



海南省港口和船舶高分辨率排放清单研究

High-resolution ship and port emission inventory of Hainan

清华大学

2023年9月

Tsinghua University

September, 2023

报告负责人

刘欢 清华大学环境学院 教授

技术报告承担单位

清华大学环境学院

顾问专家组

邵 敏 暨南大学

郑君瑜 香港科技大学（广州）

陈俊峰 交通运输部水运科学研究院环保中心

李 涛 交通运输部环境保护中心

尹 航 中国环境科学研究院机动车排污监控中心

郝春晓 中国环境科学研究院机动车排污监控中心

吴晓晨 海南省环境科学研究院

符志良 洋浦经济开发区交通运输和港航局

致谢

本研究由清华大学环境学院统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

关于清华大学环境学院

清华大学环境学院源于清华大学 1928 年设立的市政工程系。1977 年建立中国第一个环境工程专业，2011 年在清华大学百年校庆之际发展为环境学院。

清华大学环境学科在最近连续三次的教育部学科评估中获得环境科学与工程一级学科第一名；2022年QS环境学科世界大学排名第9，在所有亚洲大学的环境学科中排名第1。在最近的数十年中，在教

育部、生态环境部、科学技术部等有关部委的大力支持下，环境学院在师资队伍、学科建设、人才培养、科学研究和国际合作等方面取得了优异的成绩。

环境学院建立了以环境科学、环境工程、环境管理三大学科方向为基础，涵盖多要素多介质的综合性、交叉型学科体系，下设环境工程系、环境科学系和环境规划与管理系。教师中现有 4 名中国工程院院士（其中 2 位为美国工程院外籍院士），教师队伍具有很强的创新能力、凝聚力和团队合作精神，为高水平教学、科研和社会服务工作的顺利开展提供了有力保障。学院建立了“环境模拟与污染控制国家重点联合实验室”、“国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室”等高水平开放式研究机构，长期担任教育部高等学校“环境科学与工程教学指导委员会”和“环境工程专业教学指导分委员会”的主任单位。学院为国家重大环境问题的解决和可持续发展战略的实施提供了技术服务、理论支持和决策支撑，成为环境保护高层次人才培养基地和高水平科学研究中心，在国内外环境保护领域享有很高的声誉。

关于能源基金会

能源基金会是在美国加利福尼亚州注册的专业性非营利公益慈善组织，于 1999 年开始在中国开展工作，致力于中国可持续能源发展。基金会在北京依法登记设立代表机构，由北京市公安局颁发登记证书，业务主管单位为国家发展和改革委员会。

能源基金会的愿景是通过推进可持续能源促进中国和世界的繁荣发展和气候安全；使命是通过推动能源转型和优化经济结构，促进中国和世界完成气候中和，达到世界领先标准的空气质量，落实人人享有用能权利，实现绿色经济增长。致力于打造一个具有战略眼光的专业基金会，作为再捐资者、协调推进者和战略建议者，高效推进使命的达成。

项目资助领域包括电力、工业、交通、城市、环境管理、低碳转型、策略传播七个方面。通过资助中国的相关机构开展政策和标准研究，

推动能力建设并促进国际合作，助力中国应对发展、能源、环境与气候变化挑战。除上述七个领域的工作，能源基金会还致力于支持对中国低碳发展有重要影响的综合性议题的研究和实践，并成立了六个综合工作组：中长期低碳发展战略、城镇化、煤炭转型、电气化、空气质量、国际合作。

-----报告正文-----

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.

目 录

目 录.....	1
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目标.....	2
1.3 研究内容.....	2
第 2 章 海南水域船舶排放现状.....	5
2.1 研究现状.....	5
2.2 船舶排放清单计算方法学.....	13
2.3 研究结果.....	24
2.4 本章小结.....	39
第 3 章 海南港口港作机械排放现状.....	42
3.1 基于 MOVES-NONROAD 的港作机械排放计算方法.....	42
3.2 洋浦港港作机械排放清单.....	47
3.3 本章小结.....	51
第 4 章 海南港口集疏运车辆排放现状.....	53
4.1 港口集疏运货车排放计算方法.....	53
4.2 洋浦港集疏运货车排放核算及特征分析.....	57
4.4 本章小结.....	63
第 5 章 海南港口与船舶减排政策建议.....	64
5.1 海南船舶排放控制区减排效益评估.....	64
5.2 不同排放源对海南省港口减排的影响.....	69
5.3 基于邻近航程排放的加注站潜力分析.....	74
5.4 本章小结.....	77
第 6 章 结论与展望.....	79
6.1 结论与建议.....	79
6.2 展望.....	84
参考文献.....	86

第1章 绪论

1.1 研究背景

近年来，随着蓝天保卫战深入实施，海南省环境空气质量总体优良，但各市县频繁出现的持续臭氧污染过程已成为困扰全省大气环境质量改善的关键问题；PM_{2.5}在低浓度水平下进一步削减的难度也逐步加大。与此同时，我国提出，力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和，降碳按下快进键。《海南省“十四五”生态环境保护规划》把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局。2022年海南省的政府工作报告明确提出，海南要守牢生态环境质量底线，争当“双碳”工作优等生。航运业是海南省自由贸易港经济的命脉，也是CO₂以及大气污染物的重要来源。据估算，船舶排放对我国PM_{2.5}年平均贡献最高值可达5.2 μg/m³；对内陆地区的影响最远可达960 km。如何充分发挥航运减排潜力，在巩固且优化PM_{2.5}治理效果的同时使O₃进入下降通道，对海南省大气环境的改善提出了新的难题和挑战。另一方面，由于碳和大气污染物同根同源，减污降碳协同增效具有科学性和可操作性，航运业的“双碳”进程将为海南省空气质量持续改善注入新动能，推进国家生态文明试验区建设。作为首个中国特色自由贸易港，将海南港口的绿色低碳港口成功做法总结形成可复制可推广的经验，对实现港口整体绿色转型，建设国际领先的智慧绿色港口具有重要意义。

排放清单是识别碳和污染物主要排放源、量化排放对污染贡献的基础。然而，海南省目前已有的船舶和港口排放清单精度较低，难以满足精细化碳排放管理、空气质量改善的需求。主要体现在尚未形成提供高分辨率排放清单的方法体系，缺乏船舶、货物装卸设备、港作机械和港口集疏运车辆的活动水平和排放因子数据，无法正确体现和反映本地排放的特点，亟需一套综合评估港口和船舶大气环境影响的技术体系。

2019-2020年是海南省附近水域船舶控制政策急剧迭代的两年。交通运输部印发的《船舶大气污染物排放控制区实施方案》规定，2019年1月1日起，海船使用硫含量不大于0.5%mm的船用燃油。内河船使用硫含量50ppm的普通柴油。因此船用燃油主要包括硫含量不大于0.5%mm的船用燃油、LNG、少量内河船和江海直达船使用的普通柴油等。2020年1月1日起，海船进入沿海控制区海南水域，应使用硫含量不大于0.1%mm的船用燃油。但据管理部门反映

0.1%mm 的燃油供应不足，因此可能同时存在硫含量不大于 0.1%mm 的船用燃油、硫含量不大于 0.5%mm 的船用燃油、LNG、少量内河船和江海直达船使用的普通柴油等。不同的船舶遵循的排放标准不同。具有中国船籍在我国水域航行或作业的船舶如内河船、沿海船、江海直达船等应遵循《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法（中国第一、二阶段）》的规定，而远洋运输船舶则执行防止船舶污染国际公约（MARPOL 公约）的规定。海南 12Nm 区域中既包括中国的沿海船、少数内河船和江海直达船，同时又包括中国籍和外国籍远洋船。它们遵循的排放标准不同。

随着船舶控制区政策的实施和发动机后处理技术的改进，目前海南省水域内多种燃油和排放标准共存，船舶排放及其环境影响仍有待全面和清晰的认识。针对海南自由贸易港的清洁航运发展需求，一方面要对海南省港口和船舶碳和污染物的排放量进行准确估算，并科学评估其对省内空气质量的影响，摸清本地船舶排放现状和影响程度；另一方面要结合未来海南自由贸易港的发展规划，系统评估柴油、LNG、电动化等不同能源和措施组合对大气污染物和温室气体的减排效果，从而选择减污降碳协同增效的港口船舶治理路径。

1.2 研究目标

开展海南自由贸易港建设下，我省船舶污染排放现状调查工作，并利用船舶污染来源工具汇总计算现有船舶大气污染排放现状，建立一套海南省高时空分辨率港口及船舶排放清单。

1.3 研究内容

（1）海南水域船舶排放现状

基于我国最新船舶自动识别系统（AIS）数据中海南水域的船舶行驶轨迹和本地船舶注册信息中的静态技术参数，包括船舶类型、吨位、船龄等，利用最新研发的二代非集计动力法船舶排放模型（SEIM v2.0），结合本地化船舶排放因子，建立分工况、分船型、精确至航线的高时空分辨率船舶排放清单，识别海南港口与我国沿海港口、其它国家主要港口之间的典型航线，分析现阶段

段海南水域、港口区域及典型航线上的船舶活动和排放特征，并评估船舶排放管控措施的适用范围、低排放航线和春节等节假日特殊时段对海南省船舶流量及排放的影响。

(2) 海南港口港作机械排放现状

全面收集洋浦港港作机械（CHE）的基础数据资料，包括保有量、活动数据、发动机年龄等，利用美国环保署（EPA）开发的 MOVES-NONROAD 模型，结合本地化 CHE 排放因子、负荷因子、燃料校正因子和劣化率等参数，建立分工况、分设备类型的 CHE 排放清单；分析现阶段海南港口 CHE 排放特征。

(3) 海南港口集疏运车辆排放现状

基于港口货物物流信息中的货运车辆出发-到达（OD）位置、车辆轨迹以及海南路网等信息确定货运车行驶路线，估算不同类型货运车的活动水平；基于动态排放模型计算运输车辆排放，通过车辆运行模式和车辆基础信息获取污染物排放因子。基于分车型排放因子、活动水平及行驶路线等信息，建立港口集疏港货运车高分辨率污染物排放清单，并在地图上展示集疏港货运车排放进行可视化呈现，从车辆构成、时间变化与空间分布等方面分析排放特征。

本研究第一期具体的项目研究技术路线图和总时间安排见图 1.4-1 和图 1.4-2。研究内容围绕船舶、港作机械、港口集疏运车辆展开：

- (1) 计算海南省高精度船舶排放清单；
- (2) 计算海南省相关航程排放；
- (3) 进行 DECA 政策情景与减排效益分析；
- (4) 收集海南本地化的港作机械活动水平、排放因子；
- (5) 计算海南省典型港口港作机械排放清单；
- (6) 收集海南本地化的港口集疏运车辆活动水平与排放标准分布；
- (7) 计算海南省典型港口集疏运车辆排放清单

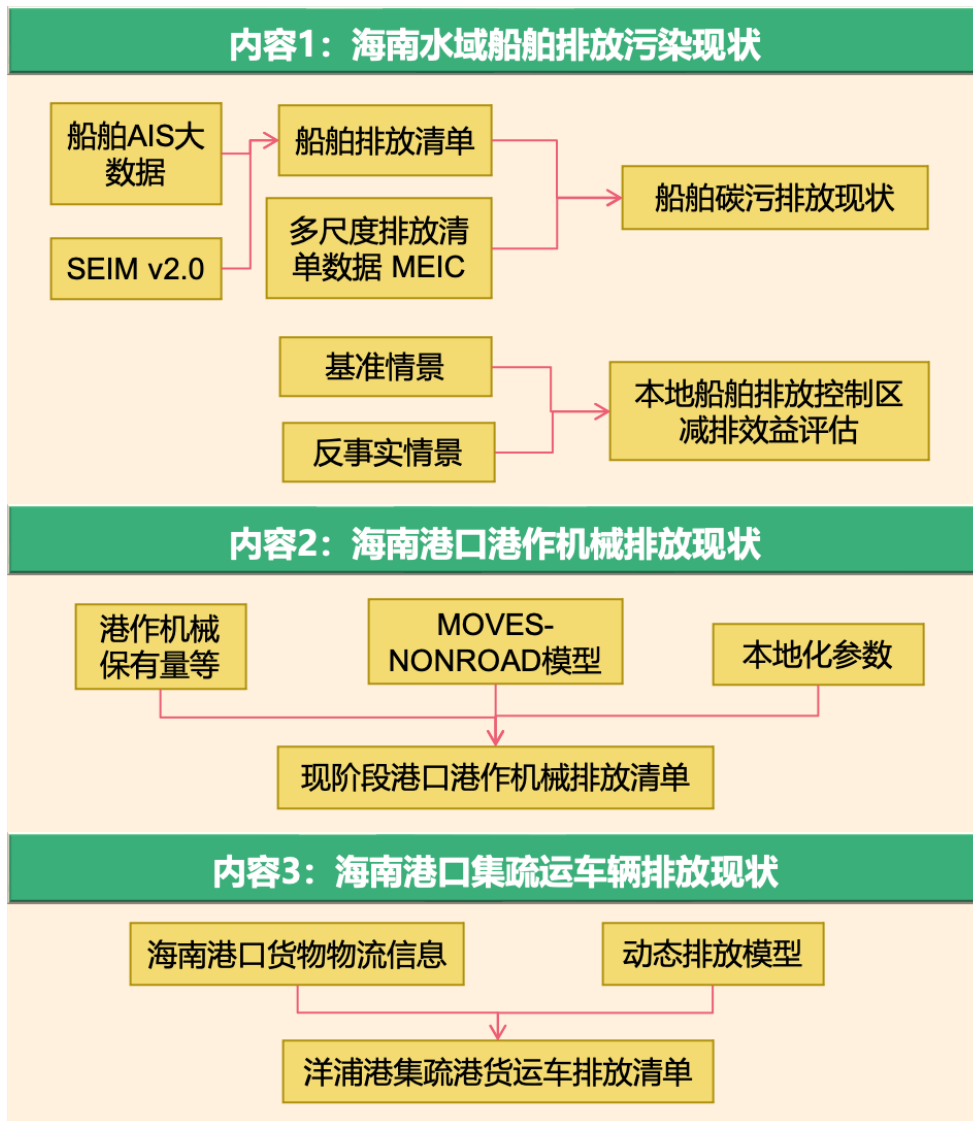


图 1.4-1 项目技术路线图

研究内容	2022-Q3	2022-Q4	2023-Q1	2023-Q2
建立海南省船舶排放清单				
建立港作机械排放清单				
建立集疏港车辆排放清单				
船舶减排路径和政策情景				

图 1.4-2 项目第一期时间安排

第2章 海南水域船舶排放现状

2.1 研究现状

2.1.1 船舶排放清单研究现状

建立船舶大气污染物排放清单是评估船舶排放影响的重要基础，基于清单对水运排放的时空特征进行分析，进而展开排放控制措施的评价和减排路径的探索，为实际政策制定和脱碳减排奠定基础。最早的排放清单计算探索可以追溯到上世纪末，美国环境保护署对船舶排放因子和船舶发动机功率展开了研究，建立了船舶活动水平和排放因子数据库^[1]。随着海运贸易数据和船舶活动数据收集机制的完善，船舶大气污染物排放清单的建立逐渐由基于统计数据和经验参数的“自上而下”方法向基于海运大数据的“自下而上”高时空分辨率排放清单计算方法发展。目前，船舶排放清单建立方法按所获取的数据类型可归为三类：1) 基于燃料统计数据的油耗法，2) 基于贸易数据的排放算法，3) 基于船舶静态技术参数的动力法^[2]，4) 基于航运自动识别系统（AIS）数据的动力法。

(1) 基于燃料统计数据的油耗法

燃油法是自上而下的计算方式，通过船舶燃油的消耗量和燃油排放因子计算得到总体的船舶排放情况，计算公式如式（2.1-1）所示。由于没有对船舶单体进行分析，不考虑船舶实际运行状态差异，计算结果较为粗糙，在 NO_x 、PM 等污染物排放水平和排放的空间分布上较真实情况有较大差异^[3]。因此目前燃油法主要用于估算大空间尺度的船舶排放，获得该区域大致的排放水平。如果要对区域内部的空间分布进行进一步分析，一般是基于船舶流量数据对估算得到的排放总量进行空间分配。

$$E_p = \sum_j (F \times A_j) \times EF_{p,j} \times 10^3 \quad \text{式 (2.1-1)}$$

其中：

E_p ，船舶排放的污染物 p 的年排放量，单位：吨/年；

F ，燃油年消耗量，单位：吨/年；

A_j ，第 j 类船舶在所有船舶中的百分比，单位：%；

$EF_{p,j}$ ，基于燃料的第 j 类船舶排放的污染物 p 的排放因子，单位：克/千克；

当计算 NO_x 排放时，通常基于发动机类型对船舶进行分类，而计算 SO_x 的排放时，通常基于燃料进行分类。这与二者的形成机制有关。用于船舶排放空间分配的早期数据集主要包括美国船只自动化互助救助系统（AMVER）、国际综合海洋大气数据集（ICOADS）和国际海事组织的远程识别与跟踪系统（LRIT）等^[4]。总体而言，燃油法计算过程相对简单，数据相对容易获取，在全球船舶污染问题开始受到关注的初期，可以提供一个数量级相对准确的全球硫排放清单，为船舶排放历史趋势的推演、未来情景预测、全球大气环境与气候影响的评估等提供了关键的数据基础^[5-8]。但该方法不考虑船舶技术特征和运行工况的差异，对除了 CO₂、SO_x 之外其他污染物的排放估算差异较大

（2）基于贸易数据的排放算法

贸易法是根据贸易对之间的水路货物运输等数据，利用经验给出假设和参数取值，将贸易和排放联系起来，进行船舶排放计算。该方法对数据的要求较低，可以基于经验对数据缺失较严重的地区进行评估假设，但准确性受限于数据完整性和经验假设准确性。Streets 等人基于港口货物周转量，结合典型航运参数，估算了亚洲水域国际航运的 SO₂ 排放量^[9]。近些年也有研究基于 AIS 系统进一步建立了贸易和船舶排放的关系，基于 Voy-SEIM 和 GTMS 模型进行高精度计算，并将排放分配到贸易商品和贸易国上，对全球交易和运输市场减排提出建议^[10]。

（3）基于船舶静态技术参数的动力法

基于船队静态技术参数的动力法（简称静态动力法）是利用船队注册数据（如英国 Lloyd 数据库）或港口船舶进出艘次数据（如签证数据）中的发动机功率信息，假定每类船舶的平均负载和航行时间，结合基于功率的排放因子（g/kW·h）计算得到船舶各种污染的排放量。由于船队数据中可以获得每艘船舶的发动机功率，因此该方法能够较好地体现单船排放的差异，相较于油耗法能够对 NO_x 等污染物的估算更准确。一般计算公式如式（2.1-2）所示。

$$E_p = \sum_j P \times LF_j \times EF_{pj} \times T_j \times 10^{-6} \quad \text{式 (2.1-2)}$$

其中：

E_p ，船舶排放的污染物 p 的排放量，单位：吨；

P，船舶主机的连续运转功率，对每艘船舶来说是固定值，单位：千瓦；

LF_j ，第 j 类船舶的平均航行负载；

T_j ，第 j 类船舶的航行时间，单位：小时；

$EF_{p,j}$ ，基于发动机功率的第 j 类船舶排放的污染物 p 的排放因子，单位：克/千瓦时。

2003 年 Corbett 等人基于劳氏海事信息系统中的船舶注册信息建立全球远洋船舶的排放清单^[11]。同年 Endresen 等基于美国船只自动化互助救助系统中的船舶数据建立了全球远洋船排放清单^[12]。2007 年 Wang 等人建立了 STEEM 模型，基于往返于北美港口的 1.72 万艘船舶的活动水平数据建立了北美船舶排放清单，后又基于该模型更新了全球船舶排放清单，提高了清单的空间分辨率^[13]。

静态统计法在计算船舶污染物排放的同时可计算燃油消耗量，在全球尺度上能够与燃油法建立的排放清单进行总量的相互校验。由于静态统计法利用单船发动机功率参数进行计算，排放计算的主体从燃油消耗量转变成了船舶本身，因此能够实现船舶排在船队结构上进行细化表征，相较于燃油法具有一定的优越性。同时该方法在港口尺度可以基于船舶进出港的签证数据进行逐艘次的计算，在港口范围内使用有较好的表现。但该方法完全依赖船舶静态数据，不包含船舶的实际活动信息，因此计算过程中需要对活动水平进行大量假设，增加了排放的不确定性，且空间上仍无法分配至船舶的真实航行轨迹。

(4) 基于航运自动识别系统 (AIS) 数据的动力法

随着船舶 AIS 设备的普及和大数据时代的到来，静态动力法发展为基于航运 AIS 大数据的动力法（简称 AIS 动力法）。AIS 动力法与静态动力法最大的区别是其将 AIS 数据作为活动水平数据，结合船舶额定功率、设计航速等静态技术参数，通过模拟船舶发动机的实际工作状态，实现在船舶真实航行轨迹的高精度排放表征。AIS 动力法可进一步分为集计法和非集计法两大类。集计法将预先对 AIS 数据中每类或每艘船舶在不同工况下的运行时间进行统计，在与船舶的技术参数进行匹配后逐船计算排放，最后利用集计的网格化 AIS 信号强度进行排放的空间分配。非集计动力法的核心思想则是跟踪 AIS 数据中每艘船舶在航行过程的动态变化，从微观视角进行船舶运行工况的判断和发动机瞬时功率的计算，从而逐船、逐时地计算船舶的瞬时排放。基于 AIS 数据的动力法计算的船舶排放通常包含主发动机、辅发动机和锅炉，计算公式如式 (2.1-3)

所示。由于动力法和船舶实际运行情况紧密联系，是目前分辨率最高的一种排放计算方式，也是近些年学界广泛采用的方式。

$$E_{i,p} = \sum_j P_i \times LF_{i,j} \times EF_{p,i} \times \Delta T_{i,j} \times 10^{-6} \quad \text{式 (2.1-3)}$$

其中：

E_p ，船舶 i 排放的污染物 p 的排放量，单位：吨；

P_i ，船舶发动机的额定功率，单位：千瓦；

$LF_{i,j}$ ，船舶 i 在工况条件 j 下的主机负载因子；

$\Delta T_{i,j}$ ，船舶 i 在工况条件 j 下的航行时间，单位：小时；

$EF_{p,j}$ ，船舶 i 排放的污染物 p 的排放因子，单位：克/千瓦时。

按照对船舶动力数据的不同处理方式，动力法又分为集计法和非集计法。集计法先将统计每艘船舶在不同工况下的航行时间，再进行计算，然后利用集计的网格化 AIS 信号强度进行空间分配。而非集计法则是逐个信号分析计算，得到单艘船舶的瞬时排放，再依据不同计算目标进行累计，得到不同船型、不同空间范围、不同时间尺度的船舶排放。

2009 年，Jalkanen 等人首次用基于 AIS 信号的动力法进行船舶排放清单计算，建立了第一代船舶交通排放评估模型 STEAM，以此为基础得到了波罗的海 2007 年的船舶排放清单^[14]。目前该模型已更新至第三代，于 2017 年建立了 2015 年的全球高时空分辨率船舶排放清单^[15, 16]。2020 年国际海事组织 IMO 发布的第四次温室气体报告基于 AIS 动力法，加入了对航程的考虑，对 2012 年-2018 年全球船舶排放清单进行了计算，是目前国际上最权威的船舶排放清单之一^[17]。

我国利用 AIS 动力法建立船舶清单的起步较晚。在全国尺度上，2016 年 Liu 提出了基于 AIS 数据的非集计动力法，建立了东亚地区 2013 年远洋船排放清单^[18]，覆盖了我国东南沿海主要港口区域，领衔了中国团队利用 AIS 动力法进行船舶排放的研究；Chen 建立了 2014 年包含远洋船、沿海船和内河船的高精度全国船舶排放清单，并进行了多维排放表征^[19]；Fu 建立了全国至港口多尺度的船舶排放清单，并将船舶排放特征与机动车进行了对比分析^[20]；Li 采用货物和港口数据估算了中国 2004—2013 年的船舶排放，并预测了不同情景下至 2040 年船舶排放路径^[21]。在区域尺度上，不少研究者利用 AIS 动力法建立了我国港口分布较为密集的长三角^[22]、环渤海^[23, 24]和珠三角^[25, 26]水域的船舶排放清单。

在港口尺度上，AIS 动力法的应用已包括香港港^[27]、上海港^[28]、天津港^[29]、宁波-舟山港^[30]、青岛港^[31]、大连港^[32]和南京港^[33]等地的船舶排放清单。

相较于早期的燃油统计法和静态动力法，基于 AIS 数据的动力法建立的船舶排放清单具有不确定性更小、研究尺度更灵活、分辨率更高等优点，是目前国际上主流的“自下而上”的清单建立方法。由于船舶发送 AIS 信号的时间频率通常为数秒到数分钟，空间分辨率可达数米，因此 AIS 数据中对船舶时空信息的记录具有较高的准确度，使该方法能够灵活地适应多尺度船舶排放清单的建立，并为空气质量模型提供精度更高的排放输入数据。相对于集计 AIS 动力法，非集计 AIS 动力法不仅能够应用于建立高时空分辨率的历史船舶排放清单，理论上也能够实现近实时的船舶排放的计算。但与此同时，非集计动力法计算成本较高，通常需要搭建大数据技术框架进行排放方法的建模，因此目前我国的船舶排放清单中采用非集计 AIS 动力法的研究较少。

尽管非集计 AIS 动力法相较于传统方法有诸多优势，但该方法极大地依赖于 AIS 数据的质量。例如，在 AIS 基站覆盖较少或海洋气象条件干扰严重的区域，AIS 数据中存在长时间信号缺失的现象（图 2.1-1），常用的处理方法是将缺失信号进行直线插值，这样方法显著的弊端是可能会产生排放分布到陆地上的情况，降低排放清单时空分布的准确性。另一方面，不断细化的管控政策也对排放模型的准确度和灵敏度也提出了更高的要求。在中国范围内，内河船舶与远洋船舶的排放标准不一，但二者存在空间活动范围的重叠，但 AIS 数据中难以实现对二者的区分，而将内河船误认为远洋船将导致排放结果偏高，无法支撑针对不同对象减排政策的合理评估。因此，随着中国船舶控制政策的推进，非集计动力法在数据处理和技术方法上都仍需要进一步提升，以响应船舶减排控制政策下的排放精准表征。

