



清华大学  
Tsinghua University



# 全球内河和沿海航运的排放和管理措施

## Global inland waterway and coastal shipping management and emissions

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

彭传圣 交通运输部水运科学研究院

纪永波 交通运输部水运科学研究院

陈东升 北京工业大学

何 卉 国际清洁交通委员会(ICCT)

纪 亮 生态环境部机动车排污监控中心

于丹阳 交通运输部科学研究院

李 悦 交通运输部规划研究院

丁 焰 中国环境科学研究院

## 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。

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 研究现状.....	2
1.3 研究目标.....	8
1.4 研究内容.....	8
第 2 章 全球内河和沿海船舶排放管理经验研究.....	10
2.1 中国篇.....	10
2.2 欧洲篇.....	25
2.3 美国篇.....	49
2.4 对比分析.....	69
2.5 小结.....	80
第 3 章 内河船舶排放计算.....	82
3.1 计算方法.....	82
3.2 中国内河和沿海船舶排放特征分析.....	95
3.3 长江流域典型航道断面船舶排放特征分析.....	109
3.4 长江流域内河船舶排放强度计算.....	122
3.5 长江流域内河船舶排放计算.....	130
第 4 章 内河和沿海船舶减排潜力评价.....	142
4.1 减排目标及相关政策指导.....	142
4.2 长江内河船舶碳减排发展路径研究.....	144
4.3 全球其他地区船舶减排路径.....	158
4.4 中国内河和沿海船舶减排方案建议.....	163
第 5 章 结论与展望.....	166
5.1 结论与建议.....	166
5.2 展望.....	167
参考文献.....	169

---

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景

船舶排放的大气污染物主要包括氮氧化物（NO<sub>x</sub>）、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、颗粒物（PM）、碳氢化合物（HC）、二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、一氧化碳（CO）、甲烷（CH<sub>4</sub>）等<sup>[1]</sup>。每年船舶排放的温室气体约占全球总排放的 3%，CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 排放分别占全球化石燃料燃烧的 2%、15%左右，SO<sub>2</sub> 排放占人为源排放的 4%-9%<sup>[2]</sup>。

水运排放对全球硫沉降的贡献占据了全部排放来源的大概 5%，贡献了约 3% 的陆地硫沉降<sup>[3]</sup>，这一比例在水运发达、船舶活动频繁的地区更高，该类地区的土壤和地表水的酸度和氮含量将会提高，生态环境平衡遭到破坏，优势种群可能发生改变<sup>[4]</sup>。船舶排放和气候变化之间的联系较为复杂，是多种污染物的复合影响结果，NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 可能导致气候变冷，而 CO<sub>2</sub> 则会导致气候变暖，因此航运可能会在短期内促进气候变冷，而在更长时间尺度上推动全球变暖<sup>[5]</sup>。

除了气候和生态影响，船舶排放还会对人群健康产生影响。船舶排放的大气污染物会随大气运动扩散到沿岸居民生活区，对公众产生潜在健康隐患。据统计，东亚地区的船舶排放可能造成了每年 1.45 - 3.75 万人的过早死亡<sup>[6]</sup>。在航运体系中，内河航道多临近或流经人口居住区，对公众的影响更大，研究表明，内河船舶是航运对城市空气质量影响的主要贡献者，上海市航运来源的 PM<sub>2.5</sub> 的 40%-80% 均来自于内河船舶<sup>[7]</sup>。

中国拥有世界上最繁忙的内河水运系统，世界上年货运量最高的三条河流均位于中国，分别是长江、珠江、京杭运河<sup>[8]</sup>。2022 年全国内河等级航道通航里程达 6.75 万公里，拥有内河运输船舶 10.95 万艘，净载重量 1.52 亿吨，全年内河货运量 44.02 亿吨，内河货物周转量 19025.73 亿吨公里<sup>[9]</sup>。如此大体量的内河水运带来的是高排放和高减排潜力，为此，建立清单评估船舶排放和探究内河船舶减排潜力是有必要的。

近年来，中国政府将碳达峰、碳中和作为国家重大战略目标，习近平总书记在第七十五届联合国大会、气候雄心峰会上先后做出重要承诺，宣布中国二氧化碳排放力争于 2030 年达到峰值，努力争取 2060 年实现碳中和。2021 年 10 月 25 日，中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达

---

峰碳中和工作的意见》（以下简称《意见》），并就加快推进低碳交通运输体系建设作出部署。《意见》明确了优化交通运输结构、推广节能低碳型交通工具的具体举措。

内河和沿海航运作为水路运输最重要的组成部分，近年来成为国家水路运输实现低碳、绿色发展的重要内容。《国家综合立体交通网规划纲要》明确指出内河水运要充分发挥其在“6轴7廊8通道”综合立体交通网主骨架中的通道作用。《绿色交通十四五发展规划》，明确提出要“深入推进大宗货物及中长距离货物运输“公转铁”“公转水”。以上都表明，我国内河和沿海航运无论从现状还是从未来规划而言，都将在国家交通网络中发挥重要作用，而且呈现良好的发展趋势。

航运的快速发展必然带来排放量的增加，如何实现航运尤其是沿海及内河航运的绿色低碳发展，是未来航运高质量发展面临的挑战。围绕全球沿海及内河航运的绿色低碳发展，探索全球沿海及内河航运排放管理模式及研究方法，分析全球沿海及内河航运的排放现状，探索适应于中国特色的船舶排放控制路径是十分有必要的。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 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<sup>[10]</sup>。

目前的船舶排放清单建立方法主要包括四种：燃油法、贸易法、统计法、动力法<sup>[11]</sup>。

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（1.2-1）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  $\text{NO}_x$ 、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<sup>[12]</sup>。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。

$$E_p = \sum_j (F \times A_j) \times EF_{p,j} \times 10^3 \quad \text{式 (1.2-1)}$$

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。

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  $SO_2$  排放量<sup>[13]</sup>。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<sup>[14]</sup>。

统计法是一种自下而上的方法，基于船舶静态数据和船舶活动水平来估算排放量，采用船舶静态统计数据，如船舶进出港艘次，结合船舶类型、发动机功率、运行工况、排放因子等数据，进行船舶排放的计算，一般计算公式如式 (1.2-2) 所示。统计法由每艘船舶的数据合并到一个船队或一类船舶，进而统计出总体的排放清单，因此这种方法可以较好地体现单船差异，精细化程度也相较于之前两种方法更高。但这种方法仍然无法真正模拟船舶实际运行情况。

$$E_p = \sum_j P \times LF_j \times EF_{p,j} \times T_j \times 10^{-6} \quad \text{式 (1.2-2)}$$

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<sup>[15]</sup>。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<sup>[16]</sup>。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<sup>[17]</sup>。

动力法和统计法一样是自下而上, 利用船舶活动水平和船舶静态数据进行排放计算, 但是动力法的分辨率更高, 利用 AIS 信号或其他实时监测数据, 获取实时的船舶动力信息, 确定船机功率、运行工况等参数, 进而建立排放清单, 计算公式如式 (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。

$$E_{i,p} = \sum_j P_i \times LF_{i,j} \times EF_{p,i} \times \Delta T_{i,j} \times 10^{-6} \quad \text{式 (1.2-3)}$$

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, 然后利用集计的网络化 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<sup>[18]</sup>。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<sup>[19, 20]</sup>。

---

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<sup>[21]</sup>。

### 1.2.2 岸电减排效益评价

船舶污染控制措施主要分为运行控制和技术控制。技术控制包括了对船体设计的优化、船舶发动机的设计优化以及燃料技术（新能源使用和燃油硫含量控制）<sup>[22]</sup>。运营措施包括优化船舶航线、航速控制<sup>[23]</sup>、船体维护、关闭辅机等。

船舶使用岸电进行减排就是通过控制在港期间辅机运行时间来减少排放。目前多项国际研究都对岸电减排效益进行了分析，各国也推进岸电建设和使用来减少在港船舶的排放。

2007 年美国 AAPA 发布的远洋船舶岸电使用白皮书对低硫油和岸电的减排效益进行了比较<sup>[24]</sup>。将船用燃料从高硫油换成低硫油，可以减少排放 10% 的  $\text{NO}_x$ 、18%-65% 的  $\text{PM}_{10}$  和 45%-96% 的  $\text{SO}_2$ 。使用岸电船舶停靠在港口几乎没有排放，如不考虑火电厂的排放，只讨论港口区域，假设船舶靠港 95% 的时间使用岸电，则大气污染物的降低率为 95%。低硫油相较于以往 2.7% 硫含量的燃油可以大幅度的降低船舶的  $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}_{10}$  排放，但是  $\text{NO}_x$  降低得很少，而使用岸电时  $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{NO}_x$  都会有大幅度降低。

2012 年，莱茵河航运委员会对未来可能发展的几项船舶技术和管理措施进行了减排潜力计算，其中岸电的减排潜在在 0-5%  $\text{CO}_2$ /吨公里，岸电和船倾优化、船闸通道优化、港内航行几项运行措施的组合减排潜在在 5-15%  $\text{CO}_2$ /吨公里<sup>[25]</sup>。

2016 年，Vaishnav 等人通过假设污染物的社会成本，结合空气质量模型，计算了岸电使用的社会影响，结果显示，通过对四分之一至三分之二停靠在港口美国的船舶改造，可以实现每年 0.7-1.5 亿美元的空气质量效益，并且这种好处可以在不给社会带来净成本的情况下产生<sup>[26]</sup>。

大部分研究认同岸电的减排效益，多国政府也采取了政策和技术手段推进岸电建设和使用。但也有研究认为，岸电可能带来排放的增加。印度一份依据本土排放因子开展的研究显示，靠港船舶使用的能源从高硫油转向岸电， $\text{PM}_{2.5}$  的净排放量将下降 46%， $\text{NO}_x$  排放量将下降 84%，但  $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}_2$  排放量将分别增加 240% 和 17%<sup>[27]</sup>。这是印度火电的高硫排放特征导致的，结合经济效益分析，研究者不建议印度政府推进岸电建设。

---

岸电使用带来的大气污染物减排实质是将污染物从交通行业转移到发电业。Hall 等人对全球各地区 2010 年的岸电使用带来的减排效益进行了分析，指出中国如果实施岸电，则可能会使靠泊船舶的 CO<sub>2</sub> 排放量增加近 40%，SO<sub>2</sub> 排放达 992 克/千瓦时<sup>[28]</sup>，因为当时的中国严重依赖化石燃料，特别是品质不高的煤炭来发电，电力来源远不如燃油清洁。

然而，也有研究指出，这并不意味着这些火电不够清洁的国家或地区不应该使用岸电<sup>[29]</sup>，因为岸电一个很大的优势是将污染物从港口地区等人口密集地区转移到发电厂通常所在的更偏远地区。因此，尽管某些污染物总数上可能有增加，但岸电将降低这些人口密集地区的健康影响等显性损害。

当火电排放较高时岸电的使用仍存争议，但考虑到中国目前电力清洁化，排放因子有所下降，岸电的减排效益将更加凸显。交通运输部水运科学研究院 2019 年发布的《靠港船舶使用岸电和低硫油效益分析》就证明了这一点。报告使用本土化的电力和燃油排放因子，对岸电和燃油的经济效益、社会效益进行了评价。结果显示，即便考虑了火电排放，船舶靠港使用岸电的大气污染物排放也远低于船舶使用燃油。和低硫油相比，船舶排放的 SO<sub>x</sub> 降低率可达 81.4%-87.9%，NO<sub>x</sub> 降低 97.4%-98.3%，PM 降低 77.1%-85.1%。和普通燃料油相比，大气污染物排放可降至原来的四分之一左右。除了降低大气污染物的排放，岸电使用还比燃油燃烧更节能，可节约 7%到 39.3%的能量消耗<sup>[30]</sup>。

2012 年针对台湾高雄港的一项研究，基于统计法进行了百分百使用岸电情况下的船舶减排情景评价，结果显示，可以减少 49.2%的 NO<sub>x</sub>、63.2%的 SO<sub>2</sub> 和 39.4%的 PM 排放。此外，温室气体排放量也将下降，CO<sub>2</sub> 减少 57.2%，HC 减少 29.2%<sup>[31]</sup>。

2015 年国际清洁交通委员会 ICCT 的一份报告采用统计法，基于 AIS 船舶数据和集装箱船的测试数据，评估了深圳地区岸电使用控制港口空气污染的潜力<sup>[32]</sup>。报告证实了岸电的减排潜力是可观的。由于缺乏集装箱船以外船型船舶的准确排放数据，报告只使用了集装箱船舶的排放因子。

对厦门港的一项船舶排放清单计算中，将岸电使用纳入了清单计算公式中，根据厦门港口管理局提供的靠港船舶岸电量使用数据，结合燃油排放因子，估算污染物减排量<sup>[33]</sup>。清单计算采用了 AIS 动力法，但对岸电的考虑还是停留在较为粗糙的排放因子计算上，没有考虑船舶工况。

---

可以看到目前大部分关于岸电的减排效益的研究只评价了岸电使用和火电在排放因子上的区别，或者是根据排放因子进行较为粗糙的计算和评价，没有依据岸电使用在船舶工况中的实际情况进行岸电使用减排的分析和计算，也没有结合中国内河水运发展情况，对未来岸电建设和使用对船舶减排潜力展开计算和分析。

### 1.2.3 船舶减排潜力研究

目前关于船舶减排潜力的研究主要包括脱碳路径的探索和政策的评价。

IMO 于 2011 年发布船舶能效管理规划时就进行了未来减排路径的评估分析，考虑了船队增长、燃料价格、法规实施情况等因素，对 2030 年的全球船舶减排进行了预测<sup>[34]</sup>。在 2020 年的第四次温室气体报告中，IMO 基于 RCP2.6 情景，预测了全球海运的碳排放将从 2018 年的 10 亿吨增加至 2050 年的 10-15 亿吨<sup>[21]</sup>。

ICCT 于 2022 年发布的一份关于中国沿海船舶排放脱碳路径探索的报告设置了三个情景，以 2019 年的船舶活动水平和排放情况为基准，对 2060 年的碳排放做出预测，并提出了可能的减排政策，例如，每五年收紧一次能效标准，推进替代燃料等<sup>[35]</sup>。

交通运输部水运科学研究院在 2022 年 11 月发布的《中国内河航运中长期低碳发展路径研究》针对不同政策和组合措施进行了碳排放预测和减排评价<sup>[36]</sup>。所采用的方法是先利用行驶里程计算燃油消耗，再结合排放因子计算。只考虑了 CO<sub>2</sub> 排放，没有考虑其他污染物排放情况。

政策评价主要集中在对替代燃料技术的评价。

目前船舶使用燃料主要是柴油和船用燃料油，国内外均已通过相关法规对燃料油的硫含量提出限制，进而控制船舶的 SO<sub>x</sub>、PM 等污染物排放<sup>[37,38]</sup>。但低硫油可降低污染物的效果有效。对大气污染排放控制区内船舶发动机的排放监测显示，当大型集装箱船减速进入大气污染排放控制区，使用的燃油从高硫燃料换为低硫燃料，几乎所有测量到的排放物减排量都超过了 88%。其中，SO<sub>2</sub>、PM、颗粒硫酸盐和云凝结核的降低比例可达 90%<sup>[39]</sup>。一研究对河北某港区多艘船舶的排放进行了实测分析，结果显示，在实施转换油政策前后，靠泊船舶对港口周边大气的硫酸盐贡献从 35% 下降到 27%，有显著下降但仍有减排空间<sup>[40]</sup>。

挪威船级社发布的报告《面向 2050 年的海事展望》对不同情景下 2050 年散货船的燃料使用市场份额进行了预测<sup>[41]</sup>。在基准情景也就是非脱碳路径下，

---

低硫燃油、船用轻柴油和液化天然气 LNG 将占据船用燃油的主导地位。而在脱碳路径下，碳中性燃料如氨、甲醇、生物燃料、电化 LNG 等，将占据大部分市场份额。

莱茵河水运中央委员会发布的《莱茵河内河水运减排的技术路线图》以 2015 年莱茵河排放情况为基准，设立了三个情景进行 2030 和 2050 年减排情况的预测，分别是现有措施情景（维持现有发动机控制政策和燃料市场份额）、保守情景（发展目前较为成熟的清洁能源）、创新情景（发展目前尚不成熟或价格昂贵但长期减排潜力可能更高的燃料）。结果显示，以生物燃料为主的保守情景和以电力、甲醇、氢动力为主的创新情景在温室气体、氮氧化物和颗粒物减排上都有较好效果<sup>[42]</sup>。

目前对船舶减排潜力的研究大多聚焦于替代燃料的技术路线选择和碳中和路径分析，缺少对于大气污染物与减碳综合路径的分析和评价，对于我国的研究仍以宏观预测为主，缺少自下而上的测算和校验。

### 1.3 研究目标

对德国、美国和中国的内河航运排放管理进行综合对比研究，建立内河船舶排放清单，并构建未来内河航运需求和排放预测模型，并提出内河航运碳中和战略路径，最后撰写结题报告。

### 1.4 研究内容

本研究的研究内容包括以下 5 点，具体项目研究技术路线图，见图 1.4-1。

- （1）分析内河航运在环境、社会、法律和技术经济方面的潜力。
- （2）制定实现全球内河航运碳中和的减排战略路径。
- （3）分析内河航运排放的主要影响因素。
- （4）预测 2030 年和 2050 年内河航运需求和排放概况。
- （5）提供技术和政策建议，协助决策者规范内河航运市场。

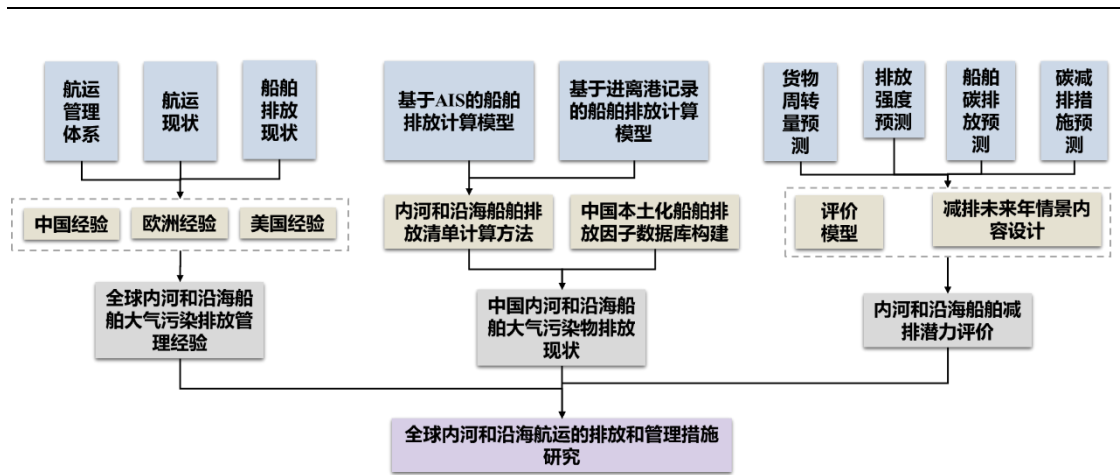


图 1.4-1 研究内容及技术路线

## 第2章 全球内河和沿海船舶排放管理经验研究

### 2.1 中国篇

#### 2.1.1 航运管理体系

##### 2.1.1.1 航运管理机构

中国内河和沿海水运的管理由交通运输部、水利部、省政府和一些其他部门共同承担，从中央到地方分层管理，同一层级的不同部门承担不同的职责，但整体来说是以交通运输部及其下的航务管理局为核心的中央-地方分层管理制度，如图 2.1-1 所示。

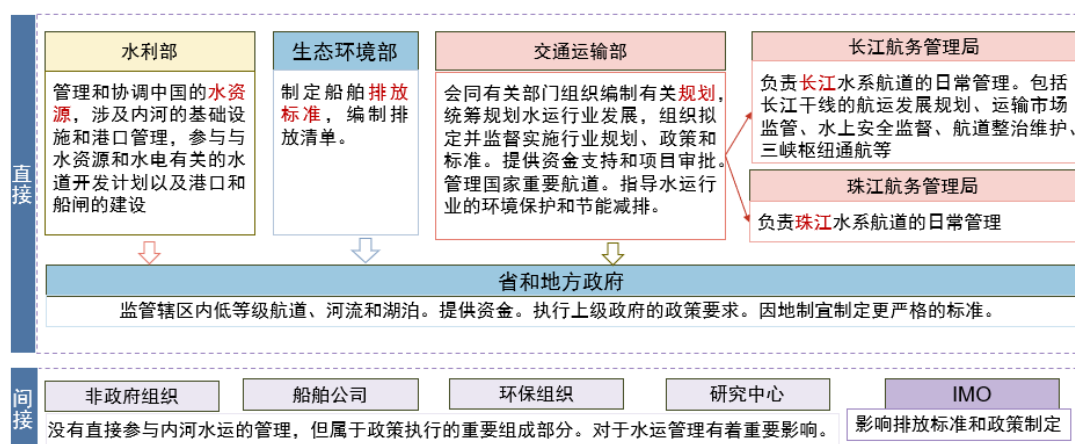


图 2.1-1 中国内河水运管理框架

交通运输部负责推进综合交通运输体系建设，会同有关部门组织编制综合运输体系规划，统筹规划铁路、公路、水路、民航以及邮政行业发展，组织拟定并监督实施行业规划、政策和标准。在水运方面，交通运输部全面负责中国内河和沿海水运的管理，制定水运方面的主要政策框架和发展路径，组织制定水运有关政策、准入制度、技术标准和运营规范并监督实施，承担水上交通安全和建设市场的监管责任。在资金支持方面，交通运输部负责提出水路固定资产投资规模和方向、国家财政性资金安排意见，按国务院规定权限审批、核准投资项目。至于具体的航道，交通运输部管理国家重要航道，包括国家航道网重要构成部分的四级及以上航道，以及在跨省运输中发挥重要作用的五级及以上航道。此外，交通运输部还需要承担水运行业的环境保护和节能减排的指导工作。

交通运输部水运局具体承担交通运输部内部水运方面的工作，主要负责水路建设和运输市场监管工作，管理港口、航道及其基础设施的建设和运维。

交通运输部海事局主要负责海运相关事宜，履行水上交通安全监督管理、船舶及相关水上设施检验和登记、船舶污染防治和航海保障等沿海和远洋运输的行政管理和执法职责。对应的沿海省份均设有地方海事局，直属交通运输部海事局管理。

在交通运输部的监管下，长江航务管理局和珠江航务管理局分别负责长江水系和珠江水系内河航道的日常管理。图 2.1-2 展示了长江航务管理局的单位组织构架，管理的流域范畴为长江干线，即四川宜宾至上海长江口，干线航道里程 2808 公里，主要职责包括长江干线的航运发展规划、运输市场监管、水上安全监督、航道整治维护、三峡枢纽通航等。珠江航务管理局承担的职责类似。

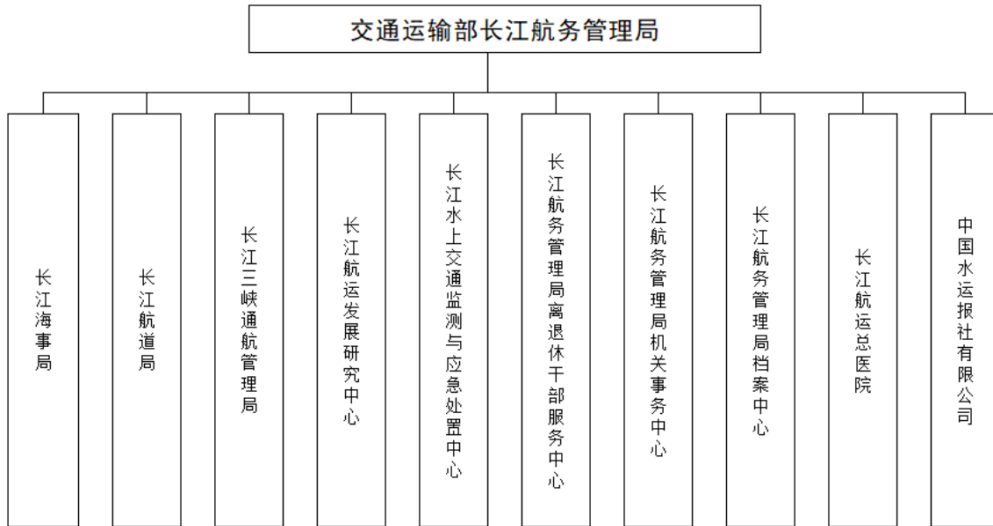


图 2.1-2 长江航务管理局组织构架

此外，还有一些其他部门参与了内河及沿海水运相关的规划和管理。水利部负责管理和协调中国的水资源，涉及内河的基础设施和港口管理，参与与水资源和水电有关的水道开发计划以及港口和船闸的建设。根据《航道管理条例》，在实施航道工程之前，主管部门应酌情征求同级林业和渔业行政主管部门的意见<sup>[43]</sup>。国家发展和改革委员会将参与制定产业政策和价格政策。生态环境部参与内河水运的污染防治和减排工作。

在地方层面，省级政府负责本省辖区内级别较低的内河航道，依据上级指示，结合当地内河水运具体情况，因地制宜制定具细化、可实施的规章制度，并负责相应的执行和监管工作。



### 2.1.1.2 航运管理法规

考虑到中国内河及沿海水运的分层管理制度，国家层面的法规更为宏观，具体的政策、标准、行动方针和发展目标也因为需要考虑到所有地区而显得更为保守，而地方政府则会给出更具体的执行方案，部分地方政府还会颁布更为严格的限制标准和更激进的发展目标。

五年规划是中国管理制度中最重要的政策法规之一。最新的《水运“十四五”规划》分析了中国水运行业的现状、不足和发展需求，提出了 2025 年安全、便捷、高效、绿色、经济的现代水运体系建设取得重要进展，2035 年基本建成的发展目标<sup>[44]</sup>。从基础设施、运输服务、技术创新、绿色安全和港口竞争力几个方面展开，对中国水运业的发展制定了战略引导。如表 2.1-1 所示，十四五规划主要对航道建设、沿海港口建设和多式联运提出了具体的发展目标。在水运减排方面，规划指出，需要加强海域、岸线资源集约节约利用，推进船舶污染防治，促进岸电常态化使用，进一步推广 LNG、电动、氢能等清洁能源应用和船舶的改造，构建清洁低碳的港口船舶能源体系，包括清洁能源和风能、光能等分布式发电技术在港口的应用。

表 2.1-1 “十四五”期间水运发展主要指标

指 标	2020 年	2025 年	增长
新增及改善内河航道里程（公里）	/	/	5000 左右
#新增国家高等级航道（公里）	/	/	2500 左右
沿海大型专业化码头通过能力适应度	>1.0	>1.1	/
沿海主要港口铁路进港率（%）	>90		/
集装箱铁水联运量年均增长率（%）	15		/

国务院颁布的《国内水路运输管理条例》对国内水运经营行为和市场秩序做出了规定，明确了水运业务各方的法律责任<sup>[45]</sup>。交通运输部依据该条例发布的《国内水路运输管理规定》进一步对水运经营者的经营范围（包括经营区域和业务种类）、船舶条件、船员配备、安全管理制度提出了要求。规定还明确，国内水路运输是指始发港、挂靠港和目的港均在中华人民共和国管辖的通航水域内使用船舶从事的经营性旅客运输和货物运输，按照经营区域分为沿海运输和内河运输，按照业务种类分为货物运输和旅客运输。

---

《中华人民共和国航道管理条例》于1987年由国务院发布，2008年修订<sup>[46]</sup>。条例旨在通过加强航道管理，改善通航条件，保证航道畅通和航行安全，充分发挥水运在国民经济和国防建设中的作用。适用于沿海和内河的航道及有关基础设施。将航道划分为三类，明确了对应管理部门：国家航道及其航道设施按海区 and 内河水系，由交通部或者交通部授权的省、自治区、直辖市交通主管部门管理；地方航道及其航道设施由省、自治区、直辖市交通主管部门管理；专用航道及其航道设施由专用部门管理。国家航道和地方航道上的过船建筑物，按照国务院规定管理。

2003年通过的《中华人民共和国港口法》对港口的规划与建设、经营、安全与管理监督以及有关经营人的法律责任作出了立法规定<sup>[47]</sup>。港口经营人须取得港口行政管理部门的经营许可证。2007年交通运输部依据该法颁布了《港口规划管理规定》，对于港口规划的编制、审批、公布、修订与调整、实施和监督管理作出了规定<sup>[48]</sup>。港口规划应当符合城市体系规划，并与土地利用规划、城市规划、水资源规划、防洪规划、海洋功能区规划、水路交通规划和其他交通运输方式相一致，还应当与法律、行政法规规定的其他有关规划相协调。

资金支持方面，目前的内河及沿海水运市场已初步形成了一个多主体融资体系。资金来源可以分为中央和地方政府、交通运输部专项资金、国内银行贷款、地方自筹资金、企业投资和国外投资。2022年全年水路固定资产投资达1679亿元，比上年增长10.9%。其中，内河建设完成867亿元、增长16.7%，沿海建设完成794亿元、增长9.9%。

“九五”期间，中央政府利用国家能源交通重点建设基金、国家预算调节基金等建立了内河水运建设专项基金，用于内河水运基础设施的建设。基金的资金来源还包括了车购税和港建费。2018年内河航道建设专项资金投入达109亿元。《中华人民共和国航道管理条例实施细则》中的第五章航道养护经费中，对过闸费、港务费、水电成本等航道养护资金的重要来源作出了规定。

### **2.1.1.3 船舶排放控制标准**

《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）》（GB 15097-2016）规定了内河和沿海船中额定净功率大于37kW的第1类和第2类船机（包含主机和辅机）的排气污染物排放限值<sup>[49]</sup>。第1类船机指额定净功率大于或等于37kW并且单缸排量小于5L的船机，第2类船机指单缸排量大于

或等于 5L 且小于 30L 的船机。标准的第一阶段自 2018 年 7 月 1 日起实行，第二阶段自 2021 年 7 月 1 日起实行。目前执行的是第二阶段限值，具体分类及限值如表 2.1-2 所示。

表 2.1-2 船机排气污染物第二阶段排放限值

船机类型	单缸排量	额定净功率	CO (g/kWh)	HC+NO <sub>x</sub> (g/kWh)	CH <sub>4</sub> <sup>a</sup> (g/kWh)	PM (g/kWh)
	(SV) (L/缸)	(P) (kW)				
第 1 类	SV<0.9	P≥37	5.0	5.8	1.0	0.3
	0.9≤SV<1.2		5.0	5.8	1.0	0.14
	1.2≤SV<5		5.0	5.8	1.0	0.12
		P<2000	5.0	6.2	1.2	0.14
	5≤SV<15	2000≤SV<3700	5.0	7.8	1.5	0.14
第 2 类		P≥3700	5.0	7.8	1.5	0.27
		P<2000	5.0	7.0	1.5	0.34
	15≤SV<20	2000≤SV<3300	5.0	8.7	1.6	0.50
		P≥3300	5.0	9.8	1.8	0.50
		P<2000	5.0	9.8	1.8	0.27
	20≤SV<25	P≥2000	5.0	9.8	1.8	0.50
		P<2000	5.0	11.0	2.0	0.27
	25≤SV<30	P≥2000	5.0	11.0	2.0	0.50

a, 仅适用于 NG (含双燃料) 船机。

第 3 类船机 (单缸排量大于或等于 30L 的船机) 执行《船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南》(GD 01)<sup>[50]</sup>。指南对不同建造阶段的船舶安装的船用柴油机进行了区分, 给出了不同的 NO<sub>x</sub> 排放限值。表 2.1-3 给出了 2000 年 1 月 1 日以后建造船舶上安装的船用柴油机 NO<sub>x</sub> 排放适用要求。对于 2000 年 1 月 1 日以前建造船舶上安装的第 3 类船机应符合 TierI 排放极限值, 否则应禁止使用。

表 2.1-3 2000 年 1 月 1 日以后建造船舶上安装的船用柴油机 NO<sub>x</sub> 排放适用要求

船舶建造日期	排放标准	对应的 NO <sub>x</sub> 极限值(g/kWh) (按 NO <sub>2</sub> 总加权排放量计算)

		n<130 rpm	130 rpm≤n<2000 rpm	n≥2000 rpm
2000年1月1日或以后至2011年 1月1日以前	Tier I	17.0	2000年1月1日 或以后至2011年 1月1日以前	Tier I
2011年1月1日或以后	Tier II	14.4	2011年1月1日 或以后	Tier II
2016年1月1日或以后 <sup>a</sup>	TierIII <sup>b</sup>	3.4	2016年1月1日 或以后 <sup>a</sup>	TierIII <sup>b</sup>

a, 适用于：2016年1月1日或以后建造并且在北美排放控制区内或美国加勒比海排放控制区内航行的船舶，其上安装的柴油机：在其他 NO<sub>x</sub> 排放控制区(北美排放控制区或美国加勒比海排放控制区除外)通过日期或以后建造，或在指定 NO<sub>x</sub> 排放控制区的修正案中规定的日期或以后建造(以较晚者为准),且在该排放控制区内航行的船舶，其上安装的柴油机。

b, Tier III标准不适用于：船长（见 MARPOL 公约附则 I 第 1.19 条定义）小于 24 米、经特殊设计并仅用于娱乐目的的船上安装的船用柴油机；主机额定功率之和小于 750kw 船舶上的所有柴油机，并向本社证实该船因设计或构造限制而不能符合 Tier III 标准；船长等于或大于 24m、经特殊设计并仅用于娱乐目的、在 2021 年 1 月 1 日之前建造、且小于 500 总吨的船上安装的船用柴油机。

额定功率不超过 37kW 的船机执行《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法（中国第三、四阶段）》（GB 20891-2014）<sup>[51]</sup>。自 2022 年 12 月 1 日起执行第四阶段标准。如表 2.1-4 所示，该类船机适用于第四阶段 P<37kW 一类。

表 2.1-4 非道路移动机械用柴油机排气污染物第四阶段排放限值

额定净功率 (P) (kW)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	HC+ NO <sub>x</sub> (g/kWh)	PM (g/kWh)	NH <sub>3</sub> (ppm)	PN (g/kWh)
P>560	3.5	0.40	3.5, 0.67 <sup>a</sup>		0.10		
130≤P≤560	3.5	0.19	2.0		0.025	25 <sup>b</sup>	
56≤P<130	5.0	0.19	3.3		0.025		5×10 <sup>12</sup>
37≤P<56	5.0			4.7	0.025		

P<37	5.5	7.5	0.60
------	-----	-----	------

- a, 适用于可移动式发电机组用 P>900kW 的柴油机;  
b, 适用于使用反应剂的柴油机。

硫氧化物的排放限制主要通过燃油限制来实现。内河船、江海直达船和在  
内河作业的渔业船舶应使用符合 GB252 标准的柴油，硫含量不大于 10mg/kg。  
沿海船使用的燃料油适用于现行的《船用燃料油》（GB/T 17411-2015），该标  
准按硫含量限值将馏分燃料分为三个等级，I级符合 2015 年 IMO 对行驶在普通  
区域的船舶燃料油硫含量的要求，II级符合 IMO 拟定 2020 年（或 2025 年）船  
舶行驶在普通区域对燃料油硫含量的要求，III 级符合 2015 年起船舶行驶在 SO<sub>x</sub>  
排放控制区（SECA）内对燃料油硫含量的要求，具体限值如表 2.1-5 所示<sup>[52]</sup>。  
残渣燃料对应的I至III 级硫含量最高限值分别为 3.50%、0.50%、0.10%。

表 2.1-5 船用馏分燃料油硫含量要求

燃料类型	DMX	DMA	DMZ	DMB
燃料等级	硫含量（质量分数）不大于/%			
I		1.00		1.50
II		0.50		0.50
III		0.10		0.10

2018 年发布的《船舶大气污染物排放控制区实施方案》设立了沿海控制区  
和内河控制区，对控制区内航行船舶的硫氧化物和氮氧化物排放提出了要求<sup>[37]</sup>。  
内河控制区范围为长江干线（云南水富至江苏浏河口）、西江干线（广西南宁  
至广东肇庆段）的通航水域。沿海控制区的范围如图 2.1-3 所示。



图 2.1-3 沿海船舶排放控制区范围示意图

2019 年 1 月 1 日起，海船进入船舶排放控制区，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。其他内河船舶应使用符合国家标准的柴油。2020 年 1 月 1 日起，海船进入内河控制区，应使用硫含量不大于 0.1% $m/m$  的船用燃油。2020 年 3 月 1 日起，未使用硫氧化物和颗粒物污染控制装置等替代措施的船舶进入排放控制区，只能装载和使用按照本要求规定应当使用的船用燃油。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<sup>[37]</sup>。

交通运输部 2019 年发布的《2020 年全球船用燃油限硫令实施方案》对进入中国水域的国际船舶燃料油进行了规定，自 2020 年 1 月 1 日起，国际航行船舶进入中国管辖水域应当使用硫含量不超过 0.50% $m/m$  的燃油，国际航行船舶进入中国船舶排放控制区，应当使用硫含量不超过 0.10% $m/m$  的燃油；自 2022 年 1 月 1 日起，国际航行船舶进入中国管辖水域，不得装载硫含量超过 0.50% $m/m$  的自用燃料，即不合规燃油。

## 2.1.2 航运现状

### 2.1.2.1 主要河流和港口

如图 2.1-4 所示，《全国内河航道与港口布局规划》明确了内河水运“两横一纵两网十八线”和 28 个主要港口的布局框架<sup>[53]</sup>。其中，两横指长江干线和西

江航运干线，一纵为京杭运河，两网为长江三角洲高等级航道网和珠江三角洲高等级航道网，十八线是中国内河 18 条主要干支流高等级航道。

截至 2022 年末，全国内河航道通航里程 12.80 万公里。等级航道按照可通航的船舶最大运载能力划分，如表 2.1-6 所示，2022 年全国内河等级航道通航里程达 6.75 万公里，占内河航道通航里程比重为 52.7%，其中三级及以上航道通航里程 1.48 万公里，占内河航道的 11.6%。表 2.1-7 给出了 2022 年中国各大水系的可通航里程数，其中，长江以 64818 公里的可通航里程数占据了过半的全国内河可通航里程数<sup>[9]</sup>。

表 2.1-6 2022 年中国按等级划分的内河航道里程数

航道等级	典型运载能力（吨）	里程数（公里）	占总量百分比（%）
等级之下		6.05 万	47
七级	50	16900	13
六级	100	16602	13
五级	300	7764	6
四级	500	11423	9
三级	1000	8543	7
二级	2000	4046	3
一级	3000	2196	2
总计		12.80 万	100

表 2.1-7 2022 年中国按水系划分的内河航道里程数

水系	可通航里程数（公里）	占总量百分比（%）
长江	64818	51
珠江	16880	13
黄河	3533	3
黑龙江	8211	6
京杭运河	1423	1
闽江	1973	2
淮河	17610	14
其他	13552	11
总计	12.80 万	100



图 2.1-4 全国内河高等级航道和主要港口布局方案图

如表 2.1-8 所示，截至 2022 年末，全国港口生产用码头泊位 21323 个，其中，沿海港口生产用码头泊位 5441 个，内河港口生产用码头泊位 15882 个。全国 2751 个万吨级以上泊位中沿海 2300 个，内河 451 个。内河港口的生产用码头泊位数更多，但万吨级的泊位却要远低于沿海港口。如表 2.1-9 所示，从用途结构看，全国港口专业化万吨级及以上泊位 1468 个，通用散货万吨级及以上泊位 637 个，通用件杂货泊位 434 个<sup>[9]</sup>。

表 2.1-8 2022 年年末全国港口万吨级及以上泊位数量

泊位吨级	全国港口年末数	沿海港口年末数	内河港口年末数
合计	2751	2300	451
3 万吨级以下	891	706	185
3-5（不含）万吨级	452	327	125
5-10（不含）万吨级	930	798	132
10 万吨级及以上	478	469	9

表 2.1-9 2022 年年末全国万吨级及以上泊位构成（按主要用途分）

泊位用途		数量
专业化泊位	集装箱泊位	372
	煤炭泊位	273
	金属矿石泊位	88



原油泊位	93
成品油泊位	155
液体化工泊位	287
散装粮食泊位	39
专业化泊位合计	1468
通用散货泊位	637
通用件杂货泊位	434

### 2.1.2.2 船舶属性

截至 2022 年末，全国拥有水上运输船舶 12.19 万艘，净载重量 2.98 亿吨，载客量 86.18 万客位，集装箱箱位 298.72 万标准箱。其中，内河运输船舶 10.95 万艘，净载重量 1.52 亿吨，载客量 57.27 万客位，集装箱箱位 55.16 万标准箱；沿海运输船舶 1.10 万艘，净载重量 0.94 亿吨，载客量 26.84 万客位，集装箱箱位 59.88 万标准箱<sup>[9]</sup>。如图 2.1-5 所示，2016-2022 年间船舶数量不断下降<sup>[54]</sup>，而船舶净载重量却呈上升趋势，说明了船舶大型化的趋势。

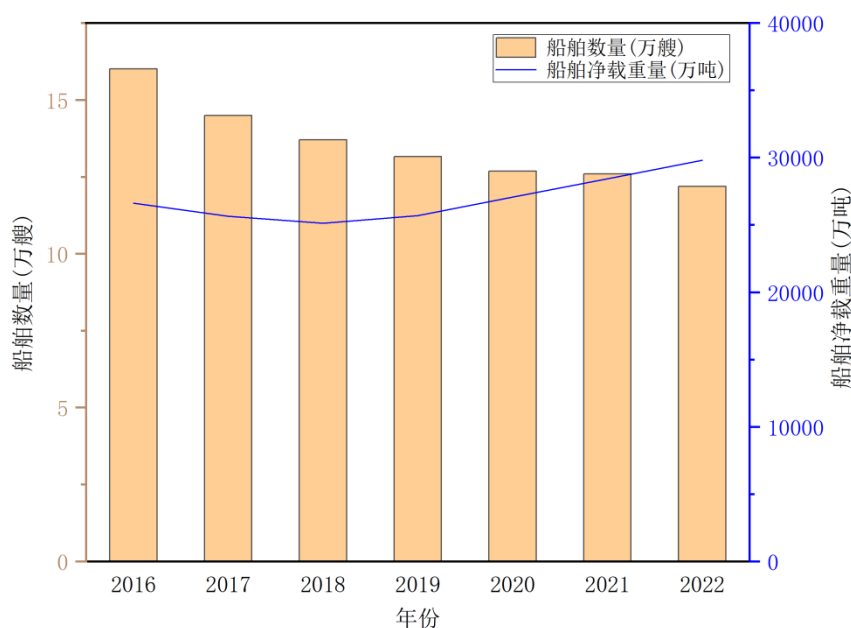


图 2.1-5 2016-2022 年间全国水上运输船舶数量及其净载重量

运输船舶又可按照有无动力推进系统分为机动船和驳船。拥有动力系统，可以自行承担航运工作的机动船占据了运输船队的绝大部分，而没有动力系统，无法自主航行，需要和推拖船配合进行航运的驳船则数量占比较少。截至 2022

