深入的分析来说明其成本及效益。若缺乏研究基础来证明这些措施的必要性和可行性，政府可能会面临来自船公司、港口和其他利益相关方的反对。
2. 美国和欧盟的大型港口会定期更新大气污染物排放清单，使得港口和监管机构能够定期调整和优化废气控制方案及“港口清洁空气行动计划”（如果港口已制定此计划）。目前国内只有香港的港口和上海港制定了详细的大气污染物排放清单并定期更新。缺乏排放数据不利于港口和监管机构因地制宜的制定废气减排方案并定期进行修订，从而实现环境和健康效益的最大化。
3. 航运业的竞争尤为激烈。港口是地方财政收入的主要来源，并为当地提供了大量工作岗位。政府和企业对港口竞争力的担忧将持续妨碍清洁技术或绿色港口政策以及自愿性计划的实施。虽然尚无明确的报道，但航运业已表达了忧虑：若部分港口决定强制实施防治方案，较高的合规成本可能会驱使船舶到要求相对较宽松的港口。这必将削弱已实施污染防治措施的港口地区的治理意愿，弱化已出台政策的效果。

由于国内公众仍很关注空气污染及其导致的健康问题，船舶和港口预计会逐步成为大气污染防治工作的重心。目前珠三角、长三角乃至全国正在开展船舶和港口废气排放控制研究，这将有助于政府和利益相关方更好地认识船舶和港口污染造成的影响以及这些污染的主要来源。

未来，进一步深入分析和研究具体港口或港口区域的废气排放情况将极大的促进船舶、货运车辆和港口设备清洁化的工作。相关的研究包括建立详细的船舶和港口大气污染物排放清单，分析污染防治措施的成本效益，以及措施可行性研究。这类研究为美国和欧洲的重点港口评估各类排放控制措施的效益和可行性提供了重要的科学依据。欧美政府和港口企业在充分理解各种排放控制措施的成本效益后，制定“港口清洁空气行动计划”，使得航运业和相关政府部门有

充足的时间选择恰当的政策和技术措施。我国主要港口地区可以参考欧美的经验，制定最符合自身情况和需求的“港口清洁空气行动计划”，并以这些计划与业界和各利益相关方进行沟通，争取其支持。此外，就 SCR、EGR、废气洗涤器、LNG 和岸电等技术议题与国际专家、机构进行经验交流，能够帮助国内相关机构更深入地认识实施这些措施所面临的机遇和挑战。

从长远角度看，国家和地方可为防治船舶大气污染协同努力，如共同探讨在大型港口附近甚至在全国近岸海域建立“排放控制区”，这将会成为消除港口竞争力忧虑，并实现环境和健康效益最大化的最佳途径。制定全国性的法律法规来防治船舶大气污染，有助于防止船舶逃避责任、转向环保要求较低的港口，并保护采取了严格环保措施的地区的经济利益。另外，建立 ECA 可以促使各类船舶在进入中国海域时采用先进的废气排放控制技术、使用清洁能源，从而有效减少船舶废气排放，帮助实现空气质量目标。

附录. 岸电分析方法概述

1. 前言

Gladstein, Neandross & Associates 公司(GNA)组织进行了泊岸远洋船废气排放的相关分析, 该分析是一项评估多种货运方式废气排放研究的一部分。

船舶废气排放分析共评估了 12 种情景, 包括船舶泊岸时使用岸电和使用传统柴油辅机等不同情景。该研究关于岸电的章节论述了 8 种情景。废气排放量的估算包括船舶的直接排放以及上游环节炼油或发电过程中的废气排放, 并按照船舶单次到港的废气排放量进行计算。上游环节废气排放情景主要根据美国 Argonne 国家实验室的 GREET 1 2012 模型计算。为符合美国加州空气资源委员会 (CARB) 针对远洋船的规定, 船舶直接废气排放和能源使用量主要基于 CARB 提供的大气污染物排放清单和相关数据进行计算^{xxi}。关于电力能源结构的假设则根据 NRDC 的指导进行。

2. 情景介绍

下表总结了岸电废气排放分析的 8 种情景。这 8 个情景中有 6 个评估了远洋船泊岸时使用辅机的情况下生命周期内的废气排放量 (即“燃油情景”)。其他两个情景评估了远洋船泊岸时连接岸电设施的情况下生命周期的废气排放量, 两个情景的电力能源结构不同。^{xxii}

燃油情景 (燃料油HFO和船用柴油MDO)	
IMO的发动机氮氧化物排放标准	燃料及其含硫量
I级	HFO, 2.5%
I级	MDO, 0.5%
I级	MDO, 0.1%
II级	HFO, 2.5%
II级	MDO, 0.5%
II级	MDO, 0.1%

注: HFO: 燃料油/重油; MDO: 船用柴油。

xxi 除非另有说明, 文中所用船舶废气排放因子和船舶运营特点均采用加州空气资源委员会的《2011年远洋船废气排放量估算方法》中的数据。

xxii GNA 的分析中还设置了其它四种岸电情景, 但其结果在本白皮书中未引用。这四种情景分别为: 1. 美国燃煤火电厂供应 100% 的非固定终端用电 (不实施符合《汞和空气毒物排放标准》要求的废气排放控制措施); 2. 美国燃煤火电厂供应 100% 的非固定终端用电, 且发电厂氮氧化物去除率达到 80%, PM₁₀、PM_{2.5} 和 SO_x 去除率均为 90%; 3. 香港电力能源结构 (燃煤发电占 50%, 天然气发电占 25%, 核电占 25%); 4. 广东省电力能源结构 (燃煤发电占 48%, 石油发电占 29%, 天然气发电占 4%, 大型水电与核电共 19%)。

岸电情景	
情景	电力能源结构
2020年美国电力能源结构	39%为燃煤发电，26%为天然气发电，21%为核能发电，13.5%为可再生能源发电，其余为渣油发电。
2020年100%天然气发电	天然气发电厂（不包括燃气-蒸汽联合循环发电厂）供应100%的非固定终端用电，用GREET模型默认值估算

传统船用柴油辅机情景：评估达到 IMO 的氮氧化物 I 级和 II 级标准的船用辅助发动机分别在使用燃料油和船用柴油时的废气排放。假设燃料油含硫量为 2.5%，船用柴油含硫量为 0.5% 或 0.1%。

岸电情景：泊岸船舶使用岸电不直接排放废气，但是其上游环节的废气排放基本取决于电力能源结构。如前所述，本白皮书所介绍的 8 个情景中包括 2020 年美国电力能源结构情景和 100% 天然气发电情景。2020 年美国电力能源结构情景中，假设美国电力能源结构为：39% 为燃煤发电，26% 为天然气发电，21% 为核能发电，13.5% 为可再生能源发电，其余为渣油发电。在 100% 天然气发电情景中，岸电全部来自天然气发电。