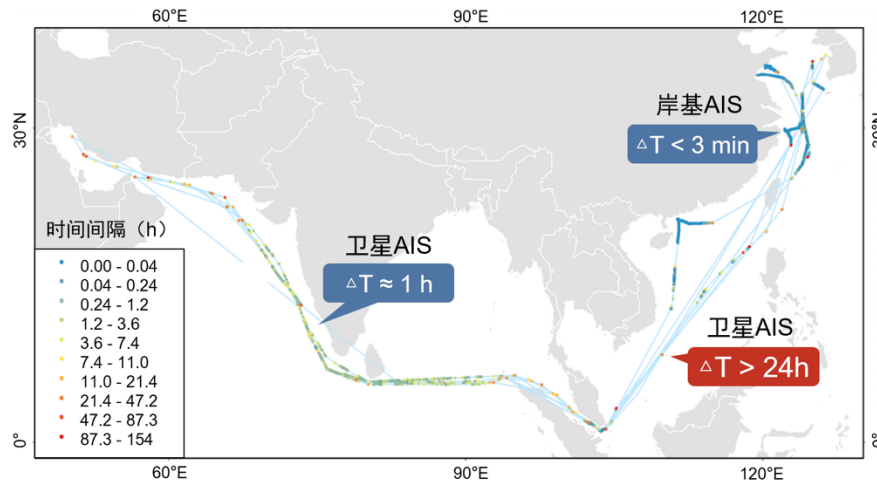


图 2.1-1 典型油船航行的 AIS 轨迹

2.1.2 基于航线的船舶排放现状研究现状

近年来，船舶 AIS 数据的应用推动了更细尺度的船舶排放和国际贸易进出口国的关联的模型研究。这种方法利用 AIS 信号中的船舶航速、吃水、轨迹及船舶静态数据中的载重吨位等特征对船舶航行状态进行再分析，逐次识别船舶航程的出发与到达国，从而推算出与运输船舶类型相匹配的海运货物类型、贸易量及海运排放量。随着全球贸易和物流的不断发展，海运航线成为出发国和到达国货物和人员运输的重要途径。然而，船舶在航行过程中会产生大量的排放，对第三方国家的大气环境和人类健康产生负面影响。例如，2018 年，Schim van der Loeff 等人将船运单数据与船舶 AIS 数据关联，同时利用动力法逐船计算海运碳排放，以 2014 年巴西出口贸易为案例实现了海运排放在贸易对层面的解析^[34]。2018，Liu 等人基于 AIS 数据首次建立了双边贸易航运船舶排放识别计算的方法，并基于大量调研工作建立了船-货匹配关系，以中美贸易为案例量化了由于双边国家之间的贸易导致的船舶排放，并评估了第三方国家因此受到的空气质量和健康损失^[35]。但是，该方法的建立依赖于获取大量具有商业敏感性的基于航程的详细货类信息目前，因此多应用于原油、散货等船型运载货物易识别的商品的推算，对于集装箱货类的推算少有研究。且其于 AIS 识别多边贸易航线的计算成本较高、算法复杂，因此在推广到地区或全球尺度时存在一定的技术挑战。

在 2020 格拉斯哥举行的《联合国气候变化框架公约》第 26 届缔约方大会 (COP26) 上, 英、美、德、日等 22 个国家共同签署了《克莱德班克宣言》(Clydebank Declaration), 宣布建立多条零排放航运路线, 即所谓的“绿色航运走廊”^[36]。《克莱德班克宣言》的目标是到 2025 年在两个或更多港口之间建立至少六条这样的走廊, 并希望到 2030 年发展更多的“绿色航运走廊”。中国虽然不是《克莱德班克宣言》的签署国, 但是参与了第一条绿色航运走廊的建设, 即上海港-洛杉矶港绿色航运走廊。这条线路是全球最繁忙的货运航线, 2020 年, 累计运输 3120 万个 20 英尺集装箱, 占全球集装箱运输总量的 21%。ICCT 的一项研究分析了在深圳和长滩之间建设一条以氢燃料电池为动力的零排放集装箱走廊的技术可行性。该研究分析了 2015 年所有行驶于这条航线的航次, 其中关键的结论是如果在深圳和长滩航线途中增设新燃料加注点以解决续航里程短的问题, 99%的航次都可以由氢驱动^[37]。

2021 年, 由全球海事论坛、海洋行动之友和世界经济论坛以及能源转型委员会合作的“零排放联盟”发布了一份关于绿色走廊的报告。这份报告认为绿色走廊和新能源技术的应用、经济措施等并列, 是推动未来海运部门实现碳中和的主要路径之一。该报告从影响和可行性的角度对 10 条国际航道进行了半定量的排名, 如图 2.1-2 所示。其影响对全球贸易量和碳强度进行了评分。可行性取决于商品价格、它们受国际海事组织范围 3 排放的影响程度、零排放燃料供应和成本以及政策和监管支持。然后将航道分为四种类型: 高可行性但低影响的“速赢”, 高可行性和高影响的“游戏规则改变者”, 低可行性和低影响的“低优先级”, 最后是低可行性但高影响力的“长期游戏”^[38]。

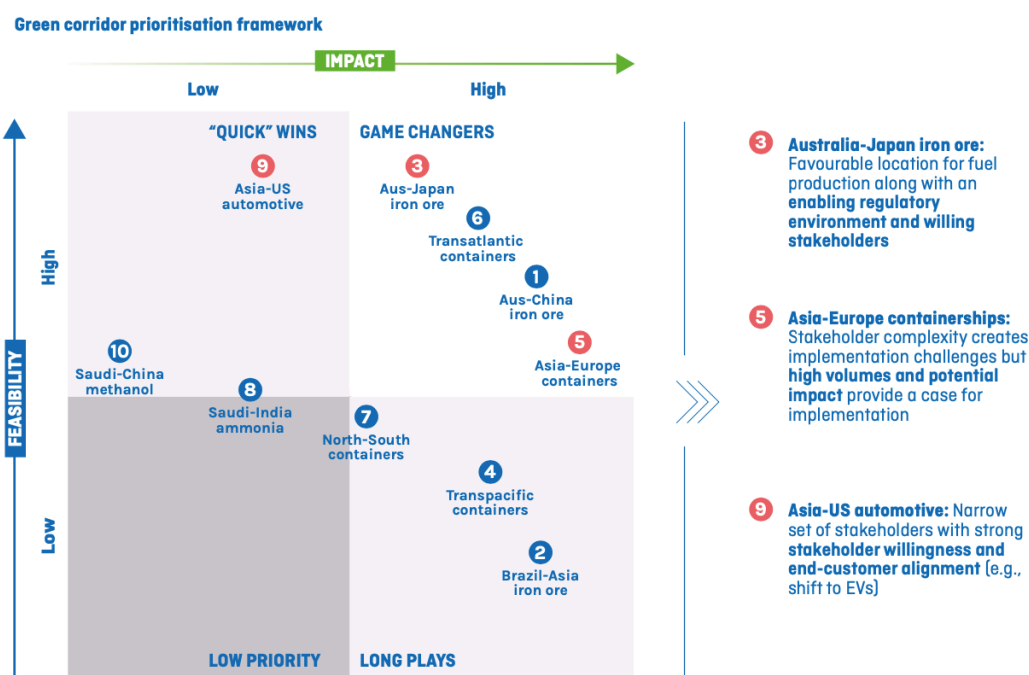


图 2.1-2 绿色航运走廊评价体系

零排放联盟的报告对三条航线（澳大利亚 - 日本铁矿石航线，亚欧集装箱航线和东北亚-美国汽车运输航线）进行了绿色航运走廊的可行性分析。研究表明，前两条航线在燃料选择、货物、政策环境和船舶类型方面展现了足够的影响规模和必要的特异性，为航运业加速脱碳提供了可行的路线图。东北亚-美国汽车运输航线实现零排放与汽车产业等利益相关者的行动紧密相关。在这条航线上，行业参与者可以在零排放燃料在全球推广前，在整个价值链上进行港口与港口间的合作以减少排放^[38]。马士基零碳航运中心从四个维度——合适的航道、船型、替代燃料和利益相关者——评估北欧-波罗的海绿色航运走廊的预可行性。该研究首先根据船队组成、贸易路线和排放选择合适的航道。鹿特丹港和汉堡港之间的集装箱航线航程距离短，已形成生产线运营，因此适合建立绿色走廊。此外，客运渡轮每年为当地大气排放贡献 500 kT 的二氧化碳排放量，因此客运路线也适合绿色走廊^[39]。国际清洁交通委员会（ICCT）系统地评估了美中集装箱走廊沿线远洋船中用液氢替代传统化石燃料的可行性。研究发现，珠江三角洲-圣佩德罗湾港口走廊 99%的航线可以使用氢气替代化石燃料，而船舶的燃料容量和运营方式只有微小的变化，例如使用 5%的仓库容量储存氢燃料或沿航增加额外的港口停靠以补充氢气。43%的航程可以用液氢实现，而

无需改变燃料容量或任何额外的港口停靠^[40]。表 2.1-1 总结了绿色航运走廊可行性研究的典型案例。

表 2.1-1 绿色航运走廊可行性研究案例

绿色航运走廊	替代燃料	文献来源
澳大利亚-日本铁矿石航线	绿氨	
欧亚集装箱航线	绿色甲醇	Getting-To-Zero-Coalition ^[38]
东北亚-美国汽车运输航线	绿氨	
北欧-波罗的海	氢气, 生物质油, 生物甲醇	MMMCZCS ^[39]
珠三角-圣佩德罗港	液氢	Xiaoli Mao ^[40]

综上所述, 目前开展的基于航线的船舶排放研究主要聚焦于双边贸易具体案例, 依赖具有商业敏感性的贸易货单数据, 从而实现对特定贸易对航线上船舶排放的测算。基于航程的船舶排放的结果, 能够为未来航运净零排放的主要路径之一的绿色走廊、新燃料加注站点的可行性评估提供数据基础。基于 AIS 的航程排放的测算方法学构建是此方法摆脱商业数据的依赖、推广到区域或全球尺度最主要的技术瓶颈。

2.2 船舶排放清单计算方法学

2.2.1 基于 AIS 数据的船舶排放清单模型 (SEIM)

2.2.1.1 方法概述

本研究所建立的 SEIM v2.0 模型是一种基于船舶大数据和非集计动力算法的排放清单计算模型。该模型由全球 AIS 数据驱动, 根据船舶运行过程中的航速和发动机功率变化计算瞬时的大气污染物和温室气体排放水平。区别于基于对船队活动水平数据进行集计化的算法, SEIM 模型是一种完全“自下而上”的非集计排放清单建立方法, 针对 AIS 数据中的每艘船舶, 通过匹配其独立的静态技术参数信息, 实现逐船、逐时排放状态的动态模拟。得益于 AIS 数据的全

样本和高频率（数秒至数分钟）的优势，SEIM 模型不需要采用代用参数进行时空分配，而是保留生成与 AIS 信号频率一致的“秒级”排放数据集，针对所需分辨率对研究区域内的排放数据进行聚合，从而“自下而上”形成高分辨率船舶排放清单。因此，SEIM v2.0 在对船舶排放的时空表征上具有显著优势，适用于多尺度高分辨率船舶排放清单的建立。

SEIM 模型的最初版本（SEIM v1.0）由清华大学刘欢团队^[18]建立，用于计算 2013 年东亚地区高时空分辨率船舶排放清单，并陆续应用于我国区域及港口尺度的船舶排放表征^[10, 41-43]。在非集计算法原理的基础上，SEIM v1.0 中主要引入了下列几种技术来提升船舶排放清单的可靠性：1）利用双层嵌套模拟域方法来减少排放在区域边界的骤增或骤降现象（“边界效应”）；2）采用渐进梯度回归树（GBRT）方法预测船舶技术参数的缺失值；3）采用 10 分钟线性插值法来填补长时间 AIS 信号缺失。为了及时更新近几年排放控制政策下的船舶排放变化，并进一步提高排放计算的时空准确性，本研究将在 SEIM 1.0 的基础上对其进行数据更新、算法改进和结构优化，将其发展为 SEIM 2.0 版本。其中方法的改进主要包括：（1）开发航线修复算法，改善缺失信号线性插值导致的航线穿过陆地问题；（2）增设内河船鉴别方法，以适应内河船不同于远洋船的燃料标准；（3）建立与国际上和国内逐步实施的排放控制政策衔接的减排修正方法，以反映不同区域及时段的船舶排放水平。

图 2.2-1 所示为更新之后的 SEIM v2.0 的模型结构示意图。在数据预处理阶段，首先对收集到的原始 AIS 数据和多源船舶技术参数数据进行数据清洗、缩减及缺失参数估算等，建立动态 AIS 数据库和船舶静态信息数据库，并根据船舶活动轨迹识别中国内河船。在排放计算阶段，需要设置模拟区域、排放因子、低负荷调整因子等参数作为基础输入参数，通过发动机负荷计算、运行工况判断来逐船模拟其瞬时排放，并利用 Dijkstra 最短路径法和 10 分钟节点插值法对部分缺失信号进行航线修复，最后结合排放控制技术进行系数修正，从而建立船舶排放清单数据集。在结果分析阶段，将对模型生成的排放数据集进行汇总与聚合，进行可视化和统计分析。SEIM v2.0 模型基于 Python 语言编写，在 Spark 分布式计算框架下运行，相较于最初版本，SEIM v2.0 模型将在数据库质量、模型稳定性及结果准确性等方面均有所提升。经过模型数十亿的计算，能够获得高信息密度的船舶排放数据集，一方面可基于 AIS 信号传输时间和船舶

的经纬度位置建立高时空分辨率的排放清单，另一方面可以结合船舶静态资料实现船队排放结构化表征。

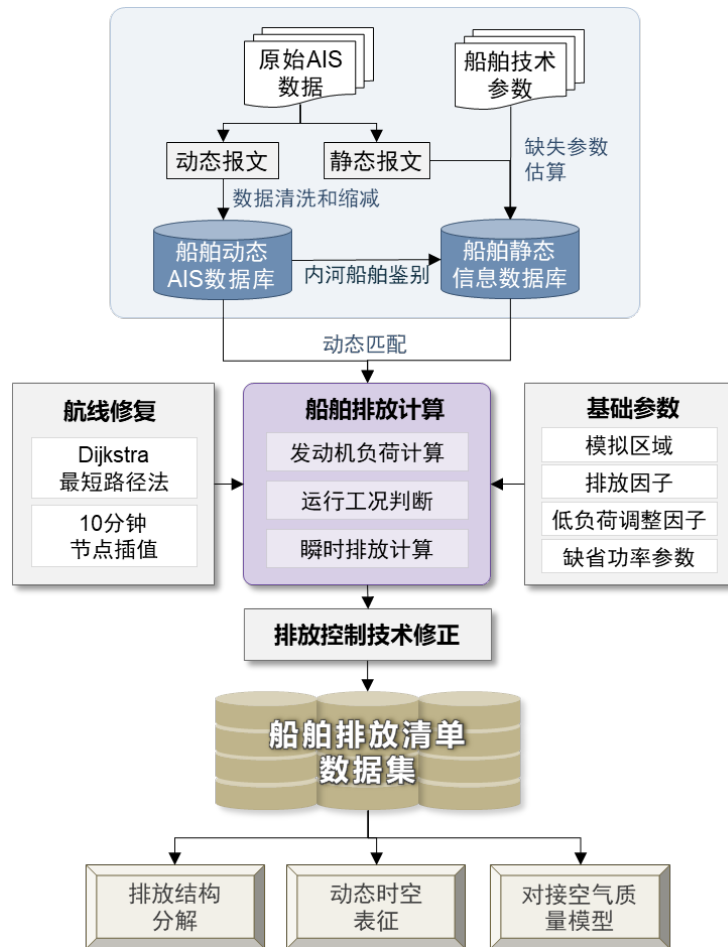


图 2.2- 1 SEIM v2.0 模型结构示意图

2.2.1.2 计算流程

模型具体的计算过程可以描述为：1) 针对 AIS 动态数据库中的每艘船舶 i ，将其所有 AIS 信号按时间排序获得历史航行状态序列，船舶 i 在目标区域内的总 AIS 信号数以 N_i 表示；2) 基于船舶 i 的海上移动通信业务标识 (MMSI) 编码，将其静态技术信息与动态序列进行匹配，获取该船舶的船型、建造年代、载重吨、主机功率、主机类型、主机转速和设计航速等静态信息列表；3) 最后以每两个连续 AIS 信号 (n 和 $n+1$) 之间的时间间隔 ΔT (数秒至数分钟) 为计算单位，基于船舶瞬时的航速、航行工况及发动机输出功率，以微观视角对船舶的主发动机、辅发动机与锅炉分别进行排放模拟计算。本研究对船舶的分类标准

与 SEIM v1.0 保持一致：将船舶类型划分为集装箱船、散货船和油船等 15 种类型；按船舶的载重吨位将其尺寸分为不同的等级，包括 0 ~ 9099 吨、10000 ~ 19999 吨、20000 ~ 29999 吨等共 12 个等级；不同船舶的主机类型主要有四种，即低速柴油发动机（SSD）、中速柴油发动机（MSD）和奥托循环液化天然气燃料发动机（Otto），船舶的燃料使用类型包括 HFO、船用轻柴油（MGO）和普通柴油（GDO）等；排放标准按船舶的建造年代分为 Tier 0、Tier I 和 Tier II 四种；而船舶航行过程中的运行工况根据其负载和航速判断，包括巡航（Cruising）、机动操纵（Maneuvering）、锚泊（Anchorage）和停靠（Berth）四种类型。

本研究针对主机、辅机和锅炉的计算方法略有差异。由于船舶的主机功率通常可以从静态库中获得较完整的数据，因此可基于船舶主机的额定功率和瞬时负荷情况来计算实际输出功率，从而结合排放因子和运行时间来计算瞬时排放：

$$E_{i,n,p}^{\text{Main}} = \text{MCR}_i \times \text{EF}_{i,p}^{\text{Main}} \times \text{LF}_{i,n} \times \text{LLAF}_{i,n,p} \times \Delta T_{i,n} \times 10^{-6} \quad \text{式 (2.2-1)}$$

式中， $E_{i,n,p}^{\text{Main}}$ 是船舶 i 的主机在第 n 与 $n+1$ 个 AIS 信号之间产生的大气污染物或温室气体 p 的排放量（t）； MCR_i 是船舶 i 的主机最大连续额定功率（kW），从船舶静态信息库中获取； $\text{EF}_{i,p}^{\text{Main}}$ 是船舶 i 主机产生的物种 p 的排放因子（g/kW·h），受船舶使用的燃料类型、发动机类型和排放标准影响。目前 SEIM v2.0 中对于排放因子的设置主要以 IMO 和 EPA 等研究报告对全球远洋船队的测试结果为准，并结合了我国的船舶燃料油标准进行校正，对于我国内河船，按照《GB 252-2011 普通柴油》标准应用硫含量更低的 GDO。随着柴油标准的加严，船舶 GDO 的硫含量由 0.035% m/m 逐渐降低至 0.001% m/m。船舶发动机排放标准按 IMO 的要求分为了 Tier 0、Tier I 和 Tier II 三类，分别适用于建造年代在 2000 年以前、2001—2010 年及 2010 年之后的船舶，主要影响船舶 NO_x 的排放水平。 $\text{LF}_{i,n}$ 是船舶 i 在第 n 个 AIS 信号时的主机负荷系数； $\text{LLAF}_{i,n,p}$ 是船舶 i 在第 n 个 AIS 信号时产生的物种 p 在主机在低负荷状态（ $\text{LF} < 0.2$ ）运行时的排放调整系数； $\Delta T_{i,n}$ 是船舶 i 的第 n 与 $n+1$ 个 AIS 信号之间的时间间隔（h）。

其中，船舶实时负荷系数可以根据螺旋桨定律，通过船舶瞬时航速和其最大设计速度计算，如式 2.2-2 所示：

$$LF_{i,n} = \left(\frac{V_{i,n}^{\text{Actual}}}{V_i^{\text{Maximum}}} \right)^3 \quad \text{式 (2.2-2)}$$

式中， $LF_{i,n}$ 为船舶 i 在第 n 个 AIS 信号时的主机负荷系数； $V_{i,n}^{\text{Actual}}$ 为船舶 i 在第 n 个 AIS 信号时的地面航速（节）； V_i^{Maximum} 为船舶 i 的最大设计航速（节）。

对于船舶辅机和锅炉，由于船舶注册信息中的额定功率资料不完善，因此按国例惯例处理方法^[44]，在 SEIM v2.0 中对不同类型、不同尺寸的船舶设定在不同工况下的默认输出功率。每艘船舶的辅机和锅炉排放计算方法分别如式 2.2-3 和式 2.2-4 所示：

$$E_{i,n,p}^{\text{Auxiliary}} = P_{i,n}^{\text{Auxiliary}} \times EF_{i,p}^{\text{Auxiliary}} \times \Delta T_{i,n} \times 10^{-6} \quad \text{式 (2.2-3)}$$

$$E_{i,n,p}^{\text{Boiler}} = P_{i,n}^{\text{Boiler}} \times EF_{i,p}^{\text{Boiler}} \times \Delta T_{i,n} \times 10^{-6} \quad \text{式 (2.2-4)}$$

式中， $E_{i,n,p}^{\text{Auxiliary}}$ 和 $E_{i,n,p}^{\text{Boiler}}$ 分别为船舶 i 的辅机和锅炉在第 n 与 $n+1$ 个 AIS 信号之间产生的大气污染物或温室气体 p 的排放量（t）； $P_{i,n}^{\text{Auxiliary}}$ 和 $P_{i,n}^{\text{Boiler}}$ 分别为船舶 i 的辅机和锅炉在第 n 个 AIS 信号时的实际输出功率（kW），它与船舶的类型、载重吨级和其瞬时运行工况相关； $EF_{i,p}^{\text{Auxiliary}}$ 和 $EF_{i,p}^{\text{Boiler}}$ 分别为船舶 i 的辅机和锅炉产生的物种 p 的排放因子（g/kW·h），受船舶的燃料类型和排放标准影响。船舶辅机和锅炉的输出功率采用之前的研究^[1]。

最后，将所有船舶所产生主机、辅机和锅炉排放量进行合计获得总排放量，如式 2.2-5 所示：

$$E_{i,p} = \sum_{n=1}^{N_i-1} E_{i,n,p} = \sum_{n=1}^{N_i-1} (E_{i,n,p}^{\text{Main}} + E_{i,n,p}^{\text{Auxiliary}} + E_{i,n,p}^{\text{Boiler}}) \quad \text{式 (2.2-5)}$$

式中， $E_{i,p}$ 是船舶 i 在目标区域内产生的大气污染物或温室气体 p 的总排放量（t）； $E_{i,n,p}$ 是船舶 i 在第 n 与 $n+1$ 个 AIS 信号之间产生的物种 p 的总排放量（t）； N_i 是船舶 i 在区域内的总 AIS 信号数。

2.2.1.3 数据来源

本研究中使用的船舶动态信息主要来自船载自动识别系统（AIS）。为了避免船舶在航行过程中发生碰撞，提高船舶航行中的安全性和效率，更好的管理船舶，IMO 要求国际航行的 300 GT 以上的船舶、沿海航行 500 GT 以上的船舶安装 AIS。该系统由船载设备、岸基和卫星接收站组成，船舶航行过程中，船载设备每隔 2 秒至数分发射一次 AIS 信号，该信号被基站（T-AIS）或者卫星（S-AIS）接收并实时传输到服务器上储存，研究表明，基站仅能接收距离 50 海里范围内的 AIS 信号，卫星可以接收远洋船舶的 AIS 信号，因此在使用 AIS 数据计算船舶排放清单时，应使用完备的 T-AIS 和 S-AIS 数据，以提高清单的准确度。本研究收集的全球 AIS 信号同时包括卫星信号和地面信号，年均报文总数约 300 亿条。

将 AIS 数据按报文内容分为静态报文和动态报文，动态报文记录了船舶在航行过程中随其行驶状况而逐时改变的高频动态信息，包括船舶 MMSI 编码、信号发射时间、船舶位置（经度和纬度）、地面航速、航向、运行工况、吃水、目的地等字段信息，在进行层层清洗之后将用于建立动态 AIS 数据库。MMSI 编码是船舶无线电通信系统在其无线电信道上发送的能独特识别各类台站和成组呼叫台站的一列十位数字码，其前三位是国家代码，后七位是关于船舶其它信息的识别码。船舶地面航速为报文发送时刻船舶的地面航行速度，以“节”为单位（1 节=1 海里/小时=1.852 公里/小时）。而船舶静态报文信息记录了船舶类型、船长、船宽、船舶总吨、载重吨和设计航速等信息，将与多源的船舶技术参数信息进行融合，用于建立船舶静态信息库。

船舶静态信息是指船舶建造后固有的、不随实际驾驶条件而变化的信息，主要包括船舶 MMSI 代码、IMO 代码、船型、船长、船宽、最大吃水深度、吨位（DWT）、额定发动机功率、设计速度、船旗国、建造年份等。船舶静态信息数据库与全球 AIS 数据匹配后，可用于的船舶排放清单的计算。

本研究的船舶静态信息数据库主要收集了劳氏船级社、中国船级社和东亚其他国家船级社收集船舶档案信息，构建船舶技术规范数据库（STSD），该数据库在过去六年中不断更新，从最早的约 80000 艘全球远洋船舶覆盖到约 120000 艘全球远洋船只和东亚本地船只。结合 AIS 静态消息和全球渔业观察（GFW）数据库收集的有效信息，从 2016-2019 年开始逐年淘汰老旧和报废船

只，并增加新建船只。目前，以 MMSI 代码为唯一标识符的 STSD 包含了全球约 38.4 万艘船舶的静态信息，高于基于 AIS 数据构建全球船舶排放清单的其他研究，如国际海事组织第四次 GHG 报告中的约 18.9 万艘船舶^[44]。具有 IMO 编号的船舶在 STSD 中被定义为远洋船舶。统计数据显示，更新后的 STSD 共包含 122746 艘远洋船舶，与国际海事组织第四次温室气体报告中记录的截至 2018 年年中具有 IMO 号的船舶数量（112144 艘）一致，略高于贸发会议记录的 2019 年世界船队数量（97136 艘）。

2.2.1.4 研究区域和范围

与大多数具有固定地理活动范围的公路移动源不同，远洋船舶具有很强的空间流动性。由于远洋船舶的船旗国、作业国和活动地点的不一致性带来的复杂性，目前几乎没有统一的标准来确定远洋船舶排放的归属国。在本研究中，制定海南船舶排放清单的目标区域是距离海南大陆领海基线约 12 Nm 以内的通航水域（以下简称 12 Nm 区域），如图 2.2-2 所示。确定目标区域的主要原因有以下几点。首先，从空气质量影响的角度来看，研究表明，该地区发生的船舶排放量被证明对中国的空气污染和人类健康有重大贡献。第二，12Nm 区域是船舶交通最密集、航线最复杂的水域。此外，该研究区域也与中国其他基于 AIS 的船舶排放清单的研究范围大致一致，以便对相应的结果进行比较。图中标注出了海南省主要港口的的位置，包括三亚港、海口港、洋浦港、八所港和清澜港，这几个港口也是海南省货物吞吐量最大的港口。

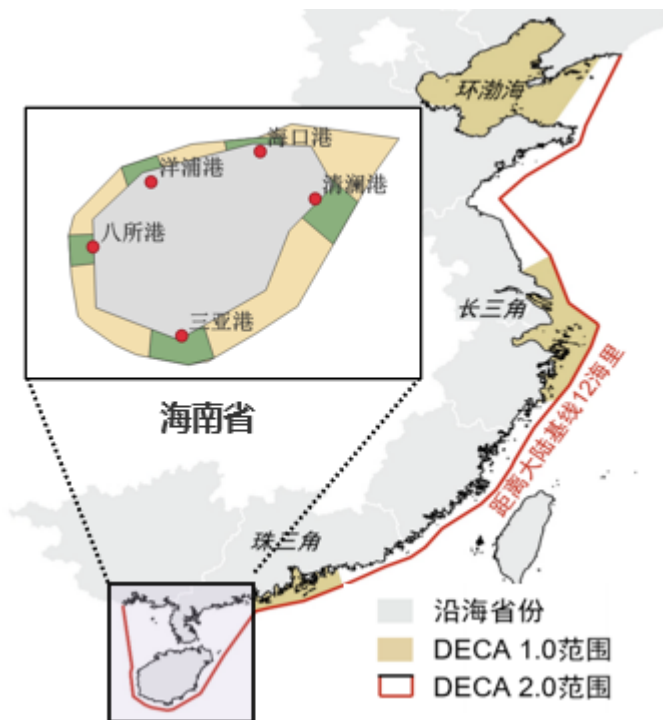


图 2.2-2 本研究的研究范围：海南省沿岸 12Nm 及其与中国排放控制区 12Nm 的相对位置

SEIMv2.0 模型结合 IMO 对船舶的分类方式，根据船舶的主要功能和用途，将船型划分为 15 大类。需要特别说明的是，本研究聚焦于水路运输产生的船舶排放，共包含集装箱船、散货船、普通货船、客船、滚装船、冷藏船、化学品船、油船、液化气船等船型。不包含渔船、搜救船、科考船、港口作业船等不参与水路运输的船舶类型。本研究涉及到的船型的详细分类说明如表 2.2-1 所示。