年末，全国水上运输船舶共有民用机动运输船 114507 艘，民用驳船运输船 7361 艘<sup>[54]</sup>。

由交通运输部主编，国家铁路局、中国民用航空局、国家邮政局等部门联合参编的《中国交通运输年鉴（2022）》将船舶分为客船、货船、拖船、驳船、客货船五类，其中货船又分为集装箱船、油船和其他货船<sup>[55]</sup>。如图 2.1-6 所示，货船占据了所有船舶数量的大多数，其次是客船和驳船。

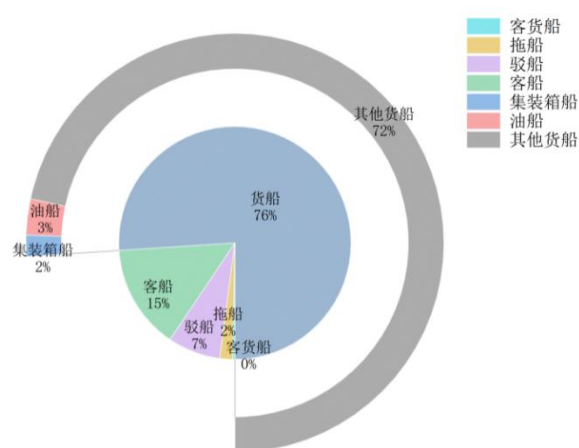


图 2.1-6 2022 年不同船型船舶所占数量比例

进一步细分到内河和沿海船队的船型构成，船型的划分和比例又有所不同。

世界银行编制的报告《新时代的蓝色航道：中国内河水运发展》从交通运输部水运科学研究院处获得了 2018 年中国内河船队的船型构成和运力数据<sup>[17]</sup>。该报告将内河船舶分为货船、客船、驳船、拖船、油船、集装箱船和滚装船七大类。如表 2.1-10 所示，货船仍是内河船舶中数量占比最高的船舶类型，其次是客船和拖船。内河船队的运力如表 2.1-11 所示，货船船队总载重吨 129.2 百万吨，集装箱船队总载重能力 33.81 万标箱，客船总载客量 71.59 万座。

表 2.1-10 2018 年中国内河船队构成

船舶类型	船舶数量	占总数百分比 (%)
货船	93,454	75.2
客船	17,651	14.2
驳船	11,148	9.0
拖船	1,848	1.5
油船	1,495	1.2
集装箱船	556	0.4

滚装船	244	0.2
总计	124,345	100

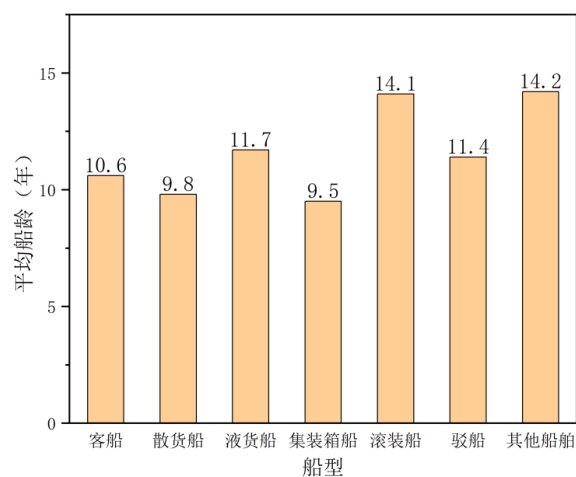
表 2.1-11 2018 年中国内河船队运力

船舶类型	运力
货船（百万载重吨）	129.2
集装箱船（1000 标箱）	338.1
客船（1000 座）	715.9

交通运输部水运局于 2023 年初发布的《2022 年沿海省际货运船舶运力分析报告》对沿海船舶中的干散货船、集装箱船、液货危险品船三大类的船舶运力进行了统计，其中液货危险品船又进一步分为油船、化学品船和液化气船<sup>[18]</sup>。

报告显示，截至 2022 年 12 月 31 日，沿海省际运输干散货船（万吨以上，不含重大件船、多用途船等普通货船）共计 2427 艘、7982.4 万载重吨，集装箱船（700TEU 以上，不含多用途船，下同）共计 350 艘、箱位数 83.0 万 TEU，油船（含原油船、成品油船，不含油品、化学品两用船）共计 1194 艘、1142.2 万载重吨，化学品船（含油品、化学品两用船，下同）共计 287 艘、139.9 万载重吨，液化气船共计 80 艘、28.8 万载重吨。

进一步讨论中国船队的船龄结构，根据《新时代的蓝色航道：中国内河水运发展》报告给出的 2017 年中国内河船队的船舶平均船龄数据，如图 2.1-7 所示，各船型的平均船龄多在 10 年左右，滚装船和其他船舶的平均船龄超过了 14 年<sup>[56]</sup>，要略高于其他船型的船舶，但与世界上其他国家相比，如美国船队 38 年的船龄中位数，中国的船队显得尤为年轻。如图 2.1-8 所示，按照船舶吨位进行划分和统计的船舶平均船龄在 5-12.7 年间不等，其中很明显的趋势是大吨位的



船舶平均船龄要小于小吨位的船舶，这与中国船型标准化的政策及船舶大型化的发展趋势是一致的。新造船舶拥有更大的吨位、更先进的基础设施，随之带来的是更高效的工作效率和更清洁的航运水平。这意味着，年轻的中国内河船队在水运市场上要比其他老旧的船队更为高效清洁，也更节约成本，无论是经济成本还是时间成本。

图 2.1-7 2017 年中国内河船舶按船型和载货类型划分的平均船龄

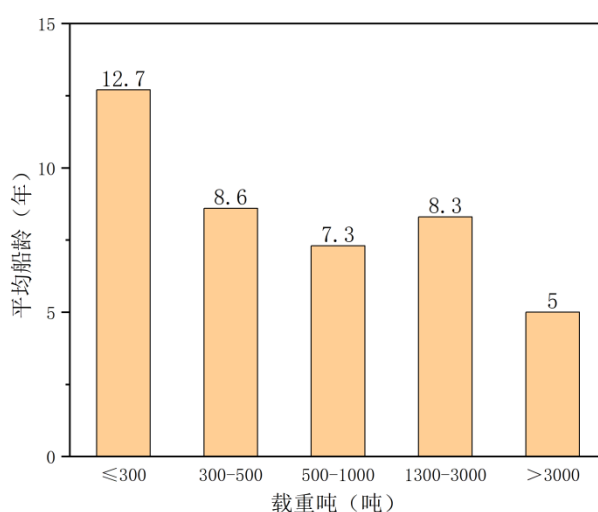


图 2.1-8 2017 年中国内河船舶按载重吨划分的平均船龄

《2022 年沿海省际货运船舶运力分析报告》中同样给出了几类沿海船的平均船龄<sup>[57]</sup>。

干散货船平均船龄 10.6 年，其中，老旧船舶（船龄 18 年以上）和特检船舶（船龄 28 年以上）分别有 253 艘、23 艘，占总艘数的 10.4% 和 0.9%。集装箱船平均船龄 9.3 年，其中，老旧船舶和特检船舶分别有 32 艘、3 艘，占总艘数的 9.1% 和 0.9%。油船平均船龄 11.0 年，其中，老旧船舶和特检船舶分别有 503 艘、2 艘，占总艘数的 42.1% 和 0.2%。化学品船平均船龄 10.8 年，其中，老旧船舶和特检船舶分别有 135 艘、1 艘，占总艘数的 47.0% 和 0.3%。液化气船平均船龄 13.1 年，其中，老旧船和特检船舶分别有 39 艘、5 艘，占总艘数的 48.8% 和 6.3%。

此外，还有一些新能源船舶开始在内河和沿海水运中得到应用。截至 2020 年夏季，中国运营或订购的内河和沿海的纯电动船舶超过 50 艘（主要是沿长江和珠江运行）。2021 年，三艘氢燃料电池示范船在大连和广东佛山进行了海试。中国船级社还批准了两套船用燃料电池系统的型号（70kW 和 50-80kW）。中

国船舶重工动力工程研究所和发动机制造商温特图尔发动机有限公司联合建立了一个新的全球测试中心，开展包括氨和甲醇在内的未来燃料推进系统的研究。

### 2.1.2.3 水运规模

根据《2022年交通运输行业发展统计公报》，2022年全年中国水运总计完成营业性货运量85.54亿吨，比上年增长3.8%，完成货物周转量121003.14亿吨公里，增长4.7%<sup>[9]</sup>。其中，内河货运量44.02亿吨，内河货物周转量19025.73亿吨公里；海洋货运量41.51亿吨，海洋货物周转量101977.41亿吨公里。

在客运方面，2022年营业性客运量为1.16亿人，旅客周转量为22.60亿人公里。

港口吞吐量方面，2022年港口货物吞吐量156.85亿吨，比上年增长0.9%。其中，沿海港口货物吞吐量101.31亿吨，内河港口货物吞吐量55.54亿吨；外贸货物吞吐量46.07亿吨，内贸货物吞吐量110.77亿吨。集装箱吞吐量2.96亿标准箱，增长4.7%，集装箱铁水联运量874.70万标准箱，增长率16.0%。集装箱铁水联运有较大幅度的提升。

如表2.1-12所示，水运主要货物包括煤炭及其制品、石油、天然气及制品、金属矿石和集装箱。沿海港口的集装箱运输要比内河更为发达。

表 2.1-12 2022 年中国港口货物吞吐量构成

	类别	单位	数量	
	合计	亿吨	156.85	
按内外贸分	外贸	亿吨	46.07	
	内贸	亿吨	110.77	
	煤炭及制品	亿吨	28.64	
	石油、天然气及制品	亿吨	12.97	
按货物品类分	金属矿石	亿吨	24.66	
		内河	亿标准箱	0.35
	集装箱	沿海	亿标准箱	2.61
		合计	亿标准箱	2.96

### 2.1.3 船舶排放现状

据《中国移动源环境管理年报（2022年）》统计，2021年中国船舶排放共计HC 9.70万吨，NO<sub>x</sub> 147.98万吨，PM 5.99万吨，没有单独的船舶二氧化硫排

---

放数据，包含工程机械、农业机械、船舶、铁路内燃机车、飞机在内的非道路移动源总共的二氧化硫排放为 16.8 万吨<sup>[58]</sup>。年报计算的船舶排放包括内河、沿海与远洋船舶排放，地理范围为领海基线外 24 海里向陆地一侧的水域。

2020 年发布的第二次全国污染源普查公报统计了 2017 年末营运船舶数量 27.82 万艘（含机动渔船），核算水域范围包括内河及沿海水域。普查主要通过船舶保有量、燃油消耗及相关活动水平数据，根据排污系数核算污染物排放量。核算得当年内河及沿海营运船舶排放共计 SO<sub>2</sub> 42.08 万吨，NO<sub>x</sub> 102.48 万吨，PM 8.44 万吨<sup>[59]</sup>。

环境保护部机动车排污监控中心编制的《中国船舶大气污染物排放清单报告》基于燃油法测算得 2015 年中国内河船舶排放 SO<sub>2</sub> 0.8 万吨、CO 15.8 万吨、HC 4.1 万吨、NO<sub>x</sub> 31.7 万吨、PM 2.5 万吨<sup>[60]</sup>。

交通运输部水运科学研究所和中国气象局的几位研究人员以 AIS 数据为基础，结合船舶静态数据和排放参数，采用动力法估算了中国近周边海域 2014 年的船舶排放清单。研究得到中国近周边海域范围内由于船舶活动一年产生的 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub> 分别约为 87.98 万吨、137.84 万吨、11.73 万吨<sup>[61]</sup>。

北京工业大学团队于 2017 年发表的高时空分辨率的中国船舶排放清单研究范围包括中国大陆及邻近水域（北纬 12.6 度至 41.6 度，东经 102.0 度至 126.0 度）。研究基于 AIS 数据，采用自下而上的方法，建立了 2014 年的中国船舶排放清单。研究显示，中国 2014 年的船舶总排放量约为 1.1937×10<sup>6</sup> 吨 SO<sub>2</sub>，2.2084×10<sup>6</sup> 吨 NO<sub>x</sub>，1.807×10<sup>5</sup> 吨 PM<sub>10</sub>，1.665×10<sup>5</sup> 吨 PM<sub>2.5</sub>，1.116×10<sup>5</sup> 吨 HC，2.419×10<sup>5</sup> 吨 CO 和 7.843×10<sup>7</sup> 吨 CO<sub>2</sub><sup>[62]</sup>。

清华团队基于 AIS 动力法利用更新后的 SEIM v2.0 模型计算了 2016-2019 年高分辨率的中国内河和沿海船舶排放清单，具体的计算范畴为距中国大陆领海基线约 200Nm 以内的可通航内河和沿海水域。清单得到 2016 年中国内河和沿海船舶 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM 和 HC 的排放量估计分别为 1.8×10<sup>6</sup>、2.5×10<sup>6</sup>、2.3×10<sup>5</sup> 和 1.1×10<sup>5</sup> 吨，2019 年分别为 1.3×10<sup>6</sup>、2.8×10<sup>6</sup>、1.7×10<sup>5</sup> 和 1.3×10<sup>5</sup> 吨<sup>[63]</sup>。

## 2.2 欧洲篇

本小节分析了欧洲内河航道状况，重点关注监管工作、主要利益相关者、法规、船队概况、排放、运输商品以及该行业面临的挑战。长期以来，内河水

---

运一直是欧洲交通网络的重要组成部分，为货物运输提供了一种成本效益高、环保节能、安全性高的选择。然而，应对气候变化和实现可持续交通解决方案的紧迫性促使内河水运需要采取大胆行动实现减排。

## 2.2.1 航运管理体系

### 2.2.1.1 航运管理机构

尽管在欧盟层面，欧洲的内河水运存在一定的管理框架和公约条例，但在欧洲各国不同地区间，内河水运的具体管理仍存在一定差异。在一些情况中，国家层级的管理机构对内河水运管理起到主要作用，而另一些情况中，地方级别的机构发挥更重要的作用<sup>[66]</sup>。

不同河流的水运情况取决于特定河流上实行的航运制度。欧洲许多河流流经多个国家，这些跨国河流的管理情况较为复杂，同时管理体系在不同河流间差异较大。多瑙河、莱茵河、萨瓦河是其中较为出名的几条国际河流。因为河流流经多个国家，而不同国家关于航行自由的法律体系是不同的，因此，不同流段的管理体系也有所差异，这也带来了不同跨国河流水运情况的独特性。

欧洲的内河航运主要由各种政府机构管理，包括欧洲经济委员会（UNECE）、欧盟（EU）、四大国际河流航运委员会，以及代表业界各方的非政府机构（NGOs）。

UNECE 在技术和政策层面管理欧洲地区内河航运。UNECE 是公认的国际陆上运输协定中心，维持着 59 项国际运输公约，为发展国际公路、铁路、内河航运、多式联运，运输危险货物和建造公路车辆提供了法律框架和技术条例<sup>[67]</sup>。

欧盟在协调和统一各成员国与内河水运有关的政策方面发挥重要作用。欧盟委员会（EC）是欧盟的执行机构，负责立法并确保条例的实施。欧盟议会和欧盟理事会通过提供立法建议和制定规章，对决策过程作出贡献。欧盟成员国的内河水运日益受到欧盟立法的管制。欧盟对于内河水运的管辖已扩展到欧洲地区更多拥有重要内河航道的国家。随着 2007 年欧盟的最后一次扩大，27 个成员国中有 20 个国家的 37000 多公里的水道受到欧盟水运管理框架的约束。但多瑙河，这条重要的国际河流，是个明显的例外，它的很大一部分流域仍然在欧盟的管辖范围之外<sup>[68]</sup>。

除了国家法规外，欧洲几条主要的国际河流还由专门设立的航运委员会管理，这些委员会负责为各自流域内的航运制定技术和法律标准。目前欧洲经委

---

会区域内共有 4 个国际河流航运委员会，分别为：莱茵河中央航行委员会（CCNR）、多瑙河委员会（DC）、萨瓦河流域国际委员会（ISRBC）和摩泽尔河流航运委员会（MC）。它们之间的主要区别在于所制定的条例是否具有法律约束力。CCNR 的决议对其成员国具有法律约束力，ISRBC 和 MC 在航运方面的决定同样具有法律约束力。而 DC 颁布的决议则不具有法律约束力，需要其成员国通过国家立法加以执行<sup>[68]</sup>。

CCNR 专注于莱茵河及其支流的航运管理，致力于规范管辖范围内航行船舶的法规、安全标准和技术要求。委员会的成员国包括德国、法国、瑞士、荷兰和比利时。除了对莱茵河航运的基本监管之外，CCNR 在技术、法律、经济和环境领域也很活跃。在其活跃领域，工作以内河运输的效率、安全、社会和环境考虑为先。现在，CCNR 的许多活动已经超出了莱茵河的范畴，更广泛地影响着欧洲可通航的内河航道，尽管 CCNR 在地理和法律方面对这些航道并没有全面的管辖权。在此背景下，CCNR 与业界代表、其他河流委员会和欧盟展开了密切合作。正如《曼海姆宣言》所强调的那样，CCNR 作为莱茵河的管理中心，对莱茵河乃至整个欧洲内河航运，都发挥着引领和先锋作用<sup>[68]</sup>。

DC 是根据 1948 年的《关于多瑙河航行制度的贝尔格莱德公约》第 V 条设立的。然而早在 1856 年，《巴黎条约》第 XVI 条就设立了欧洲多瑙河委员会，尽管有些改动，但该委员会一直存在到第二次世界大战。2010 年，DC 共有 11 个成员国：奥地利、保加利亚、克罗地亚、德国、匈牙利、摩尔多瓦共和国、罗马尼亚、俄罗斯联邦、塞尔维亚、斯洛伐克和乌克兰。缔约各方承诺保持各自辖区流段的通航性，进行必要的航道和设施建设，解决通航障碍的问题。委员会发布的决定和建议不具有法律约束力，需要通过转变为其成员国的国家立法来执行<sup>[68]</sup>。

ISRBC 成立于 2004 年，目的是执行萨瓦河流域四个沿岸国家（波斯尼亚和黑塞哥维那、克罗地亚、塞尔维亚和斯洛文尼亚）之间的《萨瓦河流域框架协议》。ISRBC 的目标是建立一个在萨瓦河及其通航支流流域范围内的国际航行制度，进行可持续的水资源管理，同时采取措施保证通航安全性。

MC 是基于 1956 年法国、德国和卢森堡之间关于摩泽尔运河化的公约设立的，总部设在特里尔（德国）。委员会于 1962 年 12 月 21 日，在运河化项目完



---

成一年半之后，举行了第一次会议。MC 通过发布具有约束力的条例，规范摩泽尔河的航运，包括交通规则、船员证书、人员配备要求和通行费<sup>[68]</sup>。

在行业层面，有几个非政府组织代表了欧洲内河航运各个部门的利益。欧洲驳船联盟（EBU）代表内河航运业，是由八个欧洲主要内河航运国家的驳船船东和驳船运营商组成的协会。欧洲船东组织（ESO）代表私人船东。欧洲内河航运组织（INE）主要代表基础设施运营商和水路管理机构。此外，还有欧洲内陆港口联合会、欧洲江海直达运输联盟等等。

#### 2.2.2.2 航运管理法规

为了处理内河航运的主要方面，欧盟、欧洲经委会和河流委员会的内河航运管理制度涵盖许多相同的领域，共同构成的欧洲内河水运管理框架下，需要处理的问题包括内河水道的标准和参数、进入内河水道的途径、内河水运相关的技术标准和安全要求、内河运输业务的法律条例以及内河航运的环境影响。

在大多数情况下，除了萨瓦河之外，欧洲最重要的河流流域的环境保护问题都由前一节提到的专门的河流保护委员会管理。基础设施的发展要复杂得多，很大程度上取决于水道上基础设施的现状，对于仍然需要开展工作来改善航行条件的水道来说，例如多瑙河和萨瓦河，如何协调各部门进行共同建设并平衡经济和环境是一个巨大挑战。而莱茵河在过去的几个世纪里，大多数主要的基础设施项目均已完成建设。最近的基础设施建设项目在寻找各方协作平衡的路上取得了一定的成绩，例如塞纳-欧洲北运河，地方当局同环境协会进行了密切协商，成功地使基础设施发展目标同环境和地方发展问题相协调。

有关内河水运的主要政策和计划如下。

2018 年 10 月 17 日，莱茵河中央航行委员会成员国的内河航运部长重申了到 2050 年基本实现温室气体和其他污染物零排的目标。为了进一步提高莱茵河和内河航道航行的环境可持续性，《曼海姆宣言》要求 CCNR 制定路线图，实现 2035 年温室气体排放量与 2015 年相比减少 35%，2035 年污染物排放量与 2015 年相比至少减少 35%，2050 年基本消除温室气体和其他污染物的排放。

欧盟委员会于 2019 年 12 月提出的《欧洲绿色协议》在其智能和可持续交通战略中，列出了几个优先政策领域，其中在可持续交通方面提出了到 2050 年实现气候中和所需采取的行动。除此之外，该协议促进更雄心勃勃的政策出台，旨在减少运输对化石燃料的依赖，努力实现“零污染”目标。设立的目标

---

为：与 1990 年相比，到 2030 年所有部门温室气体减排至少 50%，接近 55%；到 2050 年运输部门温室气体减排 90%，实现气候中和。为了实现这些目标，《欧洲绿色协议》确认，欧盟运输部门必须在 2050 年前将其排放量减少 90%，而目前占据货运总量 75% 的由公路运输的内陆货物中，很大一部分应该转向内河水运和铁路运输。协议还呼吁采取措施以提高尚未开发的内河航运能力<sup>[69]</sup>。

根据 2020 年 12 月的可持续和智能交通战略，欧盟委员会发布了欧盟运输系统未来的转型计划，到 2030 年内河运输和短途海运将增加 25%，到 2050 年增加 50%。为此，内河水运需要采取措施以确保全年通航，如改善水道间的连接和可通航性，建设更现代化的导航基础设施。预计到 2030 年，欧盟基于铁路和水路的多式联运将能够与公路运输平等竞争。最迟在 2050 年，欧盟内部的所有外部运输成本将由运输用户承担<sup>[70]</sup>。

NAIADES III 内河水运行动计划于 2021 年 6 月由欧盟委员会发布，其核心目标是到 2050 年将更多的货物运输转移到欧洲的内河水运上，同时促进船舶向零排放驳船的过渡。这与《欧洲绿色协议》和《可持续和智能交通战略》的目标是一致的。为应对能源转型挑战，计划采取的措施包括：加快低排放船舶的创新和认证过程，提高多种类替代燃料的供应及其基础设施的建设，支持各成员国向零排放过渡的需求，特别是在资金方面提供支持。

PLATINA3 项目承接之前的 PLATINA 和 PLATINA2 项目，旨在支持 NAIADES 项目的实施。能源转型是项目的一个核心目标。为了加速实现 NAIADESIII 的目标，委员会与 23 个不同合作者组成的财团共同创建了 Platina 项目。该项目是一个多学科项目，由欧洲联盟第七个研究框架计划（FP7）资助。2010 年，Platina 项目量化了消除欧洲许多内河航道瓶颈的大致成本。根据这份清单，在相关内河运输通道上的国家改善通航、发展水运的成本超过了 160 亿欧元。

“Fit-for-55”一揽子计划是欧盟最新发布的环境层面的计划。该计划于 2021 年 7 月 14 日启动，旨在使欧盟的气候、能源、土地利用、交通和税收政策能够实现到 2030 年将温室气体净排放量在 1990 年的基础上减少至少 55% 的目标。计划实际上是实施《欧洲绿色协议》和实现《欧洲气候法》设定的目标的立法工具。计划分为许多部分，所有建议之间都是协调一致的，以确保总体的实施连贯和目标一致。一揽子计划中和水运相关的包括以下几点<sup>[71]</sup>。

---

能源税指令包括了海运和内河水运的燃料不获豁免；岸上电力豁免的可能性以及为期 10 年的可持续燃料的最低税率为零。该指令建议将能源产品的税收与欧盟的能源和气候政策保持一致，推广清洁技术，取消目前鼓励使用化石燃料的过时豁免和税率降低。这将被视为对新的碳排放交易体系提案的有力补充，并与这方面的现有国际法规相关联。在水运部门中，提案将支持清洁能源和替代燃料的使用，同时取消现有的燃油税豁免，并增加对化石燃料的税收。该提案还试图排除欧盟港口以外的船舶加油，从而防止事实上的碳泄漏。

根据欧盟委员会的提议，可再生能源指令（RED）将设定一个更高的目标，到 2030 年，欧盟 40% 的能源是可再生能源。所有成员国都将为实现这一目标作出贡献，并为包括运输在内的不同部门使用可再生能源的情况提出了具体指标。基于此，该提案提出了到 2030 年将运输部门燃料的温室气体强度在 2010 年的基础上降低 13% 的目标。还必须指出的是，燃料质量指令（FQD）已经适用于内河水运，其中包括到 2020 年达到 6% 的减排目标，以及对燃料供应商设定的维持 2010 年水平的每兆焦耳能量 88.45 克二氧化碳当量的最高限制。正如 PLATINA3 项目中所提到的，成员国可以自行选择是否也对内河水运施加目标和要求。目前，在荷兰、德国和比利时等国家，内河水运的燃料供应商被排除在减排具体要求之外，而其他运输方式，主要是公路运输，正通过设立更高目标弥补这一点。

《替代燃料基础设施条例》旨在为某些需要不同基础设施并已准备就绪的替代燃料部署基础设施。该条例主要针对公路运输部门，但其中一些规定也与水运部门相关。特别是，该条例要求船舶在跨欧洲运输网络（TEN-T）的主要港口能够获得清洁的电力供应。新立法预计 TEN-T 核心和综合网络中几乎所有海运港口（包括双重港口，如鹿特丹、安特卫普、康斯坦察等）将有足够的岸上电力输出，以满足至少 90% 的船舶电力需求。另一方面，该条例对内河水运端口的要求则不那么严格，唯一的目标是 TEN-T 网络上的所有内河水运端口需要提供至少 1 个岸上电源。此外，到 2025 年，TEN-T 的沿海港口需要覆盖足够的液化天然气加气站，以满足在 TEN-T 核心网络内航行的船舶当前和未来的需求。然而，生物燃料和电力来源的天然气也应该被使用，而不仅仅是“常规”的液化天然气。该条例没有对内陆港口提出这种对液化天然气的要求，但这些燃料方面的政策也可能通过船舶的发展趋势和燃料需求间接影响到内河水运部

---

分，特别是靠近较大海运港口的航线。此外，成员国还需要制定并通过国家计划，确保推出 AFIR 目标的基础设施。

《减排分配条例》为每个成员国的建筑、公路和国内海运、内河水运、农业、垃圾回收和小型工业均分配了加强的减排目标。考虑到每个成员国的排放现状和减排能力不同，这些指标是根据其人均国内生产总值制定的，并基于成本效率进行了调整。条例为欧盟 27 个成员国设定了具有约束力的国家温室气体减排目标，预计到 2030 年减排总量达到 30%，以 2005 年为基准。

《具有国际重要性的欧洲主要内河航道协定》（AGN）为发展和建设具有国际重要性的内陆水道网络提供了协调计划，为其他内河航运的协定提供了参考。从 1998 年到 2016 年，水道网络的总长度从 27711 公里增加到 29238 公里，共计连接 37 个国家，还连接了欧洲经委会管辖区域以外的航线，包括地中海、黑海和里海的沿海航线<sup>[72]</sup>。

欧盟的跨欧洲交通网络政策 TEN-T 修订是在整个欧盟范围内发展连贯、高效的运输、多式联运和高质量交通基础设施的关键工具。TEN-T 修订旨在实现以下几个主要目标：建设和改善基础设施，提供可持续的交通方式，促进绿色交通；提高运输效率，促进 TEN-T 网络间的多式联运，提高不同运输方式间的连接和转换效率，同时更好地将城市节点整合到网络中；提高 TEN-T 治理工具的效率，简化报告和监测工具，审查 TEN-T 网络的布局<sup>[73]</sup>。

TEN-T 网络的建设仍将持续到 2050 年完成，中间期限为 2030 年和 2040 年：核心网到 2030 年，扩展核心网到 2040 年，综合网到 2050 年。TEN-T 的建设还支持充电和加油基础设施的应用，具体应用情况将取决于与替代燃料基础设施部署的协同布局（AFIR 提案）。

CCNR 内陆航运减排路线图依据 2018 年 10 月 17 日的《曼海姆宣言》制定，旨在到 2050 年基本消除内陆航运部门的温室气体排放和空气污染物，这也是欧盟的长期愿景。具体而言，与 2015 年相比，到 2035 年，温室气体排放量减少 35%，污染物排放量减少至少 35%；到 2050 年基本消除温室气体和其他污染物的排放。

船机排放控制标准方面，自 2019 年起，大于 37kW 的内河船舶的新主机必须符合欧盟为非道路移动机械（NRMM）设定的第五阶段排放要求。要求限制了一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）、颗粒物（PM）

和颗粒物数（PN）的排放。船用发动机按发动机气缸体积和发动机净功率进行分类。具体限值和分类如图 2.2-1 所示。

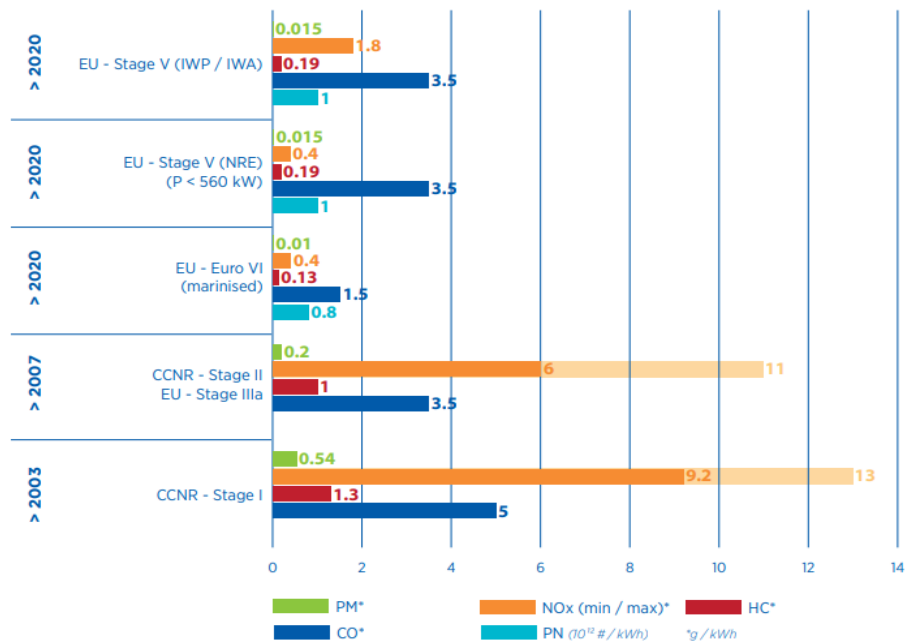


图 2.2-1 欧盟为非道路移动机械制定的排放要求

迈向零排放的水上运输项目（STEERER）由欧盟委员会在地平线 2020 框架下资助，由水上技术平台协调，设定了到 2050 年的排放目标，制定战略研究与创新议程、实施计划，以实现商定的目标。CCNR 秘书处将参与成立一个绿色航运专家组，以监测和评估战略的实施情况，并基于零排放内河运输战略制定行动方针，使船队能够实现其气候目标<sup>[74]</sup>。

## 2.2.2 航运现状

### 2.2.2.1 主要河流

#### (1) 欧洲内陆河流概况

欧洲的水路网包括了约 37000 千米的水道。具有国际性意义（IV 级及以上）的核心内河网络由超过 12000 千米的互相连接的水道、444 个船闸和数百个内河港口和交通站点构成<sup>[75]</sup>。现存的内河网络由更小的水道组成。AGN 将欧洲内河水道和港口进行了分级，并将在部分项目中得到应用。在欧盟，28 个成员国中的 21 个国家有内河水道，其中 13 个国家的内河水道相互连接。AGN 网有 6 个主要的次级网络<sup>[76]</sup>：

- 莱茵河-多瑙河网，共有 14362 千米的水道，占据 AGN 网的 47.6%；
- 亚速海-黑海-里海航道网络，航道长度为 9339 千米，占 30.9%；

- 波罗的海地区，航道长度为 840 千米，占 2.8%；
- 捷克斯洛伐克中心网络，航道长度为 715 千米，占 2.4%；
- Rhône-Saône 流域，航道长度为 679 千米，占 2.3%；
- 塞纳-瓦兹河网，航道长度为 632 千米，占 2.1%。

此外还有沿海航线及其相连的内河航道，长度为 2774 千米，占 9.2%。



图 2.2-2 AGN 下的欧洲内河航道

## (2) 水运市场的国家份额

内河水运与公路、铁路运输并称为陆地运输的三大主要方式。船舶通过内河港口和码头之间的运河、河流和湖泊等内河航道运输货物。欧洲一半的人口居住在海岸或内河航道附近，大多数欧洲工业中心都可以通过内河航运到达。

总的来说，说到欧洲的河流网络，除了意大利、西班牙、葡萄牙、芬兰、英国、乌克兰和俄罗斯的国内自主管理的内河航道体系，主要的国际内河航道网络是莱茵河-多瑙河网络，其长度为 14360 公里，主要的流域有：（1）莱茵河流域，大约 80% 的内河货运发生在莱茵河及其支流；（2）多瑙河流域，能够保证北海和地中海之间的顺利通航；（3）黑海。

莱茵河-多瑙河流域超过三分之一的水道不符合欧洲交通部长会议制定的水道标准，巴伐利亚流域东部和西部的基础设施也存在很大差异。欧盟的目标是在整个跨欧洲水道网络实现这些标准。相较于其他内陆运输方式，通过内河水路运输货物是有利的，因为推驳船比任何其他类型的陆地运输工具单位距离

（吨千米）可以运输更多的货物，一艘内河船舶的装载能力相当于数百辆卡车，这有助于节省运输成本，减少排放，缓解道路拥堵。

从内贸货物运输比例来看，与铁路和公路相比，内河航运是份额较低的运输方式。在美国和欧洲，只有不到 10% 的货物运输是通过内河航道进行的。然而，在中国，2022 年内河航运的货运量在交通货运总量中的份额已达到 16.9%，并且增长速度快于铁路。在欧洲，也有一些地区的内河航运发挥着重要作用。在荷兰，三分之一的货物是通过内河运输的。鹿特丹和安特卫普这两个欧洲主要海港的主要优势之一是它们通过高效的内河网络与欧洲的腹地相连，而莱茵河则构成了该网络的主干<sup>[77]</sup>。

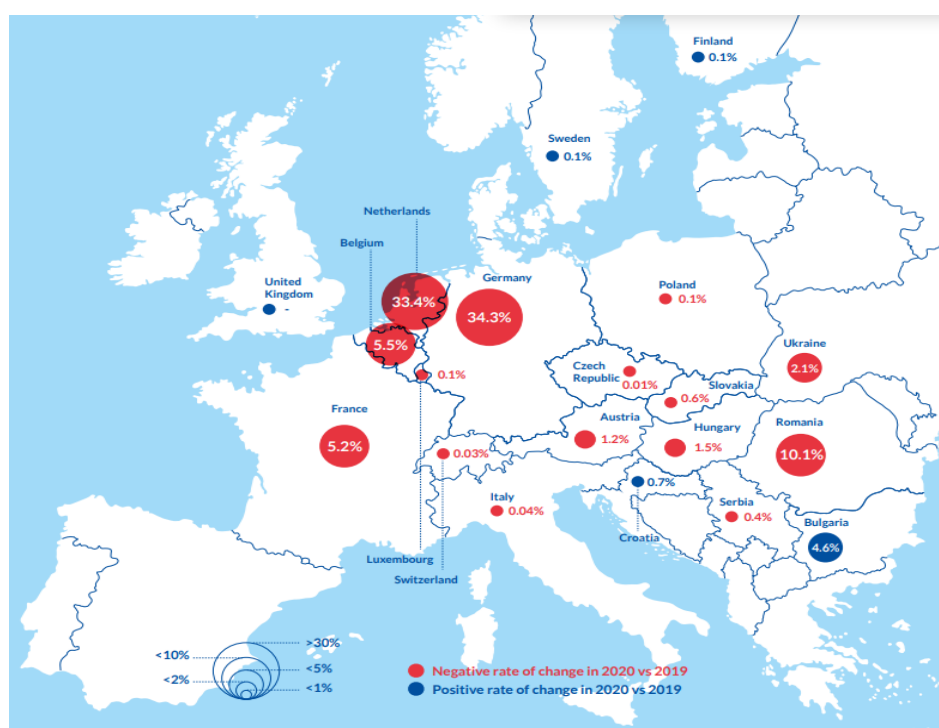


图 2.2-3 欧洲内河水运的市场份额

### (3) 莱茵-多瑙河网

1992 年，随着多瑙河主运河的开通，莱茵-多瑙河网络开始行程，连接 E 10（南北）和 E 80（东西）路线。该网络几乎占 AGN 水道总长的一半（30177 公里中的 14360 公里），由以下几级水道组成：V-VII 级（8913 公里），IV 级（2813 公里）和 I-III 级（2636 公里）<sup>[77]</sup>。

超过三分之一的内陆水道低于 AGN 标准（即低于 IV 级）。图 2.2-4 显示了基于船舶容量和多式联运适用性的不同类别的欧洲水道。需要强调的是，巴伐

利亚流域东部和西部的基础设施质量存在巨大差异，除了经济、政治和管理因素外，还对交通的发展产生了影响。

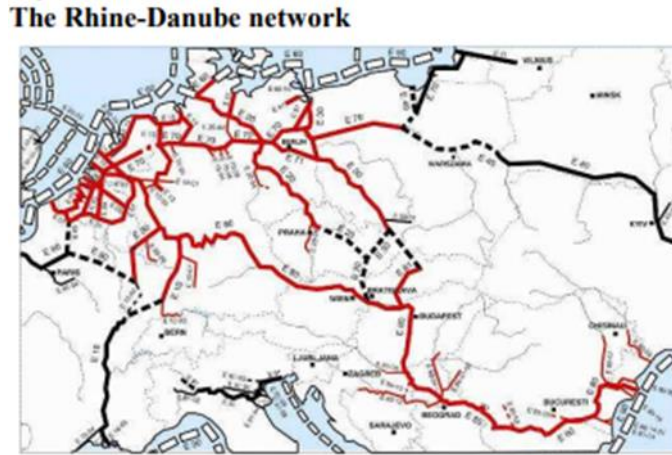


图 2.2-4 欧洲内河水运的市场份额（UNECE）

莱茵河流域是 AGN 网络中最发达、维护程度最好和利用率最高的货物运输水路，拥有最高的人口和水道密度，其高等级航道的份额远高于其他欧洲内河水系<sup>[78]</sup>。

#### 2.2.2.2 船舶属性

##### (1) 船舶数量

欧洲的内河船队由近 1 万艘在莱茵河沿线国家注册的船只、3500 艘在多瑙河沿线国家注册的船只、2300 艘船在其他欧洲国家注册的船只组成。欧洲的运输船舶总数超过 16000 艘，其中 62% 以上的船舶活跃在莱茵河地区<sup>[79]</sup>。

基础设施建设和船队构成的不平衡在莱茵河和多瑙河之间尤为明显。许多在多瑙河上航行的船只也在莱茵河上航行。2017 年，根据 CCNR 的统计，莱茵河船队由 9800 多艘船只组成，如表 2.2-1 所示。而 DC 的报告称，2016 年多瑙河船队共有 3197 艘船只，船队的发展情况如表 2.2-2 所示。

表 2.2-1 莱茵河船队的发展情况

年份	干货船		油船		推拖船
	船舶数量	总载重吨	船舶数量	总载重吨	船舶数量
2008	8249	10260000	1569	2583000	1276
2009	8203	10669000	1643	2824000	1286
2010	7952	10647000	1732	3127000	1220
2011	7980	10769000	1706	3203000	1265
2012	7776	10748000	1654	3174000	1219



2013	7618	10681000	1623	3152000	1267
2014	7464	10553000	1600	3185000	1251
2015	7323	10496000	1551	3185000	1246
2016	7136	10285000	1511	3150000	1240
2017	7092	10432000	1501	3112000	1241

表 2.2-2 多瑙河船队的发展情况

年份	机动船		驳船		推拖船
	船舶数量	总载重吨	船舶数量	总载重吨	船舶数量
2013	446	394952	2633	3024191	672
2014	439	392894	2511	2887511	649
2015	451	401533	2441	2834939	694
2016	418	397130	2171	2578415	576

至于其他地区的水道包括：

#### **a.Azov-Black-Caspian Sea 流域 (9339 km)**

俄罗斯方面：2008 年，在俄罗斯河流登记的船舶有 28215 艘，其中包括 1066 艘河海连通船。包括 17694 艘机动船和 10521 艘驳船，6807 艘干货船、1705 艘油轮和 1596 艘客轮。总运力 12033 吨，内河船舶平均船龄 29 年，河海连通船平均船龄 28 年。

乌克兰方面：2011 年初，乌克兰内河航运船队有 1,048 艘船只，包括 18 艘油轮和 276 艘干货船，其中 66 艘是机动船。

#### **b.Baltic 流域 (840 km)**

在加里宁格勒和立陶宛，内河船队微不足道。在波兰，2007 年有 107 艘自行式驳船，平均运力 600 吨，428 艘推式驳船，平均运力 500 吨。这支舰队在波兰的水道上作业，这些水道与德国的水道和莱茵河流域相连。

#### **c.Czech-Slovak 干线 (714km)**

捷克船队由 68 艘自行式驳船和 249 艘推曳式驳船组成，平均载重量分别为 900 吨和 500 吨。它们目前主要从事国内运输，而跨国运输的经济可行性受到航道有限深度的严重影响。斯洛伐克舰队主要在多瑙河上运输货物。2009 年斯洛