应注意，在各种情景下，本报告只调整了与非固定用电终端有关的电力能源结构。由于固定用电终端的废气排放已包含在各种燃料的开采和生产过程的排放中，所以固定用电终端的用电结构按照 GREET 模型的系统默认值进行设置。固定用电终端的能源结构会影响各种燃料全生命周期的废气排放，因为在燃料的生产、处理和运输等各个环节均会耗电。例如在美国，一些天然气需在电力压缩机的推动下通过管道输送，天然气生产厂的各种设备也需要电力。这些均属于固定用电终端，改变其电力能源结构将影响天然气生命周期内的能源消耗量和废气排放量（反过来，天然气生产、运输过程的能源消费变化，也会影响整个电力能源结构及其他燃料生命周期内的能耗占比）。

对于岸电，本报告考虑的是“边际电力能源结构”，即仅考虑为供应岸电而增加的这部分电力的结构。也就是说，从全国范围来看，基本的电力能源结构是不变的（至少未显著改变）。因此，在分析如岸电等非固定用电终端的边际电力需求时，固定用电终端的能源结构是不变的。本报告假设固定用电终端的能源结构不变，从而能够分析不同边际能源结构情景下岸电生命周期内废气排放的差别。

3. 船舶靠港相关假设

上游环节废气排放因子和船舶废气排放因子均以能源消耗为基础进行估算，其计算单位为克/百万英热单位（grams/MMBTU）或克/千瓦时（grams/kW-hr）。要计算船舶每次靠港的废气排放，必须估算典型的泊岸情况下，船舶的燃料消耗总量或者用电总量。燃料油或船用柴油的消耗量以 CARB 提供的辅机燃油消耗率为基础计算。船用柴油的燃油消耗率和碳含量都略低于燃料油，所以船用柴油比燃料油产生的温室气体少。船舶用电量基于 CARB 估算的辅机功率和负载系数的平均值进行计算，即功率取 8,156 千瓦，负载系数为 18%。上述数字大致上代表了

一艘 4,000 至 49,99 标准箱容量的集装箱船的参数。以 2005 年停靠加州六大港口的所有船舶的靠港时间的加权平均值作为船舶靠岸时间，即 40.1 小时，在此基础上将燃油消耗率和耗电率转化为能耗总量。

船舶靠港的相关假设	
负载系数	18%
发动机功率 (kW)	8,156
单次靠港时间	40.1
单次靠港能耗 (kW-hr)	58,877

4. 船舶废气排放因子

CARB 提供了未控制废气排放的辅助发动机（即实施氮氧化物 I 级标准之前的发动机）的排放因子。CARB 的船舶废气排放模型还提供了实施氮氧化物排放控制措施后满足 IMO 的氮氧化物 I 级和 II 级标准的发动机的排放因子。这两种发动机之间只有氮氧化物的排放因子有差异。

尾注

- 1 International Agency for Research on Cancer (IARC), *IARC Monograph: Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes*, Vol. 105, 2013, monographs.iarc.fr/ (最后访问时间: 2014年4月7日)。
- 2 Hak-kan Lai et al., "Health Impact Assessment of Marine Emissions in Pearl River Delta Region," *Marine Pollution Bulletin* 66, no. 1-2 (January 2013): 158-163. 卢旭阳, "推广使用岸电和低硫油治理船舶污染", 2014年汽车尾气排放控制研讨会发言, 2014年6月26日(最后访问时间: 2014年7月12日)。
- 3 根据 MARPOL 附件 VI, 2015 年开始在北美洲、加勒比海、波罗的海和北海 ECA 航行的船舶所使用的燃料含硫量限值为 1000 ppm (0.1%) ; 目前 ECA 以外的区域设定的燃料含硫量为 35,000 ppm (3.5%) (详见 4.9 节)。参见: IMO, "Sulfur Oxides (SOx)—Regulation 14," IMO website, 2014, www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-%28SOx%29-%E2%80%93Regulation-14.aspx (最后访问时间 2014 年 3 月 18 日)。
- 4 美国的非远洋船主要安装第 1 类和第 2 类发动机 (发动机排量小于 30 dm³)。该类船舶包括拖船、顶推船、补给船、渔船和港口内或临近港口间航行的商船。参见 Penelope McDaniel, "Controlling Port and Marine Vessel Emissions in the United States", "Motor Vehicle Emissions Control Workshop 2014"发言, 2014 年 6 月 25 日, www.cse.polyu.edu.hk/~activi/MoVE2014/Presentations/Session%204b.3%20-%20PPT.pdf (最后访问时间: 2014 年 7 月 12 日); European Council, *Directive 2009/30/EC of the European Parliament and the Council of 23 April 2009*, 2009, eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32009L0030。
- 5 Legislative Council of Hong Kong (LegCo), *Mandatory Fuel Switch at Berth for Ocean Going Vessels in Hong Kong Waters*, background brief prepared by the Legislative Council Secretariat, July 22, 2013, www.legco.gov.hk/yr12-13/english/panels/ea/papers/ea0722cb1-1537-2-e.pdf (最后访问时间: 2014 年 4 月 10 日)。Maritime and Port Authority of Singapore (MPA), "Enhancement to Maritime Singapore Green Initiative—Green Port Programme," *Port Marine Circular No. 06 of 2013*, 2013, www.mpa.gov.sg/sites/circulars_and_notices/pdfs/port_marine_circulars/pc13-06.pdf (最后访问时间: 2014 年 9 月 23 日)。在香港, 若远洋船泊岸时使用含硫量不高于 5000 ppm (0.5%) 的燃料, 其港口费用将获得 50% 的减免。在新加坡, 若远洋船泊岸时使用含硫量不高于 1000 ppm (0.1%) 的燃料或使用其他经审批减排技术, 其港口费用将获得 15% 的减免。新加坡还为在其海域内使用低硫油或其他减排技术的船舶提供 25% 的费用减免。
- 6 United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), *Review of Maritime Transport 2013*, 2013, unctad.org/en/publicationslibrary/rmt2013_en.pdf。
- 7 Zhen Hong et al., "The Competitiveness of Global Port-Cities: The Case of Shanghai, China," *OECD Regional Development Working Papers*, 2013/23, November 2013, www.oecd-ilibrary.org/urban-rural-and-regional-development/the-competitiveness-of-global-port-cities-the-case-of-shanghai-china_5k3wd3bnz7tb-en。
- 8 UNCTAD, *Review of Maritime Transport 2013*, 见尾注 6。
- 9 "The Shanghai International Shipping Institute (SISI) Issued the Global Port Development Report for 2013," *3PLNews*, 2014 年 3 月 26 日, www.3plnews.com/ocean-freight/the-shanghai-international-shipping-institute-sisi-issued-the-global-port-development-report-for-2013.html (最后访问时间: 2014 年 4 月 10 日)。
- 10 Olaf Merk and Jing Li, "The Competitiveness of Global Port-Cities: the Case of Hong Kong, China," *OECD Regional Development Working Papers*, 2013/16, November 2013, dx.doi.org/10.1787/5k3wdkjztp0w-en (最后访问时间: 2014 年 5 月 28 日)。
- 11 Qi Fu, "Container Flows in the Pearl River System: Hong Kong's Advantage" International Forum on Shipping, Ports and Airports (IFSPA) 2009 会议发言, 2009 年 5 月 24-27 日。《香港港口 2020 年总体规划》明确了香港港口发展的长期战略目标。相对于香港, 华南的邻近港口通过水路和铁路与内陆市场的联系更加紧密。在这种竞争环境下, 提高成本竞争力成为香港港口的主要挑战, 特别是香港的公路运输成本和码头装卸费较高。根据 2004 年的数据 (现有最新数据), 该计划指出: 一个 40 英尺标准集装箱 (FEU = 2 TEU) 通过航运从香港运抵美国西海岸, 其平均成本比经深圳运输多 300 美元。
- 12 Anita Lam, "Tenth Hong Kong Container Terminal, Costing HK\$100b, May Not Be Financially Viable, Consultants Say," *South China Morning Post*, 2013 年 12 月 2 日, www.scmp.com/business/economy/article/1370515/tenth-hong-kong-container-terminal-costing-hk100b-may-not-be?page=all (最后访问时间: 2014 年 4 月 1 日)。
- 13 Toh Han Shih, "Hong Kong Faces Mainland China Challenge as Ports Expand," *South China Morning Post*, 2013 年 4 月 29 日, www.scmp.com/business/china-business/article/1225412/hong-kong-faces-mainland-china-challenge-ports-expand。Demetri Sevastopulo, "Hong Kong Faces Threats from Guangzhou Port," *Financial Times*, 2014 年 1 月 15 日, www.ft.com/cms/s/0/16c77834-7d86-11e3-a48f-00144feabdc0.html#axzz2xco0GRQw (最后访问时间: 2014 年 4 月 1 日)。