表 2.2-1 根据船舶主要功能和用途的船舶分类

船舶类型	主要功能和用途
集装箱船	运载集装箱货物的自行推进式的干货船
散货船	专运散装货物的自行推进式的干货船，如煤炭等大宗散货等
滚装船	利用货车来装运货物的自行推进式的干货船，用牵引车牵

	引装运箱货或散货的半挂车或轮式托盘进出货舱装卸的运输船舶
普通货船	装运各种干货的自行式货物船，具有多层或单层船体，以运载成包、成捆、成桶等件杂货为主
油船	载运散装石油或成品油的液货运输船舶
化学品船	建造或改装用于散装运输散装液体化学品的船舶。除工业化学品和清洁石油产品外，还经常运载需要高标准油舱清洁的其他类型的敏感货物，例如棕榈油、植物油、牛脂、烧碱、甲醇等
载车船	主要用来装运进出口车辆的自行推进式的干货船，容量大，甲板层数多，船头、船尾和船中部有舷门和跳板，用于车辆上下船
冷藏船	用于装运冷冻或低温冷藏的易腐烂的鱼、肉、水果、蔬菜等食品的专用船舶，属于自行推进式的干货船，受货运量有限，吨位不大
液化石油气船	专用来运输液化石油气的船舶
液化天然气船	专用来运输液化天然气的船舶

2.2.2 基于航次的航程排放计算模型（VoySEIM）

2.2.2.1 方法概述

基于 2.2.1 章的 SEIM 增加航程识别与靠港修正可以得到基于航次的航程排放计算模型 VoySEIM。相比于 SEIM，VoySEIM 新增的功能包括：1) 将排放分配至单条航程的精度；2) 识别每条航线的出发与到达地；3) 筛选经过某特定范围的航线。在识别航线出发与到达地方面，需要输入港口边界文件，通过经纬度判断起始点是否在港口边界范围内。VoySEIM 模型基于 Python 语言编写，

在 Spark 分布式计算框架下运行，模型的最终产出为高信息密度的、基于航程与航线的船舶排放清单，可以分离区域排放与靠港航线排放并实现航程排放的空间表征。

本章中基于航程的船舶计算边界为 2022 年中国东部沿岸与东南亚（北纬 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ，东经 $90^{\circ} \sim 140^{\circ}$ ）范围内靠港海南省的航线。选择北纬 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ，东经 $90^{\circ} \sim 140^{\circ}$ 作为靠港海南省航线排放计算边界的原因是该范围包含了我国港口与周边东亚、东南亚国家，覆盖靠港海南的绝大部分航程的同时减少计算工作量。

2.2.2.2 计算流程

图 2.2-3 所示为更新之后的 VoySEIM 的模型结构示意图。模型具体的计算过程可以描述为：1) 将 AIS 动态数据库与静态技术信息进行匹配；2) 以每两个连续 AIS 信号之间的时间间隔为计算单位，基于船舶瞬时航速、航行工况及发动机输出功率，以微观视角对船舶的主发动机、辅发动机与锅炉分别进行排放模拟计算；3) 基于经纬度判断每个信号点所在位置，取每段航程首信号与末信号的位置为该段航程的出发/到达地；4) 对每一段航程，根据经纬度判断是否有信号点在限定地理区域内，若存在则导出该段航程，则可得到所有经过某区域的航程。

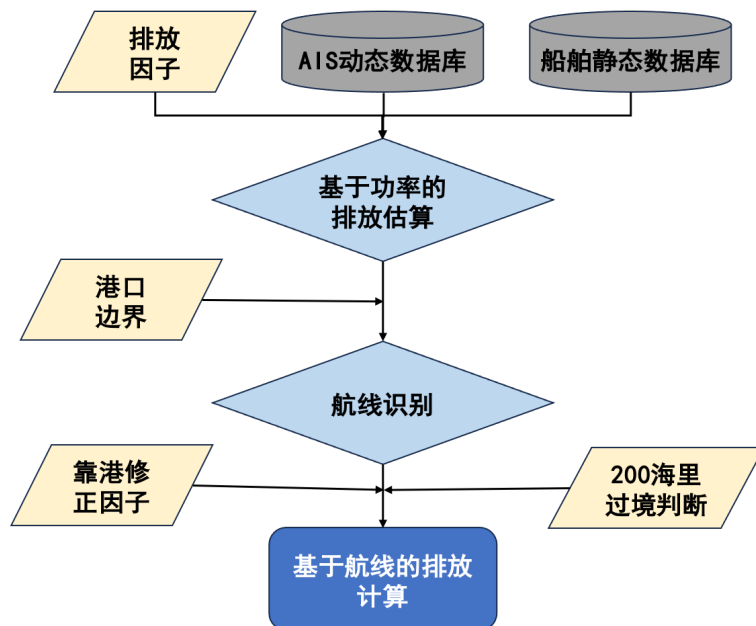


图 2.2-3 VoySEIM 计算流程

2.2.2.3 数据来源

本部分对船舶的分类标准与计算所需的 AIS 数据与船舶静态信息与 2.2.1 章相同。本研究使用的港口地理空间数据包括港口名称、港口地理空间坐标。北纬 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ，东经 $90^{\circ} \sim 140^{\circ}$ 范围内的港口划分如图 2.2-4 所示，包含了 55 个主要国内港口（表 2.2-2）和部分东亚、东南亚国家（柬埔寨、日本、朝鲜、韩国、菲律宾、新加坡-印尼-马来西亚、泰国、越南）。

表 2.2-2 研究采用的主要国内港口清单

省份	港口
海南	儋州，东方，三亚，海口，文昌
广西	钦州，北海，防城港
广东	东莞，广州，汕头，汕尾，深圳，中山，珠海，湛江，茂名，阳江，江门，惠州，潮州，揭阳
福建	福州，泉州，厦门，漳州，莆田，宁德
浙江	台州，温州，嘉兴，宁波舟山
山东	日照，青岛，烟台，潍坊，威海，东营
江苏	滨海，连云港，南通，盐城
辽宁	大连，丹东，葫芦岛，锦州，盘锦，营口
湖北	黄化
河北	秦皇岛，唐山
台湾	台湾
直辖市	上海，天津
特别行政区	香港

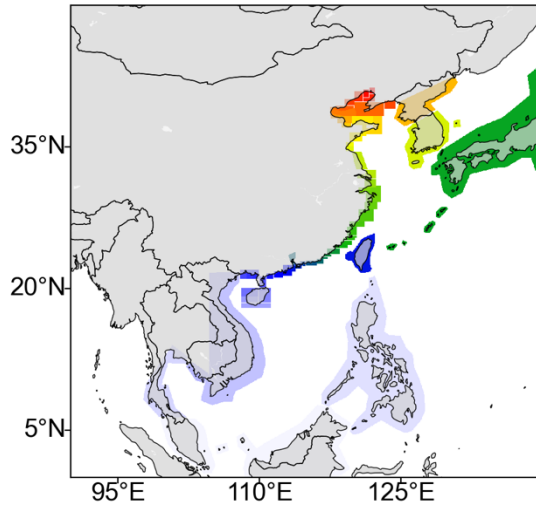


图 2.2-4 北纬 0° ~50° ，东经 90° ~140° 内港口划分

2.3 研究结果

2.3.1 区域视角的海南省船舶排放特征分析

2.3.1.1 海南省船队构成

由于 AIS 信号中有浮标、灯塔、渔网等干扰信息，本研究结合多年建立的船舶静态信息库对具有有效技术信息的船舶进行了匹配。2019 年，在海南 12 Nm 区域保持一定活动强度（年 AIS 信号不少于 2）且为船舶类型为货运船的船舶数量为 7080 艘船，总功率为 31.2 百万瓦，总载重吨为 2.2 亿吨。本研究进一步采用相同的方法统计了中国 12Nm 区域的船队，发现中国 12Nm 区的船舶共 86108 艘，主机功率总和为 2 亿瓦，载重吨总和为 12.5 亿吨。海南 12Nm 区的船舶的艘数、总功率和总载重吨分别是中国 12Nm 区船舶的 8%、13%和 15%（图 2.3-1）。

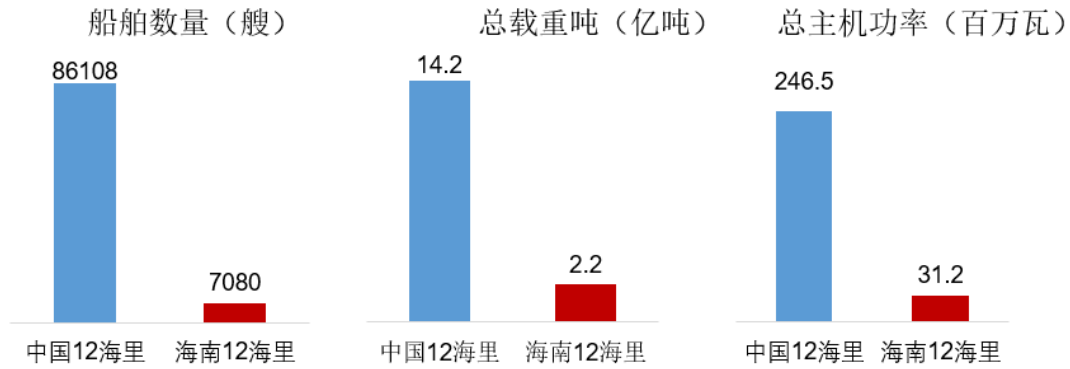


图 2.3-1 中国 12Nm 区和海南 12Nm 区活动船队对比

图 2.3-2 展示了海南 12Nm 区和中国 12Nm 区船队结构的船型构成和船旗国构成。总体来看，海南 12Nm 区和中国 12Nm 区一致，船队以散货船、油船、集装箱船、普通货船为主。这四种船舶占海南 12Nm 区活动船舶数量的 85.9%，总载重吨的 95.6%，总功率的 92.6%。对于中国 12Nm 区来说，这四种船舶占活动船舶数量的 85.4%，总载重吨的 92.9%，总功率的 90.5%。海南船队的集装箱船占船舶数量的 8.0%，高于中国船队集装箱船在数量上的占比（4.5%）。但是海南船队集装箱船在总载重吨中占 6.8%，低于中国船队集装箱船在总载重吨上的占比（14.9%）。说明海南船队中集装箱船的吨位较中国船队整体水平偏小。而海南船队的散货船占船舶数量的 54.0%，低于中国船队散货船在数量上的占比（69.5%）。但是海南船队散货船在总载重吨中占 60.2%，高于中国船队散货船在总载重吨上的占比（52.7%）。说明海南船队中散货船的吨位较中国船队整体水平偏高。燃油方面，识别出海南 12Nm 区使用 LNG 作为燃料的船舶 16 艘，占活动船舶总数的 0.3%，总功率的 0.2%，总载重吨的 0.6%。

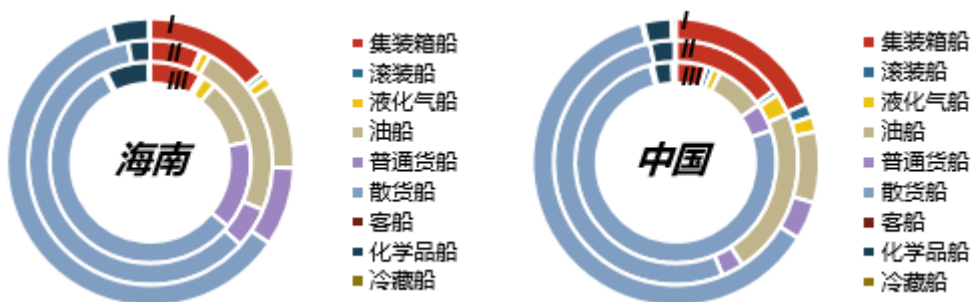
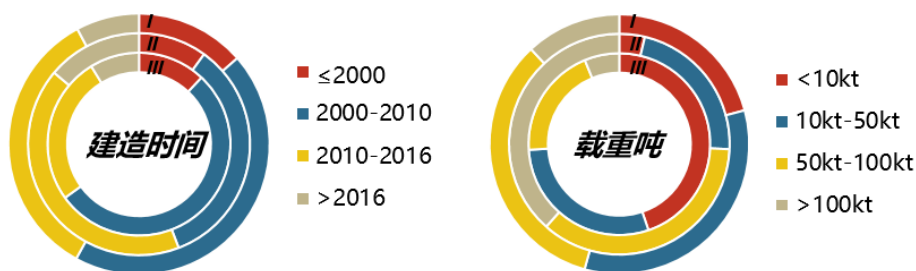




图 2.3-2 海南 12Nm 区和中国 12Nm 区的船型构成及船旗国构成 (I: 功率, II: 载重吨, III: 数量)

在船旗国构成方面, 在数量上, 海南 12Nm 区的外国船旗的船舶占比为 56.2%。而中国 12Nm 区的中国船旗的船舶占比为 27.8%。海南区域有更多的外国籍船舶活动, 这可能是由于在海南自贸港政策的吸引下, 越来越多的航运相关市场主体在海南开展国际贸易、物流仓储等活动, 从而使得外籍船舶在海南附近活动增加。除了中国船旗以外, 占比最大的三个船旗国分别是巴拿马、马绍尔群岛和利比里亚, 这三个国家也是世界上典型的方便旗国家, 但船旗国与贸易的出口国与进口国没有必然的联系, 不能反映贸易运输活动。鉴于海南省 12Nm 水域外籍船舶占比较大, 在未来的自贸港建设中应该重视对外籍船舶的管理。2019 年中国 12 海里区中国船旗的船舶总载重吨约为 3.1 亿吨, 这与《2019 年中国航运发展报告》^[45]中我国海运船舶总载重吨一致, 保证了本研究的覆盖度。



I: 总功率; II: 总载重吨; III: 总数量

图 2.3-3 海南 12Nm 区船舶的建造时间和载重吨分布 (I: 功率, II: 载重吨, III: 数量)

图 2.3-3 展示了海南 12Nm 区船队的建造时间和载重吨分布。在船舶建造时间方面，建造于 2000-2010 年之间的船舶数量上和主机功率上占比最大，分别占了 53.0% 和 44.4%。而建造于 2010-2016 年的船舶在载重吨方面占比最大，占了 42.0%。在载重吨级别方面，载重吨小于 10 千吨的小船在数量上占了 44.8%，占比最大。但是在主机功率和总载重吨方面，这部分小船仅占 20.8% 和 3.7%。载重吨方面占比最大的是吨位大于 10 万吨的大船。主机功率方面占比最大的是 50 千吨-100 千吨的船舶。

2.3.1.2 多年际船舶排放

2019 年，海南省 12Nm 区船舶 AIS 信号数为 0.1 亿，船舶排放的 SO_x 、 NO_x 、HC、 CO_2 、PM（硫酸盐）、CO 分别为 2.7 千吨、14.0 千吨、0.6 千吨、930.4 千吨、0.4 千吨和 0.7 千吨。2022 年，海南省 12Nm 区船舶 AIS 信号数为 0.1 亿，船舶排放的 SO_x 、 NO_x 、HC、 CO_2 、PM（硫酸盐）、CO 分别为 0.6 千吨、10.4 千吨、0.4 千吨、711.7 千吨、0.2 千吨和 0.5 千吨，较 2019 年下降了 7.9%-75.8%。根据清华大学开发的多尺度排放清单模型（MEIC），2019 年海南省人为源排放（不包括船舶）为 4.1 万吨 SO_x ，8.7 万吨 NO_x ，3.0 万吨 PM（硫酸盐），本研究计算的海南沿岸 12Nm 区的船舶 SO_x 、 NO_x 和 PM（硫酸盐）排放量相当于海南省人为源排放的 6.6%、16.1% 和 1.3%。海南沿岸 12 海里以内海域的航运有关的船舶排放量占中国区域相同方法统计的排放量的 0.5%-1.5%。

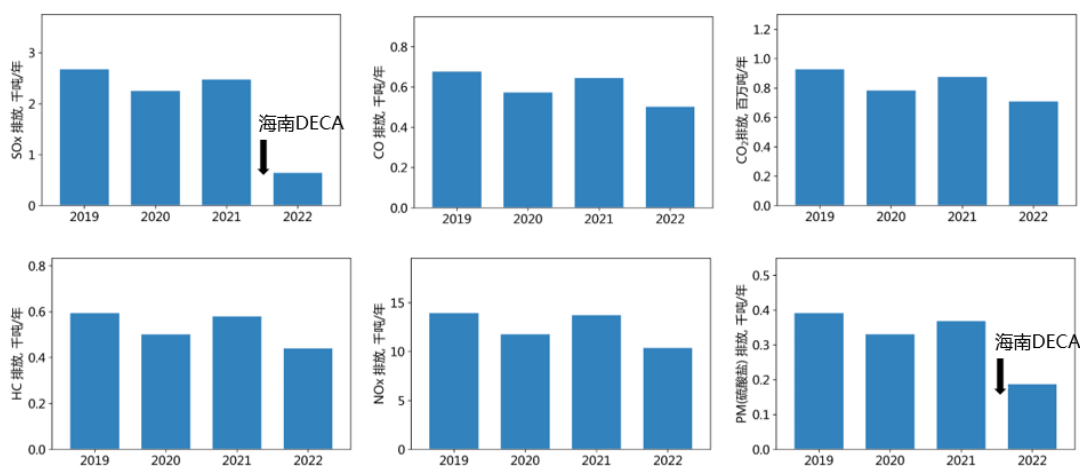
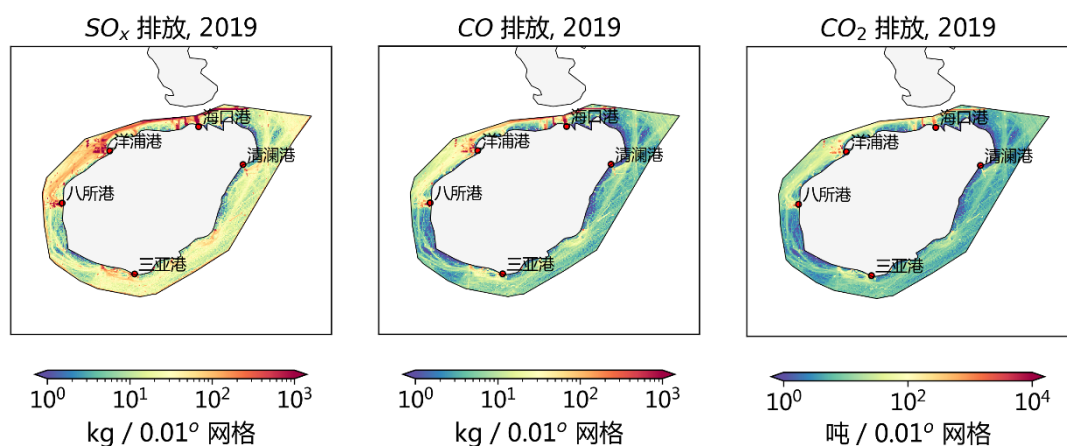


图 2.3-4 2019-2022 年海南 12Nm 区船舶排放年际变化

2019-2022 年，海南沿岸 12Nm 区的船舶排放量如图 2.3-4 所示，排放量整体呈现波动趋势，但变化不大。2020 年受疫情影响，船舶排放量相对 2019 年下降约 16%，2021 年有回升的趋势，略低于 2019 年的排放量。2022 年，沿海控制区海南水域控制要求生效，要求海船进入沿海控制区海南水域，应使用硫含量不大于 0.1% m/m 的船用燃油。DECA 政策的实施驱动船舶排放的大气污染物，尤其是 SO_x 和一次颗粒物的大幅下降，所有污染物相较于 2021 年下降了 19.2%-74.0%。根据中国环境监测总站全国空气质量实时发布平台数据，海口港最近的站点（海南大学监测点：北纬 20.0574°，东经 110.3232°、秀英海南医院站点：北纬 20.0053°、东经 110.2830°、龙华路环保局宿舍站点：北纬 20.0356°、东经 110.3300°）2022 年相较于 2021 年 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 的年均浓度均有所下降，下降幅度分别为 8%、8%、10%、18%，船舶减排对海口港口区域附近空气质量改善的贡献明显。

2.3.1.3 船舶排放的空间分布

2019 年海南 12Nm 的船舶排放空间分布如图 2.3-5 所示。船舶活动和相关排放主要集中在海口港、洋浦港、八所港、三亚港等海南主要沿海港口。从排放的空间分布可以明显看出船舶航行的轨迹，反映了海南沿海港口之间的运输活动。海南 12Nm 区的网格排放强度平均为 0.1 吨 SO_x / 0.01° 网格、0.3 吨 NO_x / 0.01° 网格、18.6 吨 CO_2 / 0.01° 网格（ 0.01° 网格相当于 1 千米网格），是中国沿海 12 海里区域平均网格排放强度的 6.4%-7.4%。其中，洋浦港、海口港和八所港附近的网格排放强度较高，最高可达到 88.7 吨 SO_x / 0.01° 网格、423.6 吨 NO_x / 0.01° 网格、3.1 万吨 CO_2 / 0.01° 网格。



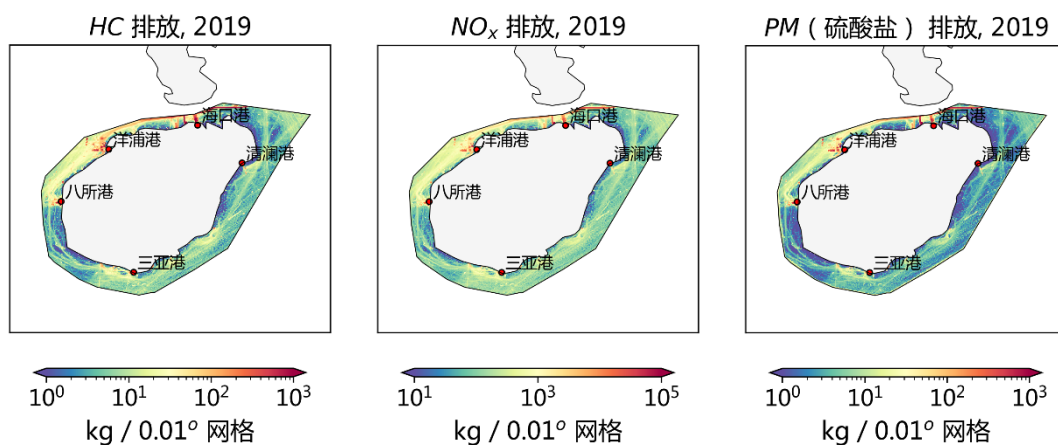


图 2.3-5 2019 年海南 12Nm 的船舶排放的空间分布

2.3.1.4 排放贡献分析

图 2.3-6 展示了 2019 年海南 12Nm 区的船舶排放构成。在所有船型中，散货船贡献了船舶排放的 35.6%-43.5%，其次是滚装船和集装箱船，分别贡献了船舶排放的 22.6%-24.5%和 22.6%-26.3%。不同的船舶类型的排放贡献的特点与货物种类有关，反映了海南的航运以能源、矿产、粮食等干散货的运输，以及制造业、贸易主导的滚装货物和集装箱货物的运输为主。在燃油方面，使用硫含量不超过 0.5% m/m 的轻柴油的船舶贡献了 95.1%-96.5%的的船舶排放。对于 SO_x 和 PM 这类主要受燃油质量影响的污染物来说，使用 MGO 作为燃料的船舶几乎贡献了全部的排放量。随着海南航运清洁化政策措施的落地和基础设施的建设，也有一部分船舶使用 LNG 作为替代能源。2019 年使用 LNG 的船舶贡献了 1.5%的船舶 CO_2 排放。在船龄方面，可以看出建造时间在 2000-2010 年之间的船舶贡献最大，贡献量为 46.0%-52.7%。2016 年以后的新造船舶只贡献了 11.9%-13.4%。在船旗国方面，中国船籍的船舶贡献了 40.6%-43.8% 的船舶排放，贡献量第二的是巴拿马籍的船舶，贡献了 8.7%-9.3% 的船舶排放。对比中国 12Nm 区，中国船籍的船舶贡献了中国 12Nm 区船舶排放的 40.1%-53.5%，高于海南水域。说明海南水域的外籍船舶活动较多，排放贡献较大。

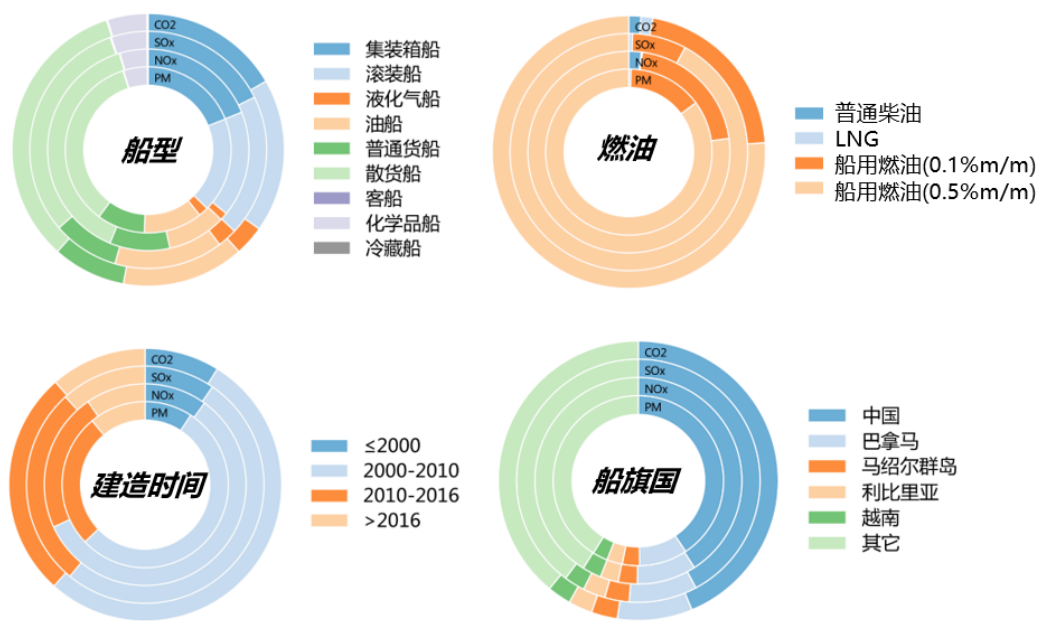


图 2.3-6 不同船型、燃油、船龄、船旗国的船舶对不同污染物的排放贡献

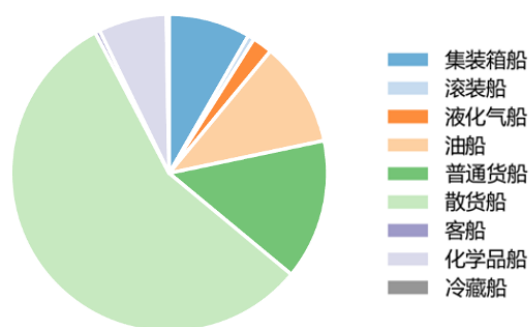


图 2.3-7 海南岛 12 海里内活动的不同类型船舶的数量构成

图 2.3-7 展示了在海南岛 12 海里内活动的不同类型船舶的数量构成。结合船队数量占比与排放占比可见，滚装船的数量少，但是对于 12 海里内的排放贡献较大，控制滚装船的排放可以达到较高的减排效率与减排效果。散货船的数量与排放占比均比较高，因此散货船的 12 海里内船舶减排的重点控制类型。