伐克共有内河船舶 228 艘，其中推船 42 艘，自行船 28 艘，推驳船 143 艘，客船 15 艘。

#### d.Rhône-Saône 流域（679km）

Rhône-Saône 流域专用的船队由宽度超过 5.1 米或足够窄但长于 Freycinet 船闸（38.5 × 5.20 米）的船只组成，这样尺寸的船只能够在该流域航行，因为从该流域出来的每条路线都是 Freycinet 船闸的尺寸。目前船队总吨位 21.54 万吨，船舶 152 艘，其中 2008 年营运船舶 134 艘，总吨位 20.96 万吨。公共运输部分由挪威国家航道管理局定期报告。

#### e.Seine-Oise 流域（632km）

Seine-Oise 流域的专用船只数量约为 500 艘（宽度超过 5.8 米），唯一能通行的相连航道是北运河（6 米宽的船闸），其他所有运河都是 Freycinet 尺寸的运河，船闸宽度为 5.2 米。船队的很大一部分是推船。因为没有 Freycinet 船，船队的平均规模比整个法国舰队大。

### （2）船型构成

如图 2.2-5 所示，莱茵河和多瑙河船队的船舶数量占据整个欧洲地区船队数量的大部分，干货船的数量要高于液货船和推船、拖船。

欧洲区域内河不同船型船队规模				
	干货船	液货船	推船和拖船	合计
莱茵河船队	6942	1435	1353	9749
多瑙河船队	2652	204	642	3498
其他船队	1561	26	727	2314
合计	11155	1665	2722	15542

图 2.2-5 欧洲不同地区船队干货船、液货船和推船、拖船的数量

从主要国家的船舶数量来看，荷兰以 4175 艘货船、841 艘推船和拖船的船舶数量居首位<sup>[80]</sup>。其次是德国，约有 2000 艘货船，410 艘推船和拖船。图 2.2-6 和图 2.2-7 分别展示了各个国家的货船和推拖船数量。

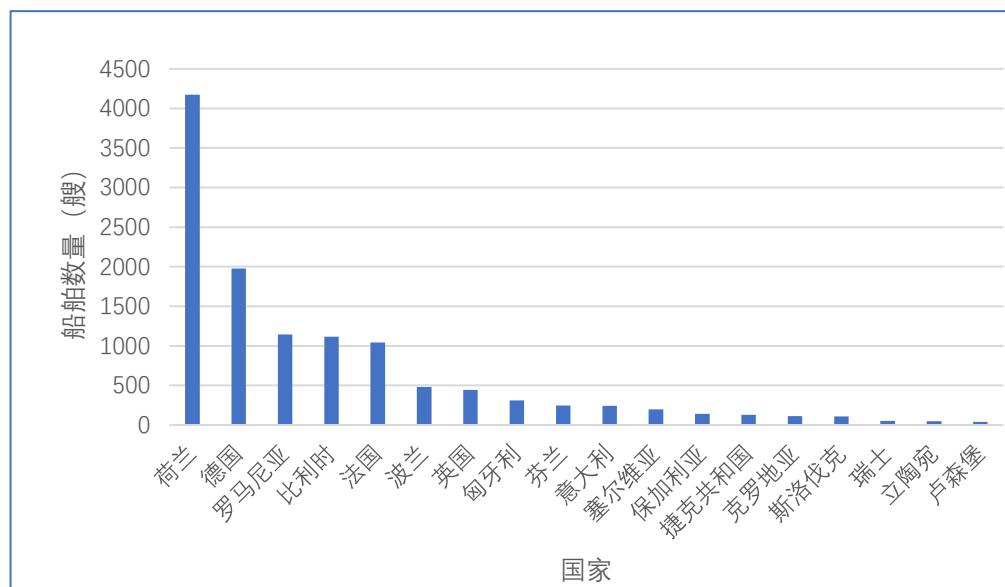


图 2.2-6 欧洲各国干货船和液体货船的数量

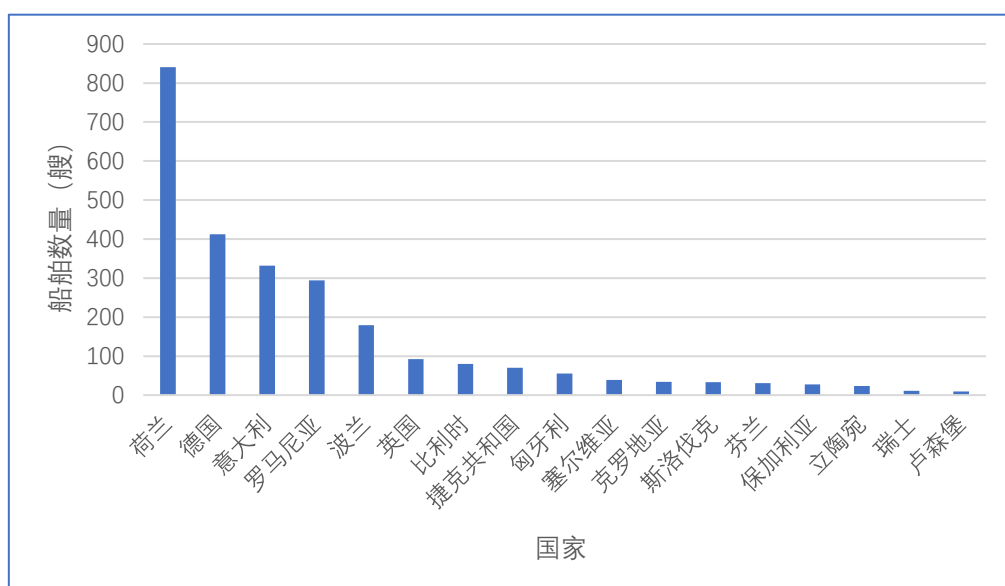


图 2.2-7 欧洲各国推船和拖船的数量

### (3) 船龄结构

如图 2.2-8 所示，欧洲海事安全局统计了截至 2023 年整个欧洲船队（包括远洋船、内河船、沿海船）的平均船龄。

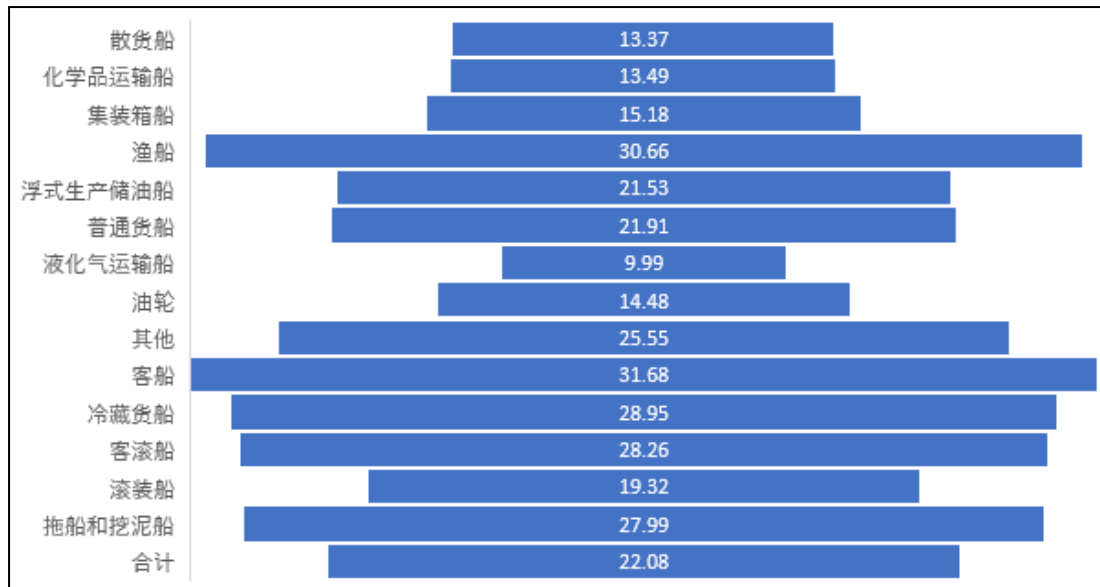


图 2.2-8 欧洲船队的平均船龄

目前在欧洲内河上航行的许多船只都是 30 多年前建造的。事实上，莱茵河流域干货船的平均建造年份是 1965 年，油轮的平均建造年份是 1979 年。油轮船队是莱茵河流域最年轻的船队，21 世纪建造的油轮占有所有油轮的 52%，而干货船和客船的这一份额分别为 16% 和 29%。

欧洲内河的推船和拖船大多是在 20 世纪建造的。荷兰在推拖船方面具有领先地位。进入 21 世纪以来，全球 102 艘新推拖船中，仅荷兰就注册了 70 艘。莱茵河船队中大约 69% 的推轮和拖船在荷兰注册，其次是德国，占 19%。

莱茵河沿岸国家约 53% 的油轮在荷兰注册，其中 47% 是在 20 世纪建造的，其余 53% 是在 21 世纪建造的。值得注意的是，荷兰的油轮在莱茵河所有油轮中 53% 的占比几乎完全符合国家船队数据库显示的 52% 的占比。排在第二位的德国油轮约占全球总量的 25%，其中约 45% 建于 20 世纪，55% 建于 21 世纪。

干散货船船队是所有船型的船队中最古老。84% 的船舶建造于 20 世纪，仅有 16% 建于 21 世纪。干散货船中 51% 在荷兰注册，德国和比利时分别占 22% 和 16%。这些基于 IVR 数据库的数据，与国家船队数据库中的数据基本相符。依据后者的统计，莱茵河沿线 49% 的干散货船在荷兰注册，22% 在德国，14% 在比利时。法国 98% 的干散货船是在 21 世纪之前建造的，这是莱茵河流域所有国家中最古老的船队。而瑞士和荷兰，这一比例加起来高达 76%。

莱茵河流域的客船总数为 2213 艘，其中 71% 是 2000 年以前进入市场的。荷兰和德国仍然在客船数量上占据领先地位，分别占有所有船舶的 53% 和 33%。瑞士以 9% 的份额排名第三，约有 200 艘客船。

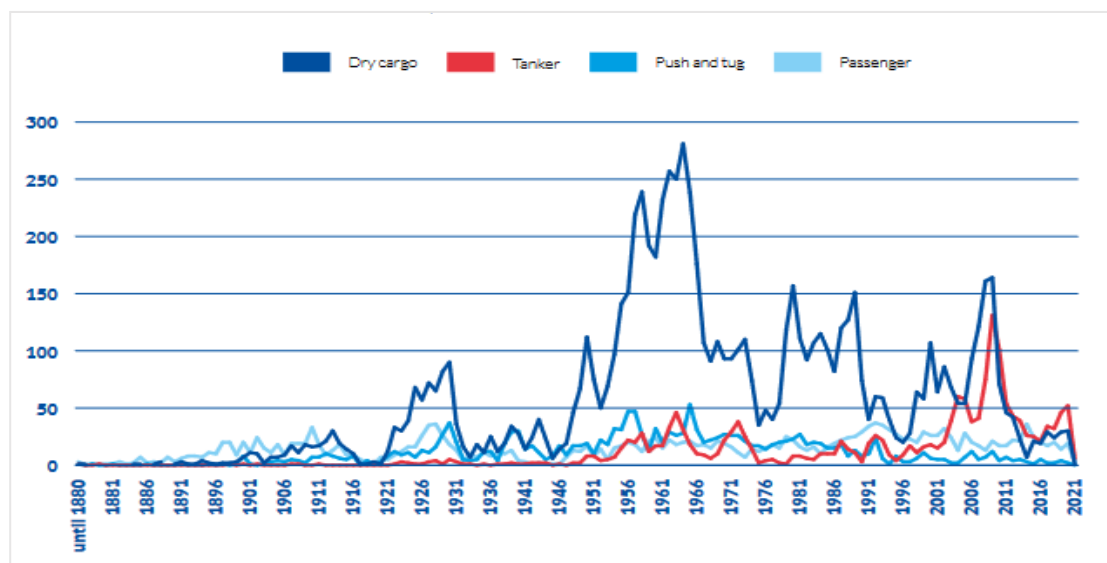


图 2.2-9 1880-2021 年间莱茵河流域不同船型的船舶试运行数量变化

多瑙河干货船的平均船龄从 18 年（克罗地亚、乌克兰）到 32 年（斯洛伐克、摩尔多瓦）不等。奥地利的平均船龄是 25 岁。多瑙河船队的总平均船龄也是 25 年。另一方面，由于缺乏数据，多瑙河液货机动船整体的平均船龄更难确定，油轮的平均船龄为 28 年。除塞尔维亚和克罗地亚（超过 25 年）外，驳船船队的平均船龄不到 20 年。罗马尼亚（735 艘，平均船龄 17 年）和乌克兰（369 艘，平均船龄 12 年）的驳船船队是多瑙河上规模最大、最年轻的船队。奥地利干货推驳船的平均使用时长为 19 年。

表 2.2-3 多瑙河船队的船龄

船型	船龄（年）
干货机动船	25
液货机动船（油轮）	28
拖船	35
推拖船	27
推船	25

欧洲现役内河游轮船队占世界现役内河游轮船队的 40% 以上。欧盟地区的内河游船主要集中在中欧水道，根据船只数量，这些水道占欧盟内河游船船队

总数的近 75%。2020 年，欧洲内河游轮数量达到 397 艘，总计 57,940 张床位，而 2019 年为 378 艘现役船只，总计 54,814 张床位。

如图 2.2-10 所示，欧盟游轮的船龄很年轻，2011 年以后建造的游轮有 194 艘，几乎占整个船队的 50%。

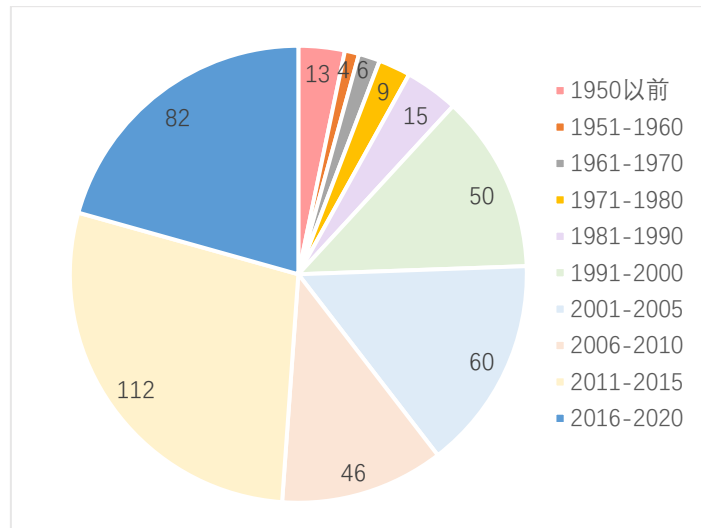


图 2.2-10 按建造年份划分的欧盟内河游船数量

此外，船舶燃料方面，90%的船舶燃料是柴油，而 10%的船舶燃料消耗为 MDO、HFO、LNG 和其他替代燃料。

### 2.2.2.3 货物运输情况

考虑到总运输表现，莱茵河流域国家（比利时、法国、德国、卢森堡、荷兰、瑞士）加上瑞士、塞尔维亚和乌克兰，占据了欧盟 27 国内河水运货物周转量的 78.6%，多瑙河沿岸国家的水运份额则为 19.1%（不包括乌克兰）。从 2020 年欧洲内河水运货物周转量（约 1320 亿吨千米）来看，74.4%的运输属于跨国运输，无论是出口、进口还是过境运输。内河运输对某些走廊特别重要。目前的市场特征表明，在莱茵-阿尔卑斯走廊内的跨境交通中，内河水运占 54%的运输份额。对于北海-地中海走廊，内河水运占 35%的跨境交通量，北海-波罗的海走廊占 38%，莱茵-多瑙河走廊占 14%。

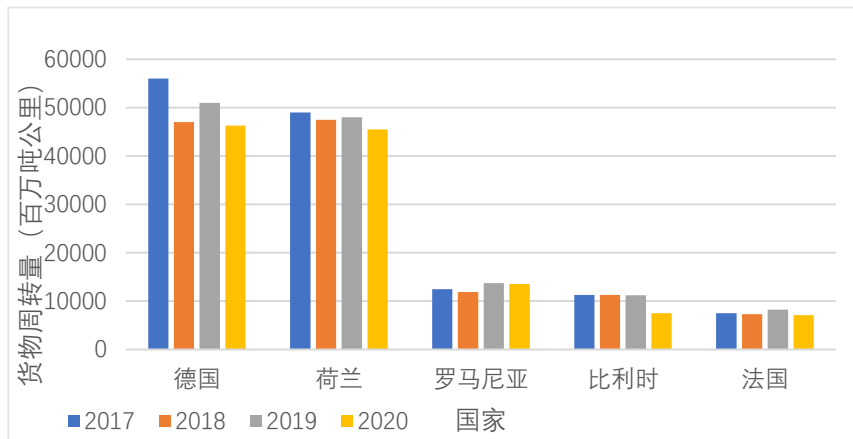


图 2.2-11 欧盟各国的内河水运情况

传统范畴的莱茵河（从巴塞尔到德荷边境）的货物运输量在 2020 年达到 1.6 亿吨，货物周转量达到 326 亿吨千米，这部分数据由德国统计局根据港口和船东提供的信息计算得出。莱茵河航运中各货物运输量的一个重要变化趋势与能源变化趋势有关，煤炭在能源部门中被逐步淘汰导致了煤炭运输的减少，2020 年延续了这种下降趋势。莱茵河运输的煤炭主要是从国外进口的，其中约一半用于能源行业，另一半用于生产钢铁。如果单独考虑与钢铁有关的煤炭，所有与钢铁生产有关的货物运输约占莱茵河水运货运量的 25%。

唯一呈现上升趋势的水运货物类型是农产品和食品，这与欧洲收获的更高的粮食产量有关。2020 年集装箱货物运输量（净重）达 1500 万吨，与 2019 年的 1520 万吨基本持平。表 2.2-4 和图 2.2-12 显示了莱茵河水运不同类型货物的货运变化。

表 2.2-4 莱茵河水运货物运输量

货物类型	2019	2020	年增长比例%
莱茵河总货运量	174.1	160.0	-8.4
矿物油产品	30.0	27.6	-8.0
砂、石、砾石	28.6	26.2	-8.4
化学品	20.1	19.3	-3.7
铁矿石	21.6	18.5	-14.2
农产品和食品	15.7	17.4	+10.7
煤炭	22.4	17.1	-23.8
集装箱货物	15.2	15.0	-1.4
金属	9.3	8.0	-14.6

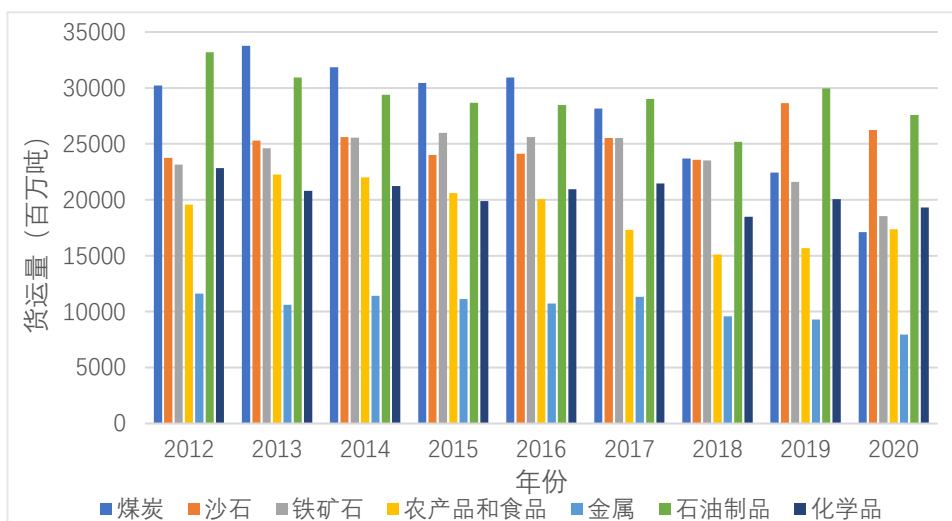


图 2.2-12 莱茵河水运货物类型

在凯尔海姆（德国）和罗马尼亚黑海之间的整个可通航的多瑙河航段上，每年的货物运输量在 3600 万至 4000 万吨之间。2020 年，多瑙河上（欧盟的多瑙河流域国家加上塞尔维亚）的货物周转量达到 258 亿吨千米，比 2019 年减少了 1.4%。

铁矿石、金属、金属制品、钢铁和炼焦煤的货运量占多瑙河所有货物运输的 45-55%。2014 年至 2019 年期间，多瑙河的铁矿石和金属货运量总体呈上升趋势。这是由于沿线许多国家积极的宏观经济增长环境，特别是 2014 年至 2019 年间，大多数国家的钢铁产量持续增长。农业部门稳定支撑着多瑙河运输，大量的粮食和其他农产品从多瑙河中部的港口运往多瑙河三角洲的港口。多瑙河上石油产品和化工产品的运输市场相对稳定。

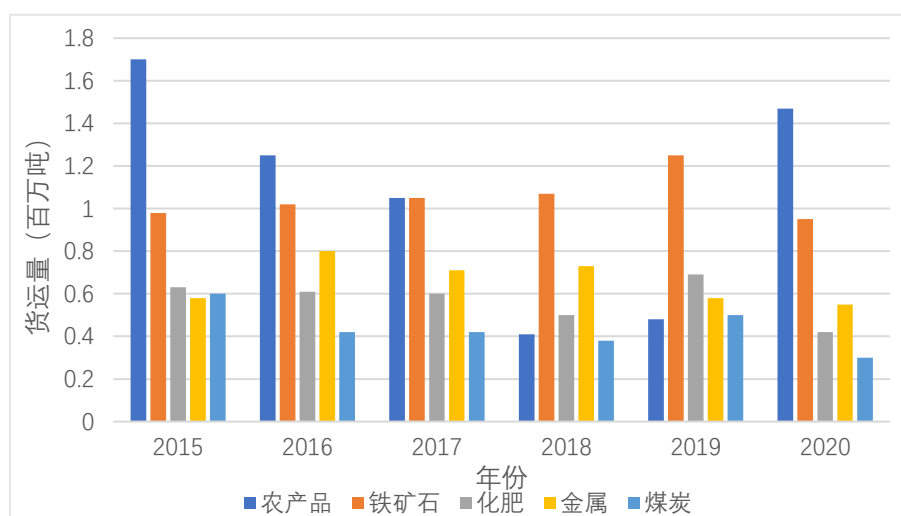


图 2.2-13 多瑙河中游的货物运输（百万吨）



#### 2.2.2.4 港口建设现状

整个欧洲有很多内河港口可供使用。据欧洲内河港口联合会统计，在欧盟超过 18 个国家有近 200 个内陆港口。一些主要的内陆港口如表 2.2-5 至表 2.2-8 所示。

表 2.2-5 莱茵河主要港口的内河运输量（以百万吨计）

港口/年份	2017	2018	2019	2020
Duisburg	52.2	48.1	47.8	42.4
Cologne	10.7	8.9	9.1	9.1
Mannheim	9.7	7.5	7.9	6.9
Strasbourg	8	5.9	7.5	6.8
Neuss	8	7.6	6.9	6.5

表 2.2-6 多瑙河主要港口的内河运输量（以百万吨计）

港口/年份	2017	2018	2019	2020
Constanța	12.1	12.1	14.5	14.5
Galati	6.3	6.4	5.9	4.5
Ismail	5.1	4.7	4.3	3.2
Smederovo	3.2	3.6	4	2.6
Linz	4.2	3.2	3.4	3.4

表 2.2-7 荷兰主要港口的内河运输量（以百万吨计）

港口/年份	2017	2018	2019	2020
Rotterdam	159.2	152.8	152.8	150.6
Amsterdam	58.4	60.1	60	53.1
Vlissingen	13.4	15.3	19.9	17
Terneuzen	14.1	14.1	14.4	14.3
Moerdijk	9.5	10.2	10.2	10.9

表 2.2-8 法国和比利时主要港口的内河运输量（以百万吨计）

港口/年份	2018	2019	2020
Antwerp	99.3	101.3	101.0
Paris	22.1	25.3	22.8
Liège	16.0	16.0	13.9
Strasbourg	5.9	7.5	6.8
Rouen	4.8	5.5	5.9

根据 CCNR 2020 年发布的报告统计，途径莱茵河和多瑙河内河港口的货物总量在内陆腹地的港口中呈上升趋势，而靠近海洋的港口则有所减少。多瑙河河口附近港口的货物运输量从 8.5% 下降到 4.4%，而位于多瑙河中游和上游的港口货运量显著增加。

### 2.2.3 船舶排放现状

由于统计数据有限，而且经常与沿海航运等其他来源混杂在一起，因此很难获得欧盟内河航运排放的详细信息，需要依靠模型估计来获得对航运排放的认识。欧洲内陆船队排放的二氧化碳总量为 4149.2 万吨<sup>[82]</sup>。其他污染物的排放情况详见于表 2.2-9。

CCNR 的许多活动现在已经超越了莱茵河的范畴，更普遍地关注于欧洲地区可通航的内河水道。在大多数研究中，多瑙河和其他小水道的排放要么被包括在莱茵河的排放中，要么由于缺乏特定水道的数据而被排除。大多数情况下，排放估计包括莱茵河-多瑙河走廊的排放量，而不仅仅是莱茵河。表 2.2-9 提供的欧洲部分的排放量只包括 CCNR 成员国，包括德国、法国、瑞士、荷兰和比利时。

表 2.2-9 大气污染物和温室气体排放汇总表

排放	总量（千吨）
CO <sub>2</sub>	4149.2
CO	38.2
CH <sub>4</sub>	0.2
NO <sub>x</sub>	60.9
PM <sub>10</sub>	2.0

有研究估计了欧洲内河水道的排放量，包括多瑙河和其他水道：排放包括莱茵河和多瑙河内河船舶（不包括驳船和其他船舶）的排放。它包括比利时、法国、德国、荷兰、卢森堡、瑞士、捷克共和国、保加利亚、匈牙利、克罗地亚、摩尔多瓦、乌克兰、奥地利、罗马尼亚、塞尔维亚、斯洛伐克。

图 2.2-14 显示了不同欧盟国家的总排放量分布<sup>[83]</sup>。德国和荷兰的份额最高，其次是比利时和法国，这反映了内河水运在这些国家的优越表现。

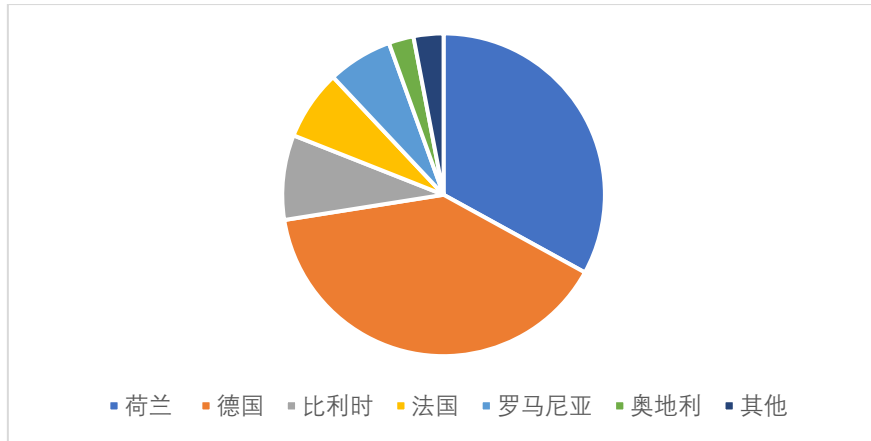


图 2.2-14 欧洲各国的排放分布

在不同船型的排放中，主要的排放来源是干散货船，占总排放量的 70% 以上。图 2.2-15 展示了小型船舶的相对低效率。650 - 1000 吨级干货船在货运业绩中所占的份额小于其排放份额<sup>[83]</sup>。

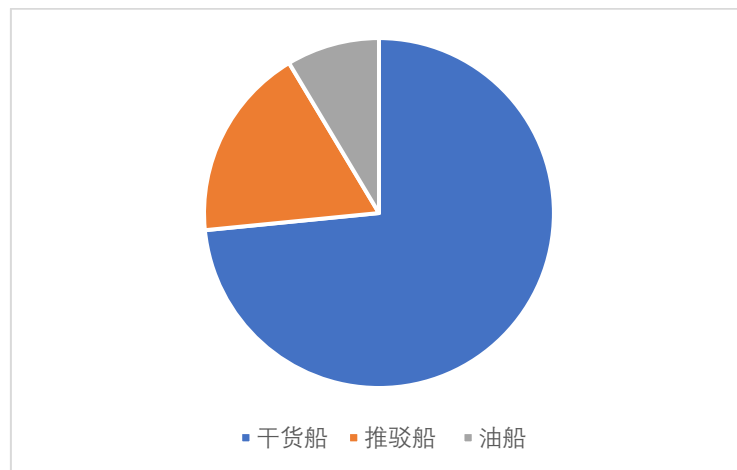


图 2.2-15 欧洲各船型的排放分布

表 2.2-10 列出了 CCNR 进行的部分研究中使用的不同船型的污染物排放因子。对于二氧化碳排放假设了不同船型均为 720 克/千瓦时的排放因子。

表 2.2-10 不同船型的排放因子<sup>[84]</sup>

船型	排放因子 (g/kWh)	
	NO <sub>x</sub>	PM
客船 (停泊或巡航工况)	9.22	0.48
推船 (发动机总功率 < 500 kW)	9.75	0.52
推船 (发动机总功率 500-2000 kW)	9.07	0.48
推船 (发动机总功率 ≥ 2000 kW)	8.26	0.41

干散货船（长度≥ 110 m）	8.13	0.42
油船（长度≥ 110 m）	7.47	0.35
干散货船（长度 80-109 m）	9.53	0.51
油船（长度 80-109 m）	8.39	0.41
机动船（长度 < 80 m）	9.63	0.52
船队	7.77	0.38
渡轮	10.30	0.54

根据内河船舶使用的燃料的排放系数，可以使用燃料消耗来粗略估计排放量。从图 2.2-16 可以看出，由于干货和液体货船是欧盟内河船队中数量最多的，这些船舶消耗了 58% 的年总燃料消耗。

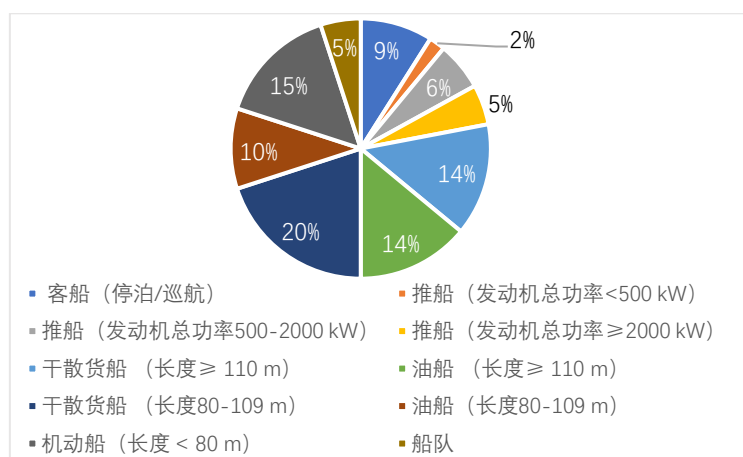


图 2.2-16 不同船型的燃油消耗份额<sup>[84]</sup>

图 2.2-17 显示了不同船型的内河船平均每艘每年的燃料消耗量<sup>[85]</sup>。

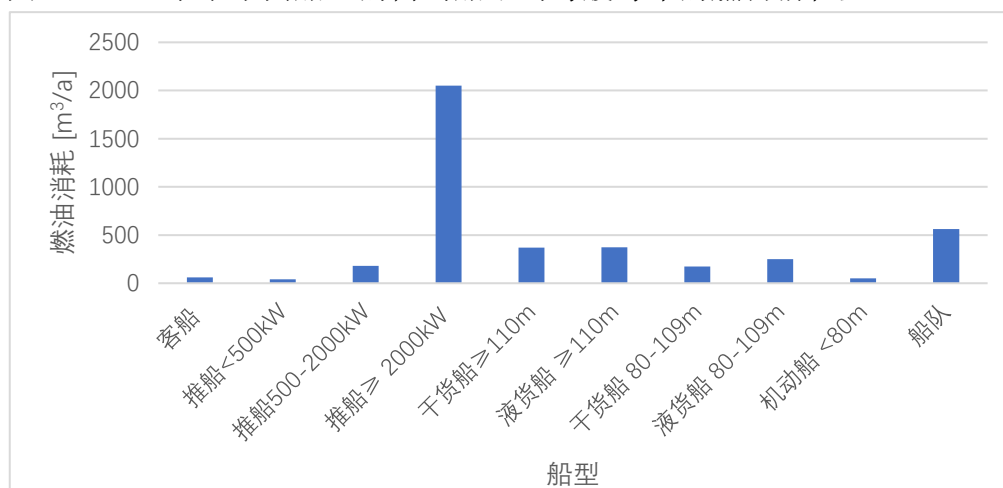


图 2.2-17 不同船型平均每艘船每年燃料消耗量

欧洲委员会发布的 2020 年莱茵河和多瑙河船队（不包括驳船）的排放清单包含的船舶总数只有 12262 艘，NO<sub>x</sub>、PM 和 CO<sub>2</sub> 的排放量以及每一类船舶的燃

料消耗量如表 2.2-11 所示。液货船和干货船在 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM 排放方面贡献最大，分别约占欧洲船队总量的 60%、57% 和 55%。

表 2.2-11 不同船型的排放

船型	船舶信息		每年的排放估计		
	船舶数量	预计耗油量(M3)	NO <sub>x</sub> (吨)	PM (吨)	CO <sub>2</sub> (吨)
客船	2553	106516	3895	177	281201
推船< 500kW	890	28644	995	49	75620
推船 500-2000kW	520	81970	2966	125	216400
推船 ≥2000kW	36	74520	2647	116	196733
干货船 ≥110m	610	206740	6681	234	545794
液货船 ≥110m	602	83168	6089	211	544582
干货船 80-109m	1801	291470	11386	551	769482
液货船 80-109m	647	153209	5171	219	404473
机动船 <80m	4463	219456	8707	432	579363
船队	140	78155	2432	85	206328
合计	<b>12262</b>	<b>1323848</b>	<b>50969</b>	<b>2199</b>	<b>3819976</b>

需要特别指出的是，对于莱茵河和多瑙河流域以外的其他地区的特定航道的排放情况并没有相关的报告和研究。

此外，正如前文所提及的，欧洲现役内河游轮数量占世界现役内河游轮船队的 40% 以上，排放自然也不容忽视。如表 2.2-12 所示，根据欧洲运输与环境联合会（AISBL）的数据，2022 年，在欧洲港口附近，214 艘游轮（仅包括 5000 总吨位的船舶）排放了 509 吨 SO<sub>x</sub>、19125 吨 NO<sub>x</sub> 和 448 吨 PM<sub>2.5</sub>。欧洲的游轮活动明显以 3 倍的速度增长，空气污染也是如此，因为港口周围的污染物排放标准多年来没有变化。与 2019 年相比，游轮的数量、在港口附近停留的时间和消耗的燃料都增加了约四分之一（23-24%）。这导致 SO<sub>x</sub> 排放量增加 9%，NO<sub>x</sub> 排放量增加 18%，PM<sub>2.5</sub> 排放量增加 25%。

表 2.2-12 欧洲港口附近游轮的排放

年份	船舶数量	在港口逗留时 长 (天/船)	总燃油消耗 (吨)	SO <sub>x</sub> 排放 (吨)	NO <sub>x</sub> 排放 (吨)	PM <sub>2.5</sub> 排放 (吨)
2019	173	63.5	332124	465	16140	360
2022	214	63.2	411023	509	19125	448

如表 2.2-13 所示，2019 年至 2022 年期间，游轮在欧洲专属经济区（EEZ）停留的时间与在港口附近停留的时间相近，即增加了 23%，燃料消耗量增加了 18%，航行距离增加了 16%。由于 2020 年引入了全球 0.5% 的硫含量上限，2019 年至 2022 年，专属经济区的 SO<sub>x</sub> 排放量减少了 62%，NO<sub>x</sub> 增加 8%，PM<sub>2.5</sub> 下降 15%。与燃料含硫量有关的 PM 排放量预计会减少更多，但实际上，与使用含硫量为 0.1% 的 MGO 相比，洗涤塔的使用加剧了 PM<sub>2.5</sub> 的排放。

表 2.2-13 EEZ 区域航行游轮的排放

年份	船舶数量	航行距离（海里）	EEZ 逗留时长（小时）	总燃油消耗（吨）	SO <sub>x</sub> 排放（吨）	NO <sub>x</sub> 排放（吨）	PM <sub>2.5</sub> 排放（吨）
2019	173	6484194	722806	2198	41	128	8
2022	214	7514499	887977	2591	16	139	7

游轮的所有排放量在 2019 年至 2022 年间都有所增加。到 2022 年，CO<sub>2</sub> 排放量增加了近 17%，达到 810 万吨 CO<sub>2</sub>。这些排放量相当于巴黎和纽约之间 5 万次航班的排放量。CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 和黑碳（BC）的排放量如表 2.2-14 所示。

表 2.2-14 游轮的温室气体排放

年份	船舶数量	总燃油消耗（千吨）	CO <sub>2</sub> 排放（吨）	CH <sub>4</sub> 排放（吨）		BC 排放（吨）	
				tCH <sub>4</sub>	tCO <sub>2</sub> 等效	tBC	tCO <sub>2</sub> 等效
2019	173	2198029	6965227	1478	44057	737	663459
2022	214	2591827	8126036	7804	232558	859	773149

## 2.3 美国篇

### 2.3.1 管理体系

#### 2.3.1.1 航运管理机构

美国内河水运的管理体系并不单由一个主体领导，而是一个由联邦、州和地方多级机构监管和规划内河水运基础设施的复杂程序<sup>[86]</sup>。总的来说，美国内河水运一共有 8 个主要的利益相关主体：美国陆军工程兵团（USACE）、美国海岸警卫队（USCG）、美国环境保护署（EPA）、海事管理局（MARAD）、州政府、地方政府、港口管理机构和航运公司。

USACE 在内河水运方面的职责主要包括管理和优化水运基础设施，提高船用替代燃料的使用，开展基础设施改进相关的实验研究，协调各州和联邦政府以降低内河水运对环境的影响<sup>[87]</sup>。USACE 本身并没有控制内河水运环境影响的

---

职责，但该部门的职责及其发布的政策和项目间接地影响着美国内河水运排放<sup>[88]</sup>。内河水运基础设施的新建和维修费用由 USACE 和使用水道的商户共同承担（50%来自于 IWTF，50%来自于 USACE）。

USCG 承担了管制船舶排放的职责，总的来说，USCG 需要规范、监测、报告和应对船舶排放相关事件<sup>[89]</sup>。USCG 通过执行美国水域内河船只的排放标准，并收集 AIS 数据来监管内河水运<sup>[90]</sup>。比如，USCG 需要确保船舶一般许可证（VGP）的施行，该法规确定了船舶排放污染物的标准，包括压载水和发动机排放<sup>[91]</sup>。作为 USCG 的一部分，国家船舶调度中心（NVMC）负责记录和监控美国水域的船舶抵达，其中一个主要职责是追踪船舶航行轨迹及其对应的排放数据<sup>[92]</sup>。

EPA 是美国内河水运排放监管的几个主要负责部门之一，主要职责包括制定船舶排放标准、监管排放、支持 R&D、提供财政拨款、管理内河水运的排放、与其他机构合作建立美国的空气污染物排放清单<sup>[93]</sup>。EPA 在内河水运方面采取主要措施包括清洁空气法案（CAA）和清洁水法案（CWA）的施行<sup>[94]</sup>。EPA 还负责向 79 英尺及以上的船舶颁发 VGP，该 VGP 的执行则由 ESCG 负责<sup>[95]</sup>。EPA 还要求部分船东上报排放和其他航行数据如燃油消耗、航行距离、平均船速和其他参数<sup>[96]</sup>。这些数据被 EPA 通过中央数据交换（CDX）或者交换网络（EN）等电子工具处理后发布在各种报告中<sup>[97]</sup>。总的来说，有 18 个州和地方机构在使用 EN，剩余的则使用 CDX。这些排放报告将对国家排放清单（NEI）的更新做出贡献。

MARAD 是美国交通部（DOT）的一个下属部门，主要职责包括确保包括港口、联邦航道和船舶运行在内的海运业的可持续增长<sup>[98]</sup>，并确保水运和其他交通运输方式联运畅通。虽然 MARAD 不像 USGC 和 EPA 对内河水运的排放有直接的监管职责，但其颁布的一些项目和政策在促进建成环境友好的水道方面扮演着重要角色，比如为改善美国航道环境质量的减排项目提供资金支持<sup>[99]</sup>。

州和地方政府也是美国内河水运管理的重要一环。美国每个州都有自己的部门监管当地内河航道网络、河流和湖泊。比如，在伊利诺斯州，内河航道由伊利诺伊州自然资源部（IDNR）的水资源办公室管理，该部门负责监管连接密

---

西西比河和密歇根湖的伊利诺斯河，并负责维护相应的基础设施，监管水质，保护航道的生态环境和野生动物资源<sup>[100]</sup>。在州内，伊利诺斯州环境保护局（IEPA）负责管理包括内河船舶在内的各种排放源的排放<sup>[101]</sup>。其他主要的州级排放管理部门包括明尼苏达州污染控制署（MPCA）、路易斯安那州环境质质部（LDEQ）和加州空气资源委员会（CARB）等等。

在地方层面，港口当局通过各种计划和倡议，在内陆航运脱碳方面发挥着重要作用。港务局的主要职责是管理港口供应链和基础设施<sup>[102]</sup>。美国一些重要的港务局包括洛杉矶港、休斯顿港、新奥尔良港等。

此外，航运公司、非政府组织、环保组织和研究中心也可以影响内河航运业的治理<sup>[103]</sup>。

简而言之，美国的内河水运治理是一个复杂的多层系统，涉及联邦、州、地方多级部门和其他利益相关者之间的协商合作。该系统主要被认为是纵向分级管理的，联邦机构在重大政策和基础设施项目中发挥主导作用。但在一定程度上，它确实涉及一些横向结构的多层次治理。例如，联邦政府将对美国所有航道拥有管辖权。另一方面，州政府的管辖权局限于本州内的部分河道，而不是整个水系，并且在一些重大项目中仍需要得到联邦政府的批准<sup>[104]</sup>。各州政府可以选择遵循联邦政府实施的控制政策，也可以制定更严格的标准，例如加利福尼亚州就实施了更严格的排放标准<sup>[105]</sup>。此外，这些部门还将监管地方和国家层面的空气质量，提供财政支持和激励政策以鼓励更清洁的技术，并推动各方共同参与到美国环境保护的事业中<sup>[106]</sup>。图 2.3-1 显示了美国 IWT 的治理概要。