- 14 Health Effects Institute (HEI), "Outdoor Air Pollution Among Top Global Health Risks in 2010," press release, 2013 年 3 月 31 日, www.healtheffects.org/International/HEI-China-GBD-PressRelease033113.pdf.
- 15 David B. Kittelson, Megan Arnold, and Winthrop F. Watts Jr., *Review of Diesel Particulate Matter Sampling Methods: Final Report*, University of Minnesota, January 1999, www.me.umn.edu/centers/cdr/reports/EPAREport3.pdf.
- 16 选择性催化还原 (SCR) 是一种安装在发动机末端、用于控制发动机尾气中 NO_x 的技术。该技术在催化剂的作用下, 将 NO_x 转化为 N₂、N₂ 和水, 反应中还需要加入还原剂, 通常使用的是氨气、液氨或尿素, 氨或尿素中的氢将 NO_x 还原为 N₂ 和水。若使用尿素作为还原剂, CO₂ 也是反应产物之一。由于燃料中所含的硫可能生产硫酸和亚硫酸, 因此, 低硫油的使用可防止酸对催化剂的腐蚀, 并通过降低铵盐的生成从而减少颗粒物的排放。因此, 使用低硫油可延长 SCR 系统的寿命, 并减少有害污染物的排放。参见 Clean North Sea Shipping (CNSS), "Selective Catalytic Reduction (SCR)," CNSS website, undated, cleantech.cnss.no/air-pollutant-tech/nox/selective-catalytic-reduction-scr/ (最后访问时间: 2014 年 7 月 30 日)。
- 17 根据国务院 2013 年颁布的《大气污染防治行动计划》, 到 2015 年底, 三个重点区域 (京津冀、珠三角和长三角) 的重点城市将供应含硫量为 10 ppm (0.001%) 的车用柴油; 到 2017 年底, 将在全国范围内供应。参见: 国务院, "大气污染防治行动计划", 2013 年 9 月 10 日, www.gov.cn/jzwgk/2013-09/12/content_2486773.htm (最后访问时间: 2014 年 3 月 17 日)。
- 18 见尾注 3: IMO, "Sulfur Oxides," TransportPolicy.net, "China: Fuels: Diesel and Gasoline," transportpolicy.net/index.php?title=China:_Fuels:_Diesel_and_Gasoline (最后访问时间: 2014 年 5 月 1 日)。
- 19 目前国内实施的柴油车标准为国 IV 标准。此处假设符合国 IV 标准的货车的 PM_{2.5} 排放系数为 0.02 克/公里, 重型柴油车平均行驶里程为 60,000 公里/年, 即 164 公里/天。装有低速发动机的集装箱船使用含硫量为 35,000 ppm (3.5%) 的燃油, 其 PM_{2.5} 排放系数为 1.54 克/kWh。假设主发动机的输出功率为 60MW。参见: Qiang Zhang et al., *Investigation of Diesel Emissions in China*, 2013, www.theicct.org/investigation-diesel-emissions-china (最后访问时间: 2014 年 4 月 13 日); Hong Huo et al., "Vehicle-use Intensity in China: Current Status and Future Trend," *Energy Policy* 43 (2012): 6-16; U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), *Proposal to Designate an Emission Control Area for Nitrogen Oxides, Sulfur Oxides and Particulate Matter: Technical Support Document*, April 2009, www.epa.gov/nonroad/marine/ci/420r09007.pdf。需要注意的是, 环境保护部机动车排污监控中心研究发现柴油货车平均行驶里程为 110,000 公里/年。如采用该数据, 则一艘集装箱船一天所排放的 PM_{2.5} 总量大约相当于我国 25 万辆国 IV 货车同一天的排放量 (2014 年 8 月 4 日与环境保护部机动车排污监控中心丁焰的沟通所得信息)。
- 20 James J. Corbett et al., "Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment," *Environmental Science & Technology* 41, no. 24 (2007): 8512-8518.
- 21 IMO, "Nitrogen Oxides (NO_x)—Regulation 13," 2014, www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-%28NOx%29-%E2%80%93Regulation-13.aspx (最后访问时间: 2014 年 3 月 18 日)。“China: Heavy-duty: Emissions,” TransportPolicy.net, http://transportpolicy.net/index.php?title=China:_Heavy-duty:_Emissions (最后访问时间: 2014 年 5 月 1 日)。“China: Non-road: Emissions,” TransportPolicy.net, http://transportpolicy.net/index.php?title=China:_Nonroad:_Emissions (最后访问时间: 2014 年 5 月 1 日)。
- 22 见该文献中的远洋船排放因子: Veronika Eyring et al., "Emissions from International Shipping: 1. The last 50 years," *Journal of Geophysical Research* 110 (September 2005): 1984-2012.
- 23 IARC, *IARC Monograph: Diesel and Gasoline Engine Exhausts*, 见尾注 1.
- 24 Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHH), "Health Effects of Diesel Exhaust—A Fact Sheet by Cal/EPA's Office of Environmental Health Hazard Assessment and the American Lung Association of California," 2007, oehha.ca.gov/public_info/facts/dieselfacts.html (最后访问时间: 2014 年 4 月 7 日)。
- 25 USEPA, "Designation of North American Emission Control Area to Reduce Emissions," regulatory announcement, March 2010, www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/marine/ci/420f10015.pdf.
- 26 Dong-qing Yang et al., "An Emission Inventory of Marine Vessels in Shanghai in 2003," *Environmental Science and Technology* 41, no. 15 (2007).
- 27 伏晴艳, 沈寅, 张建. "上海港船舶大气污染物排放清单研究". 安全与环境学报, 12: 5 (2012 年 12 月): 57-64. 刘娟. "上海市船舶及港口大气污染物排放清单研究", 2014 船舶和港口空气污染防治国际论坛发言. 2014 年 2 月 27 日, <http://www.efchina.org/News-zh/EF-China-News-zh/news-20140312-zh> (最后访问时间: 2014 年 5 月 28 日)。
- 28 Simon K.W. Ng et al., *Study on Marine Vessels Emission Inventory for Hong Kong—Final Report*, submitted to the Environmental Protection Department of the HKSAR Government, 2012.
- 29 Mike Kilburn et al., *A Price Worth Paying: The Case for Controlling Marine Emissions in the Pearl River Delta*, Civic Exchange, September 2012, www.civic-exchange.org/en/publications/4292657.