海南 12Nm 区的活动船队的构成呈现出明显的外籍船舶占比大的特点。本研究分别针对不同船旗国的船舶排放构成进行了分析。如图 2.3-8 所示。中国籍

船舶和外国籍船舶的排放构成在船型和载重吨方面有明显不同。海南 12Nm 区内，中国籍船舶的排放贡献最大的是散货船（29.1%-38.5%），其次是油船（13.3%-19.2%），而外国籍船舶中这两种船型仅贡献了 25.4%-31.1%和 7.3%-12.5%的排放。外籍船中的集装箱船和普通货船的贡献分别为 21.9%-24.4%和 12.5%-13.5%的排放，明显高于中国籍船中的集装箱船和普通货船的贡献（11.1%-13.0%和 4.3%-5.0%）。在载重吨方面，中国籍船中小于 10 千吨的船贡献了 66.4%-68.4%的排放，而外籍船船中小于 10 千吨的船仅贡献了 42.2%-43.0%的排放，外籍船中贡献最大的是 10 千吨到 50 千吨的船，贡献了 34.7%-36.7%的排放。外籍船舶中超过 10 万吨级别的大船的排放贡献占比达到了 9.9%-11.4%，高于中国籍中超过 10 万吨级别的大船的排放贡献（1.9%-2.5%）。

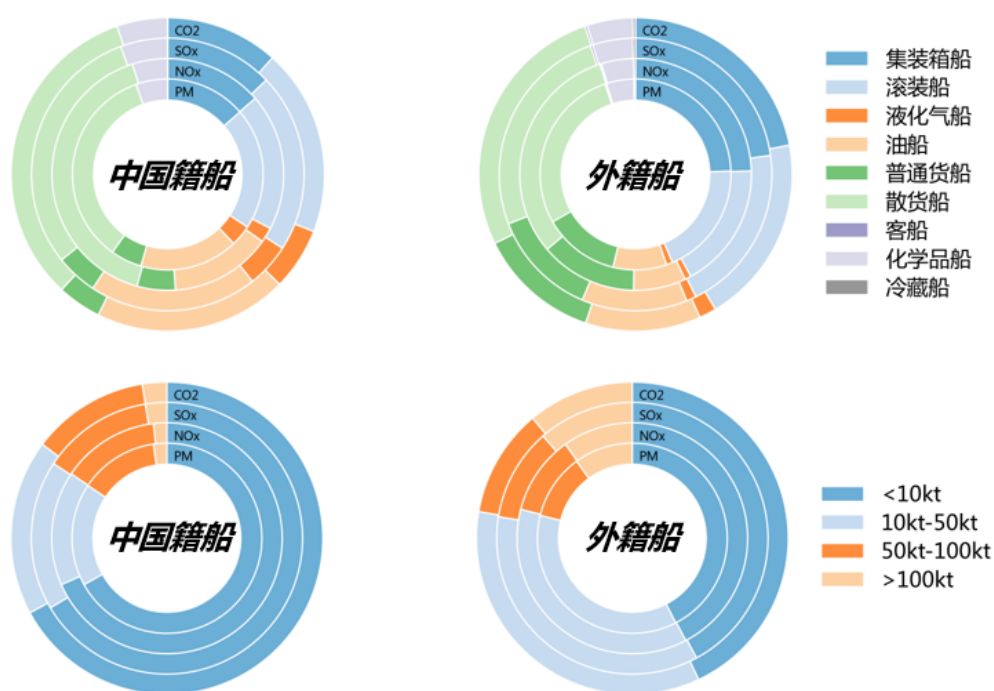


图 2.3-8 不同船型、载重吨对中国籍船、外籍船不同污染物的排放贡献

2.3.2 OD 视角的海南省船舶排放特征

根据船舶是否在海南省主要港口（儋州、海口、东方、三亚、文昌）停泊可以把 2022 年海南省周边航线划分为到港航程和途径航程，本部分的计算对象为靠港海南省的航程。

2.3.2.1 靠港航次与排放总量

在北纬 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ，东经 $90^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 的范围内，共识别出 219 万条航线，船舶排放为 1596.24 万吨二氧化碳，约占 2022 年全球海运二氧化碳排放的 2.6%。其中，共有约 2 万条航程在海南省靠港，在北纬 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ，东经 $90^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 范围内共排放 34.68 万吨 CO_2 ，174.67 吨 PM，7867.39 吨 NO_x ，964.14 吨 SO_x ，333.13 吨 CO。图 2.3-9 和图 2.3-10 分别展示了范围内所有航程排放与靠港海南省的航程排放。可见由靠港海南的航程导致的网格排放强度明显低于海南岛周边的网格排放强度，海南岛周边非靠港航线的网格排放强度大，区分靠港航程排放与途经航程排放可以分离海南在该海域内的减排责任。

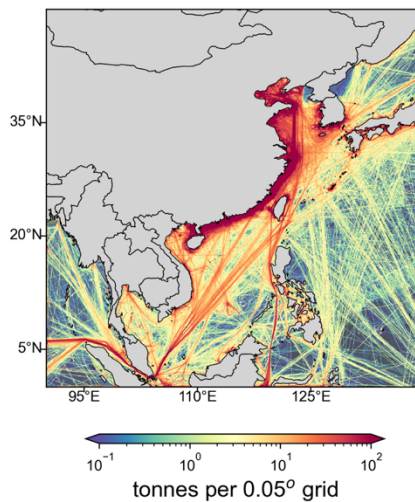


图 2.3-9 2022 年北纬 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ，东经 $90^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 范围内所有航线

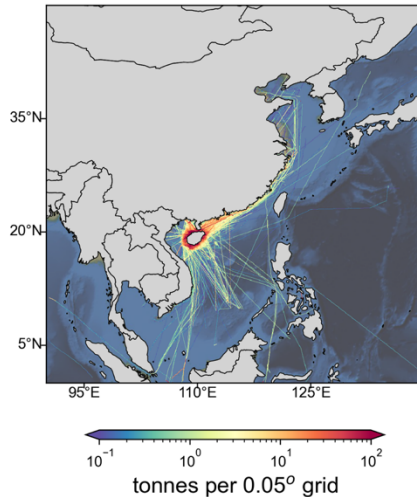


图 2.3-10 2022 年靠港海南省的所有航线

2.3.2.2 分航程的排放贡献与特征

在靠港海南省的航线中，海南省内航线贡献了大部分温室气体与大气污染物排放。2022 年，海南省内航线共排放 15.87 万吨 CO₂，80.84 吨 PM，3596.50 吨 NO_x，437.46 吨 SO_x，156.59 吨 CO，对靠港海南省航线 CO₂ 排放贡献约为 45.8%，PM 排放贡献约为 46.3%，NO_x 排放贡献约为 45.7%，SO_x 排放贡献约为 45.4%，CO 排放贡献约为 47%。海南-广东航线排放贡献次之。2022 年，海南-广东航线共排放 3.11 万吨 CO₂，15.18 吨 PM，694.64 吨 NO_x，83.78 吨 SO_x，28.92 吨 CO，对靠港海南航线 CO₂ 排放贡献约为 9.0%，PM 排放贡献约为 8.7%，NO_x 排放贡献约为 8.8%，SO_x 排放贡献约为 8.7%，CO 排放贡献约为 8.7%。

其余航线对排放贡献接近且贡献量较小。国内航线中，海南-浙江航线、海南-广西航线、海南-山东航线、海南-福建航线共排放 3.04 万吨 CO₂，15.07 吨 PM，682.49 吨 NO_x，86.88 吨 SO_x，27.42 吨 CO，对靠港海南航线 CO₂ 排放贡献约为 8.8%，PM 排放贡献约为 8.6%，NO_x 排放贡献约为 8.7%，SO_x 排放贡献约为 9.0%，CO 排放贡献约为 8.2%。国际航线中，海南-越南航线共排放 0.76 万吨 CO₂，3.90 吨 PM，171.12 吨 NO_x，21.83 吨 SO_x，7.20 吨 CO；海南-菲律宾航线共排放 0.58 万吨 CO₂，2.71 吨 PM，111.73 吨 NO_x，15.70 吨 SO_x，4.79 吨 CO，两类航线共同对靠港海南航线 CO₂ 排放贡献约为 3.9%，PM 排放贡

献约为 3.8%，NO_x 排放贡献约为 3.6%，SO_x 排放贡献约为 3.9%，CO 排放贡献约为 3.6%。

除了识别出“出发/到达港口”的航线外，“出发/到达港口”未被识别的航线贡献了较多的排放，排放 9.60 万吨 CO₂（排放贡献为 27.7%），48.60 吨 PM，（排放贡献为 27.8%），2208.40 吨 NO_x（排放贡献为 28.1%），269.37 吨 SO_x（排放贡献为 27.9%），93.04 吨 CO（排放贡献为 27.9%）。未识别航线可被归纳为三类：第一类航线的出发/到达地为远离大陆的海域或海岛（如黄海与南沙群岛），第二类是在海南岛离岸 12 海里外、100 海里内航行的渔船航线，第三类是少量出发/到达地在本区域外的航线。

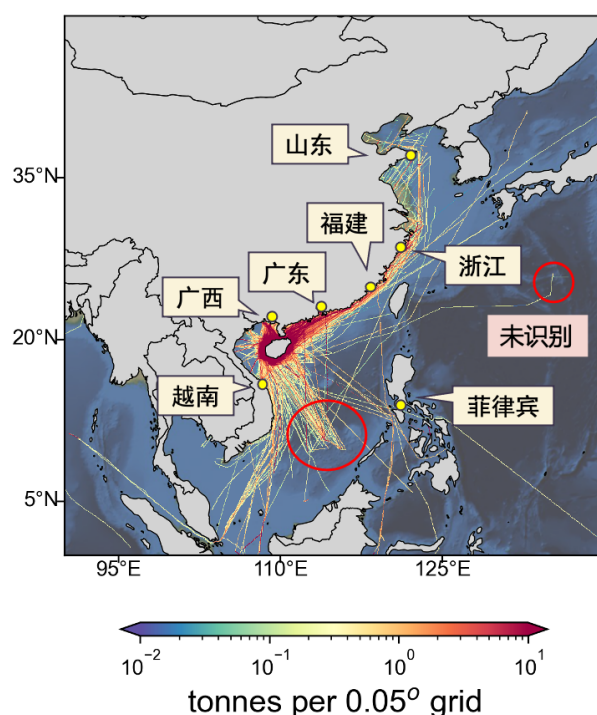


图 2.3-11 2022 年靠港海南省的主要航线示意图

表 2.3-2 和图 2.3-12 展示了各航线贡献的温室气体与大气污染物排放。由此可以看出，海南省内的船舶活动最为活跃，其次是与广东、浙江、广西、山东、福建的船舶活动，国际航线中与越南、菲律宾的船舶活动较为活跃。以上航线共占 70%的靠港海南省航线的温室气体与大气污染物排放。进一步考虑船型贡献，海南省内的**渔船**、海南-广西的滚装船、海南-越南、菲律宾、广东、

福建的货船为较为活跃的船舶活动类型。

表 2.3-2 2022 年靠港海南省的航程排放

出发/目的地	PM (吨)	NOx (吨)	SOx (吨)	CO (吨)	HC (吨)	CO ₂ (万吨)	N ₂ O (吨)	CH ₄ (吨)
靠港航线	174.67	7867.39	964.14	333.13	362.16	34.68	18.63	7.24
省内	80.84	3596.50	437.46	156.59	172.20	15.87	8.64	3.44
广东	15.18	694.64	83.78	28.92	30.20	3.11	1.65	0.60
浙江	5.73	268.47	33.64	10.13	10.66	1.14	0.59	0.21
广西	3.87	171.69	22.21	7.17	7.17	0.79	0.42	0.14
越南	3.90	171.12	21.83	7.20	7.84	0.76	0.41	0.16
菲律宾	2.71	111.73	15.70	4.79	4.56	0.58	0.30	0.09
山东	2.83	127.17	15.67	5.36	5.88	0.56	0.30	0.12
福建	2.64	115.17	15.36	4.76	4.77	0.54	0.28	0.10
新马印	1.87	79.89	11.09	3.28	3.28	0.39	0.20	0.07
港台	1.25	60.73	7.36	2.23	2.34	0.25	0.13	0.05
日韩	0.14	6.14	0.88	0.25	0.21	0.03	0.02	0.00
其他	5.09	255.76	29.80	9.41	10.02	1.04	0.54	0.20
未识别	48.60	2208.40	269.37	93.04	103.02	9.60	5.17	2.06

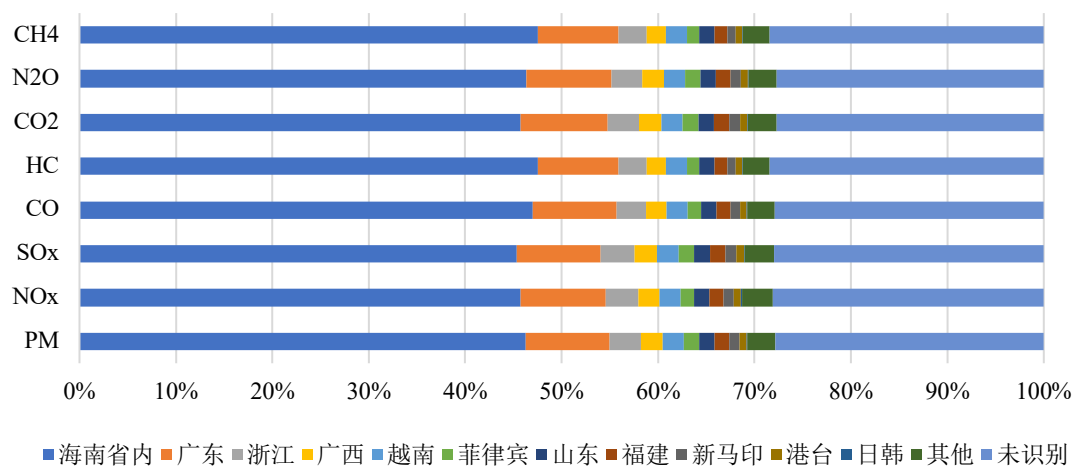


图 2.3-12 2022 年靠港海南省航线对不同温室气体与污染物的排放贡献

图 2.3-13 展示了 2022 年不同船型、船龄的船舶对海南省内航线、海南-国内航线（不包含海南省内航线）、海南-东亚、东南亚航线（包括日本、韩国、朝鲜、越南、菲律宾、泰国、新加坡、印尼、马来西亚、柬埔寨）不同污染物排放量的贡献。船型对不同航线的排放贡献存在一定差异。对于三类航线，散货船均贡献了大部分排放，是排放控制的重点船型。对于海南省内航线而言，油船、普通货船、滚装船与集装箱船的排放贡献也不可忽视。对于海南-国内航线而言，油船对污染物排放的贡献更大，约为 11.1%~13.2%。另外，相比海南省内航线，化学品船与液化气船对海南-国内航线存在一定排放贡献。对于海南-东亚、东南亚航线，化学品船与普通货船对排放的贡献明显高于海南省内航线与海南-国内航线，分别为 14.8%~16.67%和 15.0%~16.9%。

图 2.3-14 展示了海南省内航线、海南-国内航线、海南-东亚、东南亚航线中不同船型的航次数量构成。对于海南省内航线而言，69%的航次由散货船构成，其次为普通货船和油船，分别占航次数的 13%和 7%。对于海南-国内航线而言，76%的航次由散货船构成，其次为滚装船和油船，分别占航次数的 7%和 7%。对于海南-东亚、东南亚航线而言，51%的航次由普通货船构成，其次为散货船和化学品船，分别占航次数的 29%和 11%。

船龄对不同航线的排放贡献存在较大差异。对于海南省内航线而言，几乎全部排放由建造年份在 2000 年至 2010 年的船舶贡献，在省内活动的船舶较老，与中国船东协会公布的我国沿海省际干散货船与油船的平均船龄（10.67 年和 10.51 年）接近。对于海南-国内航线而言，建造年份在 2000 年至 2010 年的船舶仍然贡献了约 95%的排放，但也存在少量建造年份晚于 2010 年的船舶排放。对于海南-东亚、东南亚航线而言，建造年份更新的船对排放的贡献更大，建造年份在 2010-2016 年的船舶对排放的贡献约为 20.0%，但建造年份早于 2000 年的船舶也对排放有一定贡献，约为 5.8%。

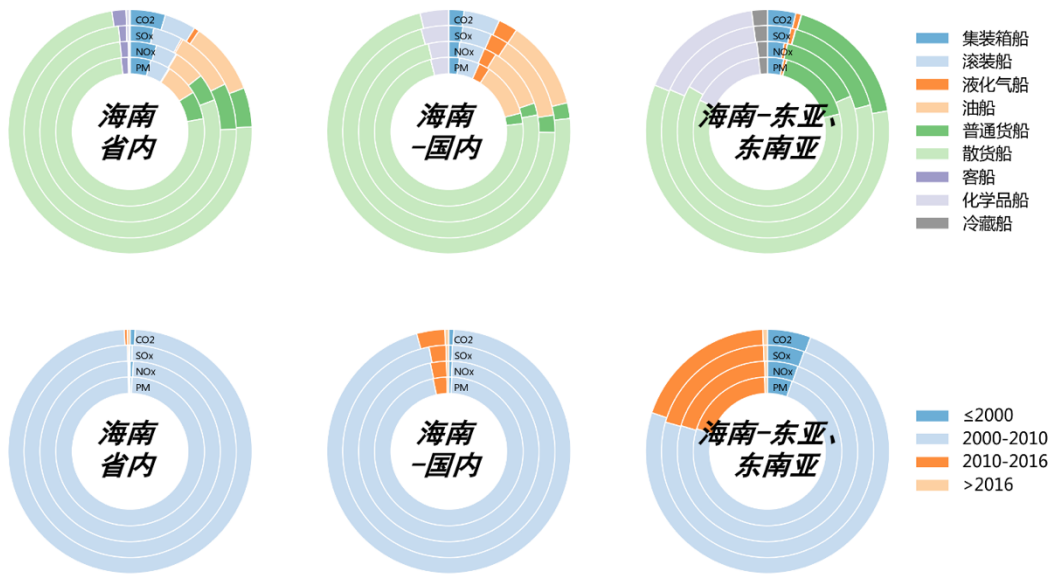


图 2.3-13 2022 年不同船型、船龄的船对海南省内航线、海南-国内航线、海南-东亚、东南亚航线不同污染物的排放贡献

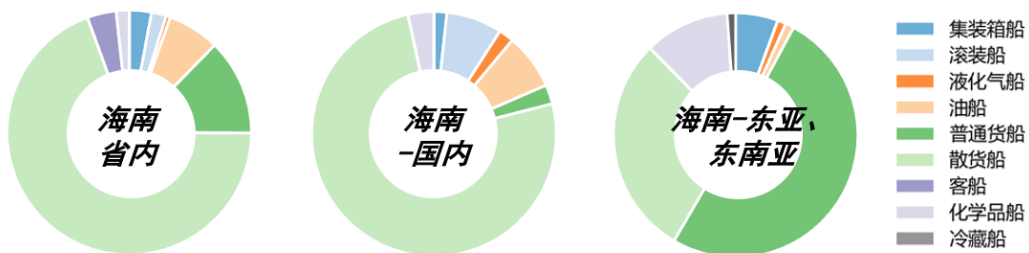


图 2.3-14 2022 年海南省内航线、海南-国内航线、海南-东亚、东南亚航线中不同船型的航次数量构成

综合船型的航次数量占比与船型、船龄的排放贡献占比可以得到需要重点控制的船舶类型。对于海南省内航线和海南-国内航线而言，散货船在航次数量与排放贡献占比均比较高，因此需要加强对于海南省船龄 10 年以上的散货船的监管；油船的航次数量占比约为 7%，排放占比达到 13%，因此也需要加强对船龄 10 年以上的油船的监管。该类船的船龄与我国沿海省际干散货船、油船的船龄接近，距离成为老旧船舶（散货船船龄达到 18 年，油船船龄达到 12 年）尚存在一定的缓冲期。对于油船而言，大部分船舶船龄邻近老旧，航线以海南省

内、海南-国内航线为主，在购置新船时可以增加甲醇、氢能等使用清洁能源船舶的比例，并加快老旧船舶的淘汰。对于散货船而言，距离被淘汰还剩余约 8 年的时间，在近期可以考虑加装尾气处理设施、使用岸电，在远期也需提升清洁能源船舶在新船中的占比。

2.3.2.3 不同船型的航程 OD 特征

根据船型解析靠港海南的航线排放结果如图 2.3-15 至图 2.3-17 所示。与货物运输相关的船型（散货船、集装箱船、普通货船）的航线（图 2.3-15）集中在海南岛周边并有部分航线均匀辐射中国东南沿岸与东南亚国家。燃料运输船（液化石油气船、油船）的航线（图 2.3-16）基本为国内航线，液化石油气船主要从海口港与洋浦港通过琼州海峡与中国东南沿海港口相连，油船的出发/到达港口包含了五个主要港口与中国东南沿海港口相连，排放量更大，且有少量通往俄罗斯的航线。与特定产业相关的船型（滚装船、化学品船）的航线与图 2.3-17 所示。滚装船航线排放分布在海口、儋州与广西省之间，化学品船航线排放较为分散，主要分布在海南、中国东部沿岸、越南、新加坡间。

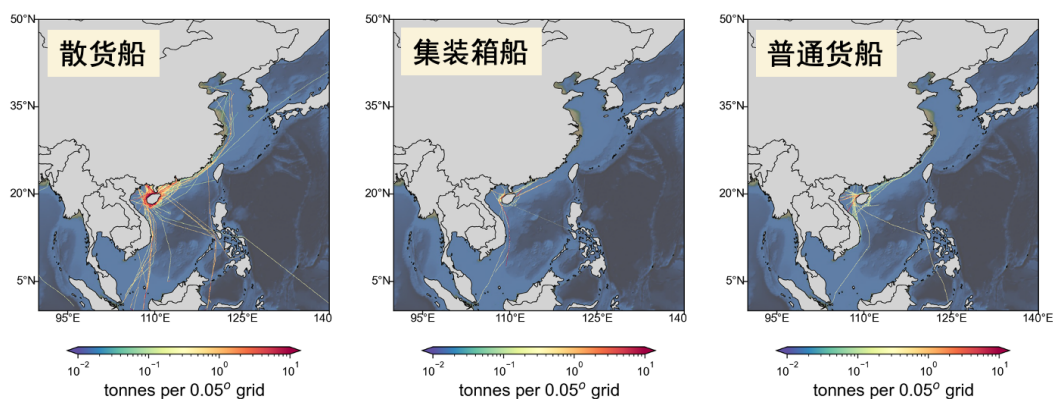


图 2.3-15 靠港海南航线中散货船、集装箱船、普通货船的排放分布

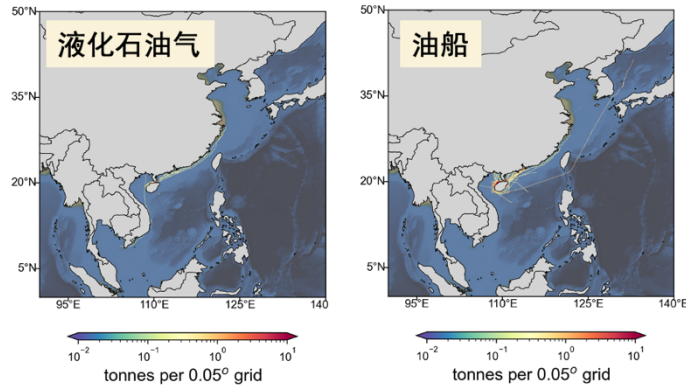


图 2.3-16 靠港海南航线中液化石油气船、油船的排放分布

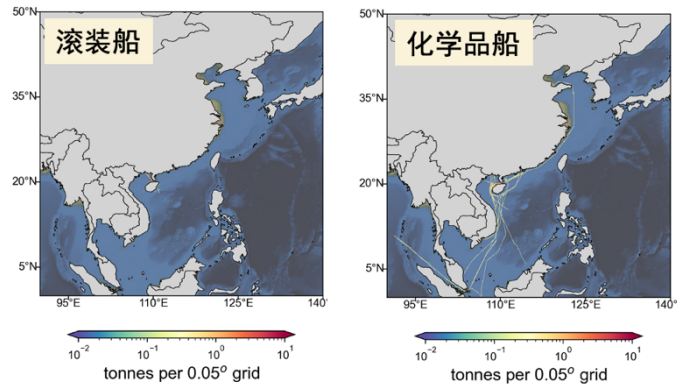


图 2.3-17 靠港海南航线中滚装船、化学品船的排放分布

2.4 本章小结

本研究将船舶排放分别分配至区域与航程，计算了海南省 12 海里范围的船舶排放与靠港海南省、途径海南省 200 海里的航程排放。计算结果展现了海南 12 海里的多年际船舶排放变化、空间分布与和靠港海南省的航程排放。

2019-2022 年，海南沿岸 12Nm 区排放量整体呈现波动趋势，但变化不大。2022 年海南省 12Nm 区船舶污染物排放（ SO_x 、 NO_x 、HC、 CO_2 、PM、CO）较 2019 年下降了 7.9%-75.8%。在所有船型中，散货船、滚装船和集装箱船贡献了最多排放；在燃油使用方面，使用硫含量不超过 0.5% m/m 的轻柴油的船舶贡献了 95.1%-96.5% 的船舶排放；在船龄方面，建造时间在 2000-2010 年之间的船

船贡献最大；在船旗国方面，中国船籍的船舶贡献了最多排放。但对比中国12Nm区，说明海南水域的外籍船舶活动较多，排放贡献较大。

在海南岛12海里范围内活动的船舶中，滚装船的数量少，但是对于12海里内的船舶排放贡献较大，控制滚装船的排放可以达到较高的减排效率与减排效果。散货船的数量与排放占比均比较高，因此散货船的12海里内船舶减排的重点控制类型。

在靠港海南省的航线中，海南省内航线贡献了大部分温室气体与大气污染物排放（约为46%），其中散货船贡献了大部分排放，是减排需要关注的重中之重，油船、普通货船、滚装船与集装箱船的排放贡献也不可忽视。几乎全部的海南省内航线排放由建造年份在2000年至2010年的船舶贡献，可见在省内活动的船舶较老，应该首先推动省内运输船队的更新。

海南-国内航线贡献了约18.4%的靠港排放，其中海南-广东航线对靠港海南航线的贡献约为9%。从船型看，散货船仍然贡献了最多的排放，是减排控制的重点。油船、化学品船与液化气船的排放贡献相比海南省内航线有所提升，也应重点控制。从船龄看，建造年份在2000年至2010年的船舶仍然贡献了约95%的排放，但也存在少量建造年份晚于2010年的船舶排放。

综合船型的航次数量占比与船型、船龄的排放贡献占比可以得到需要重点控制的船舶类型。对于海南省内航线和海南-国内航线而言，散货船在航次数量与排放贡献占比均比较高，因此需要加强对于海南省船龄10年以上的散货船的监管；油船的航次数量占比约为7%，排放占比达到13%，因此也需要加强对船龄10年以上的油船的监管。该类船的船龄与我国沿海省际干散货船、油船的船龄接近，距离成为老旧船舶（散货船船龄达到18年，油船船龄达到12年）尚存在一定的缓冲期。对于油船而言，大部分船舶船龄邻近老旧，航线以海南省内、海南-国内航线为主，在购置新船时可以增加甲醇、氢能等使用清洁能源船舶的比例，并加快老旧船舶的淘汰。对于散货船而言，距离被淘汰还剩余约8年的时间，在近期可以考虑加装尾气处理设施、使用岸电，在远期也需提升清洁能源船舶在新船中的占比。