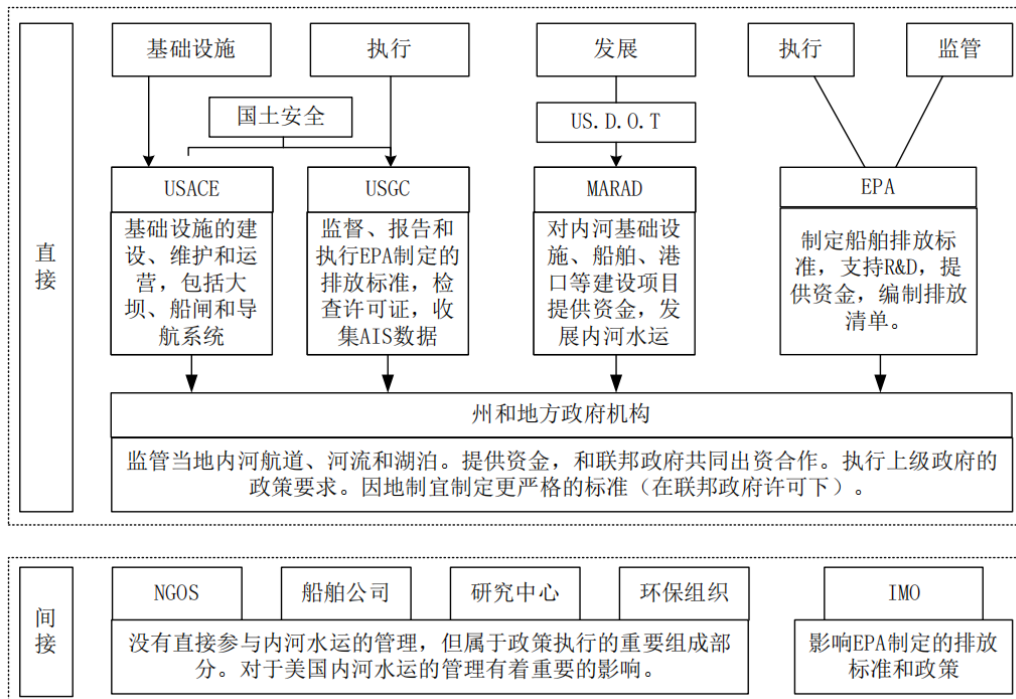


图 2.3-1 美国 IWT 治理概况

### 2.3.1.2 航运管理法规

在美国，内河水运的监管法规是一个复杂的框架，主要包括联邦、州和地方法案、EPA 制定的排放标准和其他国际标准。

提到联邦法律，就不得不提琼斯法案，也被称为 1920 年商船法，该法案要求所有通过美国水路运输的货物必须由美国制造、船东和船员均为美国公民的船只运输<sup>[107]</sup>。

内河水运方面的另一个重要法案是《河流和港口法》<sup>[108]</sup>。始于 1899 年，该系列法案赋予 USACE 开发、改造和监管美国水道及有关项目的权力<sup>[109]</sup>。

《内河航运条例》是一套联邦层级的法规，监管内河船舶的航运过程，包括船舶航行交通规则、航灯规则、先行权规则等<sup>[110]</sup>。

《污染防治法》通过限制生产、经营过程及原材料的使用，来减少包括内河水运在内各部门的污染排放<sup>[111]</sup>。具体到内河水运方面，该法律要求船舶制造商、船东和经营人遵守 MARPOL 附则 VI<sup>[112]</sup>。

最全面的联邦法律之一是《清洁空气法》（CAA）和《清洁水法》（CWT）<sup>[113]</sup>。CAA 规范了美国的排放和空气污染，对包括内河船舶在内的所有排放源

制定了若干法规<sup>[114]</sup>。而 CWT 则针对的是水污染治理，其主要目标是保护、改善和恢复美国的水质<sup>[115]</sup>。

1978 年的《内河税收法》设立了内河航道信托基金<sup>[116]</sup>。该基金的收入来自船用发动机的燃油税，该税被称为内河航道使用费，税费为每加仑 0.29 美元<sup>[117]</sup>。该基金的主要目的是建设、维护内陆基础设施。完善的基础设施和航道建设可以减少排放的产生、支持减排技术的应用，因此该基金间接影响着内河水运的减排。值得注意的是，该费用仅由机动船支付，同时在一些水道上航行的船舶是免税的，如夏威夷、阿拉斯加、巴吞鲁日以下的密西西比河下游部分地区、威拉米特河和休斯顿航道。图 2.3-2 显示了联邦收取燃油税的内河水道。



图 2.3-2 美国收取燃油税的内河水道

另一个重要的基金是根据 1986 年《水资源开发法》（WRDA）设立的港口维护基金，主要目的是维护港口航道和开发项目，确保美国水道内的顺畅运行<sup>[118]</sup>。港口维护费是对国内和国际贸易的一些货物征收的费用，收费标准为货物商业价值的 0.125%<sup>[119]</sup>，这相当于每 1000 美元价值的货物需要缴纳 1.25 美元的港口维护费<sup>[120]</sup>。按照传统规律，WRDA 每两年通过一次新法案。第一部《水资源保护法》于 1974 年颁布，随后几年通过了一系列法案，以应对不断变化的水资源和基础设施相关挑战。最近一次更新是在 2022 年，其主要目的是批准 94 项新的技术研究的启动，并批准 21 项水资源相关的基础设施项目的建设<sup>[121]</sup>。

监管框架的另一个组成部分是国际法规，主要涉及国际海事组织（IMO）的法规和标准。美国作为 MARPOL 的签署国，适用 MARPOL 附则 IV 中的标

准，EPA 将负责对美国船舶执行这些标准<sup>[122]</sup>。IMO 的另一项重要举措是设立大气污染物排放控制区（ECA）。IMO 在 EPA 的协助下，于 2010 年设计了北美控制区，涵盖夏威夷 8 个岛屿、太平洋、大西洋和墨西哥湾沿岸，在这些地区作业的船舶都需要遵守更严格的排放标准，具体控制标准如表 2.3-1 所示<sup>[123]</sup>。

表 2.3-1 北美大气排放控制区（ECA）

地区	SO <sub>x</sub> 和 PM 控制标准		NO <sub>x</sub> 控制标准	
	起始日期	燃料硫含量 (ppm)	船舶建造年份	NO <sub>x</sub> 排放 限值
北美大气排放控制区和 美国加勒比海	2010 年 7 月 1 日之前	15000	2016 年 1 月 1 日及以后	阶段 III
	2010 年 7 月 1 日之后	10000		
	2015 年 7 月 1 日之后	1000		

通过明确的排放标准和强制许可管理内河船舶的航行。EPA 负责制定包括内河船舶在内的美国船舶的排放标准，规定不同污染物的最高排放限值。在《船用发动机法规》中，EPA 对 C1、C2 和 C3 三大类船舶设定了不同的排放标准<sup>[124]</sup>。EPA 的一级标准始于 1996 年，在 2001 年至 2006 年间生效的二级标准下应用了不同严格程度的限值，三级标准在 2006 年至 2008 年之间分阶段实施，四级标准引入了大量减少 NO、HC 和 PM 的标准，第五级标准目前由 CARB 规划，计划于 2024 年实施，Tier 5 旨在实施更严格的 PM 和 NO<sub>x</sub> 标准，还计划提出新的船舶二氧化碳排放标准<sup>[125]</sup>。

管理美国水道的另一个重要方法是颁布并执行许可。首先是船舶一般许可证（VGP），该许可为船舶排放污染物（包括发动机排放）设定标准，由 EPA 授予并由 USCG 执行<sup>[126]</sup>。此外还有一些其他的许可，例如由 USCG 签发的检查证书和海岸警卫队文件等等。图 2.3-3 概述了美国内河航道的监管框架，包含了部分较为重要的法规和条例。

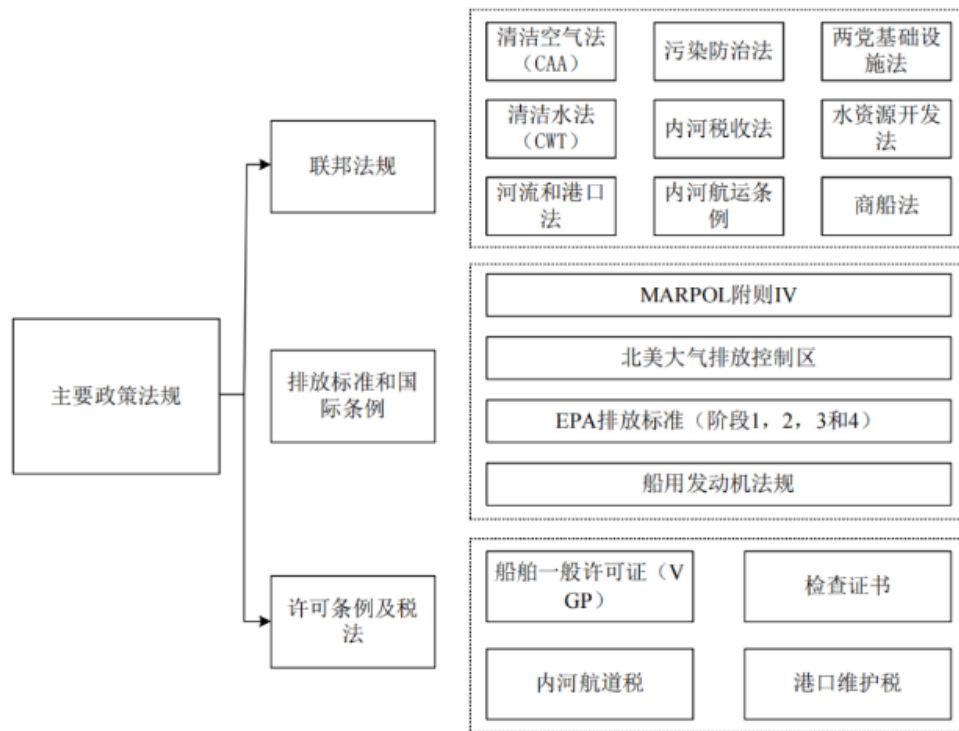


图 2.3-3 美国内河水运主要的法规、政策和标准

美国内河水运的脱碳和减排在联邦和州层级均属于优先事项，各级政府正在通过许多政策、项目、基金、行动方针等推进内河水运的减排。目前针对内河水运减排的措施可以分为以下几个方向。

首先是能源和减排技术方面的应用。在船舶改造方面，推动船用燃料向零排放燃料的过渡，提高生物燃料、氢和氨等替代燃料的应用；改造船舶设备使之能够使用电力或者建造运行全电动内河船；改进内河船舶的设计，改造现有船舶，以降低燃料强度，提高能源效率。在内河港口方面，往港口电气化和可再生能源使用的方向发展，通过岸电设施减少内河船舶靠港期间的排放，考虑在港口建设必要的基础设施以利用太阳能和风能等可再生能源。此外，鼓励科技创新是必要的，政府需要提供必要的资金和政策支持以促进内河船舶减排新技术的开发和应用，包括提高船舶航行效率、探索替代燃料的使用、开发船舶电池技术和许多其他的重要研究课题。

其次是水运相关基础设施的建设。内河水运的发展程度很大程度上受到船闸尺寸、航道宽度和可通航深度的限制。对于大多数美国水道来说，只有大约9英尺的可通航深度，这对于内河船舶的通航显然造成了很大的阻碍。而老旧的

---

船闸带来的船舶等待时长也将带来许多不必要的停泊排放。因此，建设航道、改善内河基础设施，以促进向更清洁高效的内河水运的转型是美国内河水运发展的一大重点。

最后是管理方面的提升。建立一个明确的管理框架，通过不同的机构和明确的分工来有效地执行。此外，还需提高内河水运行业不同参与者之间的协作和伙伴关系，主要是公私合作关系，这将支持水运基础设施的资本密集型投资。

以下对直接或间接促进美国内河水运部门减排的几个重要政策进行了总结。

一个重要的航运发展项目是两党基础设施法（BIL）。该法案设立的基础设施基金是拜登-哈里斯美国港口和水道行动计划的一部分，投资超过 170 亿美元，用于改善内河航道和港口的基础设施，应对内河水运的环境挑战。基金的目标是维护和修复内河水运的基础设施，建设绿色、智慧和高效的港口，促进内河船舶的电气化，提高减排技术的使用。BIL 支持的项目包括美国海上公路计划和港口基础设施发展计划。

海上公路计划来自于 MARAD，致力于扩建现有基础设施，建造新的海运设施，旨在发展海运业同时减少航运排放。一个海上公路计划补助金的例子是 2022 年的詹姆斯河集装箱扩建工程，计划为项目提供了 371.2 万美元的拨款，以扩大该地区的驳船集装箱业务，加强水路运输。

港口基础设施发展计划在提供资金以建设和改善港口设施的同时也支持清洁能源技术和电气化改造现有设施。该计划为 2022 年加州中港码头零排放转换项目提供了三千万余美元的资金支持，用 60 台新的电动拖拉机取代目前码头堆场的所有柴油拖拉机，并为位于长滩港的码头增加岸上技术基础设施。

抑制通货膨胀法案（IRA）向 EPA 提供 30 亿美元，用于投资水运碳中和技术，并协助美国港口制定减排行动计划。EPA 的清洁港口计划就是由法案资助的倡议之一，计划协助美国港口制定旨在改善空气质量和实现零排放的气候行动计划。

MARAD 还设立了建设储备基金，提供延缓税收的优惠，旨在扩大和现代化美国船队并提高现有船只的运行效率。该计划覆盖了大量的船舶，包括大型货船、油轮、拖轮、驳船、在五大湖运营的内河船舶等。

此外，MARAD 还设立了小型造船厂拨款计划，对于规模较小的船东和运营者提供资金支持，帮助其修理或改造船舶，以提高船舶的航运效率和环保性能。

EPA 还发布了柴油减排法案，通过与其他政府部门、环保组织、企业等合作，减少包括内河水运在内的运输部门的柴油相关的排放。法案为使用柴油发动机的船舶所有者提供补助金，以更换或改造其船舶。该基金为休斯顿港务局提供了 200 万美元，为两艘港口所有的船舶改装新的 Tier 4 船用发动机。

此外，还有一些计划和基金在内河水运的发展和减排中发挥着重要作用，如 USACE 的可持续航运和生态发展计划、EPA 的智能公路运输计划、MARAD 的海事环境和技术援助计划、内河航道信托基金、港口维护基金、拥堵缓解和空气质量改善计划、清洁船舶行动计划等。

如表 2.3-2 所示，MARAD 是主要的为内河水运各方提供资金来源的的联邦机构。考虑这些项目的建设目标，以基础设施的发展为首要的目标的项目在数量上占有优势，其次是港口和设备的电气化，最后才是替代燃料和可再生能源的发展。

表 2.3-2 美国几个主要的直接或间接推进内河水运脱碳的资金和项目

项目及其来源	基础设施	替代燃料或 可再生能源	电气化或能源 效率的提升	促成合作
美国海上公路计划(MARAD)	X			X
港口基础设施发展计划 (MARAD)	X	X	X	X
建设储备基金 (MARAD)	X			
基本建设基金 (MARAD)	X			
清洁港口计划(EPA)	X		X	X
小型造船厂拨款计划 (MARAD)	X			
可持续航运和生态发展计划 (USACE)	X			
港口维护基金 (USACE)	X			
内河航道信托基金 (USACE)	X			
海事环境和技术援助计划 (MARAD)	X	X	X	X

柴油减排法案(EPA)	X	X		X
联邦船舶融资计划 (MARAD)		X	X	X
MARAD 的生物燃料计划 (MARAD)		X		
智能公路运输计划 (EPA)		X		X
拜登-哈里斯美国港口和水道行动 计划	X			X

## 2.3.2 航运现状

### 2.3.2.1 主要河流

美国内河水系拥有超过 12000 英里可通航的河流、湖泊和运河<sup>[127]</sup>，是全国货物运输和贸易的重要支柱之一。内河水运运输了大量的煤炭、石油产品和其他化学品<sup>[128]</sup>，因其商品特点，造成了大量的直接和间接排放。根据美国最新水上运输航道报告，2021 年美国除了渔船以外的注册船舶数量约为 44662 艘<sup>[129]</sup>，其中内河船舶数量最多，约为 35224 艘，其次是沿海船，约为 8845 艘，五大湖地区的船舶数量为 593 艘。

据国家水运基金会，约 20%用于发电的煤炭、22%的石油产品和全国 60%以上的粮食出口通过内河水路运输<sup>[130]</sup>。正如 USACE 在其年度运输报告提到的，内河和五大湖地区贡献了 5.439 亿吨的货运量和 29.23 亿吨英里的货物周转量<sup>[131]</sup>。

美国内河规模最大也最重要的水系是密西西比河水系。该水系的河流总长度约 2500 英里，是连接中西部和南方地区的交通命脉<sup>[131]</sup>。密西西比河包括了密苏里河、俄亥俄河、伊利诺伊河和其他一些支流，连接了包括明尼阿波利斯、孟菲斯、圣路易斯和新奥尔良在内的许多重要城市。作为美国最繁忙的航道之一，密西西比河贡献了美国内河水运市场重要的煤炭和石油运输份额。

墨西哥湾沿岸航道在运输石油和化学品相关制品方面同样重要。该水系拥有超过 1100 英里的河流长度，连接了如休斯顿和新奥尔良的重要港口。根据美国最新水上运输航道报告，有超过 35104 艘船舶在密西西比河和墨西哥湾沿岸河道通航，占据了美国所有注册船舶的 78.9%<sup>[131]</sup>。

另一重要的内河水系是五大湖地区，包括苏必利尔湖、密歇根湖、休伦湖、伊利湖和安大略湖。五大湖是运输大宗货物如粮食、煤炭和钢铁的重要航道。五大湖的船舶数量占全国的 1.3%<sup>[131]</sup>。

美国航运的另一重要区域是沿海地区，包括大西洋、墨西哥湾和太平洋。尽管沿海航运严格意义上并不属于内河水运，但许多研究和报告都将沿海水运包含在内河水运中，通过二者的共同统计数据给出内河和沿海地区的水运特征。在沿海地区作业的船舶数量约占美国注册船舶总数的 19.8%<sup>[131]</sup>。图 2.3-4 展示了不同地区注册船舶的数量百分比，密西西比河和墨西哥湾沿岸地区应被列为美国船队减排的首要任务之一。

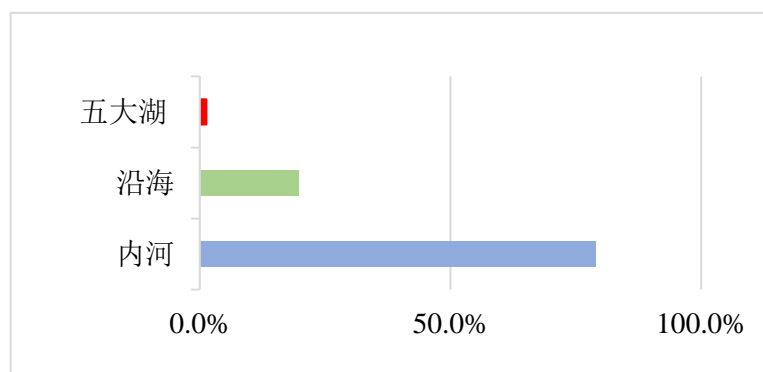


图 2.3-4 2021 年美国各地区注册船舶数量占比

### 2.3.2.2 船舶属性

#### (1) 船舶类型

正如 2.2 节提到的，美国环保署在 1999 年发布船用发动机规则后，为其国内注册船舶设定了三个主要类别，船舶的分类主要基于缸排量。就第 1 类船舶而言，主要是用于商业用途的小型内河船只，如拖船。第 2 类是中小型船舶，主要航行于内河和沿海航道。第 3 类船舶由大型远洋船舶构成，主要使用残余燃料。第 1 类和第 2 类的船舶以馏分燃料为主要能源，所适用的标准要比第 3 类船舶更严格<sup>[132]</sup>。

USACE 还将美国的注册船舶分为机动船和非机动船<sup>[133]</sup>，如图 2.3-5 所示。机动船不需要任何外部推进系统来领航，可以通过自身的动力系统来航行。机动船又分为拖船、推船、油轮、客船、干货船、近海供应船和集装箱船七类。2020 年机动船的数量为 10333 艘，其中内河有 6315 艘。非机动船，也就是驳船，因为缺乏动力系统而不能独自航行，分为五种类型：甲板驳、油驳、干顶驳、干敞驳及其他干驳船。2020 年驳船总数为 34167 艘，其中内河有 29382 艘<sup>[134]</sup>。正如前文所提及，只有机动船被纳入内河航道税的范畴，这使得这些船舶的数据更容易获取，这是由于船东在支付内河航道税以外，还需要提供更多船舶动



静态数据，包括船舶航行、船舶类型等信息。未来如能找到方式将驳船也纳入这一范畴，将有助于填补美国排放清单中关于驳船的数据空白，进而对内河水运的减排路径有更明确的认知。

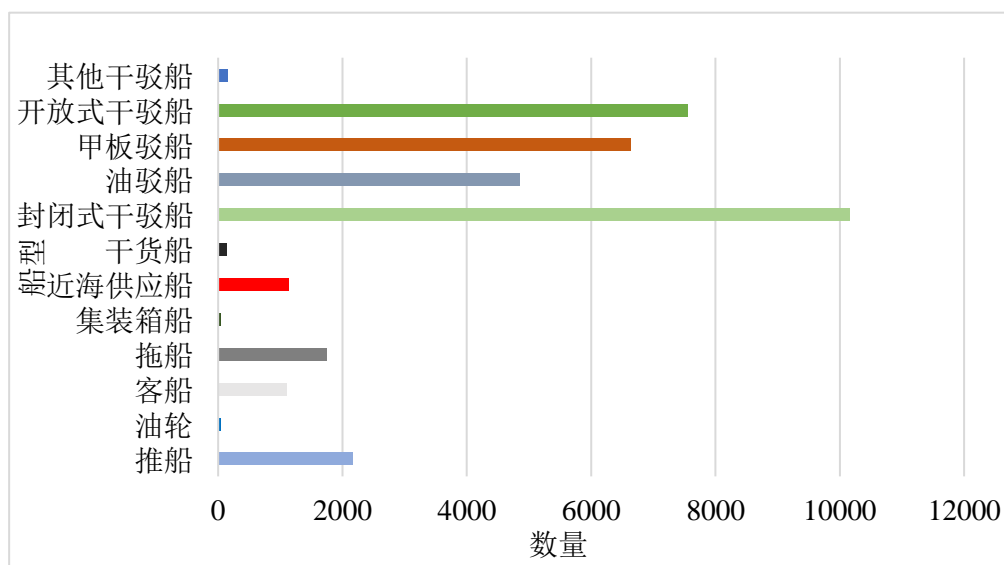


图 2.3-5 各种类型内河船舶的数量

美国内河船舶中的拖船有一套单独的由功率大小进行区分的分类方式，功率单位为马力 (hp)。USACE 统计了美国的拖船总数为 6385 艘。如图 2.3-6 所示，这种分类方式将拖船分为了低于 500hp 的 614 艘船舶、500-1000 hp 的 1513 艘船舶、1501-2000hp 的 943 艘船舶和其他类别的船舶。低于 2000hp 的拖船占据了美国总拖船数量的 60%。这些相对小型的船舶有着高达 44 年的平均船龄<sup>[135]</sup>，这对美国船队向高效清洁的船舶转型的过程造成了一定困难。

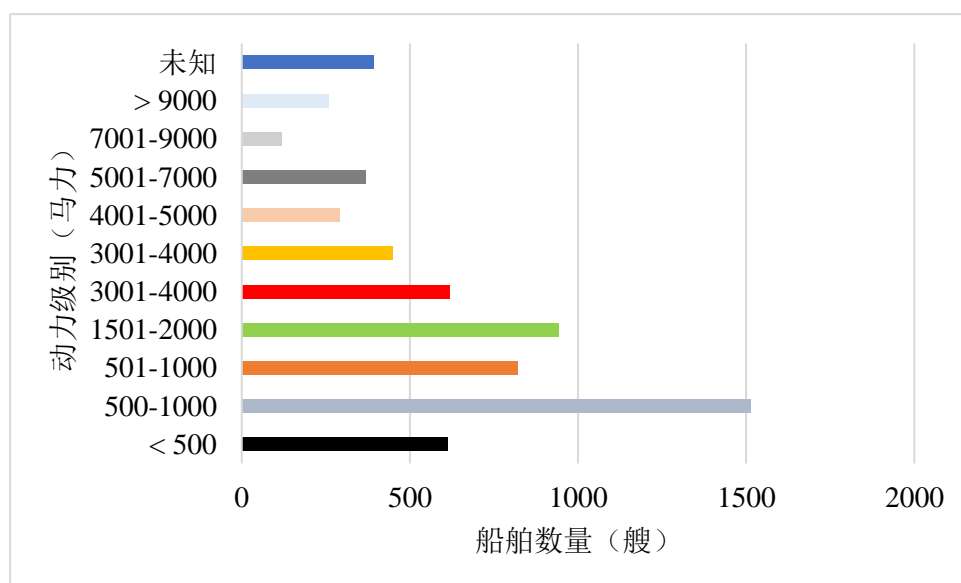


图 2.3-6 美国不同动力级别的拖船数量

## (2) 船龄结构

船舶的年龄对于其排放特征有着重要影响。尽管没有全面的统计数据单独讨论内河船舶的船龄，而是统计了美国注册船舶的总体船龄，但仍能基于已有的统计给出一点关于美国内河船舶平均船龄的分析。总的来说，美国船队 38 年的船龄中位数要高于全球的船龄中位数。例如，拖船占机动船数量的 27% 以上，在内河水运发挥重要作用，而其平均船龄要比全球高 24 岁<sup>[131]</sup>。基于来自《美国水运航线》和《2021 年美国沿海和内河航运系统》的数据，我们对美国内河水运中 8 类重要船舶的船龄进行了统计。如图 2.3-7 所示，船龄高于 25 岁的内河船舶占据了全船龄段船舶超过 33% 的比例。

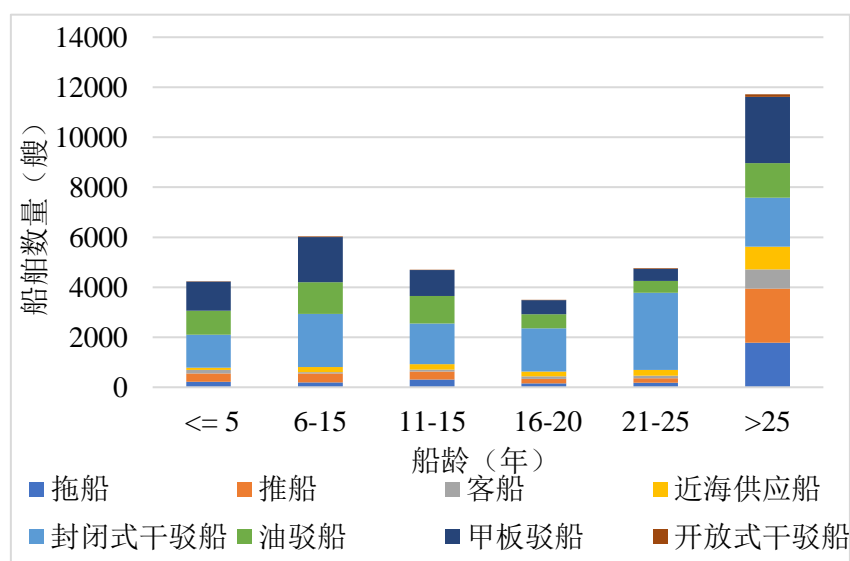


图 2.3-7 内河船队的船龄结构

### (3) 船舶运载能力

如表 2.3-3 所示，2010-2020 年，美国国内航运（内河、沿海和五大湖区）机动船总数保持相对稳定，仅从 10775 艘减少到 10333 艘。2020 年美国机动船的载客数约为 421880 人，运输货物 1177 万吨。

表 2.3-3 美国机动船运载能力

船型	2010	2015	2019	2020
	机动船			
	干货船			
船舶数量	324	247	221	222
马力	6,202,801	4,473,205	3,627,676	3,670,414
载货能力（吨）	8,500,248	6,716,918	5,685,206	5,744,728
载客能力（位）	3,204	3,209	3,221	3,221

近海供应船				
船舶数量	2,179	1,888	1,820	1,846
马力	5,250,230	5,306,609	5,388,523	5,589,921
载货能力 (吨)	1,176,688	1,432,670	1,496,109	1,549,708
载客能力 (位)	54,179	48,529	46,416	46,816
渡轮及客船				
船舶数量	1,910	1,732	1,741	1,804
马力	7,907,373	8,718,416	9,449,714	9,563,083
载货能力 (吨)	190,596	133,937	130,516	235,486
载客能力 (位)	394,497	368,665	363,662	370,095
油轮				
船舶数量	102	72	76	76
马力	1,138,088	863,207	867,879	867,879
载货能力 (吨)	4,901,028	3,986,148	3,910,689	3,910,689
拖船				
船舶数量	6,260	6,169	6,294	6,385
马力	21,005,153	24,079,561	28,583,542	30,332,191
载货能力 (吨)	154,710	204,976	297,076	326,517
载客能力 (位)	1,376	1,379	1,748	1,748
合计				
船舶数量	10,775	10,108	10,152	10,333
马力	41,503,645	43,440,998	47,917,334	50,023,488
载货能力 (吨)	14,923,270	12,474,649	11,519,596	11,767,128
载客能力 (位)	453,256	421,782	415,047	421,880

美国国内航道非自航船舶数量从 2010 年的 31906 艘增加到 2020 年的 34168 艘。就乘客数量而言，载客数约为 6840 人。2020 年，国内航道非自航船舶货运量 72982159 吨。

表 2.3-4 美国非自航船运载能力

船型	2010	2015	2019	2020
干货驳				
船舶数量	20,903	20,337	20,469	20,783
载货能力 (吨)	37,040,162	37,136,496	38,550,433	39,333,160
载客能力 (位)	1,556	2,526	2,528	2,528

油驳				
船舶数量	4,532	5,137	5,499	5,648
载货能力 (吨)	14,831,725	17,752,339	19,566,211	20,189,398
甲板驳船				
船舶数量	6,471	7,345	7,632	7,737
载货能力 (吨)	9,262,170	12,422,648	13,231,575	13,459,601
载客能力 (位)	2,610	3,487	3,282	3,282
合计				
船舶数量	31,906	32,819	33,600	34,168
载货能力 (吨)	61,134,057	67,311,483	71,348,219	72,982,159
载客能力 (位)	4,166	6,013	6,837	6,839

#### (4) 船舶燃料类型

与世界上许多船队一样，目前美国船舶上使用的机械不适应零碳燃料，这意味着燃料组合完全由化石燃料主导，主要是船用柴油（MDO）、重油（HFO）和一小部分液化天然气（LNG）。燃料混合的详细情况如表 2.3-5 所示，美国船队的燃料以 MDO 为主。

表 2.3-5 2018 年美国船队的能源需求（单位：TJ，按燃料类型分列）

	MDO	HFO	LNG	甲醇	合计
美国船队合计(TJ)	178	68	2	0	278

如表 2.3-5 所示，MDO 占燃料类型的 64%，其次是 HFO，占 24%。如图 2.3-8 所示，每个类别船舶的燃料消耗有所差异，集装箱和拖船约占能源需求的 35%。

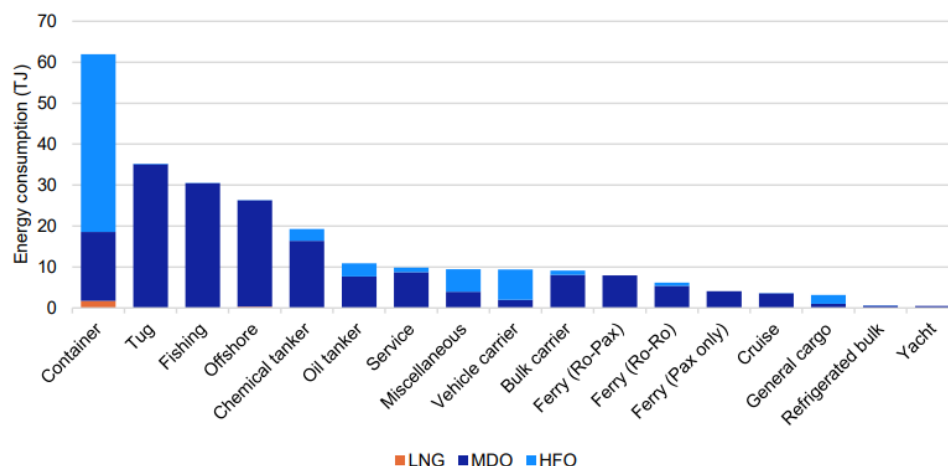


图 2.3-8 2018 年美国国旗船舶按船型的能源消耗

### 2.3.2.3 主要货运航线及港口

美国内河水运系统有几个重要商品运输走廊，如石油和石化产品走廊（密西西比河从密苏里州的圣路易斯到新奥尔良航段）、农产品和食品走廊（从密西西比河上游和伊利诺斯河到新奥尔良的流域范围）、煤炭走廊（主要覆盖俄亥俄河流域）、制成品走廊（密西西比河从圣路易斯到新奥尔良航段）。根据 USACE 的美国沿海和内河航运系统，密西西比河运输的商品约为 1.53 亿吨，其次是墨西哥湾沿岸航道，货运量约为 1.45 亿吨<sup>[132]</sup>。

如图 2.3-9 所示，绝大多数沿海机动船主要在大西洋、墨西哥湾和太平洋沿岸开展业务。只有 76 艘油轮在国内航道中航行，承担了总货运量的 33%。相比之下，在内河水运中运营的拖船约为 6385 艘，仅占货运能力的 3%。如图 2.3-10 所示，绝大多数机动船活跃在密西西比河和墨西哥湾沿岸水路，7.3 千万吨的运输总量中约 80%通过这一区域的水路运输。

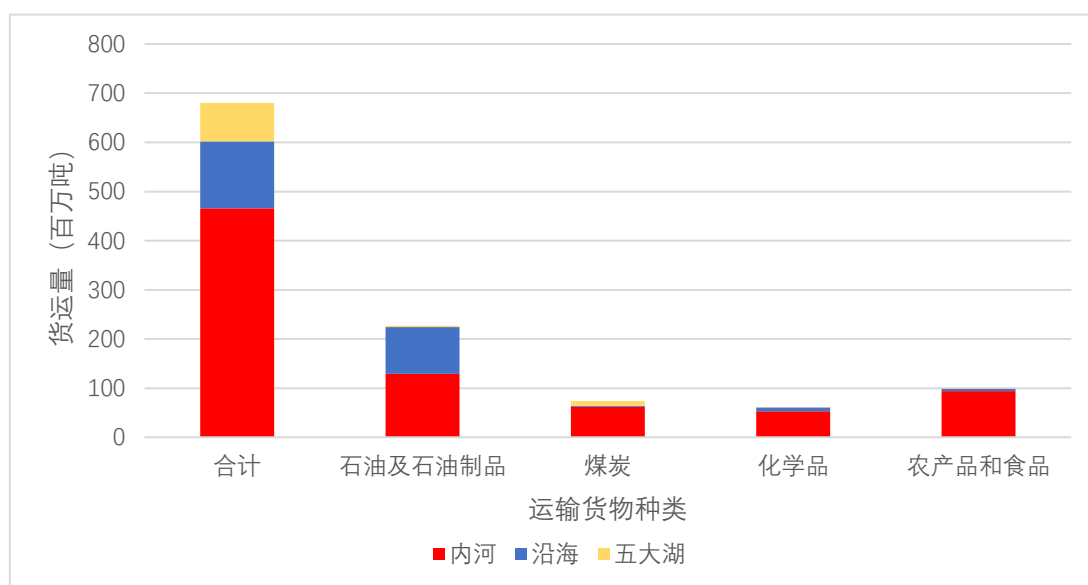


图 2.3-9 主要运输商品的运输途径

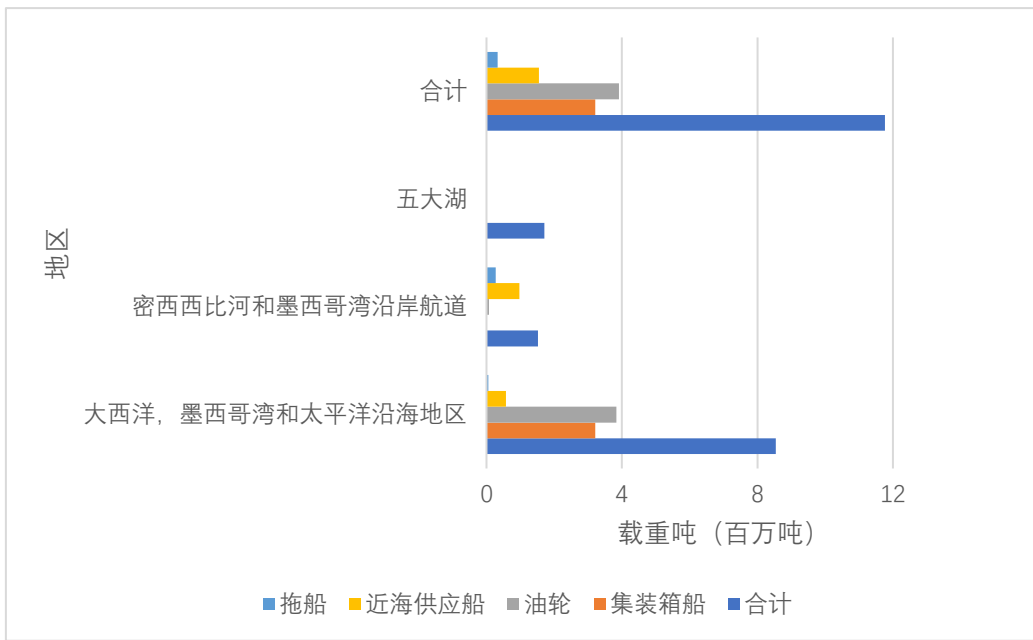


图 2.3-10 美国各地区机动船载货能力

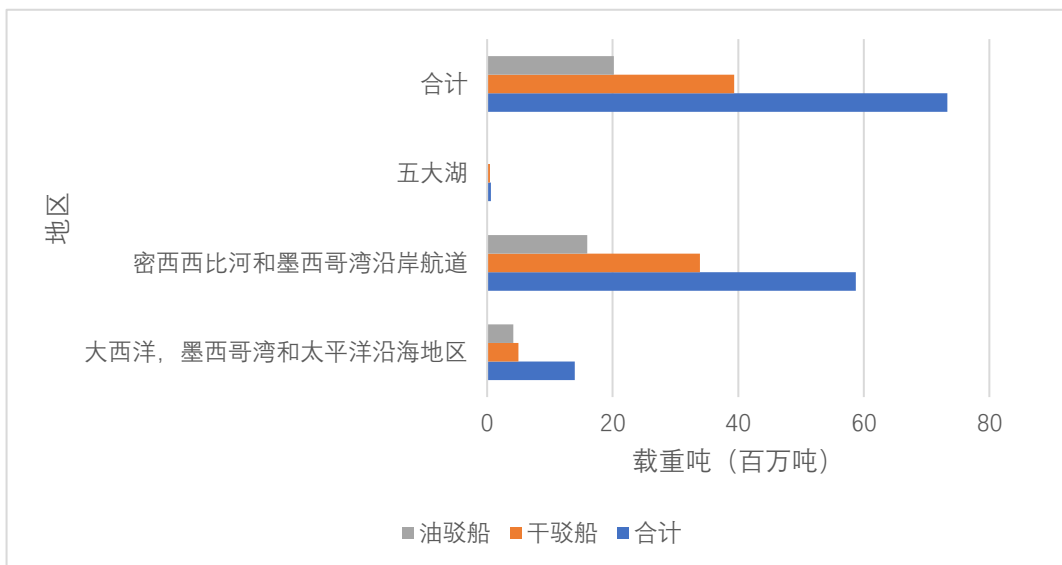


图 2.3-11 美国各地区驳船载货能力

沿海港中最大的内贸港是南路易斯安那港，货运量超过 1.15 亿吨，排名第二的休斯顿港货运量超过 0.75 亿吨，新奥尔良港的内贸约为 0.453 亿吨。这些港口和航线在美国内河和沿海的商品运输中占据重要地位。然而，繁忙的水运和港口周转也带来了高额的温室气体排放。基于此，地方和联邦政府颁布了许多政策和行动方针致力于内河水运的减排和脱碳。

表 2.3-6 美国主要内河港口

港口	货运量（百万吨）
Mid -Ohio Valley Port, OH and WV	36.5
Cincinnati -Northern KY	35.9
Huntington -Tristate, KY, OH, WV	31.1
St. Louis Metro Port, IL, and MO	29.9
Illinois Waterway Ports, IL	16.5
E IOWA and W Illinois, IA IL	7.3
Northern Grainbelt PSA, MN and WI	4.8

### 2.3.3 船舶排放现状

目前，尚没有明确计算了美国内河水运部门的排放清单。然而，有一些来自 EPA、东部研究小组、ABS、蓝天海事联盟、范德比尔特大学、UMAS 和其他报告的研究和草案包含了内河水运和海运的排放，这些研究为美国的内河和海上运输提供了不同的排放概况。总的来说，排放量的计算主要是基于 AIS 系统的数据、船舶静态统计数据或燃料消耗数据展开。

范德比尔特大学与 ABS 合作编写了一份涵盖了内河水运排放的研究报告，简化了排放计算，根据总燃料消耗及其相应的排放因子计算排放量，船舶数据主要从内河记录中检索。燃料消耗的数据是基于美国最大的驳船公司的燃料燃烧真实数据及其市场份额估计了整个内河船队的燃料消耗总量。其次，还根据内河航运信托基金的税收收入得到燃料的售卖情况。报告估计，内河船舶消耗了大约 5.5 亿加仑的燃料，每加仑燃料的 CO<sub>2</sub> 排放系数为 10.21 千克，税率为 20%。根据该研究，2018 年内河水运的总排放量约为 567 万吨 CO<sub>2</sub><sup>[133]</sup>。