- 30 Tony Y.T. Lee, "Controlling Emissions from Marine Sector in Hong Kong," The Air We Breathe 3: Pan-PRD Dialogue on Marine Emissions 的发言, 2011 年 11 月 11 日, www.civic-exchange.org/wp/wp-content/uploads/2011/07/11112TonyLee_en.pdf (最后访问时间: 2014 年 4 月 7 日).
- 31 Hong Kong Environmental Protection Department (HKEPD), *2012 Hong Kong Emission Inventory Report*, Hong Kong SAR Government, March 2014, www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/data/files/2012HKEIRReport_eng.pdf.
- 32 HKEPD, *2012 Hong Kong Emission Inventory Report*, 见尾注 31.
- 33 Ng et al., *Study on Marine Vessels*, 见尾注 28.
- 34 同上.
- 35 Ng et al., *Study on Marine Vessels*, 见尾注 28.
- 36 Greenpeace East Asia, *Live: Hong Kong Air Quality Levels*, www.greenpeace.org/eastasia/campaigns/air-pollution/work/hong-kong-air-pollution-map/ (最后访问时间: 2014 年 4 月 1 日).
- 37 Alexis K.H. Lau et al., *Street-level Air Quality in the 18 Districts of Hong Kong*, Civic Exchange, June 2010, www.civic-exchange.org/en/publications/164987310.
- 38 Simon K.W. Ng, *Cruise Ship Emissions and Control in Hong Kong*, Civic Exchange, 2013 年 3 月 5 日, civic-exchange.org/en/publications/4292628.
- 39 同上.
- 40 Ng et al., *Study on Marine Vessels*, 见尾注 28.
- 41 Lau et al., *Street-level Air Quality*, 见尾注 38.
- 42 Kilburn et al., *A Price Worth Paying*, 见尾注 29.
- 43 同上.
- 44 Hak-kan Lai et al., *Health Impact Assessment of Measures to Reduce Marine Shipping Emissions, Final Report*, Department of Community Medicine, School of Public Health, University of Hong Kong, 2012.
- 45 Simon K.W. Ng et al., "Policy Change Driven by an AIS-assisted Marine Emission Inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta," *Atmospheric Environment* 76 (2013): 102-112.
- 46 卢旭阳“推广使用岸电和低硫油治理船舶污染”见尾注 2.
- 47 刘娟,“上海市船舶及港口大气污染物排放清单研究”见尾注 27.
- 48 James J. Corbett, Paul S. Fischbeck, and Spyros N. Pandis, "Global Nitrogen and Sulphur Inventories for Ocean-going Ships," *Journal of Geophysical Research* 104, no. 3 (February 1999): 3457-3470.
- 49 Veronika Eyring et al., "Transport Impacts on Atmosphere and Climate: Shipping," *Atmospheric Environment* 44 (December 2010): 4735-4771.
- 50 USEPA, "Proposal to Designate," 见尾注 19.
- 51 Corbett et al., "Mortality from Ship Emissions," 见尾注 20. Hak-kan Lai et al., "Health Impact Assessment of Marine Emissions," 见尾注 2.
- 52 IARC, *IARC Monograph: Diesel and Gasoline Engine Exhausts*, 见尾注 1.
- 53 同上. 另参见 HEI, "Outdoor Air Pollution," 见尾注 14.
- 54 Corbett et al., "Mortality from Ship Emissions," 见尾注 20.
- 55 USEPA, "EPA Finalizes More Stringent Standards for Control of Emissions from New Marine Compression-Ignition Engines at or Above 30 Liters per Cylinder," regulatory announcement, December 2009, www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/marine/ci/420f09068.pdf.
- 56 Jørgen Brandt et al., "Assessment of Past, Present and Future Health-cost Externalities of Air Pollution in Europe and the Contribution from International Ship Traffic Using the EVA Model System," *Atmospheric Chemistry Physics* 13 (2013): 7747-7764.
- 57 Corbett et al., "Mortality from Ship Emissions," 见尾注 20.
- 58 同上.
- 59 Kilburn et al., *A Price Worth Paying*, 见尾注 29.
- 60 Hak-kan Lai et al., "Health Impact Assessment of Marine Emissions," 见尾注 2.