海南-国际航线中，海南-越南航线、海南-菲律宾航线的排放贡献较高。散货船、化学品船与普通货船是需要重点控制的船舶类型，其中化学品船与普通货船对排放的贡献明显高于海南省内航线与海南-国内航线，分别为 14.8%~16.67%和 15.0%~16.9%。建造年份在 2010-2016 年的船舶对排放的贡献约为 20.0%，但建造年份早于 2000 年的船舶也对排放有一定贡献，约为 5.8%。

第3章 海南港口港作机械排放现状

3.1 基于 MOVES-NONROAD 的港作机械排放计算方法

本研究采用的 MOVES 模型是基于美国当地的实际情况建立的排放因子模型，因此在对海南地区进行港作机械排放因子模拟的过程中，需要首先对模型的相关参数本地化修正。主要包括地理信息、机械信息、燃油信息、模拟年信息四个方面^[46, 47]。

3.1.1 地理信息处理

MOVES 模型中提供了美国的 50 个州 3042 个县的地理区域。本研究基于影响排放因子的地理气候条件方面进行相应筛选匹配。我国海南省位于北纬 18°10'~20°10'，属热带季风气候，全年高温，旱雨季明显，降水集中在雨季且量大。美国位于相近纬度的州县主要是夏威夷州，最终确定美国夏威夷州的夏威夷县 Hawaii County 作为模拟地理区域。具体海南省与夏威夷地理气候特点见表 3.1-1。

表 3.1-1 海南与佛罗里达地理气候对应特点

评价指标	海南省	夏威夷州（夏威夷县）
纬度	18°10'N 至 20°10'N	19°32'34" N
经度	108°37'E 至 111°05'E	155°39'W
年均温度	22.5°C至 25.6°C	23°C至 29°C
年均降水量	1640mm	3302mm
相对湿度	77%至 86%	66%-71%
雨季	5月至 10月	11月至 3月

3.1.2 机械信息对标

（1）港作机械类型本土化

MOVES 模型中将港作机械类型分为 16 大类，并且进一步根据燃料类型（柴油、两冲程汽油、四冲程汽油、液化石油气、压缩天然气）进行区分并采用源分类代码（Source Classification Codes, SCCs）对不同污染源进行区分，见

表 3.1-2, 表 3.1-3。根据实地调研结果, 本研究对代表性港口的港作机械按照以上分类进行一一对应。

表 3.1-2 港作机械类型到 MOVES-Nonroad 设备类型的映射

CHE Type	MOVES-Nonroad Equipment Type	MOVES-Nonroad Sector
Aerial Lifts	Aerial Lifts	Industrial
Air Compressors	Air Compressors	Commercial
Cranes	Cranes	Construction
Empty Container Handlers	Other General Industrial Equipment	Industrial
Excavators	Excavators	Construction
Forklifts	Forklifts	Industrial
Generators/Power Packs	Generator Sets	Commercial
Light Towers	Signal Boards/Light Plants	Construction
Manlifts	Aerial Lifts	Industrial
Off-highway Trucks	Off-highway Trucks	Construction
Pumps	Pumps	Commercial
Rail Pushers	Other General Industrial Equipment	Industrial
Reach Stackers	Other General Industrial Equipment	Industrial
Rollers	Rollers	Construction
RTG Cranes	Other General Industrial Equipment	Industrial
Side Handlers	Other General Industrial Equipment	Industrial
Skid Steer Loaders	Skid Steer Loaders	Construction
Sweepers	Sweepers/Scrubbers	Industrial
Top Handlers	Other General Industrial Equipment	Industrial
Tractor/Loader/Backhoes	Tractors/Loaders/Backhoes	Construction
Welders	Welders	Commercial
Yard Tractors	Terminal Tractors	Industrial

表 3.1-3 MOVES-Nonroad 设备类型和燃料类型与 SCC 的映射

MOVES-Nonroad	Source Classification Code (SCC) by Fuel Type
---------------	---

Equipment Type	Diesel	2-Stroke Gasoline	4-Stroke Gasoline	LPG	CNG
Aerial Lifts	22700030 10	N/A	22650030 10	22670030 10	N/A
Air Compressors	22700060 15	22600060 15	22650060 15	22670060 15	22680060 15
Cranes	22700020 45	N/A	22650020 45	22670020 45	N/A
Excavators	22700020 36	N/A	N/A	N/A	N/A
Forklifts	22700030 20	N/A	22650030 20	22670030 20	22680030 20
Generator Sets	22700060 05	22600060 05	22650060 05	22670060 05	22680060 05
Off-highway Trucks	22700020 51	N/A	N/A	N/A	N/A
Other General Industrial Equipment	22700030 40	22600030 40	22650030 40	22670030 40	22680030 40
Pumps	22700060 10	22600060 10	22650060 10	22670060 10	22680060 10
Rollers	22700020 15	N/A	22650020 15	22670020 15	N/A
Signal Boards/Light Plants	22700020 27	22600020 27	22650020 27	N/A	N/A
Skid Steer Loaders	22700020 72	N/A	22650020 72	22670020 72	N/A
Sweepers/Scrubbers	22700030 30	22600030 30	22650030 30	22670030 30	22680030 30
Terminal Tractors	22700030 70	N/A	22650030 70	22670030 70	22680030 70
Tractors/Loaders/Backhoes	22700020 66	N/A	22650020 66	22670020 66	N/A
Welders	22700060 25	N/A	22650060 25	22670060 25	N/A

(2) 港作机械排放标准

不同模型年的港作机械排放状况也存在一定差异。本研究通过开展实地调研，获取了研究区域当下使用的主要港作机械相关信息。根据《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》^[48]，采用设备到货日期作进行各机械执行排放标准的判定依据，见表 3.1-4。结合 2022 年底实行的国 4 标准，本研究中将模型年超过 2022 年的设备归类为国 4。

表 3.1-4 基于销售日期的排放标准判别方法

类型	国 0	国 1	国 2	国 3	国 4
挖掘机					
推土机					
工程装载机					
叉车	~2008.10.1	2008.10.1~	2010.10.1~	2016.4.1~	2023.1 ~
压路机		2010.10.1	2016.4.1	2022.12	
摊铺机					
平地机					
其它					

3.1.3 燃油构成模拟

MOVES 模型提供了 6 中不同类型的燃油，分别为：汽油、柴油、压缩天然气、液化石油气、乙醇和电力，但目前只考虑了汽油和柴油的燃料性质^[49, 50]。本研究中所涉及均为柴油机械，而在 MOVES 中主要规定了柴油的硫含量，因此，本研究模拟过程中仅对柴油硫含量进行转换调整。

研究表明，降低硫含量科研削减 HC、CO 以及 NO_x 等污染物排放。历次国家燃油标准只对硫含量做出了调整，且国家标准化管理委员会自 2019 年起，非车用柴油均按照车用柴油国 VI 标准评价（见表 3.1-5），其它指标均不变。因此，本研究中的燃油主要对含硫量进行统一设定，均为 10 ppm。

表 3.1-5 国标中规定的柴油硫含量

	国I	国II	国III	国IV	国V	国VI
柴油	2000	1000	350	50	10	10

单位：ppm

3.1.4 模拟年限确定

MOVES 内部提供了广泛的模拟时间，由于国内外的相关排放标准颁布时间以及限值存在较大区别，需要根据国内与美国排放标准的差异，结合具体的港作机械执行标准来确定模拟年限^[51, 52]。首先，研究依据我国与美国排放标准中各污染物的排放限值大小，建立了排放标准的关系见图 3.1-1。图 3.1-1 展示了我国标准实施年限与美国非道路移动机械排放标准的对应关系，其中红色折线表示美国污染物排放标准逐年的变化，红星表示我国国 1 至国 4 标准的实施年与污染物浓度。可见，我国国 1 标准排放水平对应美国 1999 年，国 2 对应 2003 年，国 3 对应 2008 年。在 2014 年后，美国的排放标准没有进一步更新，与我国国 4 标准相近。因此，本研究中对于研究区域港作排放因子的模拟年限的设定与上述一致。

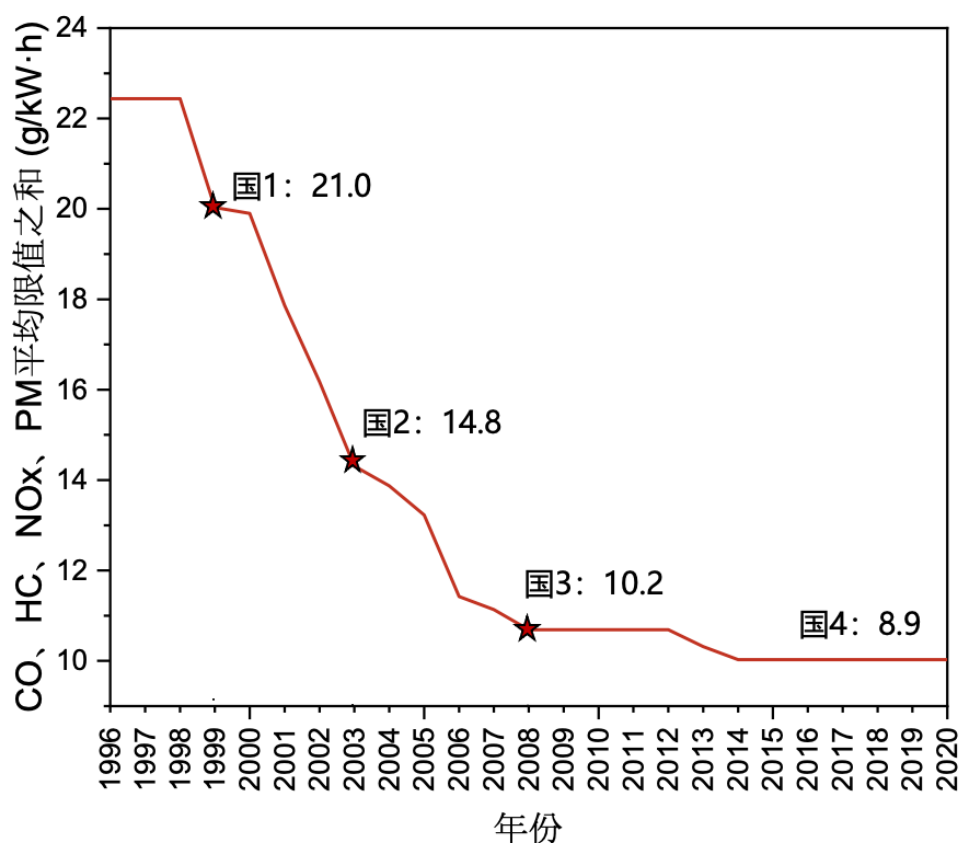


图 3.1-1 美国非道路移动机械污染物排放限值之和与我国标准对应关系

3.2 洋浦港港作机械排放清单

本研究基于本地参数化后的 MOVES 模拟得出的排放因子，首先计算出单个不同类型港作机械排放量（见式 3-1），然后结合不同设备的数量，最终计算的出年排放总量。

$$E = P \times LF \times A \times EF \quad (3-1)$$

其中， E 为单台设备的排放量， g ； P 为该类设备额定功率， hp ； LF 为引擎负载因子； A 为引擎运行时长， h ； EF 为排放因子， $g/(hp \cdot h)$ 。

3.2.1 港作机械活动水平数据

本研究对国投裕廊洋浦港的港作机械活动水平以及相关参数进行了调研，初步形成了 133 台港作机械的详细数据，见图 3.2-1。其中装载机、门座起重机以及重型引车数量最多，共 46 台，占比 36%。

港作机械的燃料类型直接影响其排放。研究港口港作机械主要动力驱动类型包括柴油以及电力。其中，柴油机驱动的设备共计 60 台，港作机械电动化率达到 55%。岸桥、门座起重机、龙门起重机与轮胎吊的电动化程度最高。

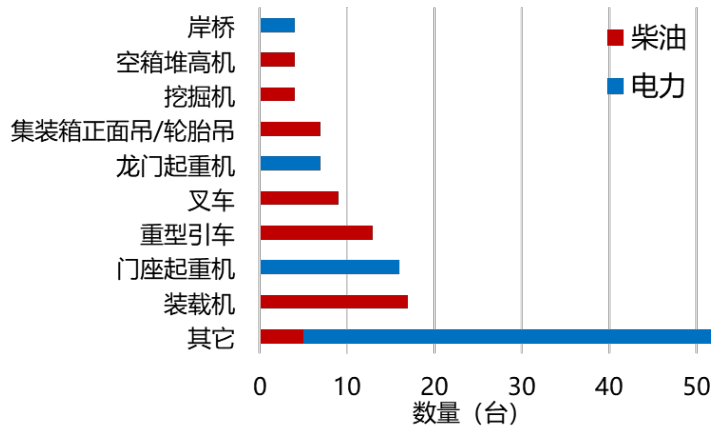


图 3.2-1 国投裕廊洋浦港的港作机械保有量以及燃料类型

进一步对柴油机驱动的港作机械进行分析。60 台柴油机额定功率范围在 66—256kW，见图 3.2-2(a)。其中超过 52 %的港作机械功率为 150—200kW；功率小于 100kW 的港作机械占比达到 23%；功率大于 200kW 的机械占比最小，仅为 8%。港作机械的年工作时长见图 3.2-2(b)。在所有港作机械中，超过 70%的港作机械年工作时长小于 1000 小时。

各类型港作机械模型年调研结果见图 3.2-2(c)。依照《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》划分调研区域柴油机驱动的港作机械的排放标准，最终得到所有港作机械排放标准均在国 0 到国 3 之间，见图 3.2-2(d)，其中国 3 的港作机械最多，占比达到 55%；而国 0 占比最少，占 10%。

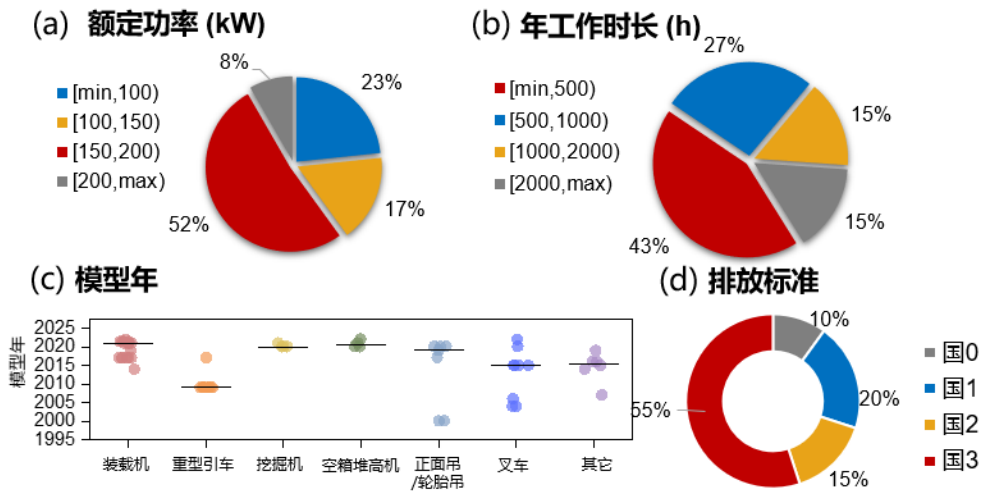


图 3.2-2 柴油驱动港作机械额定功率、工作时长、模型年以及排放标准基本情况

3.2.2 基准排放因子计算

基于 MOVES-NONROAD 模型，在地理选项为 Hawaii County 的基础上，由调研结果中的燃料类型确定采用非道路机械柴油，并依照我国现阶段柴油标准，将其中硫含量调整为 10 ppm；然后依照 WRF 模拟的海南省典型月份平均气温以及湿度信息进行气候条件设置；最终根据不同排放标准分别选定模拟为 1990，1999，2003 以及 2008 年进行模拟，得到排放因子。

模拟结果与《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》中推荐值进行对比。结果显示：（1）本研究中各种功率、各排放标准下，大部分结果均在推荐值±50%以内；（2）PM₁₀、PM_{2.5}、HC、CO、NO_x 平均偏差分别为 7%、10%、-57%、-17%以及 5%。考虑指南中指标值测定时设备性能、燃油组成、环境条件不同，同时由于设备功率分类不同，合并过程中也会带来差异，综合形成的影响。

3.2.3 港作机械污染物排放总量

2022 年国投裕廊洋浦港的港作机械排放污染物 THC、CO、NO_x、SO₂、PM₁₀、PM_{2.5} 以及 CO₂ 总量分别为 1.93 吨、7.11 吨、24.75 吨、0.02 吨、1.26 吨、1.22 吨 以及 3094.49 吨。进一步结合货运量分析，计算得到洋浦国际集装箱码头、其它码头以及整个洋浦港的港作机械产生的 THC、CO、NO_x、SO₂、PM₁₀、PM_{2.5} 以及 CO₂ 总量分别为 18.68 吨、68.72 吨、239.12 吨、0.18 吨、12.18 吨、11.82 吨 以及 29901.03 吨，见表 3.2-1。由结果可知，由于非道路机械采用车用柴油，其含硫量较低（低于 10 ppm），港作机械产生的 SO₂ 排放较低，而 NO_x 的排放仍处于较高水平，是目前港口排放的主要污染物。

表 3.2-1 洋浦港污染物及二氧化碳排放总量（吨）

	THC	CO	NO _x	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO ₂
国投裕廊洋浦港	1.93	7.11	24.75	0.02	1.26	1.22	3094.49
洋浦国际集装箱码头	15.58	57.30	199.40	0.15	10.16	9.85	24934.64
其它码头	1.17	4.30	14.97	0.01	0.76	0.74	1871.90
洋浦港总计	18.68	68.72	239.12	0.18	12.18	11.82	29901.03

分设备的排放结果见图 3.2-3。重型引车在各类污染物中的贡献均为最高，约 50%，并且在颗粒物 PM_{2.5} 以及 PM₁₀ 中占比达到 65%。此外，装载机、正面吊/轮胎吊的排放占比相当，而空箱堆高机和其它机械排放占比最低。

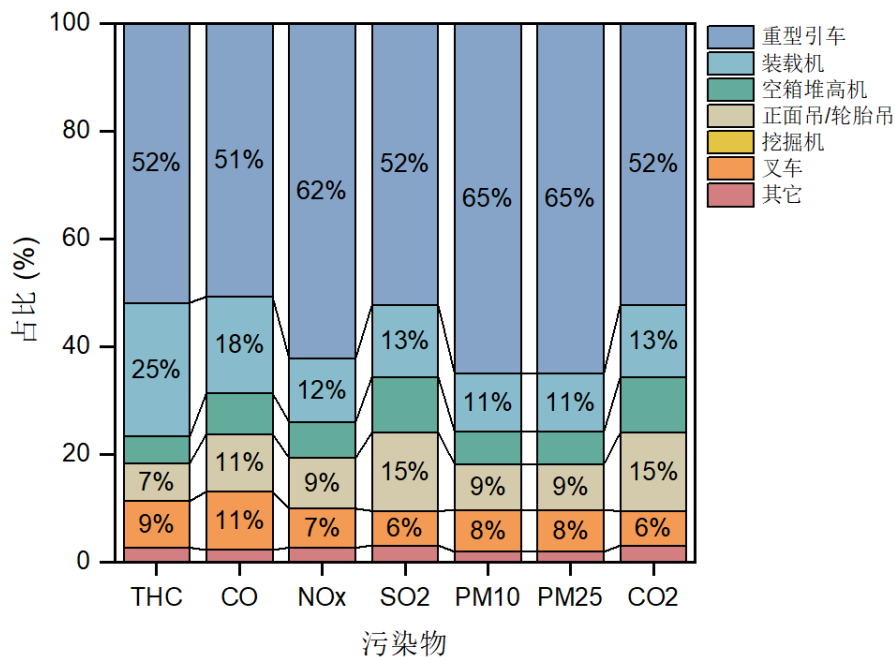


图 3.2-3 洋浦港不同港作机械排放占比

以港作机械的排放标准划分结果见图 3.2-4。在各类污染物中，国 1 机械排放占比最大（主要为重型引车），并在 NO_x、PM₁₀、PM_{2.5} 中占比均超过 50%，其次为国 3，而国 0 机械排放占比最小。

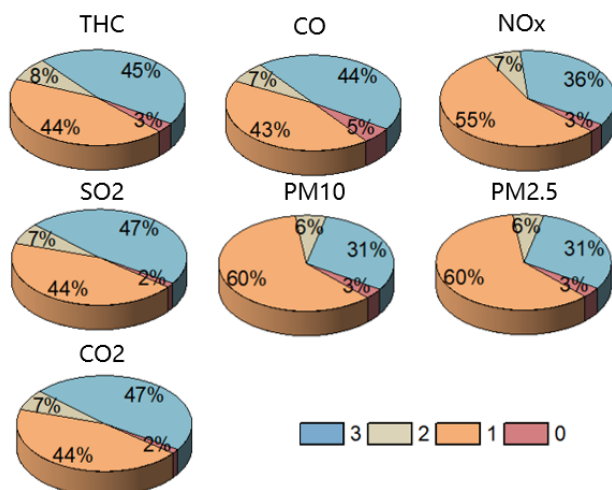


图 3.2-4 洋浦港不同港作机械排放占比

洋浦港分港作机械的各标准设备排放结果见图 3.2-5。由结果可知，重型引车中，国 1 设备排放占比最高，超过 80%；而装载机、正面吊/轮胎吊以及空箱

堆高机的排放主要来自于国 3 机械。此外，叉车排放主要来自于国 2 和国 0 机械，而其它港作机械的排放主要为国 2 机械，在各污染物中占比均超过 60%。

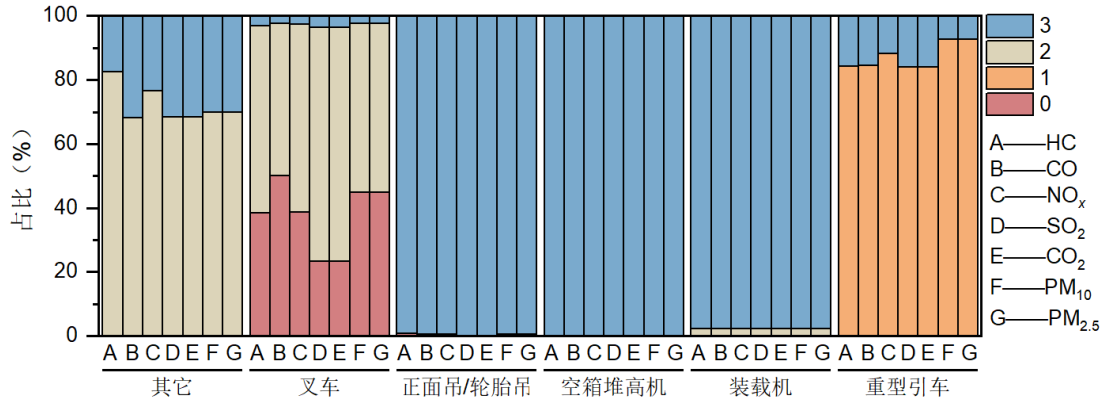


图 3.2-5 洋浦港分设备各标准港作机械排放占比

3.3 本章小结

本研究通过现场调查和数据调研，获取海南省儋州市国投裕廊洋浦港港作机械种类、保有量、功率分布和活动水平数据。进一步通过 MOVES 模型 nonroad 模块建立了本地化排放因子库，结合各货物吞吐量核算了 2022 年洋浦港港作机械排放清单。研究结果明确了主要污染源和主要污染物，为制定针对性的减排措施提供依据。

计算结果显示，就机械种类而言，各污染物分担率最高的机械为重型引车，约占排放总量的 55%；就排放阶段而言，对典型污染物分担率最高的机械为国 1 和国 3 标准机械，共计占比超过 80%。对首要污染物 NO_x，港作机械中以国 1 标准的排放分担率最高，占总排放 58%；重型引车中国 1 机械排放分担率最高，占总排放的 88%。岸桥、龙门起重机、门座式起重机的电动化率最高，装载机、重型引车的电动化率低，且数量较多、排放分担率高，是港作机械排放控制的重点与难点。

因此，针对未来洋浦港港作机械的减排路径，应主要从以下方面开展：（1）老旧港作机械淘汰：包括进一步推进包括叉车、集装箱正面吊、空箱堆高机以及重型引车在内的国 0、国 1、国 2 标准设备（销售年份早于 2016 年 4 月 1 日）

的淘汰进程，以减少高排放强度设备的使用；（2）港作机械清洁能源替代：持续推动港口清洁能源发展，针对主要排放源重型引车，积极推动电动化和其它清洁能源替代进程，以期能获取最大的减排效益。（3）提高港区智能化水平：加强物流与污染联合监控管理，一方面，通过优化运输路线提升运输效率，释放物流调度环节的减排潜力；同时，通过天地空检测设备进行污染物监控，识别排放热点区域，支撑管控措施及时落地。

第4章 海南港口集疏运车辆排放现状

4.1 港口集疏运货车排放计算方法

4.1.1 方法概述

本研究计算了洋浦港集疏港货车因港口货物运输需求，即货物从港口运输至目标公司或从生产公司运至港口，该过程产生的运输排放清单，并对排放进行空间分配，分析港口货运车的排放特征，评估减排潜力。研究的污染物包括 HC、CO、CO₂、SO₂、NO_x、PM。

本研究计算了 2022 年洋浦港货车排放清单并进行空间分配。货车排放数据通过洋浦港货运量进行计算，公式如下：

$$E = \sum_{i,j} A \times \alpha_i \times \beta_j \times l \times EF_{ij} \times 10^{-6} \quad (4-1)$$

其中： E 为污染物排放总量（t）， EF_{ij} 为污染物排放因子（g/km）， α_i 表示不同车型的货车占比，根据总质量分为重型、中型、轻型和微型， β_j 表示不同排放标准的货车占比， l 为进出港货车平均运距（km）， A 为进出洋浦港总货车车次，通过第一季度进出港车次推算得到全年进出港车次。

4.1.2 活动水平

本研究前往洋浦经济开发区的两个港口公司，国投洋浦港有限公司（以下简称国投洋浦）和洋浦国际集装箱码头有限公司（以下简称洋浦国际）进行调研，以确定本地活动水平。本研究通过收集公司门禁系统中的进出港货车信息和过磅信息，确定港口货物运输量；通过整理港口登记的车辆行驶证打印文件，收集港口车辆信息，包括排放标准、燃料类型、平均载重、车型等。具体数据内容及数据量如表 4.1-1 所示。

表 4.1-1 港口调研数据条目

港口公司	时间	数据类型	数据量（条）	日均（条）
国投洋浦		散货出港	12860	429

		散货进港	9274	309
	2023.1.1- 2023.3.30	集装箱	11223	374
		进港车辆	42610	1420
		进口箱	118	16
洋浦国际	2023.3.1-2023.3.7	出口箱	1993	284
		进港车辆	6503	929

本研究收集了两个公司 3 月前后的门禁数据，并计算单日平均车次分别为 339033 辆、174745 辆。由于我们收集了海南统计年鉴中洋浦港港口吞吐量数据，除重要节日（如春节、国庆）外，其变化并不明显（如图 4.1-1），因此我们认为可以使用 3 月左右的平均车次推算至港口全年。