蓝天海事联盟的另一项研究采用了与范德比尔特大学和 ABS 所做的研究类似的方法，基于驳船公司的反馈和不同类别的船舶燃料使用情况，估计了船舶的燃料消耗。与之前的研究相比，前者的税收归宿约为 50%，后者为 20%。该报告估计，2018 年美国船舶（包括内河船、沿海船、远洋船和其他船舶）的排放量为 4530 万吨 CO<sub>2</sub>。至于内河水运单独的部门排放，该研究由于难以估计内河船队消耗的燃料量而无法给出较为准确的计算，这主要是因为美国内河的一部分船舶不需要缴纳内河航道税，而且一些公司不愿意提供燃油税相关的数据，这部分船舶的排放将无法准确获得。例如，若税率为 80%，则消耗的燃料为 476 万吨，若税率为 20%，则消耗的燃料则为 290 万吨。因此，内河水运的 CO<sub>2</sub> 排

放量可能从 56 亿公斤到 1480 万公斤不等，这是基于 2018 年报告的燃料税收归宿得到的估计。由于两种估计之间的范围较宽，报告中估计税收归宿为 50%，内河船舶的 CO<sub>2</sub> 排放量为 930 万吨，内河船舶消耗 300 万吨燃料，平均每使用 1 吨燃料排放 3.1 吨 CO<sub>2</sub><sup>[134]</sup>。

UMAS 的研究估算了美国航运的排放量。与之前的两项研究不同，这家航运咨询公司开发了自己的模型——UMAS 燃料统计和排放模型，该模型基于 AIS 数据和船舶信息进行计算，该研究还估计了美国注册船舶消耗的燃料。值得注意的是，该研究提到，只有 56% 的美国船只被 AIS 捕获，其载重吨约占总载重吨的 87%。总体而言，美国注册船舶排放的 CO<sub>2</sub> 总量为 2598 万吨（分析也包括捕鱼的排放量），而国内水运（包括内河和沿海）排放的 CO<sub>2</sub> 总量为 1330 万吨。不同类型船舶的排放情况如表 2.3-7 所示。报告还指出，拖船占 2018 年国内航运排放的 26%，CO<sub>2</sub> 排放量约为 349 万吨。2018 年，主要由内河拖船构成的服务船舶排放了约 109 万吨 CO<sub>2</sub>，约占国内水运总排放量的 8%。同时在内河和远洋水运中占据重要份额的船舶是渔船，根据这项研究，渔船在 2018 年排放了 562 万吨 CO<sub>2</sub><sup>[135]</sup>。

表 2.3-7 美国船队不同船型船舶排放量

船型	CO <sub>2</sub> 排放量（百万吨）
散货船	0.74
化学品运输船	1.45
集装箱船	4.9
游船	0.3
渡轮（只限多人）	0.66
渡轮(Ro-Pax)	0.44
渔船	5.62
普通货船	0.29
杂货船	1.35
近海供应船	3.46
油轮	0.83
冷藏散装船	0.05
滚装船	0.51
后勤服务船	1.09



拖轮	3.49
载具	0.73
游艇	0.07
合计	25.98

东部研究小组为 EPA 提供的两项研究估计了美国海运的排放量，这两份报告是 EPA 国家清单的一部分。估算排放量的方法如下式所示，主要基于 AIS 数据进行计算。

$$Emissions_{interval} = Time(hr)_{interval} \times Power(kW) \times EF(g/kWh) \times LLAFF$$

其中，*Time* 对应于每个连续 AIS 信息之间的活动持续时间；*Power* 是根据船舶类型和船舶航行工况来判定的发动机功率；*EF* 是发动机的排放系数；*LLAF* 是负荷因子。

该研究比较了 C1 类和 C2 类发动机的排放演变。2017 年，装载 C1 和 C2 类发动机的船舶的排放约为 1460 万吨 CO<sub>2</sub>，2020 年减少至 1050 万吨 CO<sub>2</sub>。而 C1、C2 和 C3 类船舶的总排放量相当于 3864 万吨 CO<sub>2</sub><sup>[136]</sup>。除 CO<sub>2</sub> 外，该报告还给出了 C1 和 C2 类船舶排放的其他大气污染物。

美国 EPA 最新的温室气体排放清单草案中估计了美国水运的排放量。在草案中，排放量是根据国内水运（包括内河和沿海）的燃油销售计算的。这项研究没有考虑到国际运输活动消耗的燃料，得到的内河和沿海水运总排放量为 2330 万吨 CO<sub>2</sub>。

图 2.3-12 比较了不同报告的总排放量。各类研究和报告在估计美国内河及沿海水运排放量方面缺乏统一性。首先，这种差异是由于水运排放计算缺乏标准化，研究采用不同的计算方法和原始数据来源。一些报告使用 AIS 数据，而其他报告使用燃油税来估计排放量。而不同的方法使用的数据来源的误差也给计算结果带来了不确定性和差异。AIS 信号覆盖的船舶比例和某些类别船舶的非强制性排放报告给排放计算带来了巨大的误差空间，特别是约有 49% 的美国船舶没有被 AIS 信号捕捉到。一些地区和船舶类别免征内河航道税，这导致了一些基于此类税收收入来估计燃料消耗的报告对水运排放的低估。

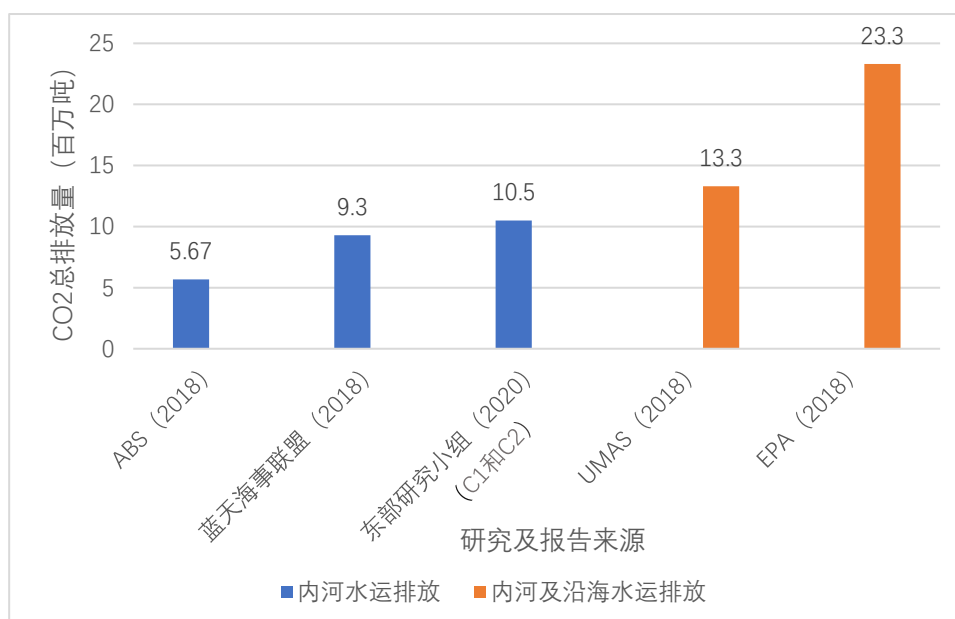


图 2.3-12 美国内河和沿海水运的排放

## 2.4 对比分析

### 2.4.1 管理体系

正如上文提到的，高效的管理有利于促进内河水路贸易、运输和环境可持续性。表 2.4-1 给出了美国、中国和欧洲内河水运管理体系的主要区别。通过对比这三个地区，可以从其内河水运管理方法中获得经验和借鉴。

表 2.4-1 美国、中国和欧洲内河水运的管理体系、资金来源和监管机构的对比

国家	管理体系	主要资金来源	主要监管机构
美国	存在一些横向结构的集中管理模式	联邦政府	联邦政府 (USACE, USCG, Marad, EPA...)
		使用费 (内河航道税、港口维护费等) 州政府为小型项目提供的资金	州和地方政府
中国	具有集中和分散治理的混合模型	中央政府	中央政府
		地方政府	交通运输部 生态环境部
		国外资金 (世界银行) 税收 (过闸费、港务费等)	水利部 省级政府 河流航务管理局 (长江和珠江)

欧洲	具有集中和分散治理 的混合模型	国家预算、欧盟基金 和用户收费	欧洲委员会 河流委员会（CCNR、 DC） 成员国政府 欧洲经济委员会
----	--------------------	--------------------	---

美国内河水运的管理涉及多个联邦和州层级的机构，尽管有一些横向结构，但更准确地说，它是一个集中的管理模式。联邦政府主要通过美国陆军工程兵团（USACE）对内河水运的基础设施进行开发、维护和管理。USACE 负责操作和维护船闸、大坝和航道，并负责导航、防洪和生态系统恢复。联邦政府的资金支持和征收的内河航道费是基础设施项目重要的资金来源，USACE 对有关政策和项目的决策过程具有重大影响。虽然一些决策权被授予州和地方政府，但联邦政府仍保留总体控制权和权力。

中国的水路运输管理模式既融合了美国和欧洲的元素，又具有鲜明的特点。这一模式很复杂，国家、省和地区的众多机构共同承担责任。中国水运的管理涉及到多部委，主要由交通运输部统筹管理，其他各部位其中包括如国家发展改革委员会、生态环境部、水利部等协管。在地方层级，省级政府发挥着突出作用。中国内河水运的资金来源多种多样，包括中央和地方政府的资助。此外，世界银行等国际银行的外国投资以及《内河航道维护费征收和使用办法》中规定的航道维护费等各种使用费也为该系统的资金提供了帮助。

在欧洲，内河航道的治理呈现出一种混合模式，涉及集中和分散治理的要素。欧洲委员会（欧共体）和欧洲经委会在制定有关内河运输的政策和条例方面发挥重要作用。水道的日常管理权责在很大程度上被分散到成员国。每个国家都有自己的政府机构负责维护和运营其内河航道基础设施。这些当局与有关的国家和地区机构密切合作，以确保有效的航行、安全和环境保护。为促进成员国之间的合作与协调，成立了莱茵河中央航行委员会、多瑙河委员会等跨国河流委员会。这些组织促进讨论，协调法规，并促进特定国际水道管理方面的合作。欧洲基础设施项目的资金来自国家预算、欧盟基金和用户收费。

中国和美国在内河运输系统（IWT）的管理方面存在相似之处。两国都将内河水道视为主权国家水道，并在国家体系下管理，设有次主权部门（中国为省级政府，美国为州政府）。尽管存在这些共性，但它们的部门治理方法却

存在显著差异。在美国，联邦政府，特别是美国运输部的海事管理局，负责监督整个内河运输政策。然而，IWT 网络的实际管理和运作主要是由一个单一的综合军事机构——美国陆军工程兵团来处理的。国家在内河运输政策或基础设施管理方面没有执行权责，除了为赞助项目提供资金和建议。美国系统的独特之处在于，IWT 隶属于美国国防部，而其他运输网络则在民用管理模式运作。相比之下，中国将内河运输系统的大部分管理权力下放给了专门的河流管理局和省级政府。交通运输部通过专门的河流管理局——长江航务管理局和珠江航务管理局监管中国内河两大水系的主要水道和基础设施，而省级政府通过省级航运管理局管理剩余的内河航道和水运基础设施。这种按行政区划进行的管理适合中国的独特背景，也是合乎逻辑的。总之，两国都拥有国家水道主权，并由国家政府掌握完整的内河水运管理权，但美国依靠中央军事机构进行内河运输管理，而中国则将责任分散到省级政府。根据各自国家的具体需要和情况，两种办法都有其优点。

如图 2.4-1 所示，中国、欧洲和美国在管理体系、基础设施发展核心、主要资金来源、国际合作和排放标准几个方面都有所不同。

方面	区别		
地区	美国	中国	欧洲
管理体系	集中管理模式，存在一些横向结构	具有集中和分散治理的混合模型	混合监管框架，垂直和水平方向均有
基础设施建设	侧重维护和升级现有基础设施	侧重 <b>航道建设</b> ，扩大和升级内河航道网	侧重维护和升级现有基础设施
资金来源	主要是联邦资金和用户收费	来源多样，主要是 <b>中央、省级政府</b> 的资金支持，还包括用户收费和外资等	国家预算、欧盟基金和用户收费
国际合作	注重国内治理，缺乏重要的国际合作。(加拿大除外)	<b>以国内治理为主</b> ，存在一些以往和当前的国际合作(世界银行，一带一路...)	CCNR和多瑙河等河流委员会促进了欧盟成员国和非成员国之间的合作
排放标准和减排路径	内河水运的脱碳途径没有清晰的认识。与欧洲相比，排放标准仍然相对宽松。对于PN和CO等的排放标准，没有中国严格	逐步加严以欧盟和IMO为基础的排放标准。给出了整个国家的碳中和碳达峰目标，但在内河及沿海水运方面仍没有明确的减排目标和途径。	拥有全球最雄心勃勃的减排计划和内河水运最严格的排放标准。大多数国家在内河航运标准和减排目标上跟随欧盟的脚步。

图 2.4-1 美国、中国和欧洲内河水运的主要差异

## 2.4.2 排放标准和减排目标

### 2.4.2.1 排放标准

#### 1) 欧洲内河船舶排放标准

---

欧洲船舶发动机排放标准主要包括欧盟非道路移动机械（NRMM）内燃机排放标准、莱茵河航运中央委员会（CCNR）船舶检查规则、欧洲内河航运标准起草委员会（CESNI）制定的内河航行船舶技术要求等。

### （1）欧盟 NRMM 排放标准

2004 年 4 月 21 日，欧盟颁布 NRMM 内燃机气体及颗粒物排放指令——Directive 2004/26/EC，包括 Stage III（2006 年 1 月 1 日实施）和 Stage IV（2014 年 1 月 1 日实施）两个阶段。其中，Stage III 阶段又分为 A、B 两个部分，而 Stage III A 部分适用于 37kW 以上内河船舶发动机。

2016 年 9 月 14 日，欧盟又更新了 NRMM 内燃机气体及颗粒物排放指令——Regulation(EU)2016/1628，即 NRMM Stage V 阶段标准。与 Stage IIIA 不同的是，Stage V 根据用途将内河船舶发动机分为 IWP（内河船舶主推进用发动机）和 IWA（内河船舶辅助用发动机）两类，IWP 和 IWA 又各分成变速发动机和恒速发动机两种，每种发动机又根据净功率分为 4 小类；污染物类别方面增加了 PN（粒径大于 23 纳米的颗粒物数量），并对气体燃料发动机的总 HC 排放限值提出了特殊要求。如果发动机全部或部分采用气体燃料，则 HC 排放限值应按  $HC=0.19+(1.5 \times A \times GER)$  计算得到，其中 GER 为整个测试循环的平均气体能量比例(%)，对于双燃料发动机，系指整个测试循环所使用气体燃料的能量占两种燃料全部能量的比例；对于纯气体燃料发动机，GER 取为 1。如果计算值大于  $0.19+A$ ，则 HC 排放限值就取为  $0.19+A$ 。

欧盟在 2019 年引入的第五阶段排放标准，除了功率低于 300KW 的发动机外，几乎所有类别的发动机 PN 限值都被设定为  $1 \times 10^{12}$  g/kWh。

### （2）CCNR 排放标准

莱茵河航运中央委员会（CCNR）成立于 1816 年，在欧洲船舶规范制定方面一直占据主导地位。2003 年，CCNR 率先在其内河船舶规范《莱茵河船舶检查规则》中颁布了船舶发动机空气污染物排放标准，即 CCNR Stage I 标准。2007 年 CCNR 又颁布了 CCNR Stage II 标准，进一步收紧排放限值。CCNR 船舶发动机排放标准与欧盟 NRMM 标准体系和限值均不相同。为了与 NRMM 标准协调，CCNR 规则规定，按照欧盟指令 Directive 2004/26/EC 进行型式认证的船舶发动机（即满足 NRMM Stage IIIA）视为等同于《莱茵河船舶检查规则》提及的型式认证。

---

### **(3) CESNI 排放标准**

为协调 NRMM 与 CCNR 规则的一致性，CCNR 在 2015 年 6 月决定成立 CESNI，由 CCNR 成员国和欧盟成员国的专家共同组成，其目的是制定统一的内河航运船舶技术要求。按照计划，NRMM 和 CCNR 规则将于 2018 年 10 月 8 日完全统一。

CESNI 于 2017 年发布了《欧洲内河船舶技术要求》（2017/1），该技术要求直接引用了欧盟指令 Regulation(EU) 2016/1628，即 NRMM Stage V 标准。最迟在 2018 年 10 月 7 日前，欧盟指令和 CCNR 都将按照上述要求执行，从而达到欧洲内河船舶技术要求的统一。

#### **2) 美国内河船舶排放标准**

美国船舶柴油机排放控制标准纳入《美国联邦法规》（CFR）中，主要由美国环保署（EPA）制定，属于具有普适性的国家法律组成部分之一。EPA 根据用途、额定功率、单缸排量等将船舶柴油机分成小型、C1 商用、C2、C3 和 C1 娱乐共 5 类，每一类都对应有不同的排放标准。

##### **(1) 小型船舶发动机（37kW 以下）**

CFR 第 40 篇第 89 部分“新造及在用非道路压燃式发动机排放控制”规定了非道路压燃式发动机的空气污染物排放标准，额定功率小于 37kW 的船舶柴油机需满足其中 Tier 1 和 Tier 2 两个阶段的要求。

##### **(2) C1 商用、C1 娱乐、C2 和 C3（37kW 以上）**

CFR 第 40 篇第 94 部分“船用压燃式发动机排放控制”专门针对 37kW 以上船舶柴油机提出了排放控制要求，也分为 Tier 1 和 Tier 2 两个阶段。对于 C1 和 C2，如果是天然气发动机，则用 NMHC+NO<sub>x</sub> 代替 THC+NO<sub>x</sub>，排放限值不变。

CFR 第 40 篇第 1042 部分“新造及在用船舶压燃式发动机及船舶排放控制”进一步针对 37kW 以上船舶柴油机提出了 Tier 3 和 Tier 4 阶段限值。Tier3 限值适用 3700kW 以下的 C1 和 C2 类发动机，Tier 4 限值适用于 600kW 以上 C1 商用和 C2 类发动机。

#### **3) 中国船舶排放标准**

我国内河船舶排放标准主要包括《内河船舶法定检验技术规则》、GB20891《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》和 GB15097《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法》等。

---

### (1) 《内河船舶法定检验技术规则》

2011年9月1日，中华人民共和国海事局《内河船舶法定检验技术规则》(2011版)生效，正式在全国内河实施船舶发动机NO<sub>x</sub>排放控制，限值与IMO Tier I相同，适用于130kW以上柴油机。2015年3月1日，《内河船舶法定检验技术规则2015修改通报》正式生效，新造船舶柴油机NO<sub>x</sub>排放需满足IMO Tier II要求，这也是我国130kW以上船舶柴油机现行排放标准。

### (2) GB20891《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》

2007年4月3日，我国发布了GB20891-2007《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国I、II阶段)》，第I、II阶段分别于2007年10月1日和2009年10月1日实施，但仅规定额定净功率不超过37kW的船舶柴油机可参照执行，非强制要求。

2014年5月16日，我国又发布了GB20891-2014《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国III、IV阶段)》，第III阶段从2014年10月1日开始实施，第IV阶段实施时间待定，且明确规定额定净功率不超过37kW的船舶柴油机需强制执行。

### (3) GB15097-2016《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法》

2016年8月22日，环境保护部和国家质量监督检验检疫总局联合发布了GB15097-2016《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、二阶段)》，这是中国首次专门针对船舶发动机排放控制发布强制性国家标准。该标准适用于额定净功率大于37kW的第1类船机(额定净功率大于或等于37kW且单缸排量小于5L)和第2类船机(单缸排量大于或等于5L且小于30L)，包括柴油机和气体燃料发动机，对气体燃料发动机还专门提出了甲烷(CH<sub>4</sub>)排放限值。

## 4) 全球典型区域排放标准对比分析

基于上述信息可以看出，欧洲和美国内河船舶排放控制标准已经历了20余年发展，中国的内河船舶排放控制标准经历了10余年，本研究将从全球各区域控制船舶排放污染物种类、排放限值两个方面进行了对比分析。

### (1) 船舶排放污染物种类

从表2.4-2可以看出，欧洲、美国和中国标准均涵盖CO、HC、NO<sub>x</sub>和PM四种基本污染物。但值得注意的是，我国在HC、NO<sub>x</sub>、PM限值方面仍相对落后；

目前欧洲在颗粒物数量 PN 控制方面的标准领先。我国在标准中提出了对船机 CH<sub>4</sub> 的排放控制，但实际并未实施，这是由于我国船舶在运行过程中 CH<sub>4</sub> 逃逸现象严重，导致目前标准难以实施。

表 2.4-2 全球典型国家和地区船舶排放控制污染物种类（发动机功率>37kW）

污染物种类	欧洲	美国	中国
CO	√	√	√
HC	√	√	√
NO <sub>x</sub>	√	√	√
PM	√	√	√
PN	√	×	×
CH <sub>4</sub>	×	×	√

## (2) 船舶排放污染物控制标准文件

从表 2.4-3 可以看出，目前全球缺乏针对极地区的船舶排放限制的标准或法规。值得注意的是，目前绝大多数内河船机机型已能达到 IMO Tier 2 排放水平。但 IMO Tier2 是国际海事组织对远洋船机的排放控制要求，但只控制 NO<sub>x</sub> 排放。按照《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）》要求中，对于内河船机不止控制 IMO 要求的 NO<sub>x</sub>，还提出了 CO、HC 和 PM 的控制要求，控制要求比 IMO Tier 2 项目多。从 NO<sub>x</sub> 限值看，单缸排量小于 20L 的船机，《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）》的控制要求比 IMO Tier 2 严格，对于单缸排量大于 20L 小于 30L 的船舶，中国的标准于 IMO Tier 2 的要求大致相当。

表 2.4-3 全球典型国家和地区船舶排放控制污染物标准/法规

各区域	船舶类	航行区域	欧洲控制标准/法规	美国控制标准/法规	中国控制标准/法规
海[洋]船		海洋区域	欧盟非道路移动机械（NRMM）内燃机排放标准	《美国联邦法》	IMO



极区船	北冰洋或南 极圈内海区	无	无	无
远洋船	大洋上	欧盟非道路移动机械 (NRMM) 内燃机排放标准	《美国联邦 法》	IMO
沿海船	沿海各港口 之间	欧盟非道路移动机械 (NRMM) 内燃机排放标准	《美国联邦 法》	
江海直 达船	沿海水域和 江河航道		《美国联邦 法》	《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)》
海峡[渡] 船	海峡两岸或 岛屿间水域	欧盟非道路移动机械 (NRMM) 内燃机排放标准 《欧洲内河船舶技术要 求》、欧盟非道路移动机械 (NRMM) 内燃机排放标 准、《莱茵河船舶检查规 则》	《美国联邦 法》	
内河船	内河、湖泊		《美国联邦 法》	

### (3) 船舶排放污染物控制标准详细要求

表 2.4-4 对欧洲、美国和中国最新船舶排放限值范围进行了比较。不难看出，欧洲 Stage IIIA、美国 EPA Tier 3 和中国 Stage I 对 HC、NO<sub>x</sub> 和 PM 等常规污染物的限值基本处于同一水平。但欧盟颁布标准 NRMM Stage V 和美国颁布的 EPA Tier 4 均进一步了收紧 HC 和 NO<sub>x</sub> 限值，同时对 PM 进行了大幅削减，相比之下，中国的第二阶段的标准则要宽松一些。从欧盟 NRMM Stage V 和美国 EPA Tier 4 来看，PM 排放是未来船机的一个挑战，逐步引入颗粒物数量 PN 排放控制，也是未来船机 PM 排放控制向精准化方向发展的趋势之一。

表 2.4-4 全球典型国家和地区船舶排放控制污染物标准详细要求

规定	欧洲				中国				美国 EPA		
	Stage IIIA	Stage III B	Stage VI	Stage V	<=37kW		>=37kW		Tier 3		Tier 4
排放标准					Stage III	Stage IV	Phase I	Phase II	C1 & C2	C3	C1 & C2

实施年份		2007-2008	2011-2013	2014	2019-2020	2014	2022-2023	2018	2021	2008-2014	2016	2014-2017
CO	g/kWh	3.5-5.5	3.5-5	3.5-5	3.5-5	3.5-5.5	3.5-5.5	5.0	5.0	5-8	5.0	-
HC		-	0.19	0.19	0.19	-	0.19-0.4	-	-	-	2.0	0.19
NOx		-	2-3.3	-	0.4-2.10	-	0.67-3.3	-	见表2.1-3	-	1.9-6-3.4	1.8
HC+NOx		4-7.5	4-4.7	-	4.7	4-7.5		7.2-11	5.8-11	4.7-11	-	-
PM		0.2-0.5	0.025	0.025	0.01-0.3	0.2-0.6	0.025-0.6	0.27-0.5	0.12-0.5	0.11-0.4	-	0.04-0.12
PN	#/kWh	-	-	-	$1 \times 10^1$ <sub>2</sub>		$5 \times 10$ <sub>12</sub>	-	-	-	-	-

#### 2.4.2.2 减排目标

如表 2.4-5 所示，三个地区都通过各种条例和政策加强水运发展和减排。到目前为止，只有欧盟发布的 CCNR 内陆航运减排路线图和 NAIIDES 计划专门针对内河水运部门。欧盟计划到 2050 年基本消除内河航运的温室气体排放，并在同年将内河航运和短途沿海运输的份额提高到 50%。另一方面，尽管美国和中国通过许多计划、政策和倡议为内河运输部门的减排做出了很多努力，但在增加内河运输份额和减少内河水运温室气体排放方面仍然没有明确的目标。唯一与航运有关的精确排放目标是作为国际海事组织有关减排目标的签署国需要遵循的减排目标。

表 2.4-5 欧洲、中国和美国的内河水运减排目标

	欧洲	美国	中国	IMO
2030 年目标	内河及短途沿海运输的份额增长 25%			全球航运排放强度降低 40%，排放总量降低 20%，力争 30%，替

				代燃料使用比例达到 5%，力争 10%
2035 年目标	内河航运温室气体和其他污染物排放相较于 2015 年减少 35%			
2040 年目标				全生命周期排放总量降低 70%，力争降低 80%
2050 年目标	基本上消除内河航运的温室气体和其他污染物（90%） 内河及短途运输的份额增长 50%			航运净零排放
航运净零排放	2050	2050	2050	
国家碳中和目标年份	2050	2050	2060	

### 2.4.3 航运现状

图 2.4-2 比较了三个地区内河船队不同船型的船舶数量，主要对比了推拖船、货船和驳船，这几类船舶占这三个国家内陆船队总数的 85% 以上。中国的内河船舶总量比欧洲和美国分别高出 150% 和 111%。这表明，从技术和经济角度来看，中国向更清洁的船队过渡将更具挑战性。

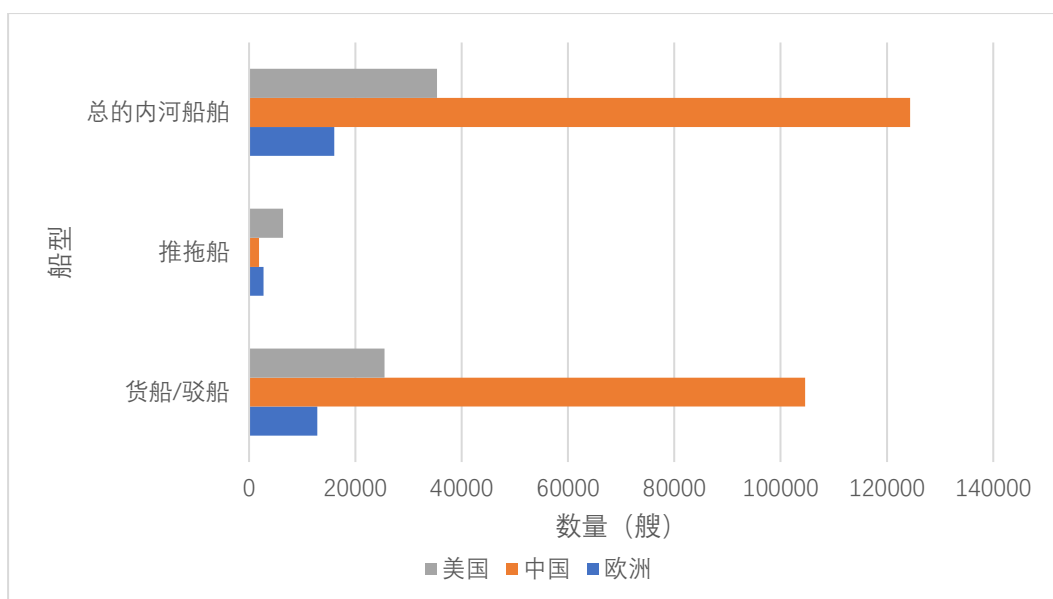


图 2.4-2 欧洲、中国和美国的内河船舶数量

据研究统计，长江作为中国最重要的内河航道，在 2022 年，完成内河货运量 36.5 亿吨，货运周转量为 16881.6 亿吨公里。而根据美国交通统计局 2019 年的数据，密西西比河是美国最重要的水道，长度为 3766 公里，运输货物约 4.53 亿吨，而长江内河货运量在 2019 年为 31.94 亿吨，约为美国密西西比河货运量的 7 倍。根据 CCNR 2021 年的数据，莱茵河是欧洲最繁忙的河流，年运输量约为 1.59 亿吨，而长江 2021 年内河货运量为 33.9 亿吨，约为莱茵河内河货运量的 21.3 倍。

#### 2.4.4 船舶排放现状

由于中国拥有最多的内河船舶，中国的内河船队将排放更多的 CO<sub>2</sub>。我们使用 SEIM 2.0 模型进行分析计算，得到 2022 年内河航运的 CO<sub>2</sub> 总排放量为 3238 万吨/年，其中排放量是基于 AIS 数据对每艘船的瞬时运行状态和功率变化进行计算的<sup>[21]</sup>。就美国而言，正如上文提到的，有几家机构对航运的排放量进行了估算。EPA 和 Eastern Research Group 共同完成的 2020 年 1 类和 2 类商业船舶排放清单研究提供了 2020 年排放的一些不同类型的污染物。该报告显示，美国注册船舶每年的 CO<sub>2</sub> 排放量为 1058 万吨，是中国的三分之一。减少内河航运排放的 CCNR 路线图给出了欧洲内河船舶的基线排放量，该报告估计欧洲内河船 CO<sub>2</sub> 排放量为 415 万吨。

---

## 2.5 小结

中国、欧洲和美国是世界上水运最发达的几个地区，但面对内河水运的减排问题都仍还在路上，采取了一些措施，但尚未确立成熟的减排路径、达成减排目标。

在航运管理体系方面，三个地区均呈现分层治理的结构，但管理力度有所不同。欧洲在欧盟的带领下确立了部分国际条例和公约，并对于重要的跨国河流设立了专门的管理委员会，但受限于国际组织较为松散的结构和有限的管理权力，欧洲范围内并没有统一的强制性标准，内部不同主权国家对各自的河流和航道有着不同的管理条例和法规政策，这给不同航段间的连续通航带来了一定的阻碍。而中国和美国作为主权国家，内河水运由中央政府领导，地方政府具体执行，中央政府对于国内的航道具有最高管辖权。但在具体管理机构上又有所不同，中国由交通运输部统领整个内河及沿海水运从基础设施建设、航运管理到减排控制方面的各项管理政策，其他部门如水利部、生态环境部配合承担部分责任，并成立了长江、珠江航务管理局具体负责中国内河两大水系，省政府及地方政府则负责辖区内的低等级航道。而美国的内河水运由美国陆军工程兵团（USACE）、美国海岸警卫队（USCG）、美国环境保护署（EPA）、海事管理局（MARAD）、州和地方政府多个主体共同管理，管理体系更为复杂且涉及一些横向结构的管理，联邦政府拥有所有航道的管辖权，而州和地方政府则只对辖区内的航道负责。

在航道建设和基础设施方面，中国的内河航道通航里程达 12.8 万公里，欧洲拥有 3.7 万公里水道，美国有 1.2 万公里的水道。其中，长江水系就拥有 6.5 万公里的可通航里程，甚至高于欧洲和美国的总和。需要指出的是，美国内河可通航的河流平均深度只有 9 英尺，加上其老旧基础设施带来的漫长过闸等待时长，对航运的便利和高效都带来了阻碍。莱茵河-多瑙河流域超过三分之一的水道不符合欧洲交通部长会议制定的水道标准，巴伐利亚流域东部和西部的基础设施也存在很大差异。而 2022 年中国内河等级航道通航里程占比为 52.7%。尽管对于水道的标准并不相同，但中国内河航道的通航状况和基础设施的运行状况要普遍优于欧洲和美国，这与中国内河水运在近几十年内的快速发展和建设是相关的。

---

在船队方面，中国同样以 12.19 万艘的水运船舶和 10.95 万艘的内河船舶数量领先于美国和欧洲。中国船队中数量最多的船型是货船，而美国船队中驳船要更多。在航运现状方面，中国拥有世界上最大的内河水运体系。在美国和欧洲，只有不到 10% 的货物运输是通过内河航道进行的。而中国内河航运的货运份额已达到 16.9%，并且在不断增长。

在航运管理经验方面，值得注意的是，中国的船舶排放标准起步较晚，目前已与国际标准接轨，如 IMO 的 2020 年全球船用燃油限硫令，但与美国和欧洲在船舶发动机的排放限值上仍存在一定差距，还有继续发展和严格要求的空间。在对未来水运船舶的减排发展上，欧洲 CCNR 针对莱茵河地区的船用替代燃料的发展作出了预测和路径分析，而中国目前对于船舶能源发展还不明确，目前的政策聚焦于 LNG 和岸电这两类能源，但对于更长远的船舶发展和燃料应用仍缺乏更多的研究和探索。

---

## 第 3 章 内河船舶排放计算

### 3.1 计算方法

#### 3.1.1 基于 AIS 的船舶排放计算方法

##### 3.1.1.1 方法概况

SEIM v2.0 以非集计动力法为核心思想，对船舶大气污染物和温室气体排放进行逐船、逐时的精细化模拟。在全球船舶 AIS 数据的支持下，SEIM v2.0 模型适用于 2016—2019 年从全球至港口不同尺度船舶排放清单的建立。模型的主要功能包括数据预处理、排放计算和结果分析。在数据预处理方面，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。在排放计算方面，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。在结果分析方面，可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。模型的最终产出为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。

##### 3.1.1.2 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  $\Delta T$  (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。针对船舶的详细分类标准如 Liu et al.（2016）的研究所述。

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：

$$E_{i,n,p}^{\text{Main}} = \text{MCR}_i \times \text{EF}_{i,p}^{\text{Main}} \times \text{LF}_{i,n} \times \text{LLAF}_{i,n,p} \times \Delta T_{i,n} \times 10^{-6} \quad \text{式 (3.1-1)}$$

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）； $\text{MCR}_i$  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； $\text{LF}_{i,n}$  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，如公式 3.1-2 所示：

$$\text{LF}_{i,n} = \left( \frac{v_{i,n}^{\text{Actual}}}{v_i^{\text{Maximum}}} \right)^3 \quad \text{式 (3.1-2)}$$



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）； $V_i^{\text{Maximum}}$ 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（Faber et al., 2020; Smith et al., 2014），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公式 3.1-3 和公式 3.1-4 所示：

$$E_{i,n,p}^{\text{Auxiliary}} = P_{i,n}^{\text{Auxiliary}} \times EF_{i,p}^{\text{Auxiliary}} \times \Delta T_{i,n} \times 10^{-6} \quad \text{式 (3.1-3)}$$

$$E_{i,n,p}^{\text{Boiler}} = P_{i,n}^{\text{Boiler}} \times EF_{i,p}^{\text{Boiler}} \times \Delta T_{i,n} \times 10^{-6} \quad \text{式 (3.1-4)}$$

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（Liu et al., 2016）。

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，如公式 3.1-5 所示：

$$E_{i,p} = \sum_{n=1}^{N_i-1} E_{i,n,p} = \sum_{n=1}^{N_i-1} (E_{i,n,p}^{\text{Main}} + E_{i,n,p}^{\text{Auxiliary}} + E_{i,n,p}^{\text{Boiler}}) \quad \text{式 (3.1-6)}$$

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。

### 3.1.1.3 数据来源

本研究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（Faber et al., 2020）。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 年年中在役船舶数量（119626 艘）一致，略高于贸发会议记录的 2019 年世界船队数量（97136 艘）。

### 3.1.2 基于船舶进离港记录的内河船舶排放估算方法

在本研究中“内河船舶排放”是指航行于内河流域中的航行船舶的排放行为。内河航道多呈狭长型分布，且内河航道的水文条件也显著区别于沿海和远洋水域。船舶 AIS 数据可用来表征船舶动态活动特征，近年来随着船舶安装 AIS 装置的比例升高，和船舶 AIS 信号质量的提高，AIS 数据可成为了计算船舶大气污染物排放量的关键数据，且与之相适应的计算方法也不断被提出和改进。

但在内河水域，采用 AIS 数据计算内河船舶排放量具有明显的局限性，主要表现在以下三个方面：

（1）由于船舶 AIS 信号接收基站分布不充分，且虽然规定大于 300 总吨的船舶需要安装 AIS 装置，但仍会有部分船舶被人为关闭 AIS 船载设备，同时，内河船舶 AIS 信号相较于海船更具有政治敏感性问题，因此，基于商业的 AIS 数据用来表征内河船舶活动特征具有局限性；

（2）计算船舶大气污染物排放，还需要与船舶 AIS 数据相匹配的船舶静态数据，但内河船舶静态数据多存储于行业管理部门，难以获取，且船舶静态数据与船舶 AIS 数据的匹配率不高，这都会影响船舶排放清单计算精度；

（3）以船舶 AIS 数据为基础计算的内河船舶排放结果，会存在排放计算记过与船舶货运量统计数据源不一致的问题，难以进行后续的研究分析，例如结合船舶货运量、排放量、运输距离分析船舶排放强度。

在考虑以上问题基础上，本研究引入了船舶进离港记录数据，以替代船舶 AIS 数据用来计算内河船舶大气污染排放量。船舶进离港机记录数据记录了各艘船舶详实的相关数据，其中包括船舶进离港时间、港口名称、船舶的静态数据（例如船舶类型、总吨、船舶建造年份、主机功率）、船舶在各个航程的载货量、货物类型等。但船舶的航行速度是影响排放量的关键因素，而船舶进离港数据无法提供详细的船舶的航行速度，因此，本研究结合提出了一种结合船舶 AIS 数据和船舶进离港记录数据的内河船舶大气污染物排放量计算方法。

该方法分为基础数据收集与处理、船舶排放计算两部分，具体的方法流程如图 3.1-1 所示。该方法仍然延续课题组现有的 SEIM v2.0 计算模型，具体计算步骤如下：

---

**步骤 1：各个港口间船舶习惯航速统计分析。**以航道内船舶历史 AIS 数据为基础，统计分析船舶在各个港口之间的习惯航行轨迹和习惯航行速度，并结合航道内历史水文数据，修正基于 AIS 数据统计的船舶习惯航速；

**步骤 2：各个港口间船舶单航程航行时间统计分析。**基于步骤 1 统计的各个港口间的习惯航行轨迹，估算各个港口间船舶单航程航行距离。再结合步骤 1 中统对于船舶在各个港口间单航程内的习惯航速分布区间统计结果，计算船舶在单航程内各个习惯航速区间内的航行时间；

**步骤 3：单船在单航程内排放量计算。**依据现有的对于内河船舶大污染物排放限制政策，结合已有文献和 SEIM v2.0 中提供的船舶排放各组分污染物的排放因子，确定适用于本船舶的排放因子。再结合一系列船舶静态数据信息（如船舶主机功率、船舶辅机功率、船舶设计航速等），以及 SEIM v2.0 模型中的其他计算参数（如船舶低负载修正因子（LLAM）、船舶负载因子（LF）等），计算单船在单航程内的排放量；

**步骤 4：区域内河船舶大气污染物排放量计算。**累加单船在单航程内的排放量。

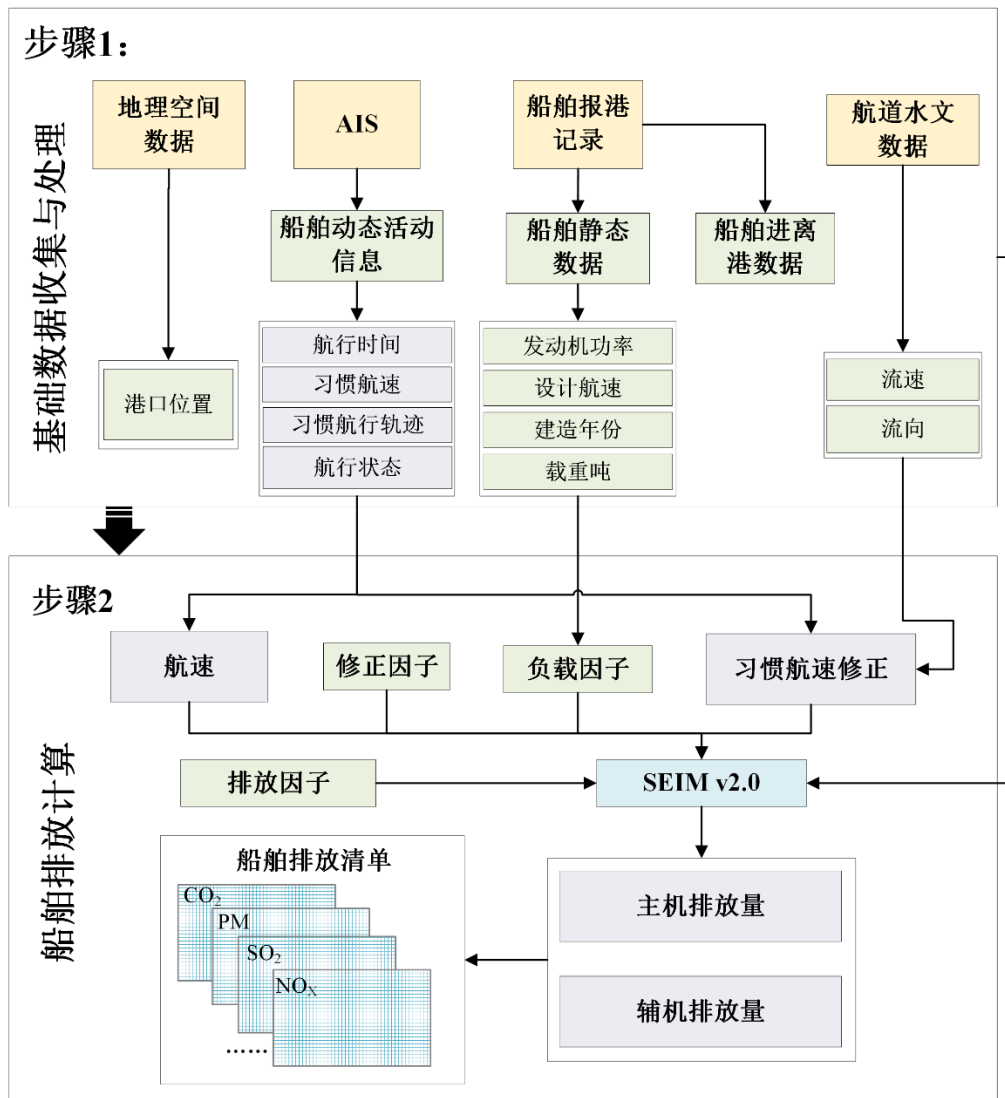


图 3.1-1 内河船舶大气污染物排放量计算方法流程

### 3.1.2.1 基础数据收集与处理

在计算模型中，需要收集五种类型基础数据，数据类型、数据字段名称、数据获取途径的详细介绍如表 3.1-1。

表 3.1-1 模型基础数据概要表

数据类型	数据字段名称	数据获取途径
	习惯航速分布	
历史 AIS 数据	习惯航迹	历史 AIS 数据统计分析
	航行时间	
船舶静态数据	发动机功率	船舶档案数据库、
	设计航速	采用统计方法进行补充