- 61 Tara L. Greaver et al., “Ecological Effects of Nitrogen and Sulfur Air Pollution in the U.S.: What Do We Know?” *Frontiers in Ecology and the Environment* 10, no. 7 (September 2012): 365–372.
- 62 USEPA, “EPA Finalizes More Stringent Standards,” 见尾注 55.
- 63 Bill Collins, Michael G. Sanderson, and Colin E. Johnson, “Impact of Increasing Ship Emissions on Air Quality and Deposition over Europe by 2030,” *Meteorologische Zeitschrift* 18, no. 1 (February 2009): 25–39.
- 64 National Park Service (NPS), *Evaluation of the Sensitivity of Inventory and Monitoring National Parks to Acidification Effects from Atmospheric Sulfur and Nitrogen Deposition, Main Report*, U.S. Department of the Interior, April 2011.
- 65 USEPA, *Nitrogen Dioxide/Sulfur Dioxide Secondary NAAQS Review: Integrated Science Assessment (ISA)—Final*, EPA/600/R-08/082F, 2008.
- 66 Ida-Maya Hassellöv et al., “Shipping Contributes to Ocean Acidification,” *Geophysical Research Letters* 40, no. 11 (June 2013): 2731–2736.
- 67 Wen-Sung Chung et al., “Ocean Acidification Will Interfere with Fish Eyes,” *Journal of Experimental Biology* 217 (2014): 311–312. Philip L. Munday et al., “Ocean Acidification Impairs Olfactory Discrimination and Homing Ability of a Marine Fish,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.* 106, no. 6 (February 2008): 1848–1852.
- 68 Jan Fuglestedt et al., “Shipping Emissions: from Cooling to Warming of Climate—and Reducing Impacts on Health,” *Environmental Science and Technology*, 43 (24), (2009): 9057–9062. Tronstad M. Lund et al., “Global-mean Temperature Change from Shipping toward 2050: Improved Representation of the Indirect Aerosol Effect in Simple Climate Models,” *Environmental Science and Technology*, 46 (16) (July 2012): 8868–8877. 另参见 Eyring et al., “Transport Impacts on Atmosphere,” 见尾注 49.
- 69 Jens Borken-Kleefeld, Terje Berntsen, and Jan Fuglestedt, “Specific Climate Impact of Passenger and Freight Transport,” *Environmental Science and Technology* 44, no. 15 (July 2010): 5700–5706. 另参见 Eyring et al., “Transport Impacts on Atmosphere,” 见尾注 49.
- 70 Trude Pettersen, “Fifty Percent Increase in Northern Sea Route,” *Barents Observer*, December 3, 2013, barentsobserver.com/en/arctic/2013/12/fifty-percent-increase-northern-sea-route-03-12 (最后访问时间: 2014年8月14日).
- 71 Stig B. Dalsøren et al., “Environmental Impacts of Shipping in 2030 with a Particular Focus on the Arctic Region,” *Atmospheric Chemistry and Physics* 13 (2013): 1941–1955. Tami C. Bond et al., “Black Carbon in the Climate System: A Scientific Assessment,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118 (June 2013): 5380–5552.
- 72 关于 MARPOL 的更多信息请参见 IMO 网站:
<http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/Pages/Default.aspx>
- 73 IMO, “Sulfur Oxides,” 见尾注 3, 以及“Nitrogen Oxides,” 见尾注 24.
- 74 California Air Resource Board (CARB), “Vessel Speed Reduction for Ocean-going Vessels,” presentation at public workshop, Sacramento, CA, July 29, 2009, www.arb.ca.gov/ports/marinevess/vsr/docs/072909speakingnotes.pdf (最后访问时间: 2014年4月12日). European Council, Directive 2012/33/EU of the European Parliament and the Council of November 21, 2012, amending Council Directive 1999/32/EC as regards the sulfur content of marine fuels, 2012, eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012L0033. IMO, “Sulfur Oxides,” 见尾注 3.
- 75 Helsinki Commission, “Baltic NOx Emission Control Area (NECA) Application under MARPOL Annex VI, 37th Meeting,” Trelleborg, Sweden, June 2012, meeting.helcom.fi/c/document_library/get_file?p_l_id=18975&folderId=1786543&name=DLFE-49917.pdf. Danish Ministry of the Environment, *Economic Impact Assessment of a NOx Emission Control Area in the North Sea*, 2012, www2.mst.dk/Udgiv/publications/2012/06/978-87-92903-20-4.pdf. Netherlands Environmental Assessment Agency, *Assessment of the Environmental Impacts and Health Benefits of a Nitrogen Emission Control Area in the North Sea*, 2012, www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2012-assessment-of-the-environmental-impacts-and-health-benefits-of-a-nitrogen-emission-control-area-in-the-north-sea-500249001-v2_0.pdf
- 76 2014年6月19日与香港环保署 Phoebe Lui 的沟通所得信息。
- 77 Keith Wallis, “Shipping Lines Face Host of Obstacles in Jump to Cleaner Fuel,” *South China Morning Post*, 2013年1月14日, www.scmp.com/news/hong-kong/article/1127309/shipping-lines-face-host-obstacles-jump-cleaner-fuel (最后访问时间: 2014年4月10日).
- 78 LegCo, *Mandatory Fuel Switch at Berth*, 见尾注 5.
- 79 Advisory Council on the Environment (ACE) of Hong Kong, *Mandatory Fuel Switch at Berth for Ocean Going Vessels in Hong Kong Waters*, 2013, www.epd.gov.hk/epd/english/boards/advisory_council/files/ACE_Paper_10_2013.pdf (最后访问时间: 2014年3月1日).
- 80 Legislative Council of Hong Kong (LegCo), *Legislative Council Brief: Air Pollution Control Ordinance (Cap. 311) Air Pollution Control (Marine Light Diesel) Regulation*, January 2014, www.legco.gov.hk/yr13-14/english/subleg/brief/2_brf.pdf (最后访问时间: 2014年3月24日).
- 81 同上。

- 82 同上。
- 83 LegCo, *Legislative Council Brief: Shipping Legislation (Control of Smoke Emission) (Amendment) Bill 2014*, February 26, 2014, www.legco.gov.hk/yr13-14/english/bills/brief/b201402281_br.pdf (最后访问时间: 2014年3月25日)。
- 84 同上。
- 85 Public Accounts Committee (PAC) of the Legislative Council of Hong Kong, *PAC Report No. 59: Chapter 2 of Part 7—Implementation of Air-quality Improvement Measures*, 2012, www.legco.gov.hk/yr12-13/english/pac/reports/59/m_7b.pdf.
- 86 HKEPD, *ACE Paper 12/2012: Air Pollutant Emission Reduction Plan up to 2020*, Hong Kong SAR Government, December 2012, www.epd.gov.hk/epd/english/boards/advisory_council/files/ACE_Paper_12_2012.pdf. HKEPD, *Air Pollution Control Strategies*, Hong Kong SAR Government, 2013, www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/prob_solutions/strategies_apc.html.
- 87 HKEPD, *ACE Paper 12/2012*, 见尾注 86。
- 88 HKSAR Government, *Air Pollution Control (Amendment) Ordinance 2013, Ordinance No. 12 of 2013, e-Gazette*, 2013, www.gld.gov.hk/egazette/pdf/20131729/es12013172912.pdf.
- 89 World Health Organization (WHO), *WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide: Summary of Risk Assessment*, 2006, whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf. Anthony J. Hedley, *Air Quality and Public Health—The Current Avoidable Burden of Health Problems, Community Costs and Harm to Future Generations*, February 2009, www.legco.gov.hk/yr08-09/english/panels/ea/ea_iaq/papers/ea_iaq0212cb1-733-2-e.pdf (最后访问时间: 2014年8月10日)。
- 90 Hedley, *Air Quality and Public Health*, 见尾注 89。
- 91 环境保护部, 环境空气质量标准(GB3095-2012), 2012。
- 92 环境保护部, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)(HJ633-2012), 2012。
- 93 环境保护部, 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)(GB20891-2007), 2012。
- 94 见尾注 17。
- 95 环境保护部, “The State Council Issues Action Plan on Prevention and Control of Air Pollution Introducing Ten Measures to Improve Air Quality,” 2013年9月12日, english.mep.gov.cn/News_service/infocus/201309/t20130924_260707.htm (最后访问时间: 2014年3月31日)。
- 96 “Interpretation of China’s Action Plan of Prevention and Control of Air Pollution,” *China Daily*, 2013年9月11日, www.chinadaily.com.cn/china/fightairpollution/2013-09/11/content_16962092.htm (最后访问时间: 2014年3月31日)。
- 97 “Los Angeles and Shanghai Link-Up in Eco-Partnership,” *Port Technology International*, 2014年7月14日, www.porttechnology.org/news/los_angeles_and_shanghai_link_up_in_eco_partnership/#.U-2iDfkuMyY (最后访问时间: 2014年9月12日)。
- 98 深圳市政府“中国深圳绿色航运新闻发布会”: www.sz.gov.cn/cn/xxgk/xwfy/wqhg/20140924/ (最后访问时间: 2014年9月28日)。
- 99 2014年8月6日与深圳人居环境委员会卢旭阳沟通所得信息。
- 100 Civic Exchange, “Experts’ Day Workshop Report,” *The Air We Breathe 3: A Pan-PRD Dialogue on Marine Emissions Workshop*, November 11, 2011, www.civic-exchange.org/en/events/The-Air-We-Breathe-3-A-PanPRD-Dialogue-on-Marine-Emissions_30. 另参见 HKSAR, *Air Pollution Control (Amendment)*, 见尾注 88。
- 101 Kilburn et al., *A Price Worth Paying*, 见尾注 29。
- 102 根据 2014 年 9 月 12 日当天的 Bunkerworld 指数, 重油的价格为 BW380 和 BW180 价格的平均值, 而低硫油的价格基于 Bunkerworld 馏分油指数确定。(<http://www.bunkerworld.com/prices/index/bwi>)
- 103 LegCo, *Mandatory Fuel Switch at Berth*, 见尾注 5。
- 104 Jasmine Wang, Kyungkee Park, and Natasha Khan, “Maersk Wants Hong Kong to Ban Dirty Fuel to Fight Smog,” *Bloomberg News*, 2013 年 1 月 7 日, www.bloomberg.com/news/2013-01-06/maersk-wants-hong-kong-to-ban-dirty-fuel-to-fight-smog.html (最后访问时间: 2014 年 3 月 26 日)。LegCo, *Mandatory Fuel Switch at Birth*, 见尾注 5。
- 105 Starcrest Consulting Group, *Developing Port Clean Air Programs*, 2012 年 6 月 12 日, theicct.org/sites/default/files/ICCT_SCG_Developing-Clean-Air-Programs_June2012.pdf (最后访问时间: 2014 年 3 月 28 日)。Lar Petter Bilkom, “Global LNG Bunkering Infrastructure as of January 2014,” (2014 年 3 月 26 日), www.slideshare.net/blikom/global-lng-bunkering-infrastructure-as-of-january-2014 (最后访问时间: 2014 年 8 月 17 日)。