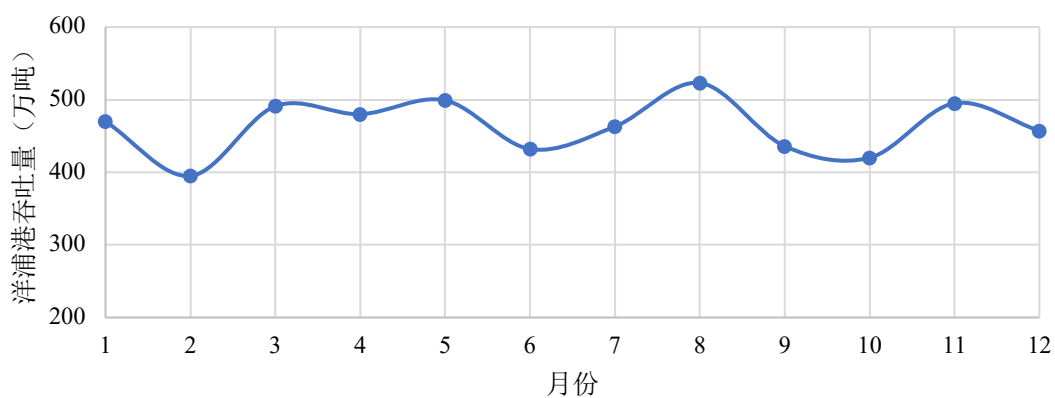


图 4.1-1 2021 年洋浦港吞吐量变化

本研究联系港口公司拿到纸质车辆登记表，手动录入行驶证信息，包括号牌号码、车辆类型、品牌型号、发动机号码、车辆识别代号、注册日期、整备质量、总质量、核定载质量、准牵引总质量、燃料类型。获取了 449 辆进出港货车信息，通过车辆识别代号匹配排放标准，计算港口货物平均运输车次和不同车队类型比例。港口货物平均运距来自《海南省统计年鉴》。

4.1.3 排放因子

污染物排放因子主要来自于《道路机动车排放清单编制技术指南》（后用《指南》代替），如表 4.1-2 所示。然而《指南》中对排放因子的测试主要针对柴油车，且缺乏最新国六标准和二氧化碳的排放数据，而洋浦港的天然气货车、国六标准车在车队中占比均较高，对排放的影响不可忽视，因此本研究进行了对货车排放因子的研究进行了文献调研，补充缺失的排放因子，最终应用于清单计算的排放因子如表 4.1-2 所示。

表 4.1-2 《指南》中不同排放标准的重型货运车排放因子（g/km）

排放标准	CO	HC	NOx	PM
柴油车-国三	2.79	0.255	7.934	0.27
柴油车-国四	2.2	0.129	5.554	0.153
柴油车-国五	2.2	0.129	4.721	0.03

SO₂、CO₂ 排放因子的推导依靠课题组之前相关项目中对重型货车排放特征的研究工作结论，使用不同排放标准下 SO₂、CO₂ 与其他气体的比例系数，如表 4.1-3。

表 4.1-3 重型车 CO₂、SO₂ 与其他气体排放比例关系

	CO ₂ /CO	SO ₂ /(CO+CO ₂ +VOC)
柴油车-国一前	44.12638	0.000212
柴油车-国一	103.6288	0.000217
柴油车-国二	194.7986	0.000218
柴油车-国三	215.0465	0.000218
柴油车-国四	272.7245	0.000219
柴油车-国五	272.6337	0.000219
柴油车-国六	272.6337	0.000219

表 4.1-4 通过文献调研完善后的货运车排放因子（g/km）

排放标准	CO	HC	NOx	PM	CO ₂	SO ₂
------	----	----	-----	----	-----------------	-----------------

柴油车-国三	3.357	0.287	6.762	0.673	730.574	0.160
柴油车-国四	2.354	0.165	4.559	0.300	649.6974	0.143
柴油车-国五	2.354	0.137	4.500	0.020	649.4811	0.143
柴油车-国六	1.795	0.040	0.100	0.020	495.250	0.109
天然气-国五	0.700	5.263	3.227	-	761.401	-
天然气-国六	0.350	5.263	0.725	-	761.401	-

4.1.4 空间分配方法

本研究以 12km 洋浦港货物平均运距为半径，划取港口货车排放影响区，并在该区域路网上对港口货车排放进行分配。首先统计排放影响区内不同类型道路的长度（表 4.1-5），考虑到货车运输的实际情况，本研究中的城市道路只包括一级和二级道路。

表 4.1-5 排放影响区内不同类型道路长度

道路类型	长度 (km)
城市道路	1123.77
省道	968.78
国道	154.55
高速	495.80

通过调研相关研究获取不同类型货车在不同道路上的 VKT 占比（表 4.1-6），作为空间分配的权重因子，将排放分配至 12km×12km 网格中。

表 4.1-6 文献中不同车型在不同道路上的 VKT 占比

	微型	轻型	中型	重型
城市道路	0.35	0.24	0.14	0.08
省道	0.19	0.34	0.19	0.14
国道	0.21	0.14	0.25	0.16
高速	0.22	0.27	0.39	0.58

其他	0.03	0.01	0.03	0.04
----	------	------	------	------

4.2 洋浦港集疏运货车排放核算及特征分析

4.2.1 港口货车车队构成与活动水平

洋浦经济开发区典型港口的集疏运货车车队构成与活动水平数据由实地调研得到。课题组在 2023 年 3 月 27 日至 2023 年 3 月 31 日（共 5 天）在洋浦国际集装箱码头有限公司和国投裕廊洋浦港有限公司开展了实地调研，通过与港口管理方沟通的行驶获得了进出港车队行驶证信息与某段时间内货车进出港信息（洋浦国际集装箱有限公司的时间段为 2023 年 3 月 1 日 00 时 00 分至 2023 年 3 月 7 日 23 时 59 分，国投裕廊洋浦港为 2023 年 1 月 1 日 00 时 00 分至 2023 年 3 月 30 日 10 时 59 分）。通过对两家港口公司的调研，本研究共收集到 449 条进出港车辆信息，其中有 448 条为重型货车，1 条为轻型货运车。



图 4.2-1 实地调研企业地理位置分布

4.2.1.1 车队构成

从车型来看，所调研的货车均为重型车，其中重型半挂牵引车为最主要的货车类型，约占总调研车辆的 92%。其次为重型自卸货车与重型罐式半挂车，分别占 3%和 2.8%。图 4.2-2 展示了车队的燃料类型分布，从燃料类型来看，约 59%的车为天然气车（264 条车辆信息），约 35%的车为柴油车（157 条车辆信息），6%的车的燃料类型未知。因为不同燃料类型的货车排放标准不同，且燃料类型为未知的货车的排放标准也未知，因此，排放标准分布的基数为已知燃料类型的 421 辆货车。图 4.2-3 展示了不同燃料类型货车的排放标准分布。总体而言，达到国五标准的货车占大多数（235 辆，约占 55.8%），其次为达到国六标准的货车（共 165 辆，约占 39.2%），有少量车为国四、国三标准的货车（分别占 4.8%和 0.2%）。若区分不同燃料类型的车，对柴油车而言，有 84.7%的柴油车达到了国五标准，2.5%的柴油车达到了国六标准，12.1%的柴油车达到了国四标准；对天然气车而言，有 61.6%的天然气车达到了国六标准，38.3%的天然气车达到了国五标准，其余为排放标准未知的货车占比。

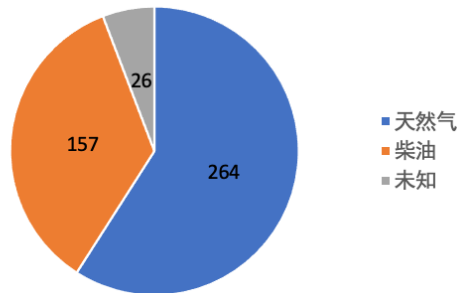


图 4.2-2 洋浦港集疏运货车燃料类型分布

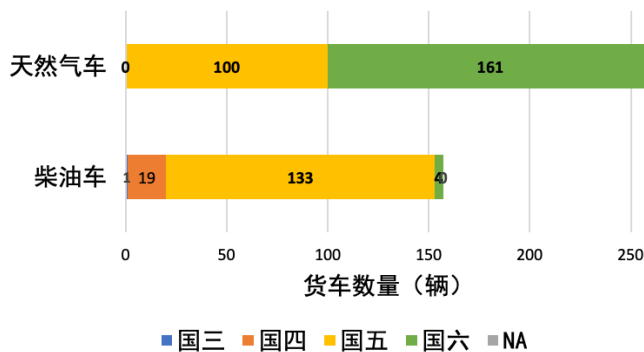


图 4.2-3 不同燃料类型的货车排放标准占比

95%的港口集疏运货车的排放标准都达到国五及以上，其中 87%的柴油车的排放标准都达到国五及以上，99%的天然气的排放标准都达到国五及以上。天然气的排放标准分布整体优于柴油车。

4.2.1.2 活动水平

在实地调研的两家港口企业中，国投裕廊洋浦港提供的数据时间段较长且包含进出港车辆的行驶里程数据，所以对货车车队活动水平的分析主要基于国投裕廊洋浦港的货车情况。

在 2023 年第一季度（2023 年 1 月 1 日至 2023 年 3 月 30 日），进出国投洋浦港的总车次为 42609，单日车次为 479 次。在 2023 年 3 月的第一周（2023 年 3 月 1 日至 2023 年 3 月 7 日），进出洋浦国际集装箱码头的总车次为 6502，单日车次为 929。如图 4.2-4 和图 4.2-5 所示，从贸易类型来看，国投洋浦港的货车运输货物以内贸为主，进出港车次中提箱与收箱的比例接近 1:1。

在进出国投洋浦港的货车行驶证信息中，共有 184 条货车信息包含行驶里程数据。表 4.2-1 展示了在国投洋浦港登记行驶证信息的集疏运货车的行驶里程数据。进出国投洋浦港的货车平均过去一年（即 2022 年）的行驶里程为 89564 千米，其中天然气车过去一年的平均行驶里程为 108219 千米，柴油车过去一年的平均行驶里程为 45922 千米。天然气的平均行驶里程与 2019 年全国货车平均行驶里程（102881 千米）接近，且远高于柴油车的平均行驶里程（约为柴油车的 2.4 倍）。据此可推断柴油车多被用于短距离运输，天然气多用于长距离运输。结合货车的车队构成与活动水平，可见从数量与运输距离的角度，洋浦港的集疏运货车以天然气车为主，柴油车的使用强度较小。

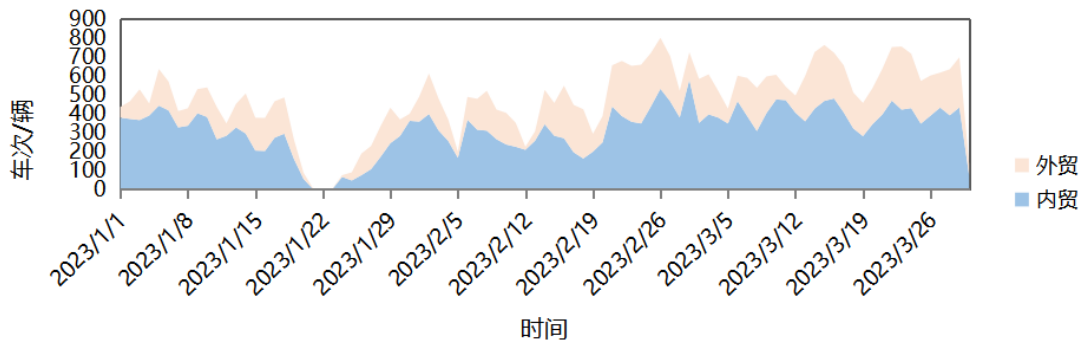


图 4.2-4 国投洋浦港进出港货车内外贸货物运输情况

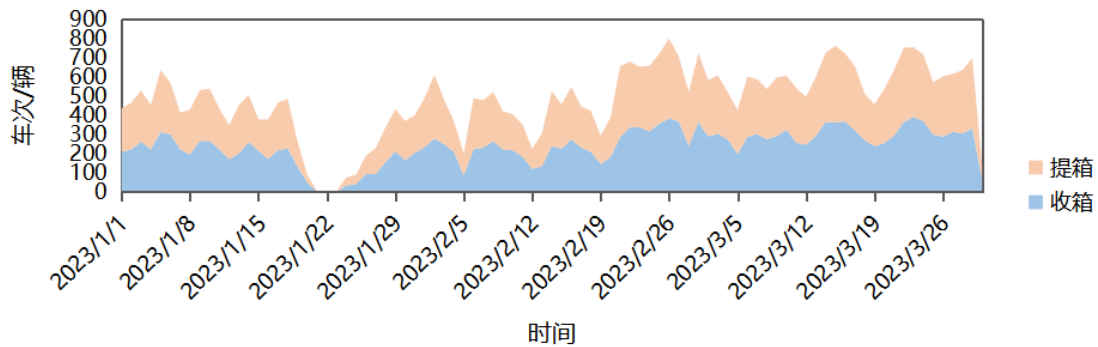


图 4.2-5 国投洋浦港进出港货车提箱收箱情况

表 4.2-1 国投裕廊洋浦港集疏运货车行驶里程数据

	去年一年的行驶里程 (km)			总行驶里程 (km)
	平均	2019 年全国平均	2019 唐山市平均	平均
总	89564	100375		252060
天然气车	108219			264159
柴油车	45922		89000 ±45000	225768

洋浦港集疏运货车的出发地/目的地可以大致分为市内、跨市区两类，市内出发/到达地包括金海浆纸、逸盛石化、海南炼化等洋浦经济开发区内的其他码头，跨市区出发/到达地集中在海口、儋州、三亚周边。跨市区的货车路线主要通过 G98 环岛高速（图 4.2-6）。



图 4.2-6 洋浦港集疏运货车主要行驶路线

4.2.2 港口货车排放清单

表 4.2-2 展示了 2022 年洋浦港集疏运车辆温室气体和大气污染物的排放情况。2022 年洋浦港集疏运货车在距离港口 12 千米的区域内共排放了 1.73 万吨 CO₂, 0.71 吨 PM₁₀, 74.91 吨 NO_x, 1.75 吨 SO₂, 34.80 吨 CO 和 66.41 吨 HC。不同燃料类型与排放标准的货车对不同污染物的贡献也有较大差异。图 4.2-7 展示了不同燃料类型、排放标准的货车对不同气体排放的贡献。天然气车在 SO₂、PM₁₀、NO_x、CO 的减排中表现较好, 对 SO₂ 和 PM₁₀ 的排放贡献小于 5%, 对 NO_x 和 CO 的排放贡献小于 30%。然而天然气车对 CO₂ 和 HC 的排放贡献较大, 对 CO₂ 的排放贡献约为 55% (略小于天然气车在车队数量上的占比 59%), 对 HC 的排放贡献约为 97%。柴油车在 SO₂、PM₁₀、NO_x、CO 的减排中表现较差, 其中国四标准的柴油车相比国五标准的柴油车贡献了更多的 PM₁₀ 排放, 尽管国四标准的柴油车在数量构成上远小于国五标准的柴油车。

表 4.2-2 2022 年洋浦港集疏运货车 12km 排放清单

排放量 (吨)	CO	HC	NO _x	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂
---------	----	----	-----------------	------------------	-----------------	-----------------

柴油-国三	0.26	0.02	0.53	0.05	57.22	0.01
柴油-国四	3.50	0.25	6.78	0.45	966.69	0.21
柴油-国五	24.52	1.43	46.87	0.21	6764.51	1.49
柴油-国六	0.56	0.01	0.03	0.01	155.15	0.03
天然气-国五	3.30	24.79	15.20	0.00	3586.66	0.00
天然气-国六	2.65	39.92	5.50	0.00	5774.57	0.00
总排放	34.80	66.41	74.91	0.71	17304.79	1.75

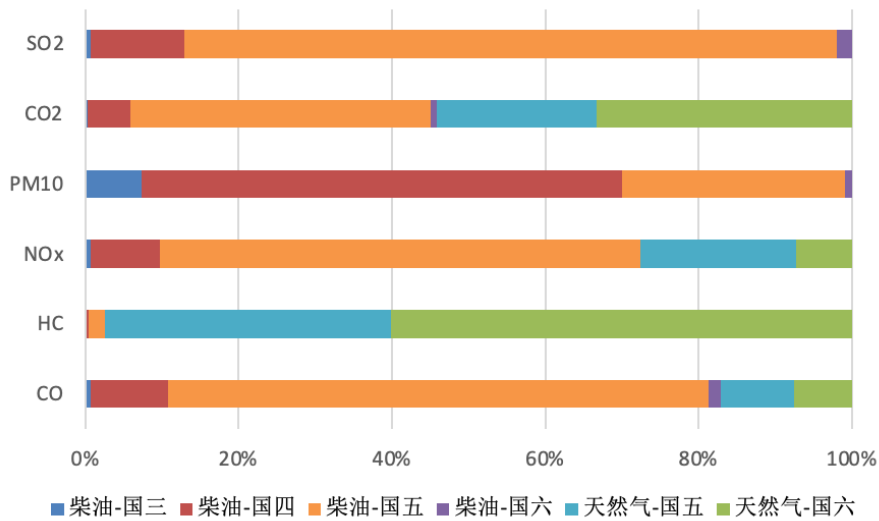


图 4.2-7 2022 年洋浦港集疏运货车 12km 排放贡献

4.2.3 排放空间分布

图 4.2-8 展示了洋浦港集疏运货车排放的空间分布。各类温室气体和大气污染物排放集中在 G98 环岛高速与洋浦经济开发区与儋州市之间的万洋高速。

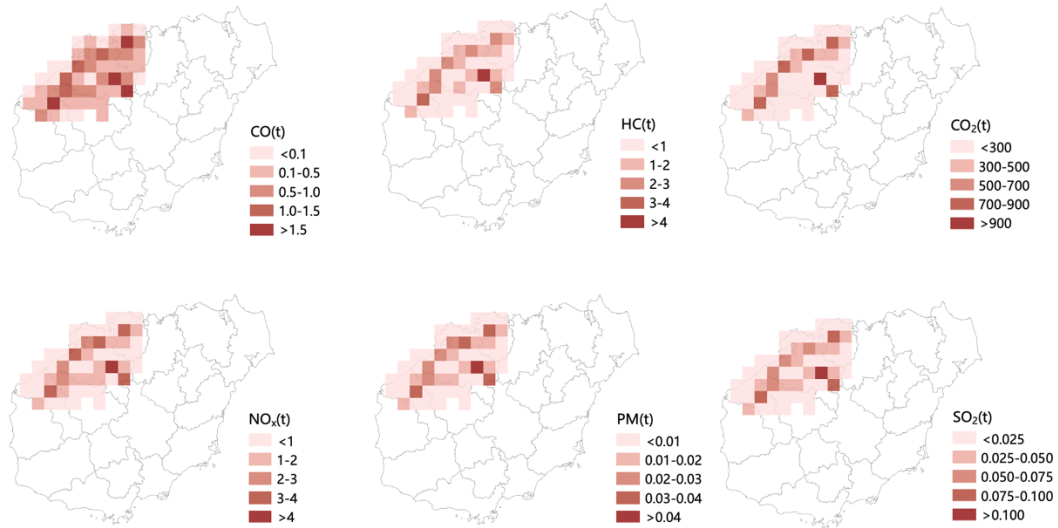


图 4.2-8 2022 年洋浦港集疏运货车排放空间分布

4.4 本章小结

本研究通过现场调查和数据调研，获取海南省儋州市国投裕廊洋浦港和洋浦国际集装箱码头进出港货车数据。进一步通过文献调研建立了本地化排放因子库，结合进出港货车车次核算了 2022 年洋浦港进出港货车排放清单。研究结果明确了主要污染源和主要污染物，为制定针对性的减排措施提供依据。

2022 年洋浦港集疏运货车在距离港口 12 千米的区域内共排放了 1.73 万吨 CO_2 ，0.71 吨 PM_{10} ，74.91 吨 NO_x ，1.75 吨 SO_2 ，34.80 吨 CO 和 66.41 吨 HC 。天然气车对 CO_2 和 HC 的排放贡献较大，柴油车在 SO_2 、 PM_{10} 、 NO_x 、 CO 的减排中表现较差，尽管国四标准的柴油车在数量上少于国五标准的柴油车，但国四标准的柴油车却贡献了更多的 PM_{10} 排放。

第5章 海南港口与船舶减排政策建议

5.1 海南船舶排放控制区减排效益评估

5.1.1 2019-2022 年海南 DECA 政策演变

2018 年，我国交通运输部印发了《船舶大气污染物排放控制区实施方案》^[53]，将控制区沿海水域扩展至全国领海基线外延 12 海里内的所有海域和港口，包括海南水域及其港口；内河控制区则纳入沿海地级以上城市行政辖区内的内河通航水域以及长江干线通航水域。“控硫”是《船舶大气污染物排放控制区实施方案》的关键措施。其规定了 2019 年 1 月 1 日起，海船进入排放控制区，应使用硫含量不大于 0.5% m/m 的船用燃油，大型内河船和江海直达船舶应使用符合新修订的船用燃料油国家标准要求的燃油。2022 年 1 月 1 日起，海船进入沿海控制区海南水域，应使用硫含量不大于 0.1% m/m 的船用燃油。沿海排放控制区海南水域的地理范围如图 5.1-1 所示，同本研究定义的海南 12Nm 区一致。

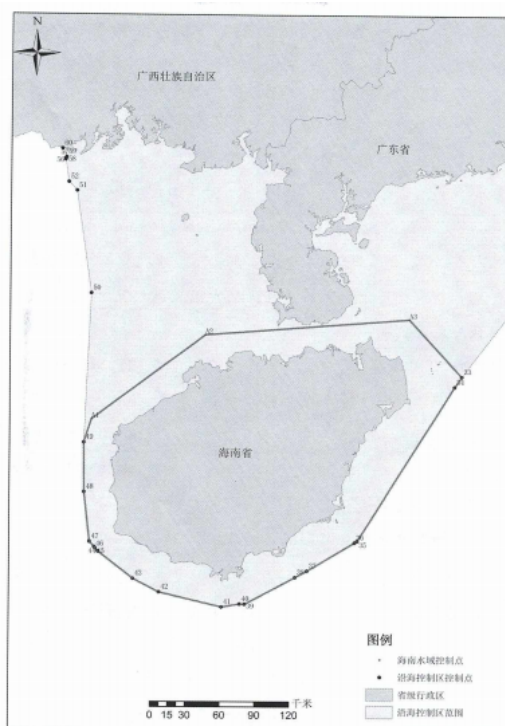


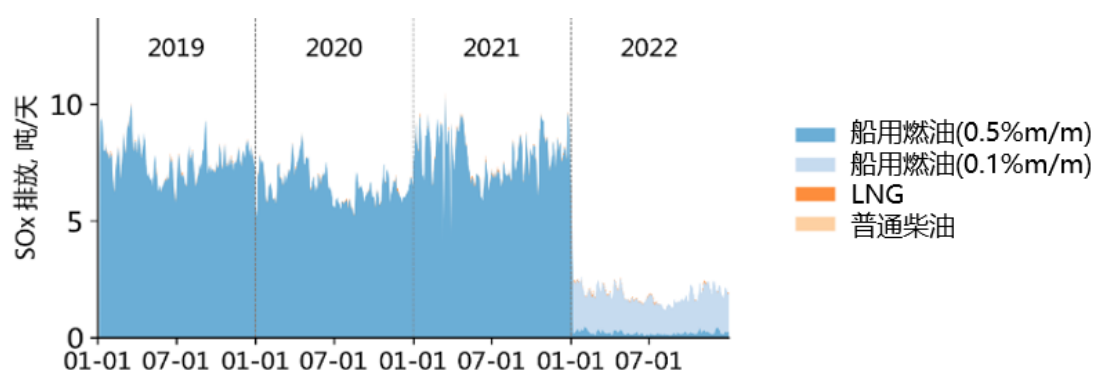
图 5.1-1 沿海控制区海南水域范围示意图^[8]

IMO 的“限硫令”于 2020 年 1 月 1 日开始实施，其规定全球范围内船用燃油硫含量不超过 0.5% m/m ^[54]。可以看出，我国沿海船舶排放控制区海南水域的

措施实施前于国际标准。2022 年海南水域对船舶燃料硫含量的要求更是进一步提高，凸显了海南作为绿色发展的先锋和生态文明建设的典范的雄心。体现了海南省致力于减轻船舶排放对环境的影响，推动航运业向更加绿色、可持续发展的方向。

5.1.2 DECA 政策演变下的逐日船舶排放

本研究假设沿海船舶控制区海南水域的船舶完全遵守交通运输部《船舶大气污染物排放控制区实施方案》的规定，使用对应硫含量的燃油。燃油硫含量对船舶 SO_x 和一次颗粒物排放的影响最大。图 5.1-2 展示了 2019-2022 年海南 12Nm 区船舶逐日 SO_x 、PM（硫酸盐）和 NO_x 的排放趋势。2019-2021 年，海南 12Nm 区船舶排放的 SO_x 、PM（硫酸盐）和 NO_x 的 95% 以上都是由使用硫含量不超过 0.5% m/m 的船舶贡献的，日排放量约为 6.8 吨/天、1.0 吨/天和 36.1 吨/天。海南 DECA 政策实施后，硫含量不超过 0.1% m/m 的轻柴油的贡献上升。2022 年，船舶 SO_x 排放和 PM（硫酸盐）的排放量相较 2021 年分别下降了 73.9% 和 49.0%。但 DECA 政策对 NO_x 的减排效果有限，2022 年，船舶 NO_x 排放量相较 2021 年仅下降了 24.3%。