	船舶建造年份	
	船舶载重吨	
	河流流向	公共网站、
航道水文数据	河流流速	水利局
	港口名称	
港口地理空间数据	港口地理空间坐标	公共网站
船舶进离港文本记录数		
据	船舶进离港记录	海事局

### (1) 内河船舶航行状态辨识

船舶在不同活动状态下的航行速度有着显著的差异，在 SEIM v2.0 中，将船舶的活动状态分为了巡航、机动、锚泊和停靠泊四种状态。在本研究中，结合内河船舶的活动特征以及内河航道的通航环境特征，以内河船舶活动的地理空间位置为分类标准，将内河船舶活动分为四种状态，如图 3.1-2 所示。

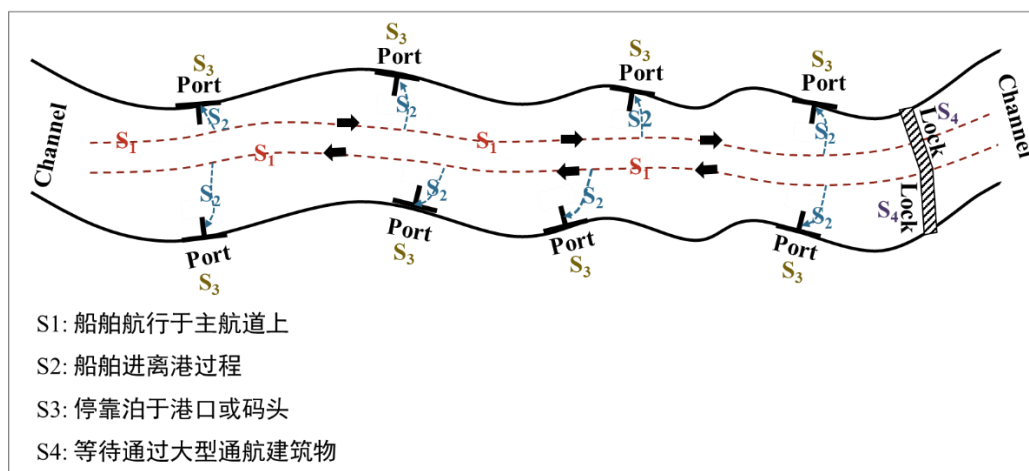


图 3.1-2 内河船舶活动状态示意图

四种活动状态的具体解释如下：

- 活动状态 1 ( $S_1$ )：船舶航行于主航道上。在计算模型中，船舶处于该活动状态时，船舶航速大于 3 节，船舶主机、辅机同时工作；
- 活动状态 2 ( $S_2$ )：船舶进离港的过程。在计算模型中，船舶处于该活动状态时，船舶航速位于 1~3 节范围内，船舶主机、辅机同时工作；
- 活动状态 3 ( $S_3$ )：船舶停靠泊。在计算模型中，船舶处于该状态时，船舶辅机工作，船舶主机停止运转；

● 活动状态 4 ( $S_4$ )：船舶等待通过大型通航建筑物。船舶处于该状态时，船舶辅机工作，船舶主机停止运转。

## (2) 港口间船舶习惯航速统计分析

在本研究中，需要统计船舶在 $s_1$ 和 $s_2$ 的航行速度的统计分布特征。首先，并对船舶的航行速度进行区间划分，具体如式(3.2-1)所示。

$$\begin{cases} s_1 = \{v_1(1, 1.5kn), v_2(1.5, 2kn), v_3(2, 3kn)\} \\ s_2 = \{v_1(3, 5kn), v_2(5, 7kn), v_3(7, 10kn), v_4(10, +\infty)\} \end{cases} \quad \text{式 (3.1-7)}$$

然后，以航道内近 3 年或更长时间尺度的历史 AIS 数据为基础，分别统计历史 AIS 数据中，船舶在 $s_1$ 和 $s_2$ 状态下，在各个航行速度区间范围内的航行时间比例，具体计算公式如式(3.1-8)所示。

$$R_{s_i, v_j} = t_{s_i, v_j} \times (t_{s_i})^{-1} \quad \text{式 (3.1-8)}$$

式(3.1-8)中， $R_{s_i, v_j}$ 为船舶处于活动状态 $s_i$ 时，历史船舶以 $v_j$ 航速航行的时间占船舶处于活动状态 $s_i$ 时总活动时间的比值； $t_{s_i}$ 为船舶处于活动状态 $s_i$ 时总活动时间，单位：h； $t_{s_i, v_j}$ 为船舶处于活动状态 $s_i$ 时，并以 $v_j$ 航速航行的时间，单位：h。

### 3.1.2.2 内河船舶排放计算

#### (1) 船舶单航程活动时间统计分析

##### ● 船舶处于活动状态 $s_1$ 和 $s_2$ 时的活动时间

船舶排放量与船舶航行速度密切相关，当船舶处于状态 $s_1$ 和 $s_2$ 时，船舶会以不同的航行速度在内河航道中航行，因此，在本研究中，通过统计船舶在各个航程段，在 $s_1$ 和 $s_2$ 活动状态下以不同航行速度航行的时间，记为 $T_{s_i, v_j}$ ，单位为h，具体的计算方法如下：

$$T_{s_i, v_j} = S_{s_i} \times (\sum_{j=1}^n v_j \times R_{s_i, v_j})^{-1} \times R_{s_i, v_j} \quad \text{式 (3.1-9)}$$

式(3.1-9)中， $T_{s_i, v_j}$ 为在单航程内船舶在活动状态 $s_i$ 时，以航速 $v_j$ 航行的时间，单位：h； $S_{s_i}$ 为船舶在活动状态 $s_i$ 时的航行距离，单位：km。

航行于内河中的船舶航速会受到风和水流的影响。在航海领域，将船舶在静水中的航行速度称为船速，即对水速度，将船舶在风、浪、流等环境因素影响下相对于海底的速度成为航速，即对地速度。而船舶 AIS 提供的船舶速度信息指的是航速，因此需要对 AIS 提供的航速进行修正，得到真正的船速，才能

用于模型的计算。对环境影响因素下的船速修正主要分为两大步骤，第一步计算环境场中风流因素对船舶速度的影响。风和流对船舶航速的影响主要体现在两个方面，一方面，风动力和水动力的综合影响会导致船舶产生风致飘移；另一方面，风致飘移不仅与迎风面相关，而且受到船舶速度的影响，当船舶处于静止状态下，船速完成受风致飘移的影响。风、流影响船舶运动的示意如图 3.1-3 和 3.1-4 所示。风流影响因素前的速度等于 AIS 提供的航速减去风致飘移速度和流至飘移的速度，航速修正的公式如式 (3.1-10) 所示。因此，式 (3.1-9) 中的  $v_j$  是在考虑风、流修正后的 AIS 航速。

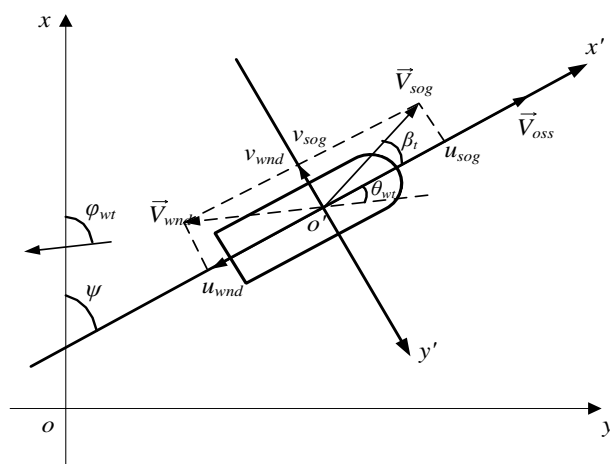


图 3.1-3 风影响下的船舶运动平面坐标系

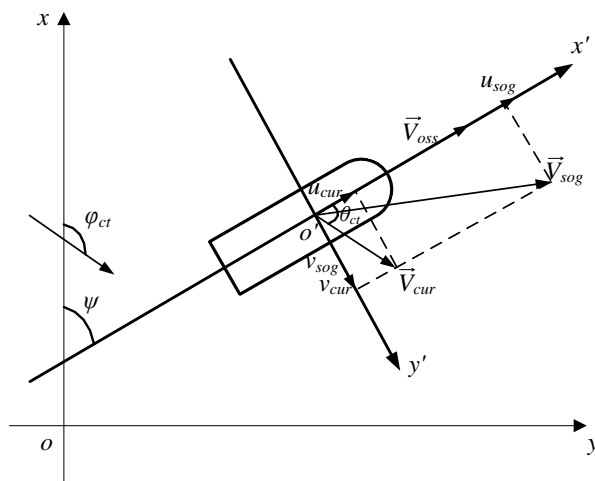


图 3.1-4 流影响下的船舶运动平面坐标系

$$V_{OSS'} = \left( \sqrt{V_{sog}^2 * 0.5144 - (V_{cur} * \sin \theta_{ct} - V_{wnd} * \sin \theta_{wt})^2} - V_{cur} * \cos \theta_{ct} + V_{wnd} * \cos \theta_{wt} \right) * 1.944 \quad \text{式 (3.1-10)}$$



式 (3.1-10) 中,  $V_{OSS'}$  为修正后的航速, 单位: knot;  $V_{wnd}$  为风速, 单位: m/s;  $\theta_{wt}$  为风舷角;  $\theta_{ct}$  为流舷角;  $V_{soq}$  为船舶对地航速, 即 AIS 提供的船舶航速, 单位: knot;  $V_{OSS'}$  为考虑风、流影响修正后的船舶航速, 单位: knot。

- 船舶处于活动状态  $s_3$  时的活动时间

船舶在港口的停泊时长可通过实地调研、问卷调查、一线访谈等形式, 进行统计。

- 船舶处于活动状态  $s_4$  时的活动时间

由于内河航道各航段内地势、地貌等的差异, 因此, 可通过修建大型通航建筑物以改善内河航道通航条件。船舶等待通过大型通航建筑物的时间, 可参考统计年鉴或通过实地调研的方式获取。

## (2) 单船在单航程内排放量计算

本研究计算的船舶大气污染物组分包括  $CO_2$ 、 $N_2O$ 、 $CH_4$ 、 $PM$ 、 $NO_x$ 、 $SO_2$ 、 $CO$ 、 $HC$ 。单船在单航程内的排放量为船舶在四种活动状态下的排放量之和, 具体计算方法如式 (3.1-11) 所示。

$$E = \sum_{i=1}^4 E_{m,s_i} + E_{a,s_i} \quad \text{式 (3.1-11)}$$

式 (3.2-5) 中,  $E_{m,s_i}$  和  $E_{a,s_i}$  为船舶在活动状态为  $s_1$  时, 船舶主机和船舶辅机排放量, 单位: g。

当船舶处于活动状态  $s_1$  和  $s_2$  时, 船舶主机和辅机同时处于工作状态, 船舶主机工作排放的大气污染物计算方法如下所示。

$$E_{m,s_i} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n P_m \times \left(\frac{v_j}{MS}\right)^3 \times T_{s_i,v_j} \times LLAM \times EF_{m,k} \quad \text{式 (3.1-12)}$$

式 (3.1-12) 中,  $P_m$  为船舶主机功率, 单位: kW;  $MS$  为船舶设计航速, 单位: kn;  $LLAM$  为主机处于低负荷状态下的调整因子, 当主机负荷率低于 20% 时, 主机的排放量明显增加, 因此需要运用  $LLAM$  对船舶排放因子进行调整, 参考值见表 3.1-2;  $EF_{m,k}$  为第  $k$  类污染物的船舶主机排放因子, 单位:  $g/kWh$ , 参考值见表 3.1-3。

$$E_{a,s_i} = P_a \times LF_a \times T_{s_i,a} \times EF_{a,k} \quad \text{式 (3.1-13)}$$

式 (3.1-13) 中,  $P_a$  为船舶辅机功率, 单位: kW;  $LF_a$  为船舶辅机负载因子;  $T_{s_i,a}$  为船舶在活动状态  $s_i$  时主机的运行时间, 单位: h;  $EF_a$  为第  $k$  类污染物的船舶辅机排放因子, 单位:  $g/kWh$ 。

表 3.1-2 主机低负荷调整因子参考值 (Geng et al., 2016)

负荷%	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	HC
2	1	4.63	21.18	7.29	4.63	1	9.68	21.18
3	1	2.92	11.68	4.33	2.92	1	6.46	11.68
4	1	2.21	7.71	3.09	2.21	1	4.86	7.71
5	1	1.83	5.61	2.44	1.83	1	3.89	5.61
6	1	1.6	4.35	2.04	1.6	1	3.25	4.35
7	1	1.45	3.52	1.79	1.45	1	2.79	3.52
8	1	1.35	2.95	1.61	1.35	1	2.45	2.95
9	1	1.27	2.52	1.48	1.27	1	2.18	2.52
10	1	1.22	2.18	1.38	1.22	1	1.96	2.18
11	1	1.17	1.96	1.3	1.17	1	1.79	1.96
12	1	1.14	1.76	1.24	1.14	1	1.64	1.76
13	1	1.11	1.6	1.19	1.11	1	1.52	1.6
14	1	1.08	1.47	1.15	1.08	1	1.41	1.47
15	1	1.06	1.36	1.11	1.06	1	1.32	1.36
16	1	1.05	1.26	1.08	1.05	1	1.24	1.26
17	1	1.03	1.18	1.06	1.03	1	1.17	1.18
18	1	1.02	1.11	1.04	1.02	1	1.11	1.11
19	1	1.01	1.05	1.02	1.01	1	1.05	1.05
20	1	1	1	1	1	1	1	1

表 3.1-3 船舶排放因子参考值 (Wang et al., 2022)

燃料 类型	排 放 设 备 类 型	发 动 机 类 型	C	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	PM	NO <sub>x-ti</sub>	NO <sub>x-ti</sub>	NO <sub>x-ti</sub>	SO <sub>2</sub>	H	C
			O <sub>2</sub>	O			er0	er1	er2		C	O
HFO	主 机	SS	60	0.0	0.0	1.33	18.1	17	15.3	9.26	0.	0.5
		D	7	31	12	5				1	6	4
		MS	67	0.0	0.0	1.33	14	13	11.2	10.2	0.	0.5
		D	0	34	1					15	5	4
2.43	辅 机		70	0.0	0.0	1.33	14.7	13	11.2	10.7	0.	0.5
			7	36	8					9	82	4

	锅	97	0.0	0.0								
	炉	0	8	02	2.1	14.85	14.85	14.85	0.1	0.	0.2	
		SS	60	0.0	0.0							
	主	D	7	31	12	0.31	17.01	15.98	14.38	1.81	0.	0.5
	机	MS	67	0.0	0.0							
<b>MG</b>		D	0	34	1	0.31	13.16	12.22	10.53	1.98	0.	0.5
<b>O-</b>	辅		70	0.0	0.0							
<b>0.5%</b>	机		7	36	8	0.32	13.82	12.22	10.53	2.12	0.	0.5
	锅	97	0.0	0.0								
	炉	0	8	02	0.2	1.974	1.974	1.974	3.1	0.	0.2	
		SS	60	0.0	0.0	0.19						
	主	D	7	31	12	9	17.01	15.98	14.38	0.51	0.	0.5
	机	MS	67	0.0	0.0							
<b>MG</b>		D	0	34	1	0.2	13.16	12.22	10.53	0.56	0.	0.5
<b>O-</b>	辅		70	0.0	0.0	0.20						
<b>0.13</b>	机		7	36	8	2	13.82	12.22	10.53	0.59	0.	0.5
<b>%</b>	锅	97	0.0	0.0	0.11							
	炉	0	8	02	2		1.974	1.974	1.974	0.82	0.	0.2
		SS	60	0.0	0.0	0.01						
	主	D	7	31	12	92	17.01	15.98	14.38	0.13	0.	0.5
	机	MS	67	0.0	0.0	0.01						
<b>GDO</b>		D	0	34	1	92	13.16	12.22	10.53	0.14	0.	0.5
<b>-</b>	辅		70	0.0	0.0	0.01						
<b>0.035</b>	机		7	36	8	93	13.82	12.22	10.53	0.15	0.	0.5
<b>%</b>	锅	97	0.0	0.0	0.00							
	炉	0	8	02	2							
		SS	60	0.0	0.0	0.00						
	主	D	7	31	12	28	17.01	15.98	14.38	0.01	0.	0.5
	机	MS	67	0.0	0.0	0.00						
<b>GDO</b>		D	0	34	1	27	13.16	12.22	10.53	0.02	0.	0.5
<b>-</b>	辅		70	0.0	0.0	0.00						
<b>0.005</b>	机		7	36	8	28	13.82	12.22	10.53	0.15	0.	0.5
<b>%</b>	锅	97	0.0	0.0	0.00							
	炉	0	8	02	1							
		SS	60	0.0	0.0	0.00						
	主	D	7	31	12	1	17.01	15.98	14.38	0.00	0.	0.5
	机	MS	67	0.0	0.0	0.00						
<b>GDO</b>		D	0	34	1	1	13.16	12.22	10.53	0.00	0.	0.5
<b>-</b>	辅		70	0.0	0.0	0.00						
<b>0.001</b>	机		7	36	8	1	13.82	12.22	10.53	0.00	0.	0.5
<b>%</b>	锅	97	0.0	0.0	0.00							
	炉	0	8	02	1							

LNG	Ott	45	0.0							0.00	0.	
	o	7	2	8.5	0.03	1.3	1.3	1.3	1.3	3	5	0.5

### (3) 区域船舶排放量计算

即对研究区域范围的单船、单航程的排放量进行累加。

## 3.2 中国内河和沿海船舶排放特征分析

### 3.2.1 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，船舶具有很强的空间流动性。由于船舶的船旗国、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船舶排放的归属国。在本研究中，制定中国船舶排放清单的目标区域是距离中国大陆领海基线约 200 Nm 以内的可通航内河和沿海水域（以下简称 200 Nm 区域），如图 3.2-1 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在 200 Nm 以内，对中国的空气污染和人类健康有重大贡献。第二，由于目前的 DECA 被限制为距离领海基线 12 Nm，远小于国际上提出的 ECA 面积，即 200 Nm 可以延伸到距离领海基线 200 Nm，研究 200Nm 区域的排放变化，为进一步的方案设计提供科学的参考。第三，200Nm 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。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。

本研究中内河船、沿海船、远洋船遵循了 SEIMv2.0 模型中的区分方式<sup>[147]</sup>。首先，对模拟年份的逐船 AIS 信号数量和所属地理区域进行统计，将一年中 AIS 信号量中超过 50% 位于内河水域的船舶定义为内河船，即在内河航行的船舶。非内河船中，具有 IMO 号的认为是远洋船，其余则被认定为沿海船。

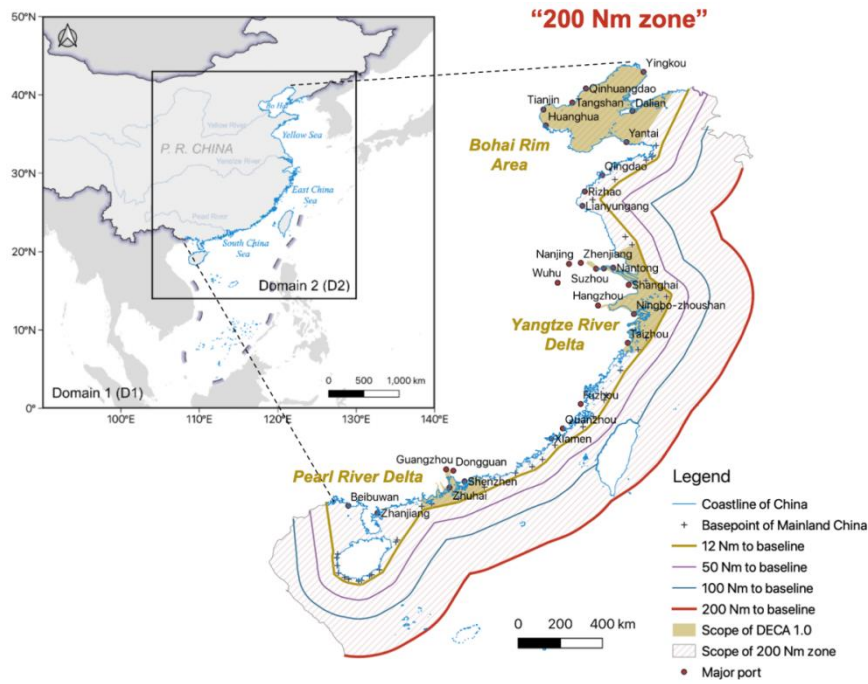


图 3.2-1 中国船舶排放控制区 200nm

### 3.2.2 结果分析

#### 3.2.2.1 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。2022 年，在 200 Nm 区域保持一定活动强度（每年 AIS 信号量大于 10）且参与清单计算的船舶数量约为 8.1 万艘船，总功率为 2 亿瓦，总载重吨为 12.5 亿吨。几乎是《2022 年中国航运发展报告》中统计的我国海运船队载重吨的 4 倍。这是由本研究的研究范围决定的，不仅包括我国海运船队，还包含在 200Nm 水域活动的外籍船舶。图 3.2-2 展示了 2022 年 200 Nm 区域活动的船队结构。远洋船、沿海船和内河船的船数比约为 25%/22%/53%，远洋船、沿海船、内河船的总功率比约为 22%/11%/2%。在船队总载重吨方面，远洋船占了 95%。虽然内河船和沿海船的吨位较小，但在功率方面的占比较为可观，因此也产生的排放量也不可忽视。

本研究经过 AIS 数据的清洗、处理，并与船舶静态库匹配，得到的 200Nm 范围的活动船舶数量低于统计年鉴中的我国船舶保有量，内河船在总数中的占比也和统计年鉴中略有不同。可能有以下几个原因：

首先，模型计算的船舶包含了“在 200Nm 区有一定活动强度（年 AIS 信号总量>10）的船舶”。而保有量的统计涵盖了所有登记在册的船舶。在统计口径

上，本研究覆盖的范围更小。原因在于：1) 活动强度低的船舶未统计；2) 未安装 AIS 系统或因检修等原因而无足够的 AIS 信号量的船舶未统计；3) 静态库未覆盖的船舶未统计等。

其次，本研究的“内河船”的概念，有别于保有量中内河船的概念。本研究的“内河船”是通过船舶在我国大陆领海基线以内的 AIS 信号频率的分布，以及是否有 IMO 号识别的，而保有量中的船舶则往往通过内河船认证标识判断是否为内河船。具有标识的内河船，有可能因为在沿海活动产生大量的 AIS 信号而在本模型中被识别为沿海船，或少量因为具有 IMO 号而在本模型中被识别为远洋船。同样，登记的非内河船也可能由于在内河活动，在内河上产生大量的 AIS 信号在本模型中被识别为内河船。因此，本研究的“内河船”在定义上与统计年鉴中的口径存在一定的不同，这种区分方式能够体现出船舶活动的空间范围和内河船、非内河船活动的空间异质性，更加便于排放管理者对船舶排放源的主要贡献部分进行掌握和监管。

另外，本研究聚焦于航运排放，因此不考虑渔船、港口作业船、搜救船、科考船、游艇等类型的船舶。也是统计结果区别于年鉴的重要原因。

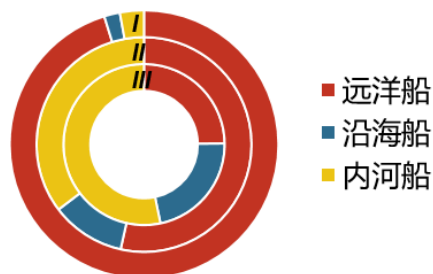


图 3.2-2 本研究 2022 年活动船队结构 (I: 总载重吨; II: 总功率; III: 总数量)

图 3.2-3 呈现了本研究聚焦的 2022 年中国 200Nm 区域活动船舶的功率分布和载重吨分布。在载重吨方面，远洋船载重吨的范围明显较宽，大船多。沿海船和内河船以载重吨低于 2 千吨的小船为主。在主机功率方面，本研究的远洋船主机功率的峰值为 8 千瓦，沿海和内河船的主机功率峰值在 3 千瓦以下。

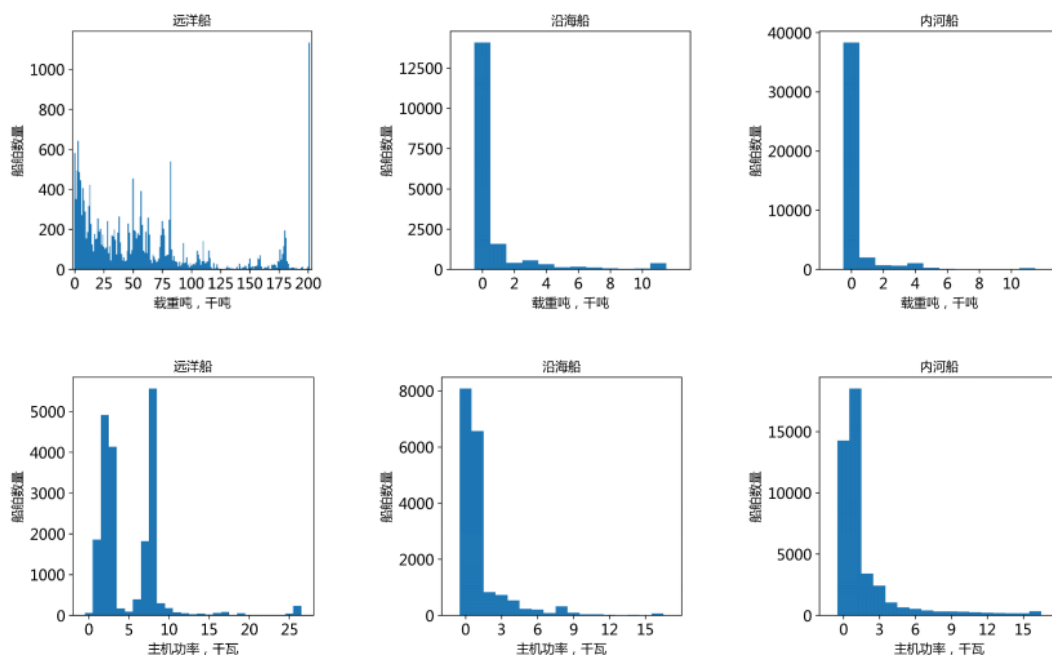


图 3.2-3 本研究中远洋船、沿海船、内河船的载重吨和主机功率分布

### 3.2.2.2 排放总量及构成

图 3.2-4 展示了 2016—2022 年中国水运货物周转量和旅客周转量的变化趋势。根据《交通运输行业发展统计公报》（国家统计局, 2022），2016—2022 年中国内河和海洋货运周转量逐年增加，年均增长率分别为 5.1% 和 3.4%。内河货运周转量的占比从 2016 年的 14.5% 提高到了 2022 年的 15.7%。但客运周转量受疫情影响，加上近年来高铁、飞机等行业的冲击，2020—2022 年显著下降。

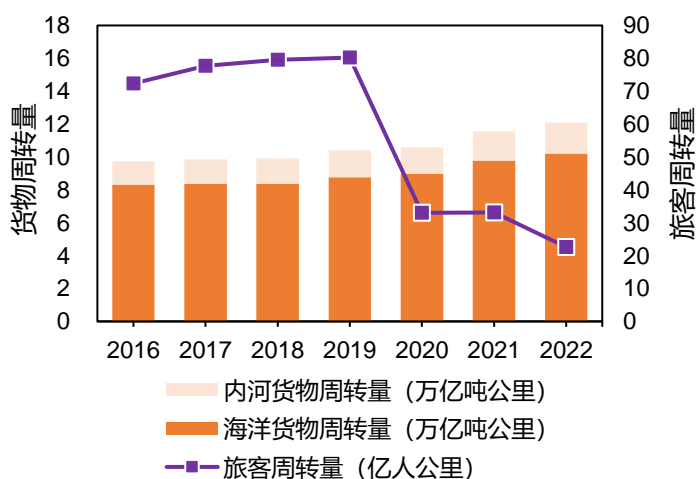


图 3.2-4 我国内河货运周转量、海洋货运周转量和水路旅客运输量的多年际变化

---

本研究以 200Nm 区为研究区域，基于 AIS 大数据建立了 2022 年高分辨率船舶排放清单，对中国船舶排放特征进行分析。2022 中国 200Nm 区域分河海船类型的主要大气污染物和温室气体的年排放总量和以前研究的对比如表 3.2-1 所示。2022 年，我国 200Nm 区域船舶排放的 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM（硫酸盐）、SO<sub>2</sub>、HC 和 CO 分别为 1.2 亿吨、200.6 万吨、4.1 万吨、26.4 万吨、9.5 万吨和 9.7 万吨。根据生态环境部发布的环境统计年报<sup>[144]</sup>，2021 年我国人为源（统计范围不包括非道路移动源）的 NO<sub>x</sub> 排放为 988 万吨，SO<sub>x</sub> 为 275 万吨。我国 200Nm 范围内的船舶排放与我国人为源排放的 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 的比例约为 27% 和 11%。发生在 200Nm 区域的船舶排在量级上不可忽视。尽管船舶排放的污染物大部分发生于海上，但在大气的风力的作用下也会传输到陆地区域，且在传输通过大气化学反应生成二次污染物，对我国沿海地区空气质量造成影响。

2022 年，远洋船的 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、PM（硫酸盐）和 CO<sub>2</sub> 的年排放量分别为 125.1 万吨、22.4 万吨、3.5 万吨和 8068.1 万吨，占区域内总船舶排放的 57.9%~84.4%。对于不同年份，远洋船舶始终是区域内最主要的排放来源。在整个全球范围内，虽然中国的水域面积（研究区域内）不到全球水域面积的 1%，但其远洋船排放占全球总远洋船排放的 8.9%~10.9%，而美国、欧洲按相同统计方法得到的水域远洋船 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、PM（硫酸盐）和 CO<sub>2</sub> 排放分别占全球总远洋船排放的 0.2%-1.7% 和 0.8%-3.6%。这进一步凸显了中国船舶排放的严峻性。因此，中国作为世界上海运贸易量最大的国家，也是世界主要的造船大国之一，在不断发展对外贸易、提升国际竞争力的同时，也需要对海运船舶所带来的负面影响给予同等重视。

除远洋船外，内河船舶也产生了相当大的排放量，在所有年份中对区域内的 NO<sub>x</sub>、HC、CO、CO<sub>2</sub> 排放量的贡献为 12.8%~35.6%。对于中国内河船舶，由于本研究设定内河船舶均使用硫含量达到国家标准的普通柴油，因此对 SO<sub>2</sub> 和 PM（硫酸盐）排放量的贡献较少（<1%）。然而，内河船的 NO<sub>x</sub> 排放量高达 31.5 吨/年，在量级上约为北京、上海等直辖市在全境内所有陆地交通源的排放量<sup>[146]</sup>。而且内河船的 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 HC 排放一直保持上升趋势，量级上仅次于远洋船。因此，内河船舶排放所产生的大气环境影响在未来的船舶排放管控中需受到重视。



表 3.2-1 不同研究估算的中国船舶大气污染物及温室气体排放量

年份	来源	NO <sub>x</sub> (百万吨)	SO <sub>2</sub> (百万吨)	PM (硫酸盐) (千吨)	HC (千吨)	CO (千吨)	CO <sub>2</sub> (百万吨)
2022	远洋船	1.25	0.22	0.22	34.7	55	61
	本研 究 沿海船	0.25	0.04	0.04	6.6	11	12
	内河船	0.50	0.00	0.00	0.02	29	24
	总量	2.0	0.26	0.26	41.3	95	97
2019	Wang et al., 2021	2.5	1.2	154.5	112.0	115.8	141.8
2018	Wang et al., 2021	2.4	1.6	208.7	106.3	110.3	135.1
2017	Wang et al., 2021	2.3	1.5	197.0	100.0	104.0	126.9
2016	Wang et al., 2021	2.1	1.5	188.2	91.9	95.7	116.8
2014	Chen et al., 2017	2.21	1.19	181	242	112	78
2014	Huang et al., 2019	1.15	1.00	120	88	36	-
2013	Fu et al., 2017	1.91	1.30	164	74	69	86
2013	Li et al., 2018	1.44	1.01	107	118	67	-

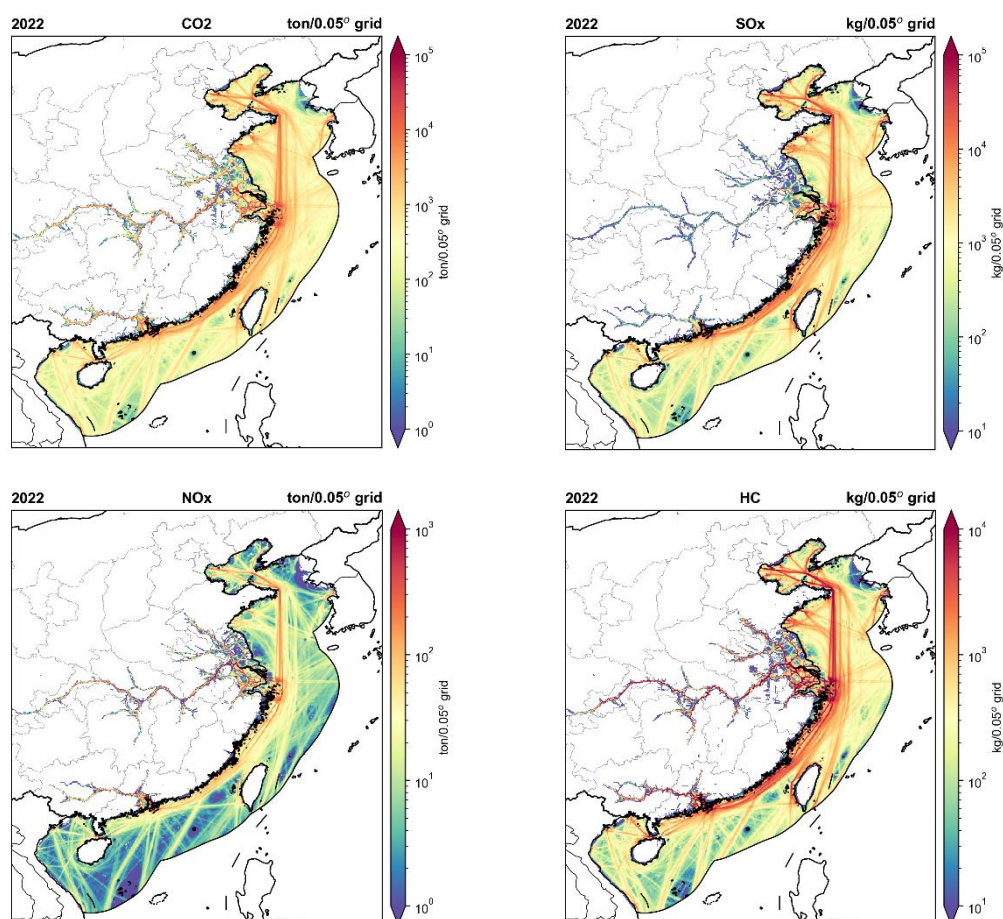
表 3.2-1 同时总结了近年来采用类似的基于 AIS 动力法建立中国船舶清单的研究。虽然 Wang et al., 2021 之前的研究区域与本研究一致，但船型范围包括了渔船、作业船、搜救船等类型，范围比本研究稍大。其它基于 AIS 数据的船舶排放清单研究与本研究结果差异产生的原因包括研究区域的不一致、基础数据库的质量差异及年际间船舶活动水平的变化等。首先，本研究划定的“200海里”是被认为对中国有潜在空气质量影响的海域，相较于其它研究空间范围略大，因此区域内船舶的活动水平更高。其次，本研究所建立的船舶静态信息库在各国船级社资料的基础上融入了 GFW 和 AIS 静态报文中的有效信息，增加了对中国沿海区域船舶的识别，能够提升部分船舶信息的准确度。此外，海运贸易增长和 AIS 设备装船量的增加都会导致 AIS 数据中观察到的船舶活动水平逐年增加，从而产生船舶排放计算结果的差异。虽然不同研究所依赖的基础数据库质量参差不齐，但船舶排放因子普遍来源于国际大规模船队发动机的运行测试结果，因此不同研究对于各船舶污染物排放量估算结果的相对比例较为一致。

自“十三五”以来，中国人为碳排放在稳步增长的同时，各部门污染物排放量大幅度下降。根据生态环境部的环境统计年报，2016—2019 年我国工业源 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放分别降低了 48.7% 和 32.3%（生态环境部，2017, 2018, 2019, 2020）<sup>[141-144]</sup>，而 CO<sub>2</sub> 排放量在期间增长了 6.1%<sup>[145]</sup>。相比之下，船舶排放的增长趋势更为凸显。2016—2019 年，虽然船舶排放 SO<sub>2</sub> 和 PM（硫酸盐）排放减少了 29.6% 和 26.4%，但 CO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放分别增加了 16.2% 和 13.0%，其他物种的排放量也

呈现出逐渐增加的趋势。进入“十四五”，虽然海运部门  $\text{SO}_2$  和 PM（硫酸盐）排放得到了较好的控制，在未来中国海运贸易的不断增长趋势下，船舶大气污染物和温室气体排放的控制仍是未来我国交通部门和实现碳达峰目标和改善空气质量的必要途径。

### 3.2.2.4 空间分布

图 3.2-5 展示了 2022 年我国附近海域及内河的船舶排放空间分布情况。虽然从船舶类型的角度看，内河船舶的排放  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、HC、CO 排放量占 200Nm 区域船舶排放的 19.5%、25.0%、30.8%、25.0%，但如果从网格排放强度的角度来看，属于中国内河的网格平均排放强度为 2494.2 吨  $\text{CO}_2/0.05^\circ$  网格、51.2 吨  $\text{NO}_x/0.05^\circ$  网格、2.8 吨 HC/0.05° 网格、2.4 吨 CO/0.05° 网格，分别是海洋网格平均排放强度的 2.6、3.4、4.2、3.4 倍。体现了我国内河水网密集、内河船舶排放强度大的特点。



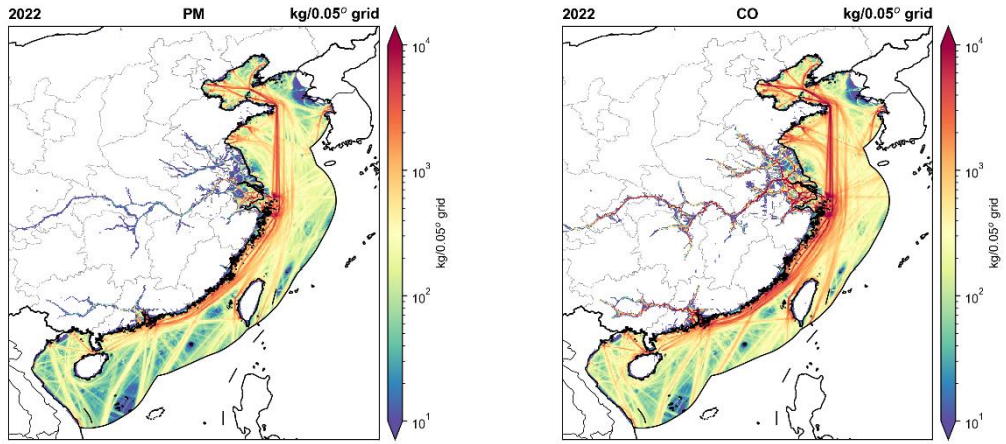
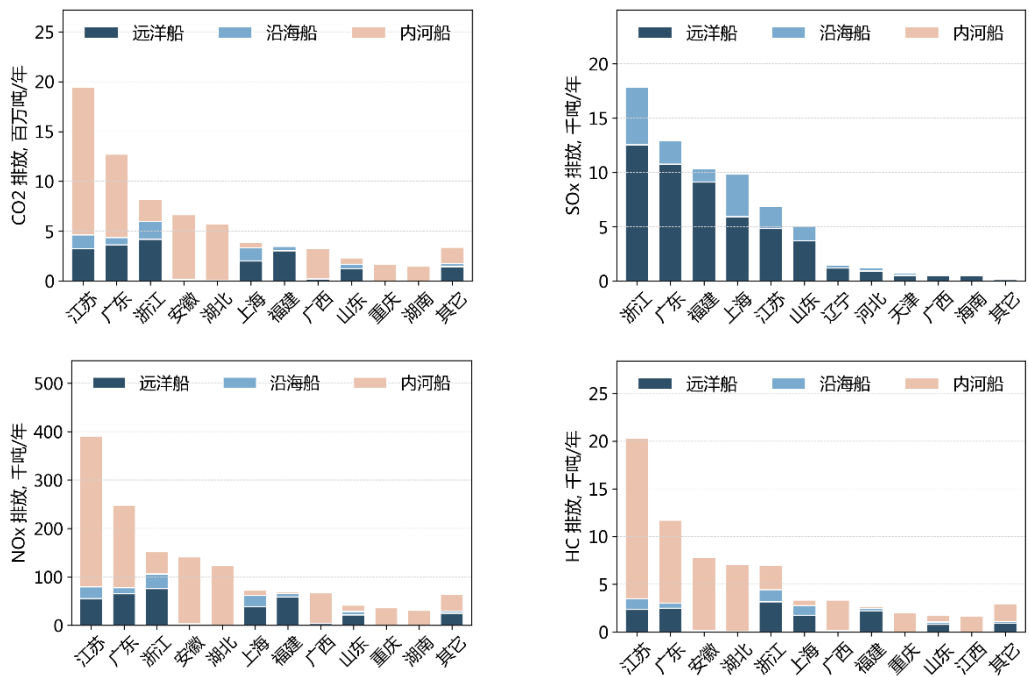