- 106 American Clean Skies Foundation, *Natural Gas for Marine Vessels: U.S. Market Opportunities* (2012), www.cleanskies.org/wp-content/uploads/2012/04/Marine_Vessels_Final_forweb.pdf (最后访问时间: 2014年7月1日)。
- 107 Maritime and Port Authority of Singapore [MPA], “Enhancement to Maritime Singapore Green Initiative—Green Port Programme,” *Port Marine Circular No. 06 of 2013*, 2013, www.mpa.gov.sg/sites/circulars_and_notices/pdfs/port_marine_circulars/pc13-06.pdf (最后访问时间: 2014年9月23日)。
- 108 参见 Jonathan Berr, “Low-sulfur Fuel Still Pricey, but Supply Challenges May Ease by 2015,” *Professional Mariner*, 2014年1月24日, www.professionalmariner.com/February-2014/Low-sulfur-fuel-supply-challenges/ (最后访问时间: 2014年5月29日)。
- 109 2014年5月13日与美国加州空气资源委员会的 Paul Milkey 沟通所得信息。
- 110 根据长滩港和洛杉矶港的统计数据, 2013年两个港口的船舶到港量为 6,000 艘次。参见 Port of Long Beach, “Facts at a Glance,” www.polb.com/about/facts.asp (最后访问时间: 2014年9月1日), 以及 Port of Los Angeles, “Facts and Figures,” www.polb.com/about/facts.asp and www.portoflosangeles.org/about/facts.asp (最后访问时间: 2014年9月1日)。加州其他港口的船舶到港量相对较小, 本白皮书撰写时未能获取相关数据。按照等比例推算, 长滩港和洛杉矶港 2014年前5个月的船舶到港量约为 2500 艘次, 说明这段时间到访加州港口的船舶未按照规定使用低硫油的情况少于 0.5%。
- 111 “New Low-sulfur Supply Planned for East Asia,” *Ship & Bunker*, November 2013, shipandbunker.com/news/apac/969411-new-low-sulfur-supply-planned-for-east-china (最后访问时间: 2014年5月29日)。
“Low-sulfur Marine Fuel in the Pipeline,” *China Daily—Agency*, 2012年9月4日, www.chinadaily.com.cn/business/2012-09/04/content_15731857.htm (最后访问时间: 2014年8月17日)。
- 112 MAN Diesel & Turbo, *Operation on Low-Sulfur Fuels—MAN B&W Two-stroke Engines*, undated. API Technical Issues Workgroup, *Technical Considerations of Fuel Switching Practices*, June 2009, www.klgates.com/FCWSite/ballast_water/air_emissions/API_Fuel_Switching.pdf (最后访问时间: 2014年8月17日)。CIMAC, “Guideline for the Operation of Marine Engines on Low Sulfur Diesel,” International Council on Combustion Engines, 2013, www.cimac.info/cms/upload/workinggroups/WG7/CIMAC_SG1_Guideline_Low_Sulphur_Diesel.pdf (最后访问时间: 2014年8月17日)。
- 113 USEPA, “Designation of Emission Control Area to Reduce Emissions from Ships in the U.S. Caribbean,” *Program Update*, July 2011, www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/marine/ci/420f11024.pdf。
- 114 Remarks on fuel switching made by Tim Smith of Maersk Line and S.C. Tai of OOCL, “Motor Vehicle Emissions Control Workshop 2014”的发言(2014年6月26日)。其他参考文献参见 Unni Einemo, “Operators Urged to Plan and Prepare to Avoid Fuel Switch Blackouts,” *Sustainable Shipping*, 2014年7月29日, www.sustainableshipping.com/news/Operators-urged-to-plan-and-prepare-to-avoid-fuel-switch-blackouts-130941 (最后访问时间: 2014年8月17日)。
- 115 Simon K.W. Ng, Veronica Booth, and Freda Fung, *Working Towards a Quality Living Region—A Pearl River Delta Emission Control Area*, Civic Exchange, 2013年11月30日, www.civic-exchange.org/en/publications/164987050。
- 116 根据 IFO 380 (US \$ 584.5) 和 IFO 180 (US \$ 87.5) 的平均价格, 以及 2014年9月12日 Bunkerworld 指数中含硫量 0.1%的柴油价格 (604.5 美元) 确定 (www.bunkerworld.com/prices/index/, 最后访问时间 2014年9月15日)。
- 117 IMO, *Proposal to Designate an Emission Control Area for Nitrogen Oxides, Sulfur Oxides and Particulate Matter*, MEPC 59/6/5, 2009年4月2日。另参见 USEPA, “EPA Finalizes More Stringent Standards,” 见尾注 55。
- 118 参考新闻报道, 如中国财富网 (<http://finance.eastmoney.com/news/1355,20140212359429779.html>) 和中国能源网 (<http://www.china5e.com/news/news-874408-1.html>) 的报道(最后访问时间: 2014年8月11日)。
- 119 Hong Kong Environment Bureau, *Future Fuel Mix for Electricity Generation—Consultation Document*, March 2014, www.enb.gov.hk/sites/default/files/en/node2605/Consultation%20Document.pdf (最后访问时间: 2014年4月11日)。
- 120 为船公司设计的岸电应用国际标准见 ISO, “ISO/IEC/IEEE 80005-1:2012—Utilities Connections in Port—Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems—General Requirements,” www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=53588 (最后访问时间: 2014年9月2日)。
- 121 CE Delft, *Greenhouse Gas Emissions for Shipping and Implementation Guidance for the Marine Fuel Sulphur Directive*, December 2006, www.dma.dk/themes/LNGinfrastructureproject/Documents/Fuels%20and%20environment/Greenhouse%20Gas%20Emissions%20for%20shipping.pdf。Ng, Booth, and Fung, *Working Towards a Quality Living Region*, 见尾注 115。
- 122 CE Delft, *Greenhouse Gas Emissions*, 见尾注 121。
- 123 同上。
- 124 Onshore Power Supply (OPS), “Investments,” undated, www.ops.wpci.nl/costs/investments/ (最后访问时间: 2014年8月17日)。另参见 Starcrest, *Developing Port Clean Air Programs*, 见尾注 105。