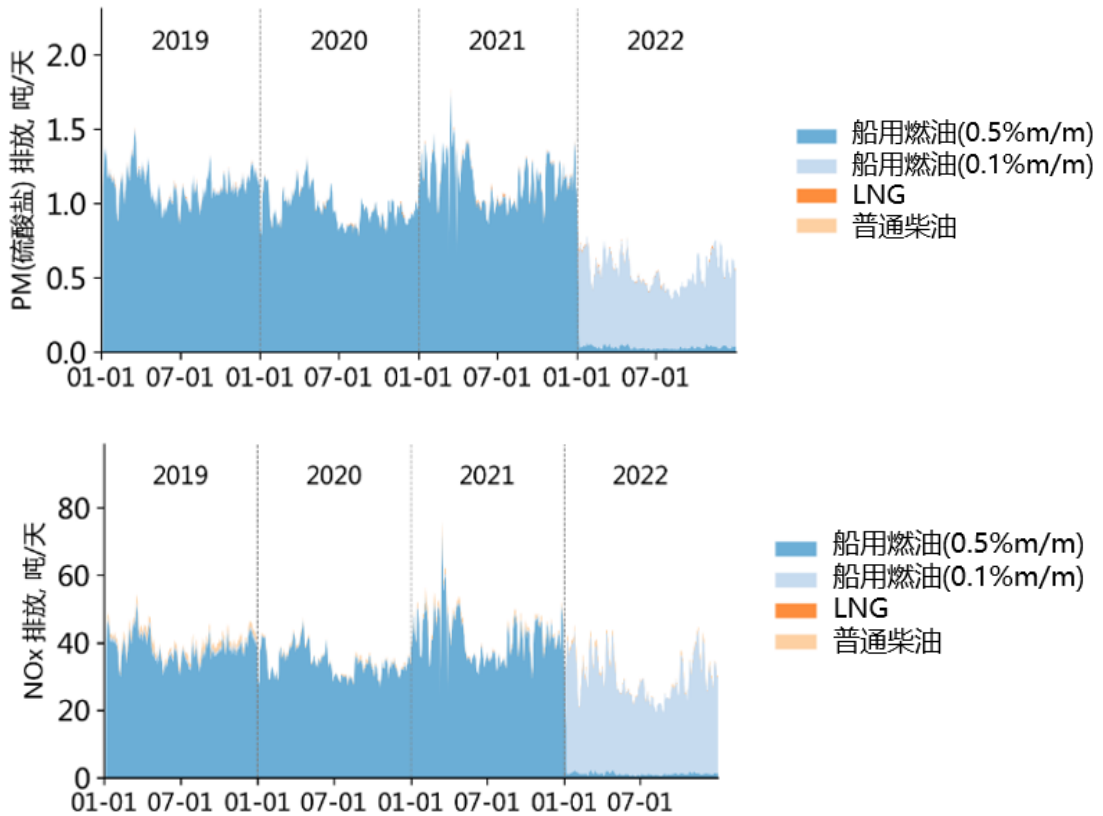


图 5.1-2 DECA 政策演变下的海南 12Nm 区逐日船舶 SO_x 、PM（硫酸盐）和 NO_x 排放

5.1.3 基于反事实情景的减排效益分析

本研究对船舶排放的估算均基于以当年的实际船舶活动水平和政策实施方案为基础，通过与上一年度对比来分析政策对船舶减排的效益。然而，该结果实际为减排政策与船舶活动水平变化共同影响下的总效益。为了进一步探究政策的绝对减排效益，本研究设置了一个假设的无政策情景，通过模拟 2019-2022 年期间不实施政策时船舶排放的变化，并将其与基准情景对比，来解析研究区域内排放控制政策和船舶活动水平变化对排放的绝对影响。在 Base 情景中，所有政策按实际执行情况进行设置，而无政策情景中，2019-2020 年间对于所有船舶均不设置控制区和燃料要求，即保持在无 DECA 政策的水平。

通过实地调研得知，海南省超低硫油（硫含量不高于 $0.1\% \text{m/m}$ ）的供应目前可能存在一定短缺。因此如果按照基准情景对船舶排放的估算与假设，很可能存在对海南 12Nm 区船舶排放的低估的情况。为了进一步探究超低硫油供应不足的情况对 DECA 政策减排效益的影响，本研究进一步设置了超低硫油供应不足情景。通过模拟 2022 年仍然维持 2019-2021 年的政策水平下船舶排放的变

化，并将其与基准情景对比，来分析供应不足对海南省船舶排放的影响。在供应不足情景中，2019-2021 年的控制区和燃料要求与基准情景相同。而在供应不足情景中，2022 年仍然使用之前海南船舶排放控制区设置的燃料硫含量不高于 0.5% m/m 的燃油标准。表 5.1-1 所示为基准情景、燃料供应不足情景和无政策情景的具体设置。

表 5.1-1 本研究中的 DECA 政策情景设置

	基准情景	0.1%燃油供应不足情景	无 DECA 政策情景
AIS 数据	2019-2022	2019-2022	2019-2022
政策设置	DECA 2.0 与海南 DECA 政策相继实施	DECA 2.0 政策实施	无 DECA 政策
燃油设置	燃油硫含量限值从 0.5% m/m 降低到 0.1% m/m	燃油硫含量限值 0.5% m/m	无要求

图 5.1-3 所示为 2019-2022 年基准、燃料供应不足和无政策情景下海南 12Nm 区内船舶 SO_x 、PM（硫酸盐）和 NO_x 排放的年际变化。若不采取任何船舶排放控制政策（无政策情景），海南省 12Nm 船舶 SO_x 、PM（硫酸盐）和 NO_x 的年均排放量分别预计将为 12.9 千吨/年、1.5 千吨/年和 14.2 千吨/年。与基准情景对比，研究区域内 DECA 政策的减排效益约 10.8 千吨 SO_x /年、1.2 千吨/ PM（硫酸盐）年和 0.8 千吨 NO_x /年。DECA 政策有效地减少了船舶 SO_x 、PM（硫酸盐）的排放至无政策情景的 16.6% 和 22.4%。但对船舶 NO_x 的减排效益有限，仅减少了无政策情景的 5.8%。近 10 年内（活动在海南省大部分船舶距离成为老旧船舶的时间）可通过船舶发动机改造或加装后处理装置等方式减少 NO_x 排放，中远期需要提升氢燃料等清洁能源船舶在新船中的比例。

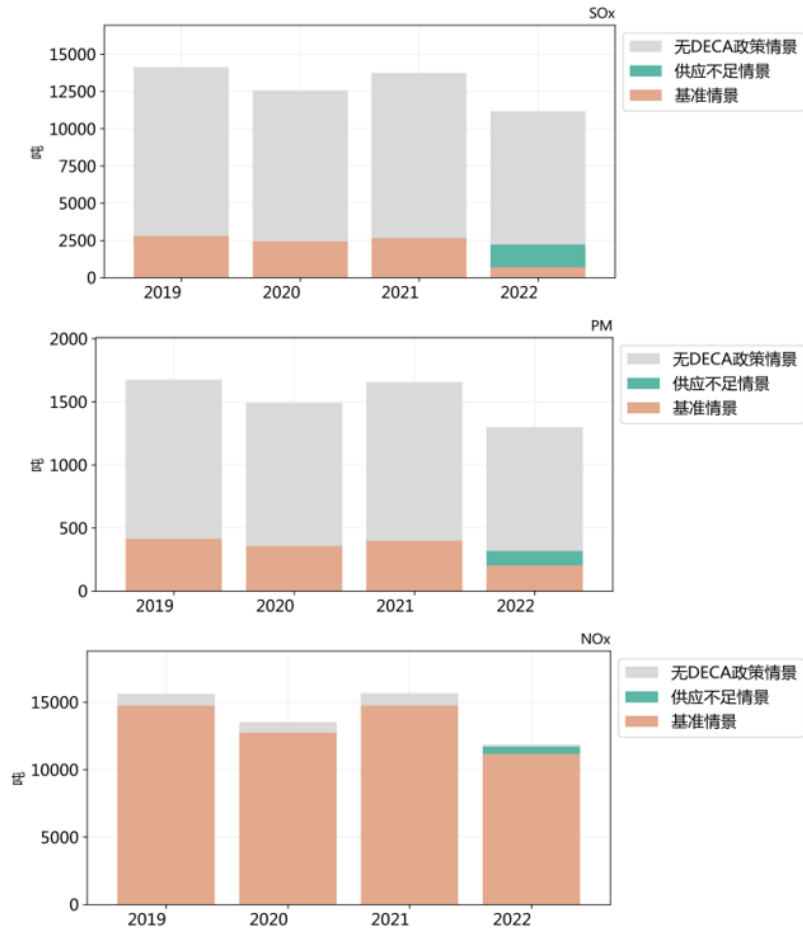


图 5.1-3 三种情景下 2019-2022 年海南 12Nm 区船舶 SO_x、PM（硫酸盐）、NO_x 排放年际变化

如果 2022 年 0.1%*m/m* 硫含量的燃油供应不足，那么 DECA 政策的控制效果将无法达到上述评估的程度。将供应不足情景与基准情景相比较，可以发现如果完全不使用 0.1%*m/m* 硫含量的燃油，那么 2022 年海南省 12Nm 船舶 SO_x、PM（硫酸盐）和 NO_x 的年均排放量将为 2.2 千吨/年、0.3 千吨/年和 11.7 千吨/年，比基准情景增加 1.5 千吨/年、0.1 千吨/年和 0.5 千吨/年，升幅约为 220.7%、56.5%和 4.8%。

5.2 不同排放源对海南省港口减排的影响

5.2.1 研究现状

5.2.1.1 港口排放核算边界

港口排放源种类繁多，港口排放清单的建立是一项综合性复杂的工程。港口排放清单主要涉及与货物运输有关的排放。如果考虑生命周期评估（LCA），相关电网的排放也应包括在清单中。

如果排放源的范围不相同，港口排放可能会产生巨大差异。因此，计算港口排放的首要步骤是确定排放核算边界。IMO 将港口排放源分为三个范围。范围 1 代表直接由港口运营管理的直接排放源，包括港口拥有的船队车辆，港口管理部门拥有或租赁的车辆，建筑物中的锅炉和熔炉，港口拥有和运营的货物装卸设备以及港口管理当局拥有和运营的任何其他排放源^[55]。范围 2 代表港口间接排放源，包括为港口管理部门拥有的建筑物和运营购买的电力。租户电力和能源购买不包括在此范围内。范围 3 包括与租户操作关联的其他间接源，例如船舶、卡车、货物装卸设备（CHE）、铁路机车、港口船只、租户建筑、租户购买的电力和港口员工车辆。对于拥有大量租户的港口，范围 3 通常是温室气体排放的最大来源^[55]。大多数港口排放清单选择范围 3 或其中的一部分作为其研究区域。

5.2.1.2 港口排放清单

美国洛杉矶港（POLA）从 2001 年起发布基于活动法的年度港口排放清单。洛杉矶港的排放清单是全球首份公开发表的港口排放清单，也是评估圣佩德罗湾港（San Pedro Bay Ports, SPBP）清洁空气行动计划（Clean Air Action Plan, CAAP）减排措施及美国联邦和加利福尼亚州颁布的减排法规的主要工具。

表 5.2-1 2022 年洛杉矶港港口排放清单

排放量 (吨)	PM ₁₀	PM _{2.5}	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC	CO _{2e}
远洋船	66	60	43	3369	129	360	143	271236
港作船舶	13	13	13	499	0	100	25	50811

货物装卸	12	11	11	425	2	672	88	170634
设施								
铁路	26	24	26	717	1	175	41	61145
货车	5	5	5	756	4	355	44	420243
总	123	114	98	5765	136	1662	341	974069

洛杉矶港排放清单的计算方法与加州空气资源委员会（California Air Resource Board, CARB）规定中的方法一致。远洋船舶（Ocean-Going Vessel）、港作船舶、卡车和货车装卸设备的排放量都是根据活动数据估算的，而部分铁路排放量是根据燃料消耗估算的^[56]。对于远洋船而言，不同操作模式（过境、锚地、泊位和机动）的排放计算方法略有不同。一般来说，远洋船排放量是船舶电力需求与排放因子乘积的函数。港作船舶的排放量基于发动机的型号年份、额定功率和年运行小时数得到。在计算货物装卸设施的排放量时，应使用控制因子来反映由于使用柴油机氧化型催化器（DOC）和柴油颗粒过滤器（DPF）等各种技术而导致的减排量。与各类减排技术相关的控制因子采用 CARB 验证或协商通过的数据。

Geerlings 提出了一种方法来粗略估计鹿特丹港集装箱码头的二氧化碳排放量^[57]。该研究旨在为港口当局提供一种估计港口排放并确定减少排放的最有效措施的工具，因此方法学和输入数据较为简单易用。其中，输入数据包含港口吞吐量、港口运营模式划分、码头配置和码头布局。码头配置是指各类货物装卸运输设备（如码头起重机、驳船起重机）的数量。码头布局是指设备到子过程的距离。结果表明，对于现有的集装箱码头，“快速更换柴油设备”和“混合可持续生物柴油燃料”是两种易于实施的减排措施，可显著降低二氧化碳排放量。最具潜力的长期零排放技术是基于氢、生物质、太阳能和风能的各种形式的电力。

Villalba 使用现有方法估算巴塞罗那港的海上排放量和陆地运营排放量^[58]。海上排放量的计算采用美国环保署的方法，根据活动水平估计，活动水平数据包括到达或离开港口、巡航和停泊状态所花费的时间。计算结果显示，2008 年巴塞罗那港共排放 331390 吨二氧化碳当量气体，其中约一半由海上排放贡献，

另一半由陆地排放贡献。单位货运量排放最高的船型是汽车运输船，每吨货物的温室气体排放量为 6 公斤。

Yang 归纳了港口货运系统的基本要素和主要碳排放源，提出港口一体化物流系统的概念。运输、重型设备、材料消耗和能源消耗是四个主要港口碳排放源。对深圳港进行的案例研究提供了一种测量港口综合物流系统中碳排放的方法^[59]。山东港务集团的港口排放清单是由中国港务局发布的第一份港口排放清单。清单计算的排放源包括货物装卸运输设备、卡车、铁路、船舶和港作船舶，排放的计算综合采用了燃料法、距离法和活动水平法^[60]。

表 5.2-2 总结了不同港口排放清单的研究。港口排放的范围不同，港口的排放源也不同，计算范围因研究而异。本研究旨在为海南寻找航运清洁低碳转型的路径，因此将排放计算范围定为船舶、卡车、货物装卸运输设备和港作船舶，它们代表了港口中最主要的货运活动。

表 5.2-2 港口排放清单研究总结

港口	年份	排放源	计算方法	文献来源
洛杉矶港	2022	船舶，货物装卸运输设备，港作船舶，卡车	活动法	Starcrest Consulting Group ^[61]
鹿特丹港	2011	货物装卸运输设备	燃料法，活动法	Geerlings and van Duin ^[57]
巴塞罗那港	2008	船舶 货物装卸运输设备， 卡车	活动法 燃料法/能源法	Villalba and Gemechu ^[58]
山东港	2020	供暖，电力，垃圾 货物装卸运输设备， 铁路，港作船舶 卡车	能源法，经验公式 燃料法 距离法	山东省港口集团 ^[60]

		船舶	活动法	
		船舶, 货物装卸运输设备	活动法	
深圳港	2013	卡车	距离法	Yang ^[59]
	2014	铁路	燃料法	
		供暖, 电力, 垃圾	能源法, 经验公式	

5.2.2 洋浦港港口排放清单

5.2.2.1 核算边界

本研究的港口排放核算边界基于货物在港口发生的三类运输模式：货物通过水运运入/运出港口（排放源为船舶）、货物在港口内的装卸搬运（排放源为港作机械）、货物通过集疏运货车运入/运出港口（排放源为货车）排放计算公式见式 5-1，港口建筑物的供暖、电力排放则不在本研究的港口排放边界内。因此本研究计算的港口排放能较全面反映由港口物流导致的排放。

$$E_{\text{港口}} = E_{\text{船舶 (12Nm区域)}} + E_{\text{港作机械}} + E_{\text{货车 (12km区域)}} \quad (5-1)$$

其中船舶排放指洋浦港周边 12 海里区域的船舶排放，以下用船舶（12 Nm 区域）代指。12 Nm 区域发生的船舶排放量被证明对中国的空气污染和人类健康有重大贡献，且该区域是船舶交通最密集、航线最复杂的水域。货车排放指以 12 千米为平均运距的货车排放影响区，用货车（12 km 区域）代指，与第 4 章的计算边界一致。其中 12 km 范围为海南省港口货物的平均运距，能较好代表港口货物使用货车运入/运出产生的排放。港作机械排放的计算边界、方法与第 3 章一致。

5.2.2.2 计算结果

表 5.2-3 为 2022 年洋浦港排放清单，2022 年洋浦港共排放 23.7 万吨 CO₂，172.2 吨 SO_x，2560.2 吨 NO_x，176.3 吨 HC，56.7 吨 PM，215.1 吨 CO，各排放源的贡献可见图 5.2-1。不同排放源对不同污染物的排放贡献存在一定差异。对于各类大气污染物和温室气体，船舶仍然贡献了大部分排放。对于 PM、CO₂、

NO_x、SO_x，船舶排放的贡献在 75%以上，对 SO_x 的贡献可达 95%以上。但是对于 CO 和 HC，港作机械和货车贡献了约 50%的排放。整体而言，船舶排放仍然是港口减排的控制重点，货车与港作机械对港口排放的贡献较小。

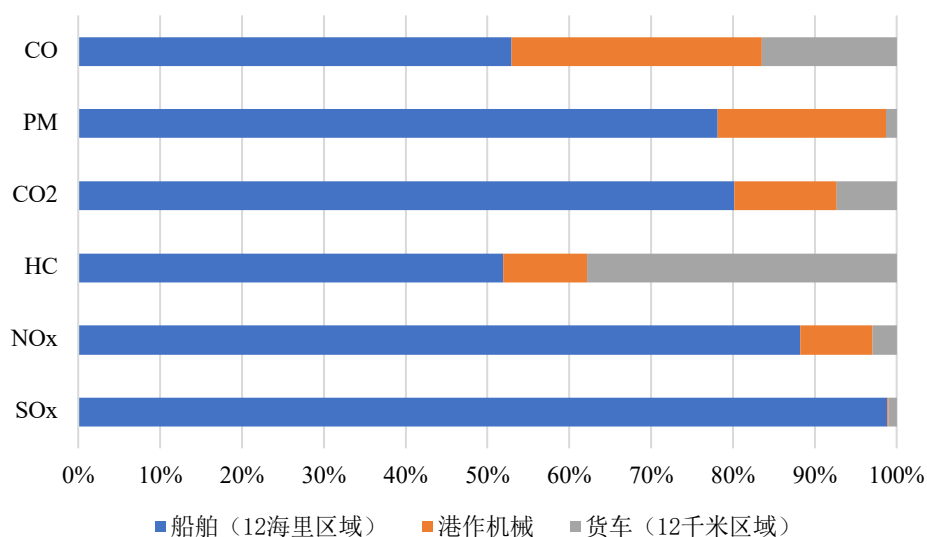


图 5.2-1 2022 年洋浦港各排放源排放贡献

表 5.2-3 2022 年洋浦港排放清单

排放 (吨)	SO _x	NO _x	HC	CO ₂	PM	CO
船舶 (12海里区域)	170.2	2246.2	91.2	189561.0	43.8	111.6
港作机械	0.2	239.1	18.7	29901.0	12.2	68.7
货车 (12千米区域)	1.8	74.9	66.4	17304.8	0.7	34.8

从建设零碳港口的角度，港作机械与货车使用零排放燃料可以带来约 20% 的降碳效益，剩余 80%的碳排放减排需要通过船舶减排措施如岸电与清洁船舶替代能源达成。船舶替代能源的选择与推进进度与海南省的能源产业发展相关，将船用能源清洁化与本地能源产业发展相结合可以实现海南自由贸易港的绿色发展，而海南省建立清洁能源加注站则是将两者结合的一条路径。

5.3 基于邻近航程排放的加注站潜力分析

5.3.1 计算边界与方法

本部分计算对象为航程途经海南岛（不包含南沙群岛、西沙群岛等海南省四大群岛）周边海域的邻近航程，计算边界为 2022 年全球航程中途径海南岛离岸 200 海里的航程的排放（以下简称 200Nm 区域）。选择 200Nm 区域的原因有：（1）海南岛离岸 200Nm 存在大量没有停靠海南省的航线；（2）对于中途/长途航线，从原始航线偏航至 200 海里处的海南停靠加注的航程增量相比原始航程在可接受范围内。海南岛离岸 12 海里、100 海里与 200 海里的区域范围如图 5.3-1 所示。

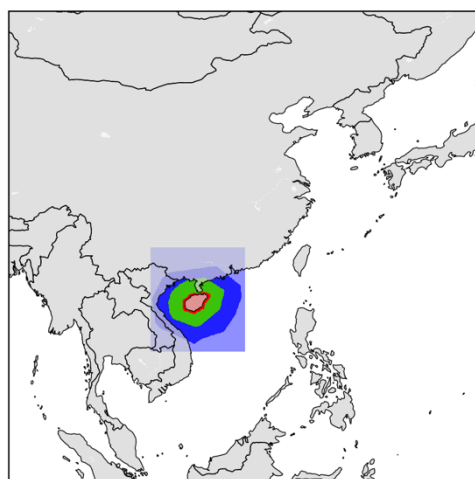


图 5.3-1 海南岛离岸 12 海里、100 海里与 200 海里的区域范围

5.3.2 途径海南岛 200Nm 区域的邻近航程排放

在 2022 年全球海运航线中筛选出途径海南岛 200Nm 区域的邻近航程得到图 5.3-2。邻近航程主要集中在东亚、东南亚，但也有较多航程通过马六甲海峡通往南亚与霍尔木兹海峡、亚丁湾，少量航程抵达非洲、北美与南美。

2022 年，途径海南岛 200Nm 区域的航程全航程排放为 201.17 万吨 CO₂，927.82 吨 PM，45447.85 吨 NO_x，5298.37 吨 SO_x，1876.80 吨 CO，占 2022 年全球国际航程总排放的 0.28%至 0.36%，约为靠港海南省的航程总排放的 5.7 倍。其中，超过 70%的排放由国内航线、中国-东南亚航线贡献。

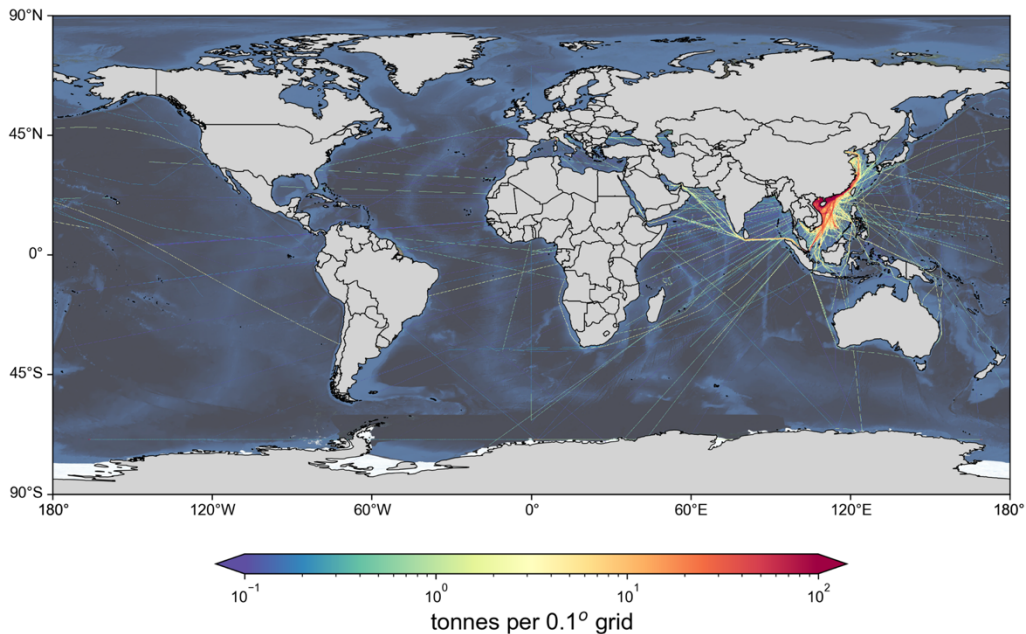


图 5.3-2 2022 年全球途经海南省沿岸 200 海里的航线

途径海南岛 200Nm 区域的国内航线排放了 131.95 万吨 CO₂，646.47 吨 PM，30093.8732 吨 NO_x，3662.21 吨 SO_x，1245.88 吨 CO，约为靠港海南省航线总排放的 3.7 倍，占途径海南离岸 200 海里总航线的 65%。途径海南省沿岸 200 海里的中国-东南亚（泰国、缅甸、马来西亚、新加坡、印度、印尼）航线（图 5.3-3）排放了 15.68 万吨 CO₂，40.77 吨 PM，1714.72 吨 NO_x，236.78 吨 SO_x，73.03 吨 CO，约为靠港海南省航线总排放 CO₂ 的 45%，对其余大气污染物的贡献较小，约为 22%。东南亚内部航线（图 5.3-4）排放主要集中在越南沿海，有部分航线排放分布在越南、菲律宾、新加坡、马来西亚间。途径海南省沿岸 200 海里的东南亚内部航线排放了 17.22 万吨 CO₂，89.91 吨 PM，3825.22 吨 NO_x，511.11 吨 SO_x，168.99 吨 CO，约为靠港海南省航线总排放的 50%。

如果海南省建立了零碳船用能源加注站，除了可以实现靠港海南省航程带来的 80 万吨减排，还可实现由途经海南岛 200Nm 范围的国内航线、国内-东南亚航线、东南亚航线贡献的 164.85 万吨 CO₂ 排放的减排，并有助于 201.17 万吨途经海南岛 200Nm 范围的国际航程 CO₂ 排放的减排。

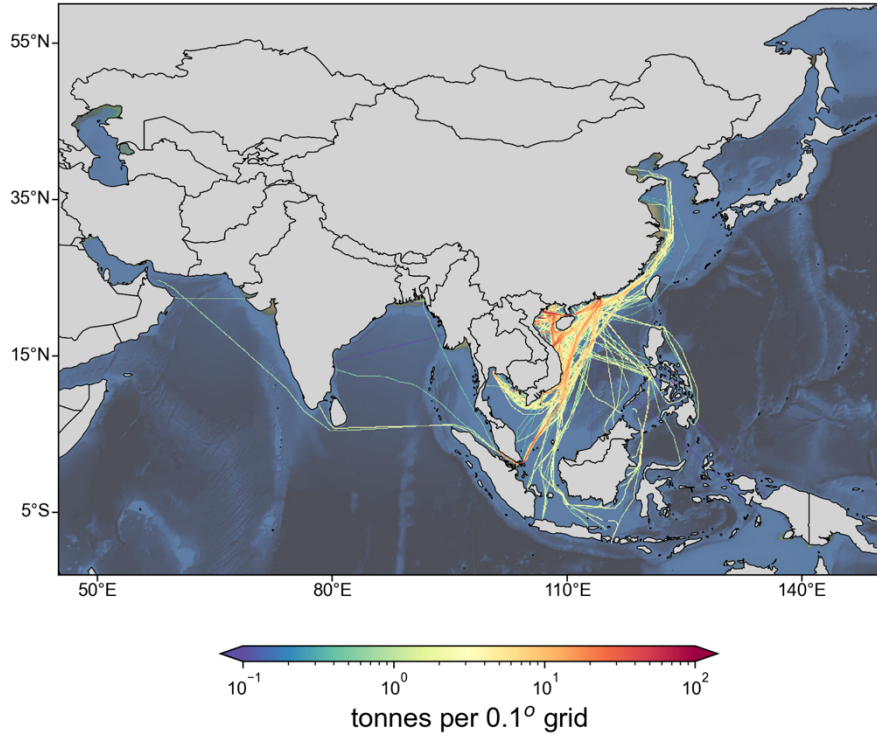


图 5.3-3 途径海南岛离岸 200 海里的中国-东南亚航线

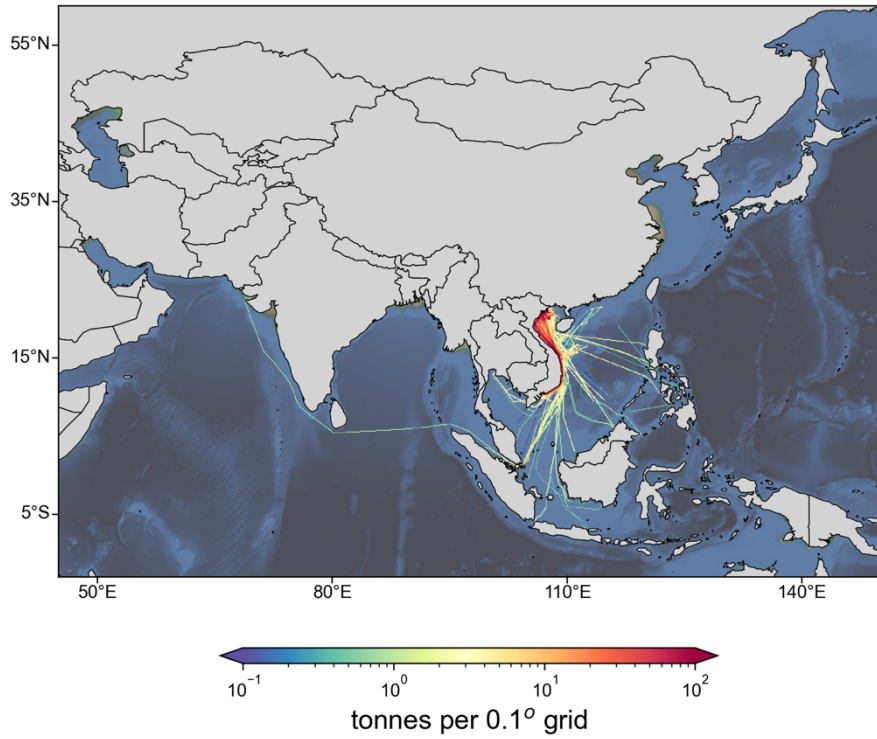


图 5.3-4 途径海南岛离岸 200 海里的东南亚航线

5.4 本章小结

(1) DECA 政策减排效益

本研究计算了 DECA 政策下 2019 年至 2022 年船舶污染物的排放演变，且构建的反事实情景能够支持 DECA 政策减排效益的后评估。2022 年，船舶 SO_x 排放和 PM（硫酸盐）的排放量相较 2021 年分别下降了 73.9%和 49.0%，但船舶 NO_x 排放量相较 2021 年仅下降了 24.3%。