图 3.2-5 2022 年我国 200Nm 区的船舶排放空间分布

将内陆船舶排放按网格地理坐标分摊到各个省市，如图 3.2-6，可以发现，江苏、广东、浙江、安徽是发生在内陆的船舶排放最集中的省份，其中内河船对这些省份船舶排放的  $\text{NO}_x$  贡献分别为 79.7%、68.8%、30.4%、79.7%。对于江苏、浙江这些临海省份来说，远洋船和沿海船也有一定贡献。但对于安徽、湖北、重庆、湖南等内陆省份和直辖市来说，船舶排放几乎都来自内河船。对于这些省市来说，船舶排放管理几乎等同于内河船舶排放管理，在交通向水路转型、内河船舶排放逐渐上升的背景下，这些地区面临的压力也会逐渐增大。



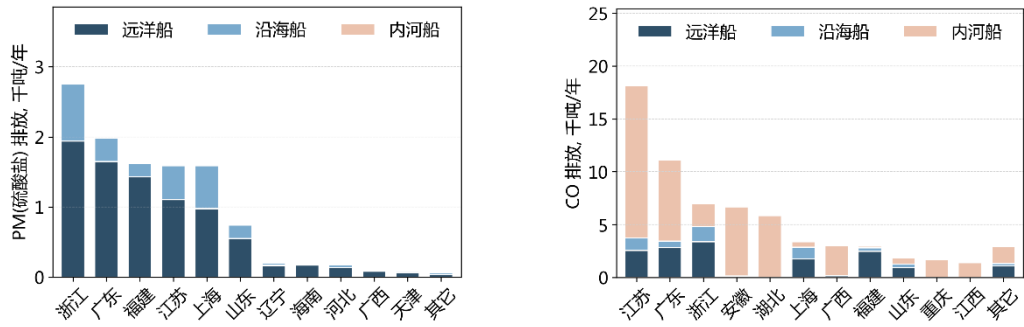
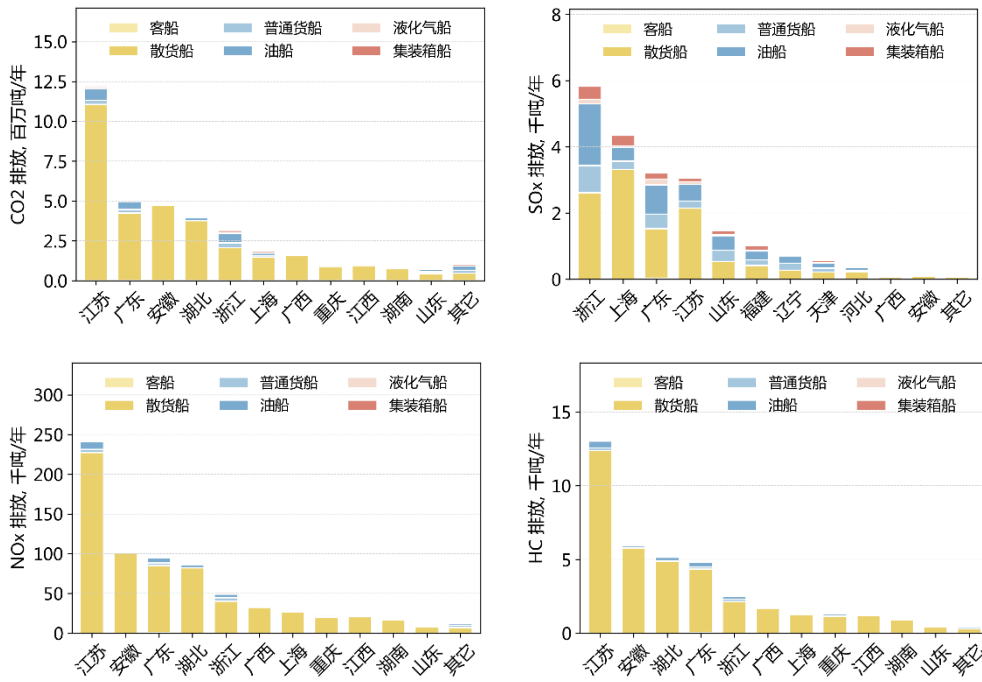


图 3.2-6 2022 年我国各省份区域水系分船舶类型排放分担量

按船舶功能类型来划分，如图 3.2-7，可以发现，散货船是所有省份船舶排放贡献的主要船型，其对各省份  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、HC、CO 的排放贡献为 88.8%、91.6%、92.4%、91.3%，对  $\text{SO}_2$  和 PM（硫酸盐）的贡献约为 49.7%、57.0%。浙江、上海、广东、江苏是沿海省份/城市，受到沿海船和远洋船的影响较大。沿海船和远洋船的燃料硫含量远高于内河船，因此对于这些省份/城市来说，集装箱船、油船、货船对船舶  $\text{SO}_2$  排放的贡献也较大。



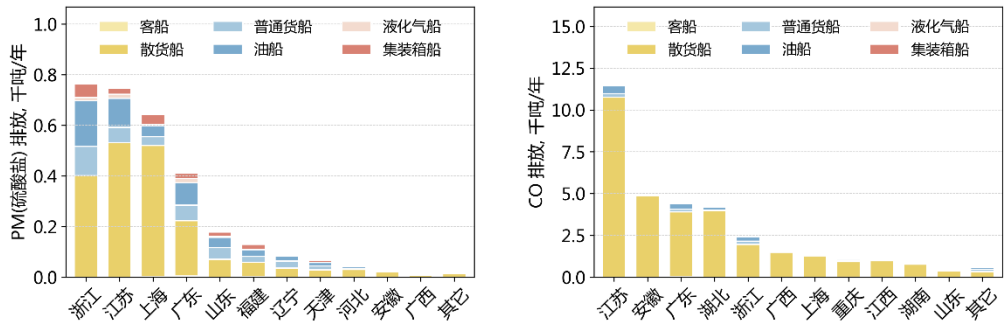


图 3.2-7 2022 年我国各省份内河区域分船舶功能类型排放分担量

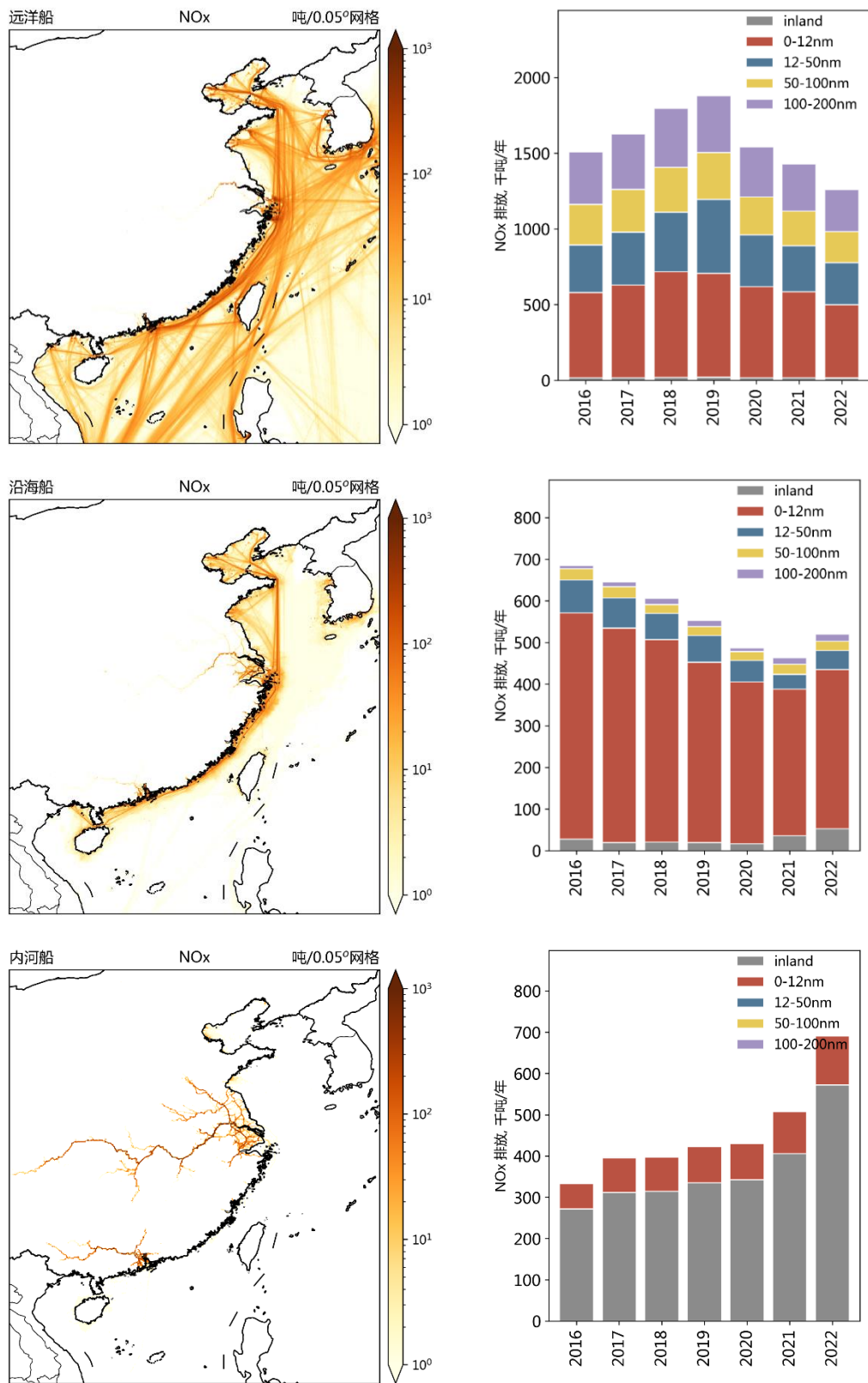


图 3.2-12 远洋船、沿海船和内河船 NO<sub>x</sub>排放空间分布与不同距离排放年际变化

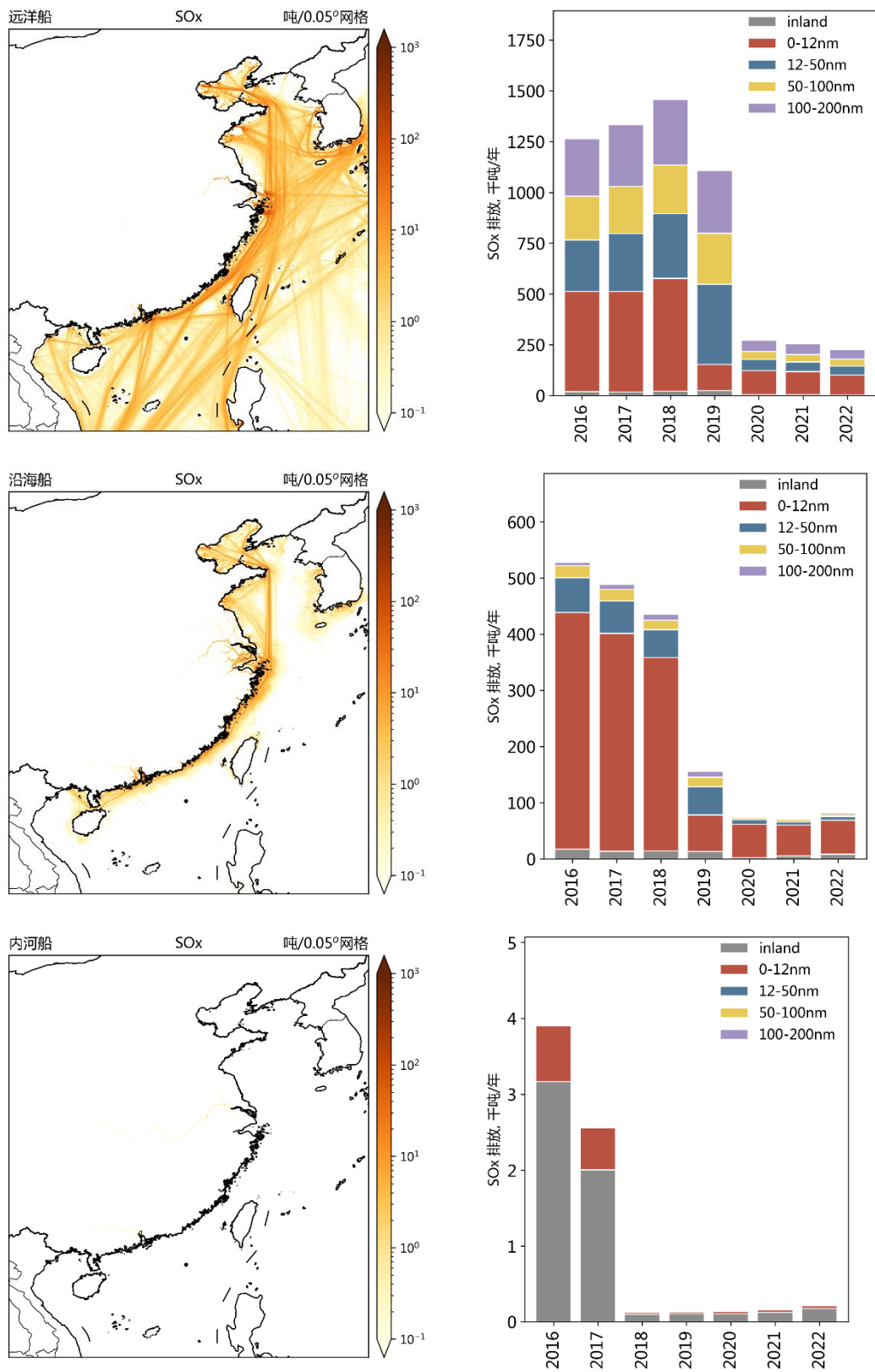


图 3.2-13 远洋船、沿海船和内河船 SO<sub>2</sub>排放空间分布与不同距离排放年际变化

---

从空间分布来看，远洋船舶的排放表现为大范围的高排放强度，且在主要航道上的排放分布非常清晰，包括中国-韩国、中国大陆-台湾、北太平洋航线、中国港口至马六甲海峡以及中国港口间的沿海航线。按远洋船排放的区域来源看，2022年“0—12海里”范围内的远洋船舶的 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 排放分别占研究区域内远洋船舶总排放的39.5%和44.4%。从2016年至2019年，除“inland”、“0—12海里”范围内 $\text{SO}_2$ 排放由于DECA 2.0的控制而大幅度下降外，其它各区域的 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_2$ 排放均表现为略有增加。2020年，由于全球限硫令的实施，各个范围区域的远洋船舶 $\text{SO}_2$ 排放均大幅下降。与图3.2-2中船舶数量的统计结果对比，可以发现尽管远洋船舶的数量最低，但其在沿海区域内的船舶排放强度远高于沿海船和内河船。远洋船舶服务于国际贸易，其船体尺寸和发动机额定功率相对较高，因此航行单位距离产生的排放量相对较高。

对于沿海船而言，约87.4%的 $\text{NO}_x$ 排放量和88.2%的 $\text{SO}_2$ 排放量分布在“inland”、“0—12海里”范围内，而100海里之外的排放分担基本小于2.0%。从空间分布来看，沿海船的排放呈现出广泛的晕染状，而在主航道的排放强度较低，这种空间分布特征源于大量沿海渔船在捕捞区的作业活动（Kroodsmat et al., 2018）。从年际变化来看，沿海船舶在2016—2021年间的排放逐年降低，在2022年有所反弹。此外，2019年在“0—12海里”范围内沿海船的 $\text{SO}_2$ 年减排率（81.0%）甚至高于远洋船（76.9%），2020年在“0—12海里”范围内沿海船的 $\text{SO}_2$ 年减排率（22.8%）甚至高于远洋船（19.5%），这表明沿海船相较于远洋船来说，受到DECA2.0和全球限硫令的影响更大。

与远洋船和沿海船相比，内河船排放的80%以上分布在江河水域的通航航段，排放强度最高的区域显然位于长江和珠江下游及其入海口。同时，由于部分内河船舶也会进入沿海水域进行货运往来，因此“0—12海里”范围内的排放也占了内河船舶排放的15%左右。从年际变化来看，随着普通柴油的硫含量标准从2017年7月1日前的350 ppm（硫酸盐）降低至2018年1月1日之后的10 ppm（硫酸盐），内河船的 $\text{SO}_2$ 排放已经达到相对较低的水平（生态环境部，2019）。然而，包括 $\text{NO}_x$ 等其它污染物的排放仍在逐渐增加。此外，目前有一部分小型船舶仍未安装AIS设备，且缺乏可靠的本地内河船排放因子测试的研究，这些因素是基于AIS数据计算的内河船舶排放清单的不确定性的主要来源。



将内陆船舶排放按网格地理坐标分摊到各个省市，如图 3.2-14，可以发现，江苏、广东、浙江、安徽是发生在内陆的船舶排放最集中的省份，其中内河船对这些省份船舶排放的  $\text{NO}_x$  贡献分别为 79.7%、68.8%、30.4%、79.7%。对于江苏、浙江这些临海省份来说，远洋船和沿海船也有一定贡献。但对于安徽、湖北、重庆、湖南等内陆省份和直辖市来说，船舶排放几乎都来自内河船。对于这些省市来说，船舶排放管理几乎等同于内河船舶排放管理，在交通向水路转型、内河船舶排放逐渐上升的背景下，这些地区面临的压力也会逐渐增大。

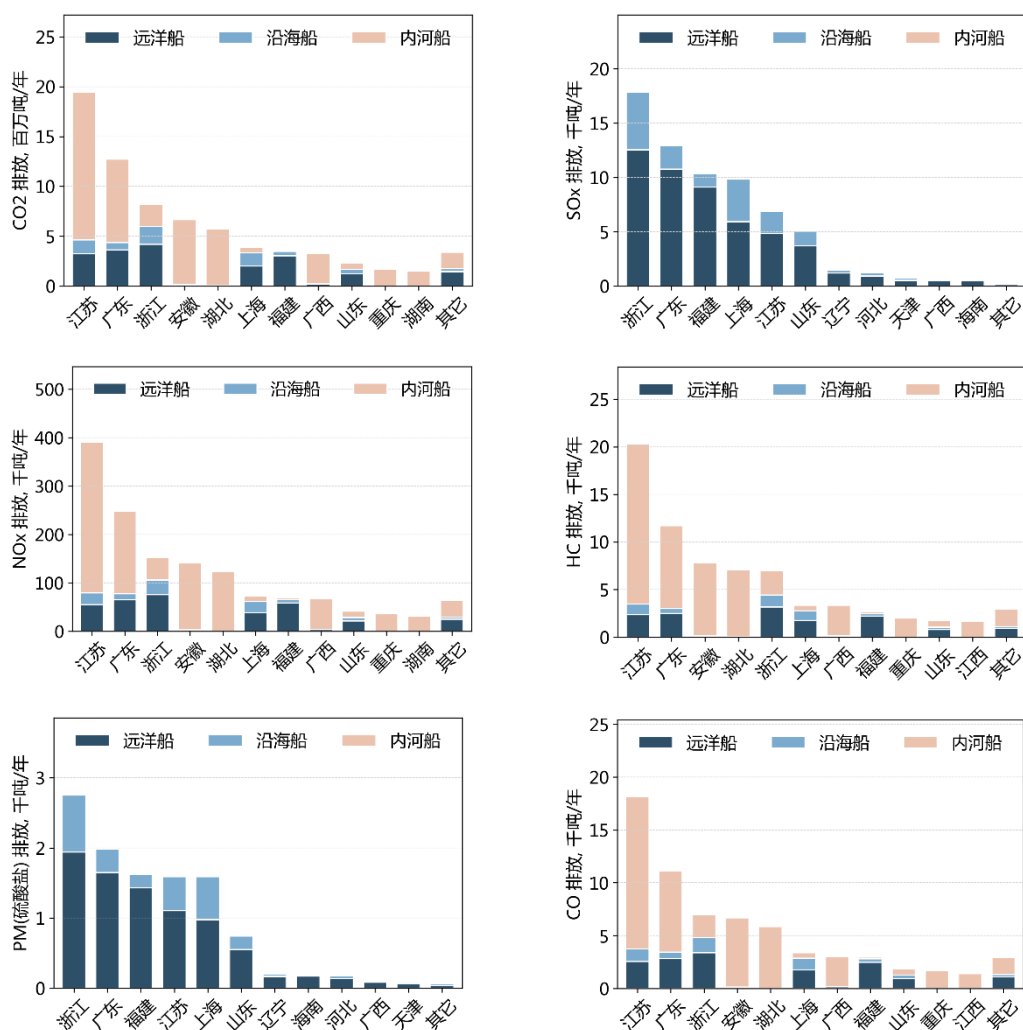


图 3.2-14 2022 年我国各省份区域水系分船舶类型排放分担量

按船舶功能类型来划分，如图 3.2-15，可以发现，散货船是所有省份船舶排放贡献的主要船型，其对各省份  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、HC、CO 的排放贡献为 88.8%、91.6%、92.4%、91.3%，对  $\text{SO}_2$  和 PM（硫酸盐）的贡献约为 49.7%、57.0%。浙江、上海、广东、江苏是沿海省份/城市，受到沿海船和远洋船的影响较大。沿

海船和远洋船的燃料硫含量远高于内河船，因此对于这些省份/城市来说，集装箱船、油船、货船对船舶 SO<sub>2</sub> 排放的贡献也较大。

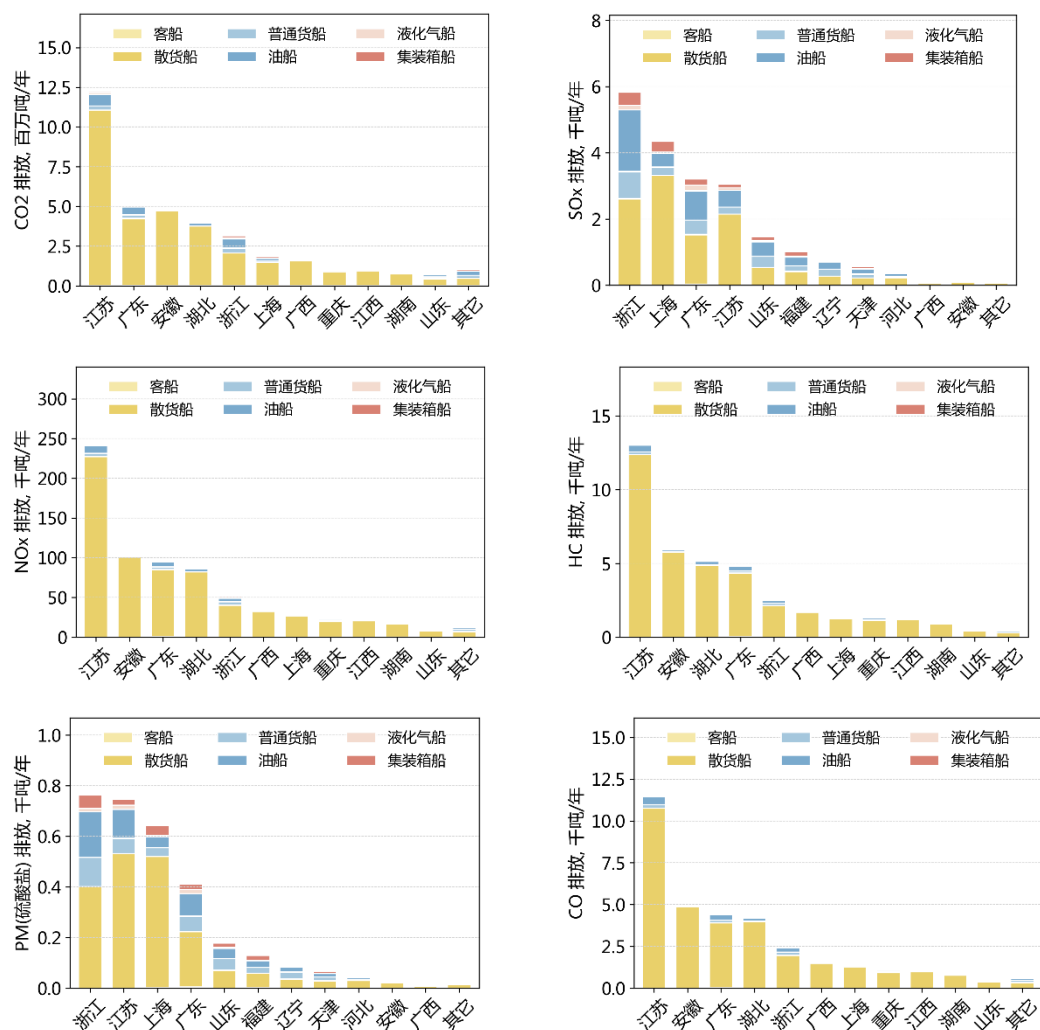


图 3.2-15 2022 年我国各省份内河区域分船舶功能类型排放分担量

### 3.3 长江流域典型航道断面船舶排放特征分析

#### 3.3.1 研究区域和相关数据概述

船舶排放强度的计算主要涉及到以下数据：典型船舶进离港记录数据、历史船舶 AIS 数据、船舶排放因子、长江航道水文气象数据等。具体研究区域示意图，如图 3.3-1 所示。

##### 3.3.1.1 典型断面上航行船舶进离港数据概况

船舶进离港数据中包含了各个船舶详细的进离港的码头名称、单航程载货吨位、船舶类型、船舶主机功率等信息。在本研究中，以通过长江干线中上游的某航道断面的船舶进离港记录数据为基础，利用 3.1.2 节中提出的内河船舶大

气污染物排放估算方法，计算通过该航道断面的船舶在全航行过程中的排放量，并结合通过该航道断面的船舶货运记录信息，以计算通过该航道断面的船舶排放强度。本研究中的典型断面上航行船舶进离港数据的概要如表 3.3-1 所示。

表 3.3-1 长江典型断面上航行船舶进离港数据概要

	数据说明	注释
时间尺度	2017.01.01-2022.06.30	
空间尺度	上海-重庆	
进离港记录总数（次）	253,960	
船舶总数量（艘）	47666	
港口数	59	原始港口名称和编号见表 3.3-2
进离港省份	上海、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川	

(1) 船舶进离港 O-D (Original port to Destination port) 距离

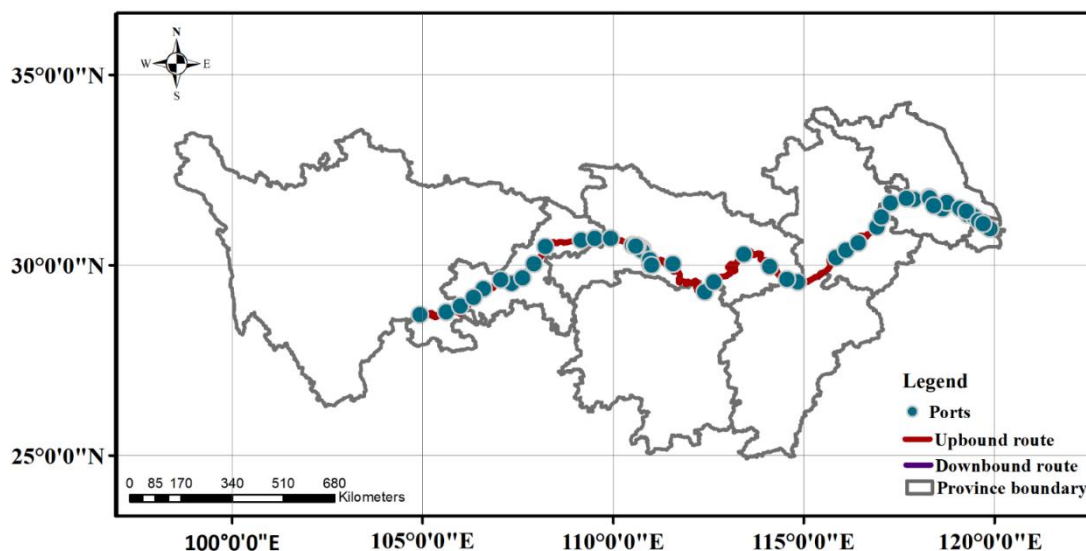


图 3.3-1 长江干线主要港口、上下行主航道示意图

为便于后续船舶排放计算，将 59 个港口进行重新编码归并为 38 个港口，详见表 3.3-2。船舶航行于两个港口间的单航程距离是主航道航行距离和进离港航行距离之和，具体各个港口间的距离计算结果如图 3.3-2 所示。

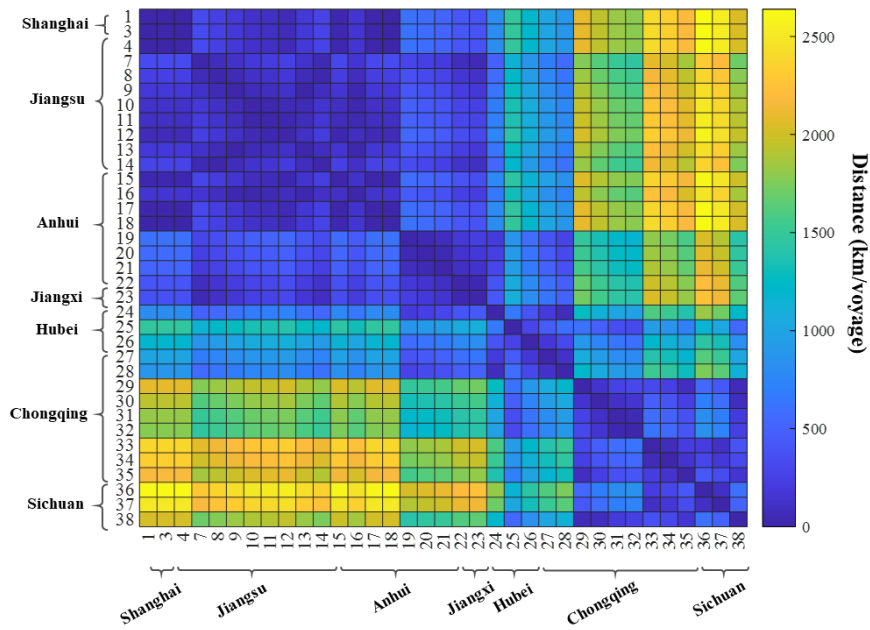


图 3.3-2 长江干线主要港口间航行距离计算结果

表 3.3-2 不同船型船舶建造年份参考值

船型编号	船舶类型名	统计样本数	建造年份	Tier	最大设计航速 (knot)
1	Other	962	2010	I	18.2
2	Bulk carrier	27409	2011	II	11.8
3	Service	210	2008	I	13.6
4	Cargo ship	68	2008	I	12.7
5	Container	370	2009	I	19
6	Oil tanker	1227	2007	I	12.1
7	Chemical tanker	789	2012	II	12.9
8	Tug	45	1995	0	11.9
9	RoRo	103	2014	II	17.4
10	Liquids tanker	14	--	--	14.2
11	Liquefied gas tanker	87	--	--	11.6
12	Passenger ship	553	2013	II	22.95
13	Yacht	28	2014	II	16.7

(2) 进离港船舶艘次和进离港记录次数

图 3.3-3 中，统计分析了典型断面上航行经过船舶逐年的船舶艘次和记录数。由于船舶载重吨与船舶尺寸大小是呈正相关的，因此，本研究也统计了船舶在不同载重吨区间的分布特征，如图 3.3-3。

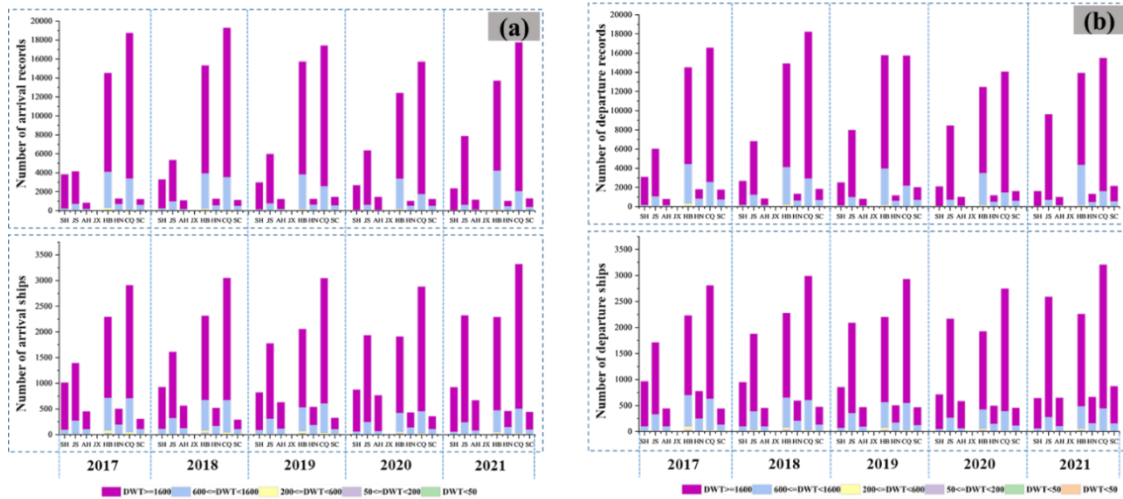


图 3.3-3 典型断面上航行船舶进离港艘次和进离港记录次

图 3.3-3 (a)为各个省份进港船舶数量和进港记录数，图 3.3-3 (b)为各省份离港船舶数量和离港记录数。从图中可以看出，2017-2021 年时间段内航道断面通过数量和通过记录数年变化不显著，主要原因是受限于选取的航道断面的船舶通过能力在 2017 年就已经趋近于饱和状态。但可以看出船舶吨位大于 1600GT 的船舶数量在逐年增加，表明长江上航行的船舶呈现船舶大型化趋势。

### (3) O-D 港口间航线数量

由于该典型航道断面位于长江中上游，因此，缺乏在长江上游航段和长江下游航段航行的船舶进离港数据，但往返至长江上下游的船舶进离港数据，在表达长江内河航段船舶航行特征具有典型的代表意义。航行经过该典型航道断面的船舶航行记录数，如图 3.3-4 所示，可以看出 O-D 对港口数量在 2021 年开始递增，且可以看出各个港口 O-D 对之间的航程数量呈现了下降的趋势，高密度航线数量减少，这主要是由于交通组织模式优化的结果。

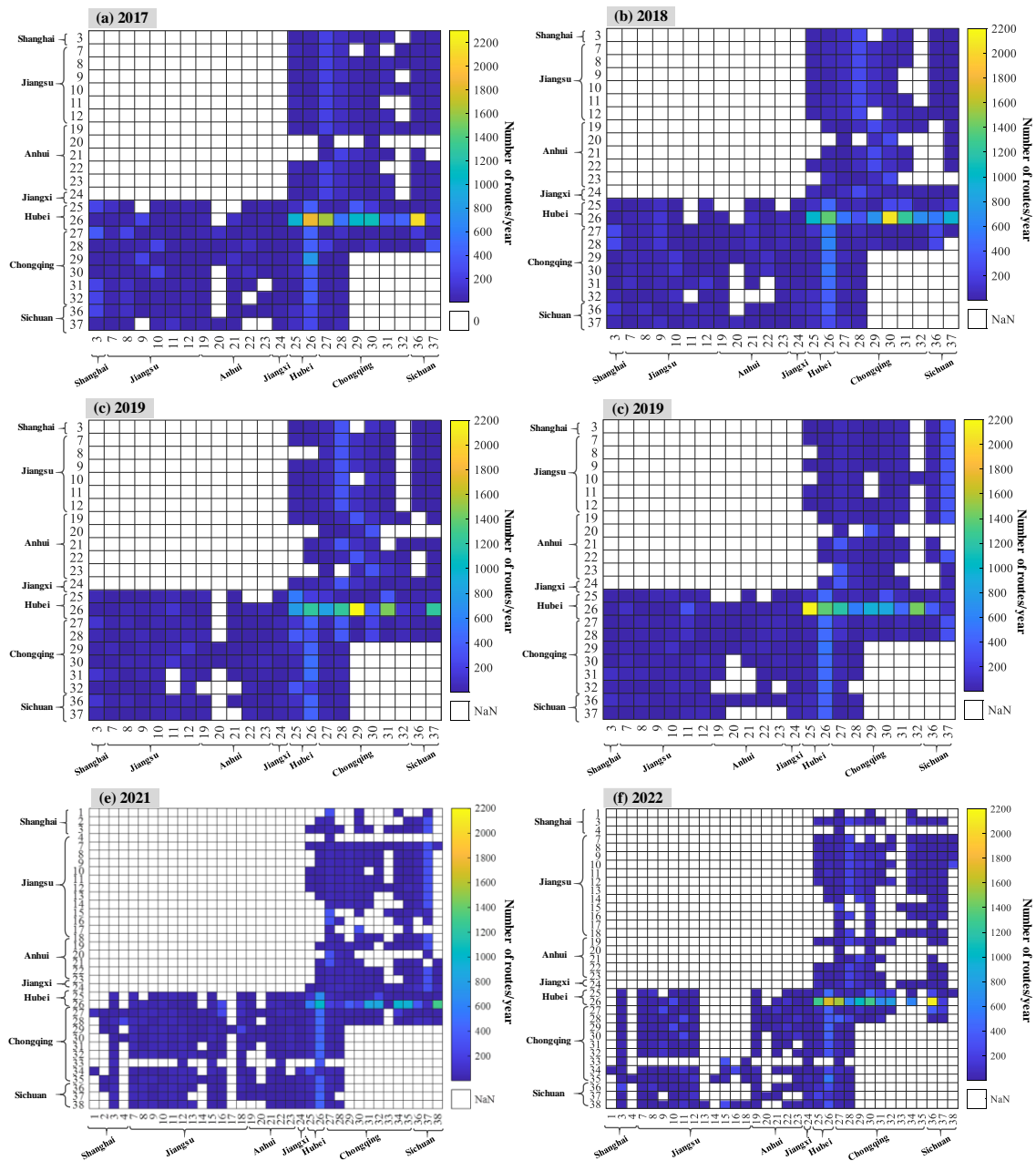


图 3.3-4 O-D 港口间航线数量逐年变化图

### 3.3.1.2 长江干线船舶历史航速统计分析

统计研究区域范围内的船舶历史航速分布特征，是计算区域内河船舶排放量的基础。因此，采用 3.1.2.1 节中提出的港口间船舶习惯航速统计分析方法，并以 2017 和 2018 长江干线两年的 AIS 数据为基础，统计长江干线上航行的船舶在 S1 和 S2 航行状态下的航速分布规律。长江上航行的船舶航速会受到航道内水流和风的影响，但由于受限于长江航道内风场数据缺失，在本研究中，仅考虑了水流的流向、流速来修正 AIS 提供的船舶航速。长江航道内水流速度参

考了长江海事局提供的长江上游、中游和下游航段在不同季节的流速监测经验值，具体流速值见表 3.3-3。

表 3.3-3 长江干线不同航段的流速监测经验值

航段		丰水期流速 (m/s)	枯水期流速 (m/s)	洪水期流速 区间 (m/s)	枯水期流速 区间 (m/s)
上游	宜宾-宜昌	4	2.25	3.0~5.0	1.5~3.0
中游	宜昌-武汉	2.5	1.35	2.0~3.0	1.0~1.7
下游	武汉-浏河口	1.75	1	1.6~1.9	0.8~1.2
长江口		None	None	None	None

在本研究中，对于长江航道内的水流流向是假设与航道方向是一致的，同时假设船舶在主航道上行驶时的航向与航道方向是一致的，在这种假设下，会忽略船舶横驶、掉头、转向的航行行为。结合航道内水流流向、流速，采用式 (3.1-10) 中的航速修正方法，修正船舶 AIS 航速。

基于修正后的 AIS 航速，统计了 2017 和 2018 年长江航道内航行船舶在不同活动状态下的航速分布规律，分析结果如图 3.3-5 所示。

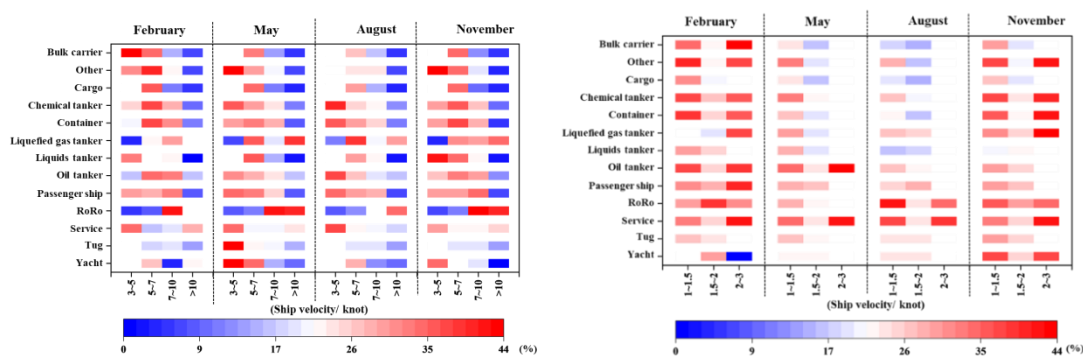


图 3.3-5 长江航道内船舶在 S1 和 S2 航行状态下的各航速段航行时间占比统计结果

### 3.3.1.3 长江内河船舶排放因子

船舶排放的  $SO_x$  和 PM 的排放因子与船舶使用燃料油硫含量密切相关，本研究根据交通运输部规定的长江流域航行的船舶的船用燃料油硫含量标准，并

---

结合已有文献中提出的参考排放因子（见 3.1-3），确定不同年份的长江航行船舶的排放因子。

长江船舶使用燃油硫含量的要求是，2016年1月1日至2019年1月1日，内河船舶和江海直达船应使用硫含量不大于0.035% $m/m$ 的燃油，海船应使用硫含量不大于0.5% $m/m$ 的燃油；2019年1月1日至2020年1月1日，内河船和江海直达船应使用硫含量不大于0.001% $m/m$ 的燃油，海船应使用硫含量不大于0.5% $m/m$ 的燃油；2020年1月1日至现在，海船进入内河水域应使用硫含量不大于0.1% $m/m$ 的燃料油，内河船和江海直达船应使用硫含量不大于0.001% $m/m$ 的燃油。

#### 3.3.1.4 内河船舶排放计算模型其他参数

##### （1）船舶建造年份

船舶的建造年份，对于计算船舶 $NO_x$ 排放结果是有影响的，在船舶排放计算过程中，需要参考 $NO_x$ 排放限值要求，选取不同的 $NO_x$ 排放因子。交通运输部在2018年提出了对于船舶氮氧化物排放控制要求<sup>[2]</sup>，即不同年份建造的船舶，需满足不同的氮氧化物排放限值要求，具体要求如下：