125 同上。

126 *Costs and Benefits of LNG as Ship Fuel for Container Vessels: Key Results from a GL and MAN Joint Study*, Germanischer Lloyd and MAN, 2012, www.gl-group.com/pdf/GL_MAN_LNG_study_web.pdf (最后访问时间:2014年8月17日)。“The Use of LNG as Fuel for Propulsion On Board Merchant Ships,” Rolls-Royce, presentation, European Fuels Conference, Paris, March 8–11, 2011, core.theenergyexchange.co.uk/agile_assets/1320/12.05_-_Marco_Andreola.pdf (最后访问时间:2014年8月17日)。G.W. Van Tassel, *LNG as a Vessel and General Transportation Fuel: Developing the Required Supply Infrastructure*, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010 Annual Meeting, Bellevue, WA, 2010.

127 Chi-Jen Yang and Robert B. Jackson, “China’s Synthetic Natural Gas Revolution,” *Nature Climate Change* 3 (2013): 852-854.

128 American Clean Skies Foundation, *Natural Gas for Marine Vessels*, 见尾注 106.

129 Mabel Tan, “China Gas to Start LNG Bunkering,” *Bunkerworld*, 2013年10月22日, www.bunkerworld.com/news/China-Gas-to-start-LNG-bunkering-125541 (最后访问时间:2013年10月22日)。Mabel Tan, “Chinese Port to Build Inland LNG Bunkering Stations,” *Bunkerworld*, 2013年9月15日, www.bunkerworld.com/news/Chinese-port-to-build-inland-LNG-bunkering-stations-131837 (最后访问时间:2014年9月15日)。Gabian Chew, “Chinese Firm Starting LNG Bunkering Ops on Yangtze River,” *Bunkerworld*, 2013年4月1日, 64.40.107.106/news/Chinese-firm-starting-LNG-bunkering-ops-on-Yangtze-river-120701 (最后访问时间:2014年9月23日)。

130 交通运输部, “交通运输部关于推进水运行业应用液化天然气的指导意见”, 2013年10月23日, www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2547150.htm (最后访问时间:2014年9月23日)。

131 European Commission, *Actions Toward a Comprehensive EU Framework on LNG for Shipping, Commission Staff Working Document*, 2013年1月24日, eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SWD:2013:0004:FIN:EN:PDF (最后访问时间:2014年8月10日)。Rolls-Royce, “The Use of LNG as Fuel for Propulsion,” 见尾注 126.

132 CE Delft (2006) 见尾注 121.

133 Anna Lee Deal, “Liquefied Natural Gas as a Marine Fuel: A closer look at TOTE’s Containership Projects,” *National Energy Policy Institute Working Paper* (2013年5月7日), www.glmri.org/downloads/IngMisc/NEPI%20LNG%20as%20a%20Marine%20Fuel%205-7-13.pdf (最后访问时间:2014年8月17日)。Dana Lowell, Haifeng Wang and Nic Lutsey, *Assessment of the Fuel Cycle Impact of Liquefied Natural Gas as Used in International Shipping*, International Council on Clean Transportation, May 2013, www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTwhitepaper_MarineLNG_130513.pdf (最后访问时间:2014年8月1日)。另参见尾注 105 中的 Lar Petter Bilkom (2014), 以及尾注 129 中的 Mabel Tan (2013) and Mable Tan (2014)。

134 CE Delft, *Greenhouse Gas Emissions for Shipping*, 见尾注 121.

135 同上。

136 American Bureau of Shipping (ABS), *Exhaust Gas Scrubber System—Status and Guidance*, 2013, www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/References/Capability%20Brochures/ExhaustScrubbers (最后访问时间:2014年8月13日)。

137 USEPA, *Exhaust Gas Scrubber Washwater Effluent*, November 2011, www.epa.gov/npdes/pubs/vgp_exhaust_gas_scrubber.pdf (最后访问时间:2014年8月18日)。

138 同上。

139 CE Delft, *Greenhouse Gas Emissions for Shipping*, 见尾注 121.

140 DNV, “SOx Reduction,” 2013年1月28日, www.dnv.pl/Binaries/5%20SOx%20reduction%20-%20class%20involvement_tcm144-536397.pdf (最后访问时间:2014年7月30日)。CE Delft, *Greenhouse Gas Emissions for Shipping*, 见尾注 121。市场上常见的废气洗涤器的 PM 去除率多超过 90%。关于市场上各类废气洗涤器的运行效率的更多信息参见 DNV 的“SOx Reduction”。

141 CE Delft, *Greenhouse Gas Emissions for Shipping*, 见尾注 121.

142 DNV, “SOx Reduction,” 见尾注 140。USEPA, *Exhaust Gas Scrubber Washwater Effluent*, 见尾注 137.

143 DNV, “SOx Reduction,” 见尾注 140.

144 USEPA, *Exhaust Gas Scrubber Washwater Effluent*, 见尾注 137。BIMCO, “Marine Gas Oil or Scrubbers When Operating in an ECA?” April 2013, www.bimco.org/reports/market_analysis/2013/0424_ecastory.aspx (最后访问时间:2014年8月17日)。

145 European Maritime Safety Agency (EMSA), *The 1,000 ppm (0.1%) Sulfur in Fuel Requirement as from 1 January 2015 in SECAs—An Assessment of Available Impact Studies and Alternative Means of Compliance*, technical report, 2010年12月13日, ec.europa.eu/environment/air/transport/pdf/Report_Sulphur_Requirement.pdf.