DECA 政策对海南 12Nm 区的船舶 SO_x 和 PM（硫酸盐）的减排效果非常显著。但政策目前仍然存在一些不足。首先，DECA 政策对 NO_x 减排效果有限，年均减排效益相对于无政策情景来说为 5.8%。此外，低硫船舶燃料的供应和排放监管对 DECA 政策取得的减排效果也很重要。如果燃料供应短缺，2022 年海南省 12Nm 船舶 SO_x、PM（硫酸盐）和 NO_x 的年均排放量将最多相对于基准情景上升 220.7%、56.5%和 4.8%。如果存在船舶违规使用超限值的燃油，也将使 DECA 政策无法完全取得理论减排效果。

(2) 各排放源对港口排放的贡献

本研究以海南省儋州市洋浦港为例，研究了与港口货物运输相关的三类排放源（船舶、港作机械、集疏运货车）对港口排放的贡献。2022 年，洋浦港共排放 23.7 万吨 CO₂，172.2 吨 SO₂，2560.2 吨 NO_x，176.3 吨 HC，56.7 吨 PM，215.1 吨 CO。

从大气污染物控制角度，船舶仍然是港口排放的重要贡献源，对于 PM、CO₂、NO_x、SO_x，船舶排放的贡献在 75%以上，对 SO_x 的贡献可达 95%以上。货车与港作机械排放对港口大气污染物排放的贡献较小。

对建设零碳港口而言，港作机械与货车使用零排放燃料可以带来约 20%的降碳效益。剩余 80%的碳排放减排需要通过船舶减排措施如岸电与清洁船舶替代能源达成。船舶替代能源的选择与推进进度与海南省的能源产业发展相关，将船用能源清洁化与本地能源产业发展相结合可以实现海南自由贸易港的绿色发展，而海南省建立清洁能源加注站则是将两者结合的一条路径。

（3）基于邻近航程排放的零碳燃料加注站潜力分析

本研究发 2022 年途径海南 200 海里范围的所有航程（国际航程和国内航程）排放约为 200 万吨 CO₂，占全球国际航程总排放的 0.3%。邻近航程主要集中在东亚、东南亚，但也有较多航程通过马六甲海峡通往南亚与霍尔木兹海峡、亚丁湾，少量航程抵达非洲、北美与南美。海南省 12 海里区年均船舶排放的 CO₂ 约为 80 万吨，如果海南作为零碳燃料加注站，有望实现比自身航运清洁化（80 万吨的减排量）更大的减排效益。

第6章 结论与展望

6.1 结论与建议

6.1.1 海南省港口与船舶排放现状

(1) 船舶排放现状

海南沿岸 12 海里以内海域的运输船舶排放的 SO_x 、 NO_x 、HC、 CO_2 、PM（硫酸盐）、CO 分别为 2.7 千吨/年、14.0 千吨/年、0.6 千吨/年、930.4 千吨/年、0.4 千吨/年和 0.7 千吨/年，仅占中国 12 海里区域相同方法统计的排放量的 0.5%-1.5%。海南省 12 海里区船舶排放的网格排放强度平均为 0.1 吨 SO_x /0.01°网格、0.3 吨 NO_x /0.01°网格、18.6 吨 CO_2 /0.01°网格（约为 1 千米网格），是中国沿海 12 海里区域船舶排放平均网格排放强度的 6.4%-7.4%。在数量上，海南 12Nm 区的外国船旗的船舶占比为 56.2%。而中国 12Nm 区的中国船旗的船舶占比为 27.8%，海南区域有更多的外国籍船舶活动。在所有船型中，散货船贡献了船舶排放的 35.6%-43.5%，其次是滚装船和集装箱船，分别贡献了船舶排放的 22.6%-24.5%和 22.6%-26.3%。不同的船舶类型的排放贡献的特点与货物种类有关，反映了海南的航运以能源、矿产、粮食等干散货的运输，以及制造业、贸易主导的滚装货物和集装箱货物的运输为主。在燃油方面，使用硫含量不超过 0.5% m/m 的轻柴油的船舶贡献了 95.1%-96.5%的的船舶排放。对于 SO_x 和 PM 这类主要受燃油质量影响的污染物来说，使用 MGO 作为燃料的船舶几乎贡献了全部的排放量。随着海南航运清洁化政策措施的落地和基础设施的建设，也有一部分船舶使用 LNG 作为替代能源，LNG 的排放贡献约为 1.5%。

在靠港海南省的航线中，海南省内航线贡献了大部分温室气体与大气污染物排放。2022 年，海南省内航线对靠港海南省航线的温室气体与大气污染物排放的贡献约为 46%。海南-广东航线对靠港海南航线的温室气体与大气污染物排放的贡献约为 9%。海南-浙江航线、海南-广西航线、海南-山东航线、海南-福建航线对靠港海南航线的温室气体与大气污染物排放的贡献约为 9%。国际航线中，海南-越南航线、海南-菲律宾航线共同对靠港海南航线的温室气体与大气污染物排放的贡献约为 4%。2022 年过境海南 200 海里范围的航程排放约为 200 万吨 CO_2 ，占全球国际航程总排放的 0.3%，约为靠港海南省航线总排放的 5.7

倍。其中超过 70%的排放由国内航线、中国-东南亚航线贡献。东南亚航线排放主要集中在越南沿海，有部分航线排放分布在越南、菲律宾、新加坡、马来西亚间，对温室气体和大气污染物的贡献约为靠港海南省航线总排放的 50%。

（2）港作机械排放现状

将 2020 年国投裕廊洋浦港的港作机械排放结合货运量分析，计算得到洋浦国际集装箱码头、其它码头以及整个洋浦港的港作机械产生的 THC、CO、NO_x、SO₂、PM₁₀、PM_{2.5} 以及 CO₂ 总量分别为 15.95 吨、62.70 吨、230.72 吨、0.16 吨、11.91 吨、11.55 吨以及 26684.71 吨。由结果可知，由于非道路机械采用车用柴油，其含硫量较低（低于 10 ppm），港作机械产生的 SO₂ 排放较低，而 NO_x 的排放仍处于较高水平，是目前港口排放的主要污染物

就机械种类而言，各污染物分担率最高的机械为重型引车，约占排放总量的 60%；就排放阶段而言，对典型污染物分担率最高的机械为国 1 和国 3 标准机械，共计占比超过 80%。对首要污染物 NO_x，港作机械中以国 1 标准的排放分担率最高，占总排放 58%；重型引车中国 1 机械排放分担率最高，占总排放的 88%。岸桥、龙门起重机、门座式起重机的电动化率最高，装载机、重型引车的电动化率低，且数量较多、排放分担率高，是港作机械排放控制的重点与难点。

（3）货车排放现状

2022 年洋浦港集疏运货车在距离港口 12 千米的区域内共排放了 1.73 万吨 CO₂，0.71 吨 PM₁₀，74.91 吨 NO_x，1.75 吨 SO₂，34.80 吨 CO 和 66.41 吨 HC。不同燃料类型与排放标准的货车对不同污染物的贡献有较大差异。天然气车在 SO₂、PM₁₀、NO_x、CO 的减排中表现较好，对 SO₂ 和 PM₁₀ 的排放贡献小于 5%，对 NO_x 和 CO 的排放贡献小于 30%。然而天然气车对 CO₂ 和 HC 的排放贡献较大，对 CO₂ 的排放贡献约为 55%（略小于天然气车在车队数量上的占比 59%），对 HC 的排放贡献约为 97%。柴油车在 SO₂、PM₁₀、NO_x、CO 的减排中表现较差，尽管国四标准的柴油车在数量上少于国五标准的柴油车，但国四标准的柴油车却贡献了更多的 PM₁₀ 排放。

6.1.2 海南省港口与船舶清洁化政策建议

(1) 现有 DECA 政策对 NO_x 的减排效果有限，需要求船舶加装后处理装置或发动机改造加强对 NO_x 排放的管控，并落实对低硫船舶燃料的供应和排放监管

2019-2021 年，海南 12Nm 区船舶排放的 SO_x、PM（硫酸盐）和 NO_x 的 95% 以上都是由使用硫含量不超过 0.5%_{m/m} 的船舶贡献的，日排放量约为 6.8 吨/天、1.0 吨/天和 36.1 吨/天。海南 DECA 政策实施后，硫含量不超过 0.1%_{m/m} 的轻柴油的贡献上升。2022 年，船舶 SO_x 排放和 PM（硫酸盐）的排放量相较 2021 年分别下降了 73.9% 和 49.0%。但 DECA 政策对 NO_x 的减排效果有限，2022 年，船舶 NO_x 排放量相较 2021 年仅下降了 24.3%。

若不采取任何船舶排放控制政策（无政策情景），海南省 12Nm 船舶 SO_x、PM（硫酸盐）和 NO_x 的年均排放量分别预计将为 12.9 千吨/年、1.5 千吨/年和 14.2 千吨/年。与基准情景对比，研究区域内 DECA 政策的减排效益约 10.8 千吨 SO_x/年、1.2 千吨/PM（硫酸盐）年和 0.8 千吨 NO_x/年。DECA 政策有效地减少了船舶 SO_x、PM（硫酸盐）的排放至无政策情景的 16.6% 和 22.4%。但对船舶 NO_x 的减排效益有限，仅减少了无政策情景的 5.8%。

DECA 政策对海南 12Nm 区的船舶 SO_x 和 PM（硫酸盐）的减排效果非常显著。但政策目前仍然存在一些不足。首先，DECA 政策对 NO_x 减排效果有限，年均减排效益相对于无政策情景来说为 5.8%。近 10 年内（活动在海南省大部分船舶距离成为老旧船舶的时间）可通过船舶发动机改造或加装后处理装置等方式减少 NO_x 排放，中远期需要提升氢燃料等清洁能源船舶在新船中的比例。

此外，低硫船舶燃料的供应和排放监管对 DECA 政策取得的减排效果也很重要。如果燃料供应短缺，2022 年海南省 12Nm 船舶 SO_x、PM（硫酸盐）和 NO_x 的年均排放量将最多相对于基准情景上升 220.7%、56.5% 和 4.8%。如果存在船舶违规使用超限值的燃油，也将使 DECA 政策无法完全取得理论减排效果。后续应进一步完善 DECA 政策，加强对 NO_x 的排放控制。此外，保证低硫船舶燃料的供应和排放监管（如船舶是否存在违规使用超限值的燃油的情况）。

(2) 运输船队主要为散货船、油船且船龄集中在 10 年及以上，需加强对于海南省内及海南-国内航行的散货船、油船、滚装船排放监管，并优先对该类船舶进行岸电、尾气处理设备加装、清洁燃料试点

海南省 12 海里区海南区域有更多的外国籍船舶活动，鉴于海南省 12Nm 水域外籍船舶占比较大，且以大中型集装箱船和普通货船为主，在未来的自贸港建设中应该重视对外籍船舶的管理和排放控制。在所有船型中，散货船贡献了最多的船舶排放，其次是滚装船和集装箱船，这几类船舶有更高的减排潜力。省内航线、海南-广西航线、海南-广东航线贡献了大部分的靠港航程排放。在进行海南航运清洁低碳转型时，应该首先控制省内航线排放和与临近省份（广西省、广东省、福建省）的航线排放。

在海南岛 12 海里范围内活动的船舶中，滚装船的数量少，但是对于 12 海里内的船舶排放贡献较大，控制滚装船的排放可以达到较高的减排效率与减排效果。散货船的数量与排放占比均比较高，因此散货船的 12 海里内船舶减排的重点控制类型。

在靠港海南省的省内航线与海南-国内航线中，散货船贡献了大部分排放，是减排需要关注的重中之重。对海南省内航线而言，油船、普通货船、滚装船与集装箱船的排放贡献也不可忽视，且几乎所有海南省内航线排放由建造年份在 2000 年至 2010 年的船舶贡献。对于海南-国内航线，油船、化学品船与液化气船也应重点控制。从船龄看，建造年份在 2000 年至 2010 年的船舶仍然贡献了约 95%的排放，但也存在少量建造年份晚于 2010 年的船舶排放。

综合船型的航次数量占比与船型、船龄的排放贡献占比可以得到需要重点控制的船舶类型。对于海南省内航线和海南-国内航线而言，船龄 10 年以上的散货船、油船在航次数量与排放贡献占比均比较高，该类船的船龄与我国沿海省际干散货船、油船的船龄接近，距离成为老旧船舶（散货船船龄达到 18 年，油船船龄达到 12 年）尚存在一定的缓冲期。对于油船而言，大部分船舶船龄邻近老旧，航线以海南省内、海南-国内航线为主，在购置新船时可以增加甲醇、氢能等使用清洁能源船舶的比例，并加快老旧船舶的淘汰。对于散货船而言，距离被淘汰还剩余约 8 年的时间，在近期可以考虑加装尾气处理设施、使用岸电，在远期也需提升清洁能源船舶在新船中的占比。散货船与油船分别与煤炭、矿

产运输与燃料运输相关，可以从形成固定上下游运输关系的航程入手，推动这两类船舶的燃料清洁化、零碳化。

（3）不同类型的港作机械电动化水平差异大，重型引车、装载机是下一步港作机械电动化的重点与难点

岸桥、龙门起重机、门座式起重机的电动化率最高，装载机、重型引车的电动化率低，且数量较多、排放分担率高，是港作机械排放控制的重点与难点。因此积极推动重型引车和装载机的电动化进程可以获得最大的电动化收益。此外，应进一步推进包括叉车、集装箱正面吊、空箱堆高机以及重型引车在内的老旧设备（国 0、国 1、国 2 标准的港作机械，即销售日期早于 2016 年 4 月 1 日的设备）淘汰进程，以减少高排放强度设备的使用。

（4）港口集疏运车队以重型天然气货车为主，但柴油车的排放也不可忽视，应加快淘汰国四标准的柴油车，并逐步推进氢能在港口货车中的使用

港口运输车队中，柴油车在 SO₂、PM₁₀、NO_x、CO 的减排中表现较差，尽管国四标准的柴油车在数量上少于国五标准的柴油车，但国四标准的柴油车却贡献了更多的 PM₁₀ 排放。

应加快提高国五、国六标准货车在车队中的占比。对于清洁燃料选择，受电池自重影响电动化的可行性较低，应推进氢能在港口集疏运货车中的使用。针对现有货车车队中的天然气车，应减缓配置天然气车，并逐步用氢动力货车取代柴油车与天然气车。此外，应提高港区智能化水平，加强物流与污染联合监控管理，一方面，通过优化运输路线提升运输效率，释放物流调度环节的减排潜力；同时，通过天地空检测设备进行污染物监控，识别排放热点区域，支撑管控措施及时落地。

（5）零碳能源加注站的减排潜力大，可与本地能源产业协同发展

途径海南省 200 海里范围的所有航程（国际航程和国内航程）排放约 200 万吨，占国际航运排放的 0.3%。海南省 12 海里区年均船舶排放的 CO₂ 约为 80 万吨。海南省建设零排放燃料加注中心有望实现比自身航运清洁化更大的减排效益。海南“十四五”规划和 2035 年远景目标提出海南省要建设海南自由贸易港船用燃料油和航空煤油加工项目。以儋州市洋浦经济开发区为例，在港口附近

有大片石化与炼油项目区，为氨、甲醇等清洁船舶替代能源的加工、加注提供产业基础。

6.2 展望

该研究主要对海南省水域船舶排放现状、典型港口港作机械、集疏运货车排放现状进行了资料收集、整理与计算分析，计算了海南 12 海里多年际船舶排放清单，从航程角度解析海南省周边海域的船舶排放，收集洋浦经济开发区典型港口企业港作机械与集疏运货车的本地化数据，并计算洋浦港港作机械与集疏运货车的排放现状。该研究的进行为中国港口排放研究提供了系统的方法论，并通过一系列典型案例的分析，为政府等决策部门提供了港口排放管理与控制政策的制定与实施提供了数据支持。

该研究还存在可以改进、完善的空间，主要体现在以下三点：

(1) 需要进行更多港口实地调研，形成更加完整的本地化数据库。不同港口的主要货物类型不同，港作机械的构成也有很大差异。洋浦港主要以货物运输为主，海口港近年来则正向客运转型，现有基于洋浦港的港口设施数据库不一定准确描述海口港的现状，需要进一步开展对海口港的实地调研。

(2) 基础数据的质量和完整性问题。报告中部分关于国内外航运相关数据来源于商业或研究机构发布的报告，数据的可靠性有待商榷，同时，对于中国内河和沿海的船舶 AIS 数据，来源于商业机构，船舶静态信息、船舶动态位置信息等可能存在不完整或不准确的问题。

(3) 围绕海南省清洁航运发展路径展开进一步研究。海南省航运发展在全国范围来看已经是排放强度较低、相对清洁的水平，海南省航运排放需要在此基础上进一步探索出再降低的新路径。因此接下来需结合对未来经济发展水平的预测、货运需求的预测等，构建近中期海南省船舶、港作机械和货车的减排路径。本研究发现途径海南省 200 海里范围的所有航程（国际航程和国内航程）排放约 200 万吨，占国际航运排放的 0.3%。海南省 12 海里区年均船舶排放的 CO₂ 约为 80 万吨。海南省建设零排放燃料加注中心有望实现比自身航运清洁化更大的减排效益。因此，未来进一步评估海南省建设零碳燃料加注中心、构建“绿色走廊”的可行性和减排潜力，可以为面向“减污降碳、协同增效”目

标的海南省清洁航运发展政策制定提供技术支撑和政策建议。

参考文献

- [1] USEPA. Non-road Engine and Vehicle Emission Study——Report and appendixes [J]. 1991,
- [2] 刘欢, 商轶, 金欣欣, et al. 船舶排放清单研究方法及其进展 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(01): 1-12.
- [3] LIU H, SHANG Y, JIN X, et al. Review of methods and progress on shipping emission inventory studies [J]. Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(1): 1-12.
- [4] ENDRESEN Ø, SØRGÅRD E, SUNDET J K, et al. Emission from international sea transportation and environmental impact [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D17):
- [5] CAPALDO K, CORBETT J J, KASIBHATLA P, et al. Effects of ship emissions on sulphur cycling and radiative climate forcing over the ocean [J]. Nature, 1999, 400(6746): 743-6.
- [6] LAWRENCE M G, CRUTZEN P J. Influence of NO_x emissions from ships on tropospheric photochemistry and climate [J]. Nature, 1999, 402(6758): 167-70.
- [7] EYRING V. Emissions from international shipping: 1. The last 50 years [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D17):
- [8] EYRING V. Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050 [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D17):
- [9] STREETS D G, CARMICHAEL G R, ARNDT R L. Sulfur dioxide emissions and sulfur deposition from international shipping in Asian waters [J]. Atmospheric Environment, 1997, 31(10): 1573-82.
- [10] WANG X-T, LIU H, LV Z-F, et al. Trade-linked shipping CO₂ emissions [J]. Nature Climate Change, 2021, 11(11): 945-51.
- [11] CORBETT J J, KOEHLER H W. Updated emissions from ocean shipping [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D20):
- [12] ENDRESEN Ø, SØRGÅRD E, SUNDET J K, et al. Emission from international sea transportation and environmental impact [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D17):
- [13] WANG C, CORBETT J J, FIRESTONE J. Modeling Energy Use and Emissions from North American Shipping: Application of the Ship Traffic, Energy, and Environment Model [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(9): 3226-32.
- [14] JALKANEN J P, BRINK A, KALLI J, et al. A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area [J]. Atmos Chem Phys, 2009, 9(23): 9209-23.
- [15] JALKANEN J P, JOHANSSON L, KUKKONEN J. A comprehensive inventory of ship traffic exhaust emissions in the European sea areas in 2011 [J]. Atmos Chem Phys, 2016, 16(1): 71-84.

- [16] JALKANEN J P, JOHANSSON L, KUKKONEN J, et al. Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide [J]. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12(5): 2641-59.
- [17] FABER J H S, ZHANG S, ET AL. London: IMO, 2020.
- [18] LIU H, FU M, JIN X, et al. Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1037-41.
- [19] CHEN D, WANG X, LI Y, et al. High-spatiotemporal-resolution ship emission inventory of China based on AIS data in 2014 [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 609(776-87).
- [20] FU M, LIU H, JIN X, et al. National- to port-level inventories of shipping emissions in China [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(11):
- [21] LI C, BORKEN-KLEEFELD J, ZHENG J, et al. Decadal evolution of ship emissions in China from 2004 to 2013 by using an integrated AIS-based approach and projection to 2040 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(8): 6075-93.
- [22] FAN Q, ZHANG Y, MA W, et al. Spatial and seasonal dynamics of ship emissions over the Yangtze River Delta and East China Sea and their potential environmental influence [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(3): 1322-9.
- [23] CHEN D, ZHAO N, LANG J, et al. Contribution of ship emissions to the concentration of PM_{2.5}: A comprehensive study using AIS data and WRF/Chem model in Bohai Rim Region, China [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 610-611(1476-86).
- [24] 邢辉, 段树林, 黄连忠, et al. 基于 AIS 数据的渤海湾地区海运排放测算 [M]//邢辉, 段树林, 黄连忠, et al. *中国环境科学*. 2016: 953-60.
- [25] LI C, YUAN Z, OU J, et al. An AIS-based high-resolution ship emission inventory and its uncertainty in Pearl River Delta region, China [J]. *Sci Total Environ*, 2016, 573(1-10).
- [26] 叶斯琪, 郑君瑜, 潘月云, et al. 广东省船舶排放源清单及时空分布特征研究 [M]//叶斯琪, 郑君瑜, 潘月云, et al. *环境科学学报*. 2014: 537-47.
- [27] NG S K W, LOH C, LIN C, et al. Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 76(102-12).
- [28] FENG J, ZHANG Y, LI S, et al. The influence of spatiality on shipping emissions, air quality and potential human exposure in the Yangtze River Delta/Shanghai, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(9): 6167-83.
- [29] CHEN D, ZHAO Y, NELSON P, et al. Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 145(10-8).
- [30] 尹佩玲, 黄争超, 郑丹楠, et al. 宁波-舟山港船舶排放清单及时空分配特征 [M]//尹佩玲, 黄争超, 郑丹楠, et al. *中国环境科学*. 2017: 27-37.
- [31] CHEN D, WANG X, NELSON P, et al. Ship emission inventory and its impact on the PM_{2.5} air pollution in Qingdao Port, North China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 166(351-61).
- [32] 谭建伟, 宋亚楠, 葛蕴珊, et al. 大连海域远洋船舶排放清单 [M]//谭建伟, 宋亚楠, 葛蕴珊, et al. *环境科学研究*. 2014: 1426-31.

- [33]ZHANG Y, GU J, WANG W, et al. Inland port vessel emissions inventory based on Ship Traffic Emission Assessment Model–Automatic Identification System [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(7): 1687814017712878.
- [34]LIU H, MENG Z-H, LV Z-F, et al. Emissions and health impacts from global shipping embodied in US–China bilateral trade [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(11): 1027-33.
- [35]LOEFF W S V D, GODAR J, PRAKASH V. A spatially explicit data-driven approach to calculating commodity-specific shipping emissions per vessel [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,
- [36]COP 26: Clydebank Declaration for green shipping corridors [M]//TRANSPORT D F. 2022.
- [37]ELISE GEORGEFF X M, DAN RUTHERFORD, LIUDMILA OSIPOVA: THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION, 2020.
- [38]GETTING-TO-ZERO-COALITION, 2021.
- [39]MMMCZCS: Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, 2022.
- [40]XIAOLI MAO D R, LIUDMILA OSIPOVA, BRYAN COMER: THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION, 2020.
- [41]MINGLIANG FU H L, XINXIN JIN, KEBIN HE. National- to port-level inventories of shipping emissions in China [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(11):
- [42]LIU H, SHANG Y, JIN X, et al. Review of methods and progress on shipping emission inventory studies [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1): 1-12.
- [43]WANG X, YI W, LV Z, et al. Ship emissions around China under gradually promoted control policies from 2016 to 2019 [J]. *Atmos Chem Phys*, 2021, 21(18): 13835-53.
- [44]FABER J H S, ZHANG S. London: IMO, 2020.
- [45]中华人民共和国交通运输部. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [46]冯玉松. MOVES-西安排放模型的建立及污染评估应用 [D]; 长安大学, 2019.
- [47]郭园园. MOVES-深圳模型的构建及其模拟机动车排放因子的应用 [D]; 哈尔滨工业大学, 2014.
- [48]中华人民共和国生态环境部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南 (试行) [M]. 2014.
- [49]冯玉松. MOVES-西安排放模型的建立及污染评估应用 [D], 2019.
- [50]郭园园. MOVES-深圳模型的构建及其模拟机动车排放因子的应用 [D], 2014.
- [51]胡明伟, 汤静妍, 刘鹏. 中国与欧美非道路移动机械排放标准对比分析 [J]. *中国环境管理*, 2021, 13(3): 66-73.
- [52]郑春芳, 庞永胜, 李长豫. 国内非道路柴油移动机械排放标准发展综述 [J]. *内燃机与配件*, 2023, 1): 115-7.
- [53]中华人民共和国交通运输部. 船舶大气污染物排放控制区实施方案 [M/OL]. 2018[2023.9.28]. <https://www.msa.gov.cn/page/article.do?articleId=6545D5FF-6617-4B20-9BE5-7C8D77636AFF>.
- [54]中华人民共和国海事局. 中华人民共和国海事局关于发布《2020 年全球船用

- 燃油限硫令实施方案》的公告 [M]. 2019.
- [55] IAPH G-U-I G P A, 2018.
- [56] STARCREST CONSULTING GROUP L, 2021.
- [57] GEERLINGS H, VAN DUIN R. A new method for assessing CO₂-emissions from container terminals: a promising approach applied in Rotterdam [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(6): 657-66.
- [58] VILLALBA G, GEMECHU E D. Estimating GHG emissions of marine ports—the case of Barcelona [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(3): 1363-8.
- [59] YANG L, YIJI CAI, XIAOZHE ZHONG, YONGQIANG SHI, ZHIYONG ZHANG. A Carbon Emission Evaluation for an Integrated Logistics System—A Case Study of the Port of Shenzhen [J]. *Sustainability*, 2017, 9(3):
- [60] 山东省港口集团, 2020.
- [61] STARCREST CONSULTING GROUP L, 2022.