- 146 “Carnival Expands Cruise Ship Scrubber Technology,” *Environmental Leader*, 2014 年 5 月 22 日。
<http://www.environmentalleader.com/2014/05/22/carnival-expands-cruise-ship-scrubber-technology/> (最后访问时间: 2014 年 5 月 28 日)。
- 147 Unni Einemo, “Sweden Could Ban Use of Open Loop Scrubbers,” *Bunkerworld*, 2014 年 5 月 9 日,
www.bunkerworld.com/news/Sweden-could-ban-use-of-open-loop-scrubbers-129433 (最后访问时间: 2014 年 8 月 17 日)。
- 148 CE Delft, *Greenhouse Gas Emissions*, 见尾注 121。
- 149 IMO, *Final Report of the Correspondence Group on Assessment of Technological Developments to Implement the Tier III NOx Emission Standards Under MARPOL Annex VI*, MEPC 65/4/7, 2013 年 2 月 8 日。
- 150 Næringslivets Hovedorganisasjon (NHO), *NOx Abatement in Marine Sector—Review of New Techniques and Their Potential*, September 2012,
www.nho.no/siteassets/nhos-filer-og-bilder/filer-og-dokumenter/nox-fondet/hovedside-nox-fondet/les-mer/presentasjoner-og-rapporter/marintek-teknologi-og-potensiale-2012.pdf (最后访问时间: 2014 年 8 月 17 日)。
- 151 IMO, *Final Report of the Correspondence Group*, 见尾注 149。
- 152 同上。
- 153 IMO, *Information About the Application Status of Tier III Compliant Technologies*, MEPC 66/INF.4, 2013 年 11 月 1 日。
- 154 W. Addy Majewski and Magdi K. Khair, *Diesel Emissions and Their Control* (SAE International, 2006)。
- 155 IMO, *Information About the Application Status*, 见尾注 153。
- 156 IMO, *Comments to the Approval at MEPC 65 of Amendments to the Effective Date of the NOx Tier III Standards*, MEPC 66/6/6, 2013 年 12 月 24 日。
- 157 IMO, *Information About the Application Status*, 见尾注 153。
- 158 同上。
- 159 Starcrest, *Developing Port Clean Air Programs*, 见尾注 105。
- 160 Laurie Turnbull, “Inside the Market Dynamics of Slow Steaming,” *Canadianshipper.com*, 2013 年 4 月 1 日,
www.canadianshipper.com/news/inside-the-market-dynamics-of-slow-steaming/1002239425/?&er=NA (最后访问时间: 2014 年 9 月 22 日)。
- 161 Wärtsilä, “Slow Steaming - A Viable Long-term Option?,” *Wärtsilä Technical Journal* (February 2010): 49-55,
www.wartsila.com/file/Wartsila/1278511884362a1267106724867-Wartsila-SP-A-Id-slow-steaming.pdf (最后访问时间: 2014 年 4 月 12 日)。
- 162 Kevin Maggay, “Vessel Speed Reduction,” International Workshop on Reducing Air Emissions from Shipping 发言, 2012 年 12 月 13 日, www.theicct.org/sites/default/files/Kevin%20Maggay_En.pdf (最后访问时间: 2014 年 8 月 17 日)。
- 163 Port of Los Angeles, “Vessel Speed Reduction Incentive Program Guidelines,” undated,
www.portoflosangeles.org/pdf/VSR_Program_Overview.pdf (最后访问时间: 2014 年 8 月 17 日)。Port of Long Beach, “Participate in the Green Flag Program,” undated, www.polb.com/civica/filebank/blobload.asp?BlobID=6963 (最后访问时间: 2014 年 8 月 17 日)。
- 164 Port of Long Beach, “Participate in the Green Flag Program,” 见尾注 163。
- 165 Jasper Faber et al., *Regulated Slow Steaming in Maritime Transport: An Assessment of Options, Costs and Benefits*, CE Delft, February 2012, www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/Slow%20steaming%20CE%20Delft%20final.pdf。
- 166 California Air Resource Board (CARB), “Vessel Speed Reduction for Ocean-going Vessels,” presentation at public workshop, Sacramento, CA, 2009 年 7 月 29 日, www.arb.ca.gov/ports/marinevess/vsr/docs/072909speakingnotes.pdf (最后访问时间: 2014 年 4 月 12 日)。
- 167 Hong Kong Economic and Trade Office (HKETO), *Transport and Industrial: Maritime—Cleaner Air in Hong Kong Ports*, 2014, www.hketosf.gov.hk/sf/whatsnew/fair_winds_charter.htm (最后访问时间: 2014 年 4 月 10 日)。World Port Source (WPS), “Port of Yantian,” 2014, www.worldportsource.com/ports/CHN_Port_of_Yantian_2219.php (最后访问时间: 2014 年 4 月 10 日)。
- 168 Guangdong Port Group (GPG), “About GPG—Port Area,” undated, en.gzport.com/en/Item/18.aspx (最后访问时间: 2014 年 4 月 6 日)。
- 169 Swedish Maritime Administration (SMA), “The Environmental Differentiated Fairway Dues System,” May 20, 2010,
www.sjofartsverket.se/pages/1615/Fairway%20dues.pdf。

-
- 170 Port of Gothenburg, “Stöd till miljösatsande rederier” (Support the Environment Betting Lines), March 2014, goteborgshamn.se/Om-hamnen/Hallbar-hamn/Miljo-och-Goteborgs-Hamn1/ (最后访问时间: 2014年3月28日)(瑞典语).
- 171 Michael Bloor et al., *Effectiveness of International Regulation of Pollution Controls: The Case of the Governance of Ship Emissions, Final Report*, Economic and Social Research Council, February 2013.
- 172 Anthony Fournier, *Controlling Air Emissions from Marine Vessels: Problems and Opportunities*, Donald Bren School of Environmental Science and Management, University of California Santa Barbara, February 2006, fiesta.bren.ucsb.edu/~kolstad/temporary/Marine_Emissions__2-11-06_.pdf.
- 173 AEA, *Cost Benefits Analysis to Support the Impact Assessment Accompanying the Revision of Directive 1999/32/EC on the Sulphur Content of Certain Liquid Fuels, Report to European Commission*, December 2009.
- 174 US Environmental Protection Agency [USEPA], EPA, “Control of Emissions from New Marine Compression-Ignition Engines at or Above 30 Liters per Cylinder,” 2010, www.federalregister.gov/articles/2010/04/30/2010-2534/control-of-emissions-from-new-marine-compression-ignition-engines-at-or-above-30-liters-per-cylinder.
- 175 USEPA, “Designation of North American Emission Control Area,” 见尾注 23.
- 176 Kilburn et al., *A Price Worth Paying*, 见尾注 29.
- 177 同上。另参见 Hong Kong Environment Bureau, *Future Fuel Mix for Electricity Generation*, 见尾注 119..
- 178 根据 Ng, Booth, and Fung, *Working Towards a Quality Living Region* 数据整理, 见尾注 115.