（1）2000年1月1日及以后建造（以铺设龙骨日期为准，下同）或进行船用柴油发动机重大改装的国际航行船舶，所使用的单台船用柴油发动机输出功率超过130千瓦的，应满足《国际防止船舶造成污染公约》第一阶段氮氧化物排放限值要求；

（2）2011年1月1日及以后建造或进行船用柴油发动机重大改装的国际航行船舶，所使用的单台船用柴油发动机输出功率超过130千瓦的，应满足《国际防止船舶造成污染公约》第二阶段氮氧化物排放限值要求；

（3）2015年3月1日及以后建造或进行船用柴油发动机重大改装的中国籍国内航行船舶，所使用的单台船用柴油发动机输出功率超过130千瓦的，应满足《国际防止船舶造成污染公约》第二阶段氮氧化物排放限值要求；

（4）2022年1月1日及以后建造或进行船用柴油发动机重大改装的、进入沿海控制区海南水域和内河控制区的中国籍国内航行船舶，所使用的单缸排量大于或等于30升的船用柴油发动机应满足《国际防止船舶造成污染公约》第三阶段氮氧化物排放限值要求。



在本研究中，基于典型航道断面的船舶进离港记录中的船舶建造年份数据，统计分析了不同船型船舶的船龄分布情况，统计结果如图 3.3-6 所示。

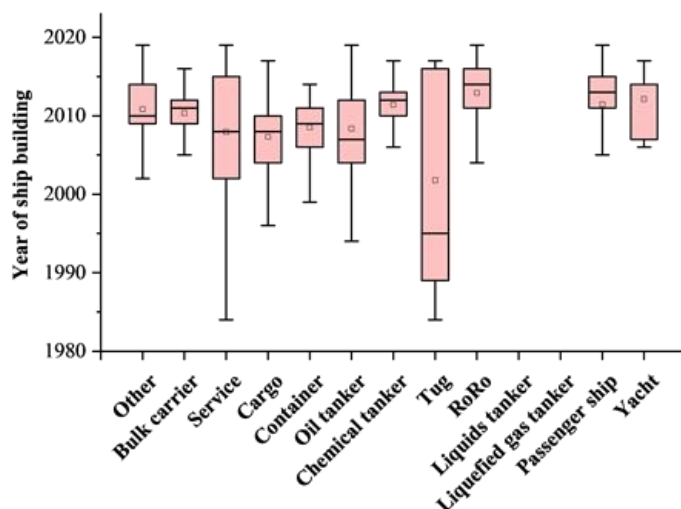


图 3.3-6 不同船型船舶建造年份统计分布

从图 3.3-6 中可以看出，长江活动船舶中，拖船的建造年份早，相对其他船型而言，相对老旧，而客船建造年份相对晚，新造船舶多。由于在进离港记录数据中，部分船舶缺乏船舶建造年龄信息，因此，在本研究中，以图 3.3-6 中不同船型的平均建造年份补充船舶缺失的船龄信息。不同船型的建造平均年份和应满足的  $\text{NO}_x$  排放控制要求，见表 3.3-2。

### (2) 最大设计航速 ( $MS$ )

在本研究中，由于长江海事局提供的船舶最大设计航速值的缺失，因此，本研究引用了 IMO 第四次温室气体研究报告中的最大设计航速参考值，具体见表 3.3-2。

### (3) 长江港口船舶停泊时间 ( $T_{s3,a}$ )

Tan 等人在关于长江岸电服务能力评价文章中，已调研了长江干线部分典型港口的船舶停泊时长。但本研究中，共涉及到 38 个港口船舶停泊时长的计算，部分缺失的港口停泊时长值，引用最邻近港口的停泊时长作为替代值。具体的参考值见表 3.3-4。

表 3.3-4 长江港口船舶停泊时间

编号	港口名	停泊时长 (h)	编号	港口名	停泊时长 (h)
1	上海	7.35	20	池州	2.72

2	南京	2.68	21	铜陵	2.2
3	镇江	3.2	22	芜湖	5.21
4	泰州	3.157	23	马鞍山	5.34
5	江阴	2.51	24	九江	4.95
6	张家港	1.28	25	荆州	3.03
7	南通	3.7	26	洪湖	3.605
8	扬州	3.157	27	武汉	4.09
9	仪征	3.157	28	黄石	5.23
10	常熟	3.157	29	巴东	3.605
11	常州	3.157	30	宜昌	2.07
12	苏州	3.157	31	城陵矶	3.835
13	太仓	7.32	32	重庆	3.75
14	安庆	2.74	33	涪陵	4.85
15	池州	2.72	34	丰都	3.835
16	铜陵	2.2	35	万州	2.99
17	芜湖	5.21	36	奉节	3.835
18	马鞍山	5.34	37	巫山	3.535
19	九江	4.95	38	宜宾	3.75

#### (4) 长江航道船舶待闸时间 ( $T_{s4,a}$ )

在长江航运发展报告中，每年都会计算船舶等待过闸的平均时间，具体值见表 3.3-5。

表 3.3-5 长江航道船舶待闸时长

年份	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
年平均待闸时长 (h)	43.98	105.88	151.19	83.33	110	19.92	19.92

### 3.3.2 内河船舶排放估算方法精度分析

为验证提出的内河船舶大气污染物排放估算方法和方法所涉及到的计算参数的可靠性。本研究以两艘长江在役船舶在 2022 年的燃油消耗报告数据为基础，

该燃油报告包括了两艘船舶在不同航程，及各个港口 O-D 对之间航行的时间、燃油消耗量、所用燃油硫含量，图 3.3-7 展示了两艘船舶在 2022 年的航程。

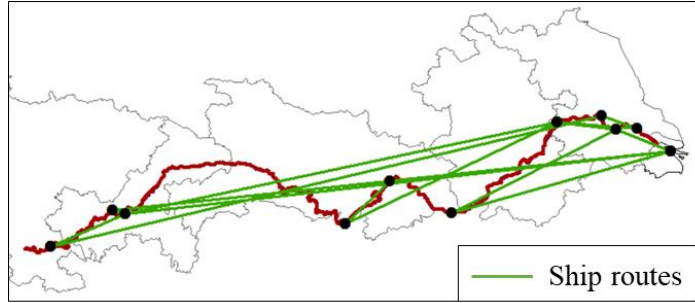


图 3.3-7 两艘船舶 2022 年航线分布图

因此，本研究采用 3.1 节中提出的方法，并结合 3.3.1 节中的关于两艘船舶的相关参数数据，计算了两艘船舶在各个航程的船舶 CO<sub>2</sub> 排放量。然后，又结合两艘船舶在各个航程的燃油消耗量，并结合船舶 CO<sub>2</sub> 的排放因子 ( $EF_{CO_2} = 3666.67 * 0.86$ )，采用燃油法计算两艘船舶在各个航程的 CO<sub>2</sub> 排放量，并以此计算结果作为船舶在各个航段的实际 CO<sub>2</sub> 排放量。燃油法的具体计算公式如式 (3.3-1) 所示。

$$E_{CO_2,FC} = FC * EF_{CO_2} \quad \text{式 (3.3-1)}$$

表 3.3-6 展示了两艘船舶的基本信息，具体如下：

表 3.3-6 两艘船舶基本信息

船舶编号	Ship1	Ship2
船舶类型	油轮	油轮
主机功率 (kW)	880	1102
载重吨 DWT (t)	3235	3401
最大设计航速 (kn)	12.1	12.1
建造年份	2011	2011
2022 年航程数 (航次)	35	25

图 3.3-8 为采用燃油法计算的船舶各航程 CO<sub>2</sub> 排放量 (实际 CO<sub>2</sub> 排放量) 和本研究提出的模型计算的船舶各航程 CO<sub>2</sub> 排放量，可以看到计算的碳排放量与实际 CO<sub>2</sub> 排放量的相对误差为 21.88%，绝对误差为 34.3%。

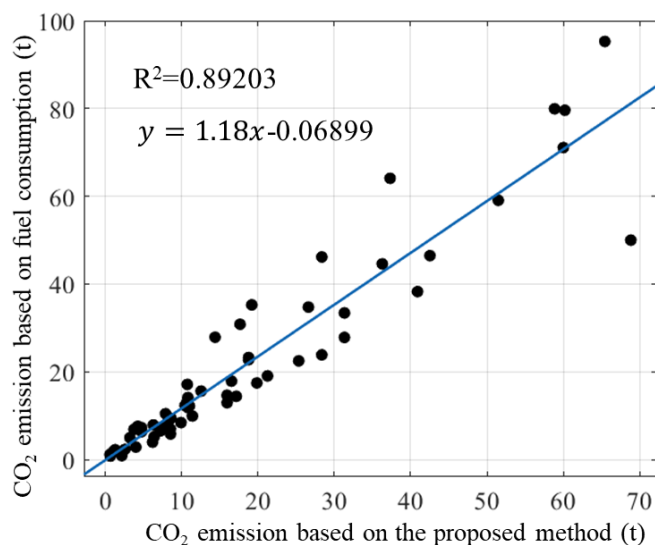


图 3.3-8 本研究提出的内河船舶排放大气污染物估算方法误差分析

### 3.3.3 长江典型航道断面船舶排放量计算

基于典型断面上航行经过船舶的进离港记录数据，并结合 5.1.1 节中的相关基础数据，采用 3.1.2 节中提出的内河船舶大气污染物排放估算方法，计算 2017 年 1 月 1 日-2022 年 6 月 30 日长江上典型航道断面经过船舶在其全航程的排放量。

#### 3.3.3.1 排放总量

典型断面上的排放总量，船舶排放的  $\text{CO}_2$  超过 93%，是发生在航行状态为 S1（即主道上航行时）时；船舶在航行状态为 S4 时（即等待过闸）时贡献了约 6% 的  $\text{CO}_2$  排放量，但船舶在 S4 排放量的贡献比例是逐年下降的，到 2022 年该比例下降至 1.4%，这主要得益于船舶过闸调度模式优化，极大程度的缩短了船舶等待过闸的时间，另外，可以看出船舶  $\text{CO}_2$  年排放量呈现波动上升趋势，且船舶排放年变化趋势与货运量和航行距离年变化趋势是一致的。2022 年由于仅有半年的进离港记录数据，因此，计算的 2022 年的  $\text{CO}_2$  年排放量不具有参考性。

对于  $\text{SO}_2$  排放量，2017 年 6 月 30 日前，内河船舶被要求使用硫含量低于 0.035% 的普通柴油，2017 年 7 月 1 日起-2017 年 12 月 31 日，内河船舶被要求使用硫含量低于 0.005% 的普通柴油，2018 年以后，内河船舶被要求使用硫含量低于 0.001% 的普通柴油，2017 年至 2022 年，船舶排放的  $\text{SO}_2$  总量明显降低， $\text{SO}_2$  减排效益非常显著。

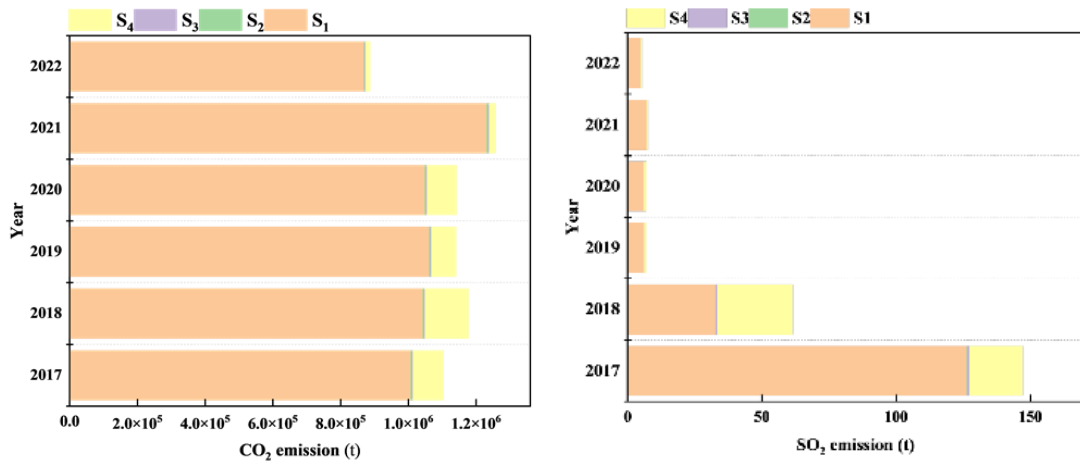


图 3.3-9 长江典型航道断面船舶排放总量

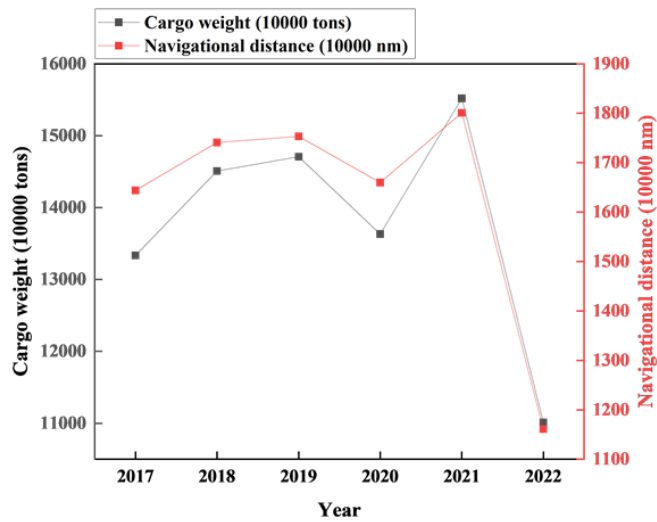


图 3.3-10 长江典型航道断面年货运量和年运输距离

### 3.3.3.2 排放结构

船舶类型分为了其他船、散货船、服务船、货船、集装箱船、油轮、化学品船、拖轮、滚装船、液化气船、一般液化气船、客船和游艇这 13 类船型，其中其他船包括多用途船、驳船、自卸砂船和其他类船，散货船包括杂货船、散货船和一般干货船，货船包括普通货船和其他液货船。图 3.3-11 展示了不同船型的船舶在不同航行状态下的年 CO<sub>2</sub> 排放量，可以看出散货船是 CO<sub>2</sub> 排放的主要船型，另外，客船在 2018 年之后排放 CO<sub>2</sub> 总量明显下降。

#### (1) 不同船型在不同航行状态下的排放量

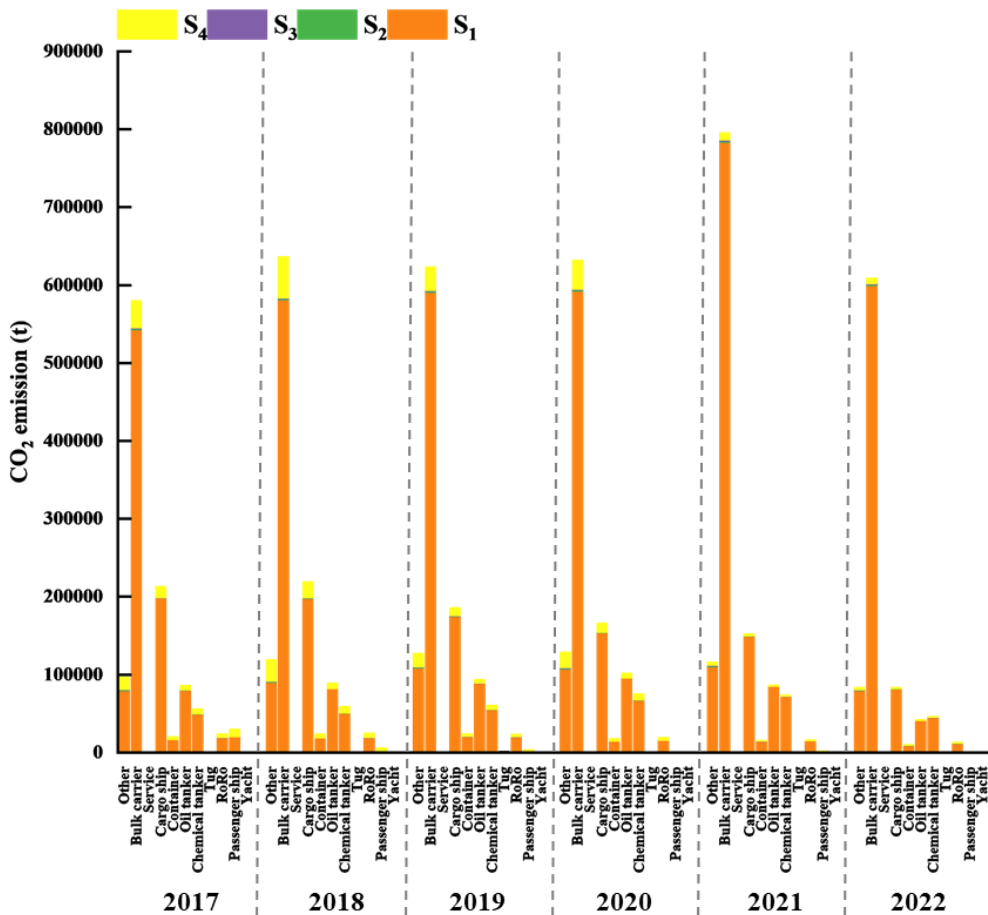


图 3.3-11 不同船型在不同航行状态下的排放量

## (2) 船舶单航程碳排放量

从图 3.3-12 中，可以看出航线上的 CO<sub>2</sub> 排放量在整体上呈现逐年下降的趋势，主要原因是由于船舶在 S<sub>4</sub> 状态下 CO<sub>2</sub> 排放量的显著下降，另外，可以看到，由于长江航道和码头基础建设投入力度的增加以及通航服务能力的增强，在 2021 年和 2022 年新增了多条航线，这分担了部分以往航线的货运压力和碳减排压力。

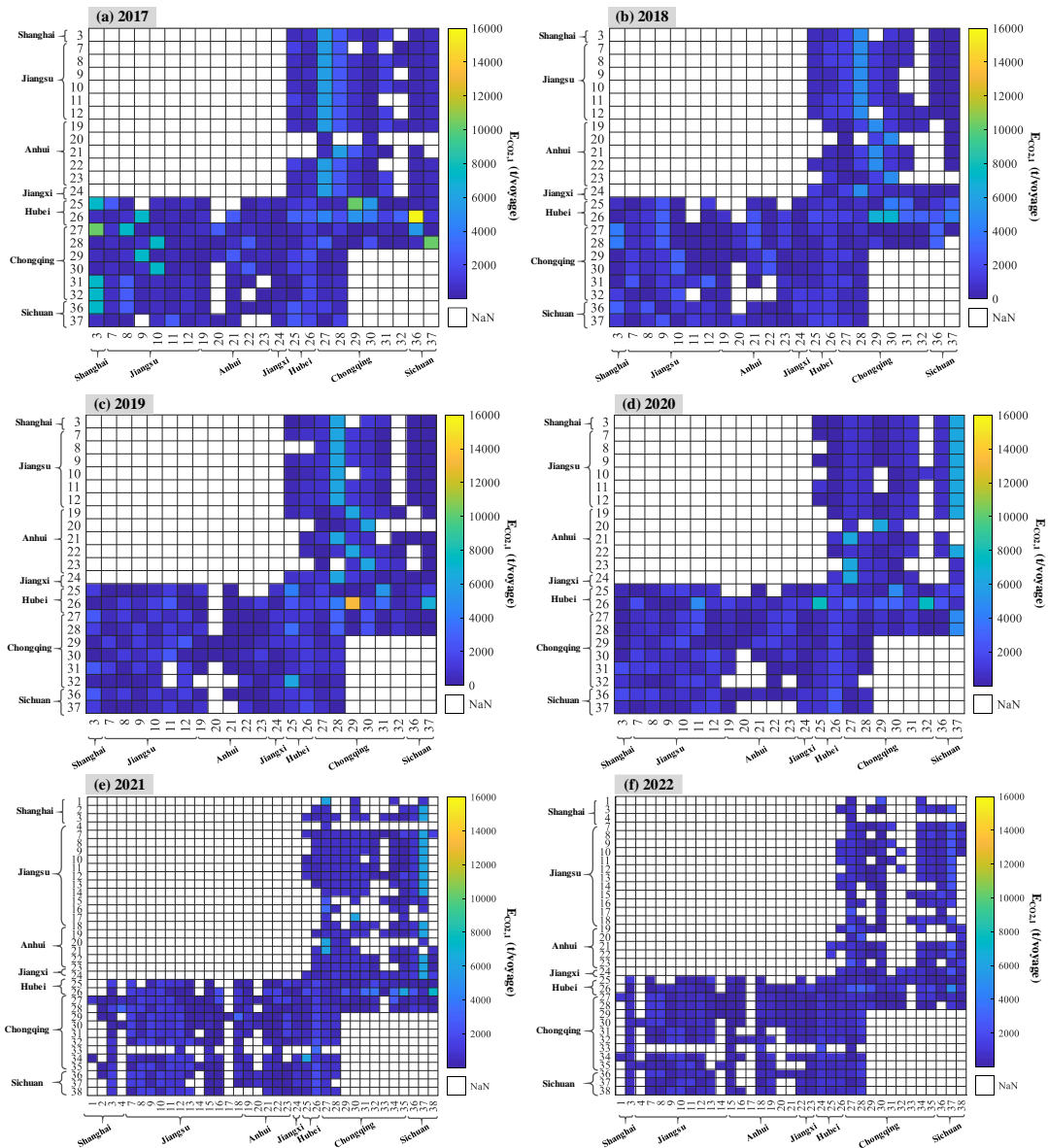


图 3.3-12 航线上单航程船舶碳排放量

### 3.4 长江流域内河船舶排放强度计算

在 3.3 节中完成了内河长江典型航道断面船舶排放量计算，且该断面的船舶航程覆盖了长江上游、中游和下游全航段，对于评价长江流域内河船舶排放强度具有代表意义。因此，本研究基于各个航段的船舶排放总量、货运总量和航行总距离，计算各个航段的船舶排放强度，具体计算方法如式（3.4-1）。另外，本研究也分析了不同货运船舶的排放强度。

$$I_i = E_i * W_{cargo}^{-1} * Dis^{-1} \quad \text{式 (3.4-1)}$$

式 (3.4-1) 中,  $I_i$  为第  $i$  类污染物的排放强度, 单位: g/t-cargo/nm;  $E_i$  为船舶排放第  $i$  类污染物量, 单位: g;  $W_{cargo}$  为运输货物重量, 单位: t;  $Dis$  为船舶航行距离, 单位: nm。

船舶进离港报告数据中, 提供了部分船舶在逐航程里的载货量, 仍然缺失部分船舶的货运量数据, 因此, 本研究通过统计分析船舶满载率和船舶的载重吨, 以填补缺失的船舶货运量数据, 即为船舶载重吨与船舶满载率的乘积。依据船舶航程的距离, 将船舶航程分为短途 ( $Dis < 300\text{km}$ )、中长途 ( $300 \leq Dis \leq 500\text{km}$ ) 和长途 ( $Dis > 500\text{km}$ ), 并分别统计不同船型的船舶满载率, 结果如图 3.4-1 所示。

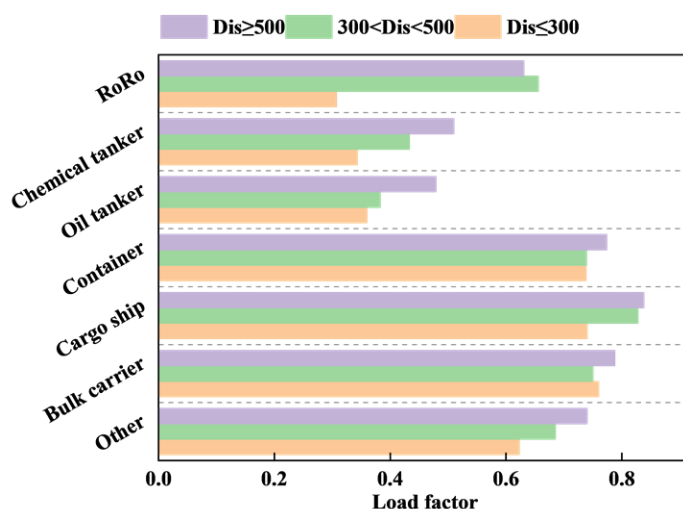


图 3.4-1 不同船型在不同运距下的满载率分析图

可以看出, 不同船舶类型的满载率是有较大差别的, 干散货船和其他货船、集装箱船的满载率要明显高于其他船型, 而油船和化学品船的满载率较低, 而且可以明显看出对于不同船型而言, 长途航线的满载率都要显著优于中、短途航线。

### 3.4.1 各个航程段排放强度

本研究分析了不同航程的船舶排放强度, 以  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  两种污染物作为示例进行了可视化展示, 如图 3.4-2 和 3.4-3 所示, 其中, 纵坐标为出发港, 横坐标为到达港。从两幅图中可以看出,  $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}_2$  排放强度大的区域在空间分布上是一致的, 都主要集中在湖北和重庆出发至长江下游和上游的航线。各航线上的  $\text{CO}_2$  排放强度在年际变化上, 呈现了逐年下降的趋势, 可以看出高  $\text{CO}_2$  排放强度的航线逐年减少, 到 2022 年几乎没有了  $\text{CO}_2$  高排放航线。从  $\text{SO}_2$  排放强



---

度来看，2017年至2022年各个航线的SO<sub>2</sub>排放强度整体呈现陡降的趋势，这表明中国政府实施的硫氧化物排放控制政策卓有成效。

另外可以看出，从重庆市和湖北省出发至上海市、江苏省（即中上游至下游航线）、从江西省和湖北省出发至重庆市和四川省（即中游至上游航线）中的部分航线的排放强度大。上游至下游的部分航线排放强度大的原因是该航程主要经过繁忙的航道，船舶密度大，导致船舶航行速度相对较慢，所需航行时间长，船舶在拥挤的水域中航行，增加了燃料消耗，导致排放量大，因此，这些航程的船舶排放强度大。中游至上游航段中的部分航线船舶排放强度大的原因主要是两方面原因，首先，该航段的航道水文条件复杂，且船舶为逆流航行，需要消耗更多的燃料，导致排放量更高；另外，从图3.4-5中可以看出，这些航线的船舶满载率较低，这也是导致船舶排放强度大的重要原因。

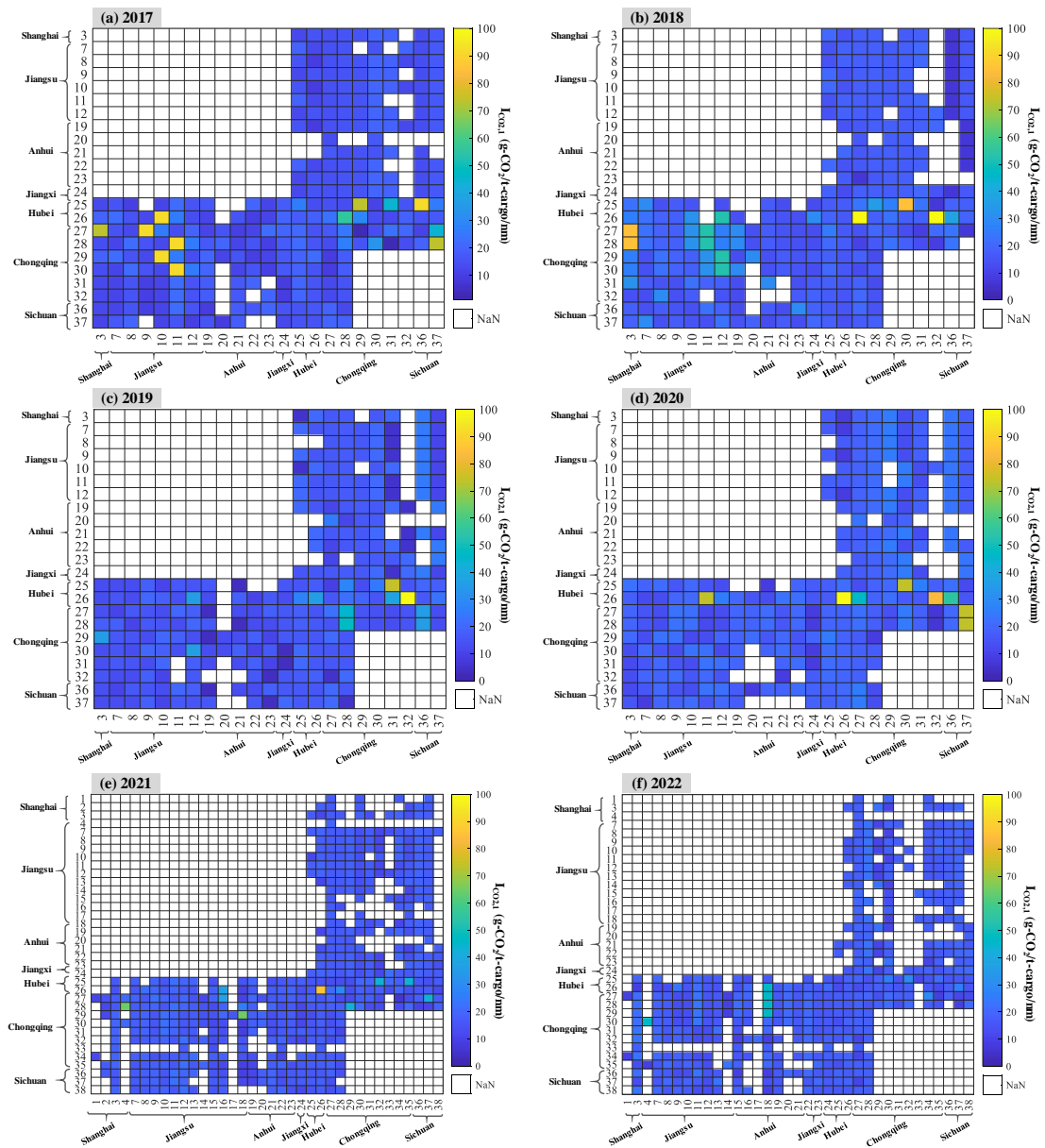


图 3.4-2 航线 CO<sub>2</sub> 排放强度

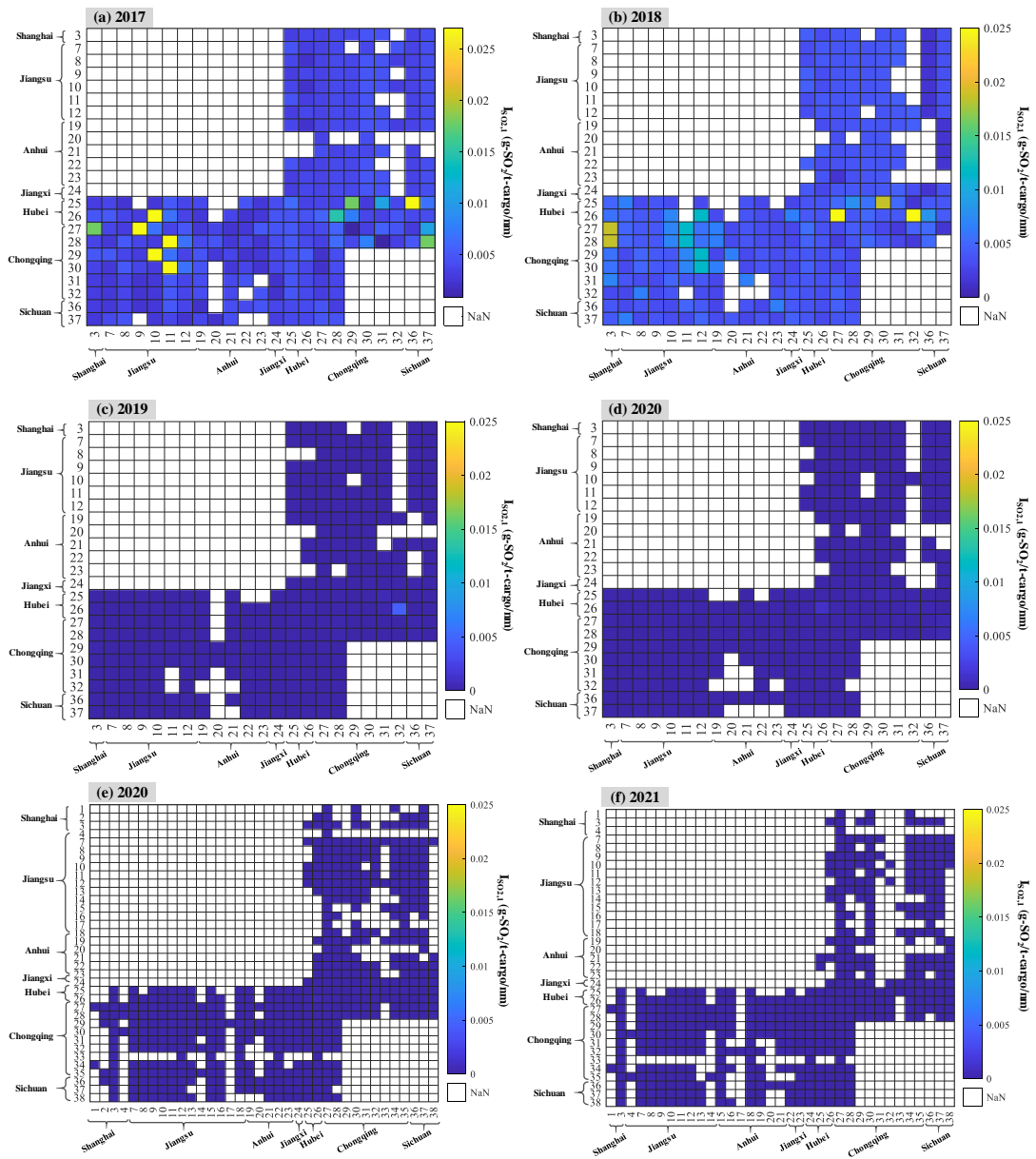


图 3.4-3 航线 SO<sub>2</sub> 排放强度

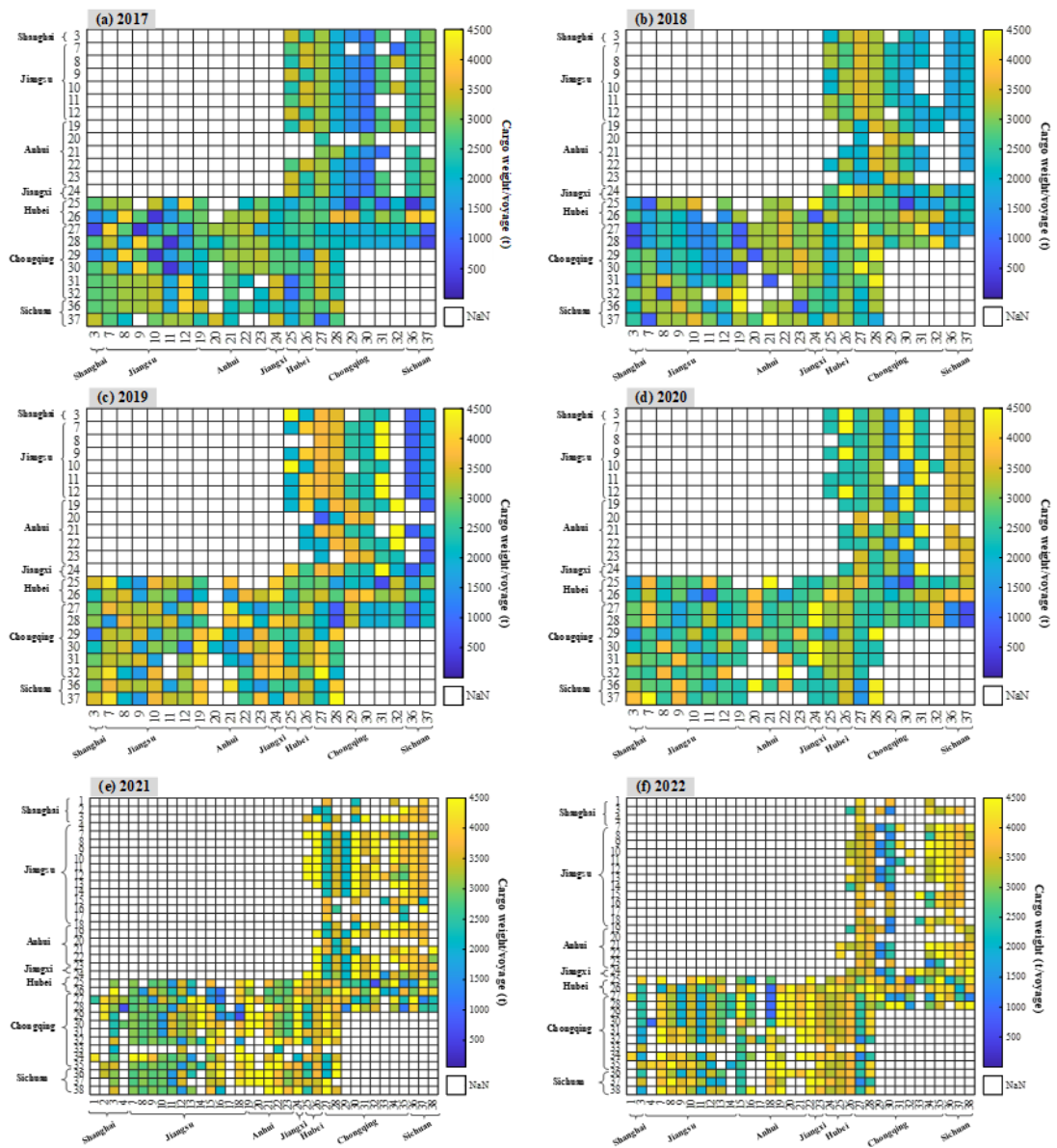


图 3.4-4 航线上单航程船舶平均载货量 (t)

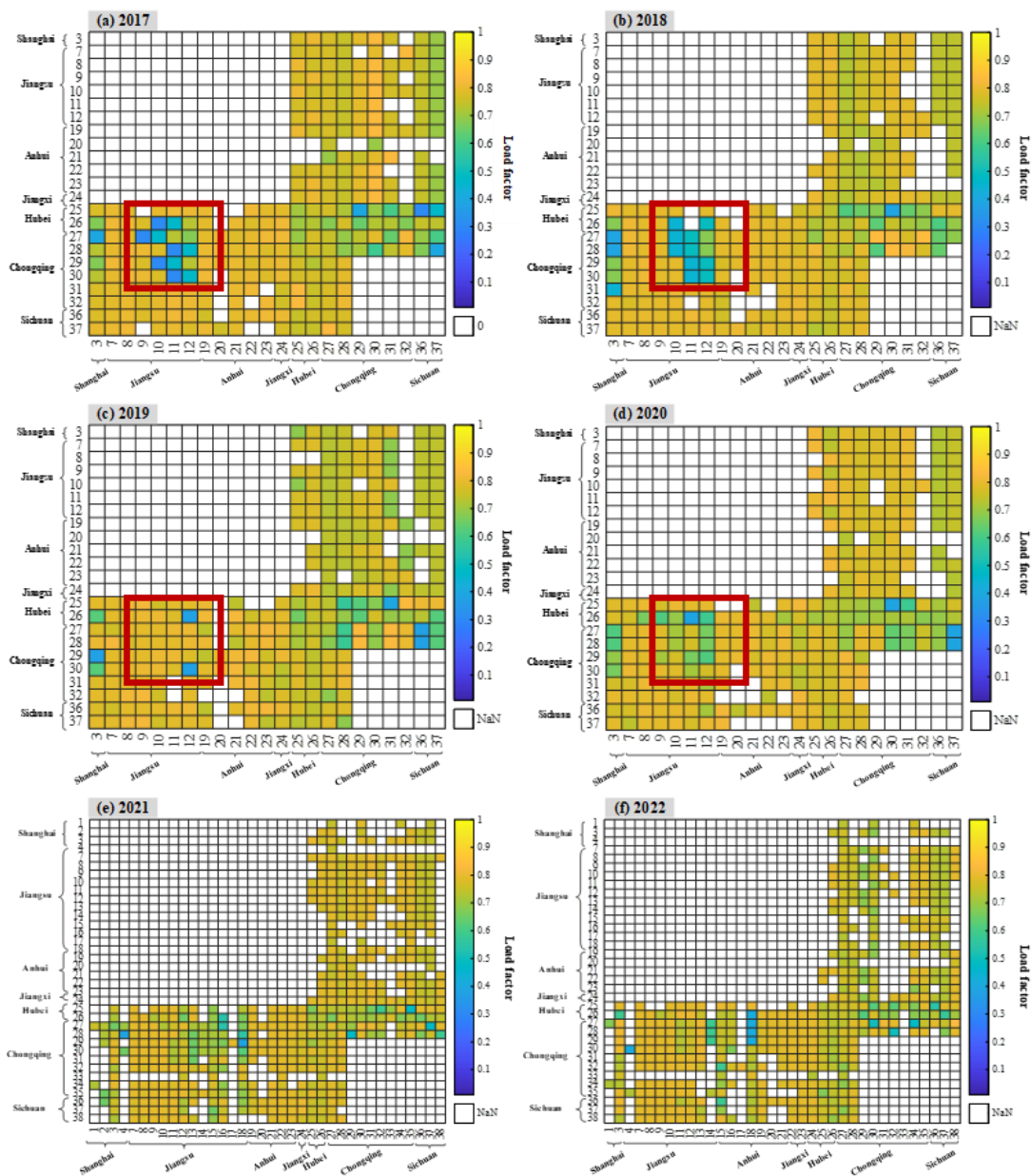


图 3.4-5 航线上单航程船舶满载率 (t)

### 3.4.2 不同船型排放强度

该典型航道断面航行经过船舶的全航程进离港记录数据集，该数据集中的船舶航程涉及了长江上、中、下游全航段，因此，依据该数据集统计的长江航道船舶排放强度计算结果具有代表性。图 3.4-6 展示了长江航道船舶排放不同污染物组分的排放强度，其中包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}_x$ 、HC、 $\text{CH}_4$ 、PM、CO、 $\text{SO}_2$  八种污染物。从计算结果来看，不同组分污染物的排放强度都呈现了逐年递减的趋势，这表明一系列的内河航运减排、节能增效政策措施的施行有了成效；同时，可以看出，油轮和滚装船的排放强度要高于其他船舶，这主要是由于这

两种船型的满载率要低于其他的船型，且这两种船型运输货物的特殊性，往往会出现往返航程中会出现其中一段航程的空载现象，这也就导致出现了高排放强度的现象。

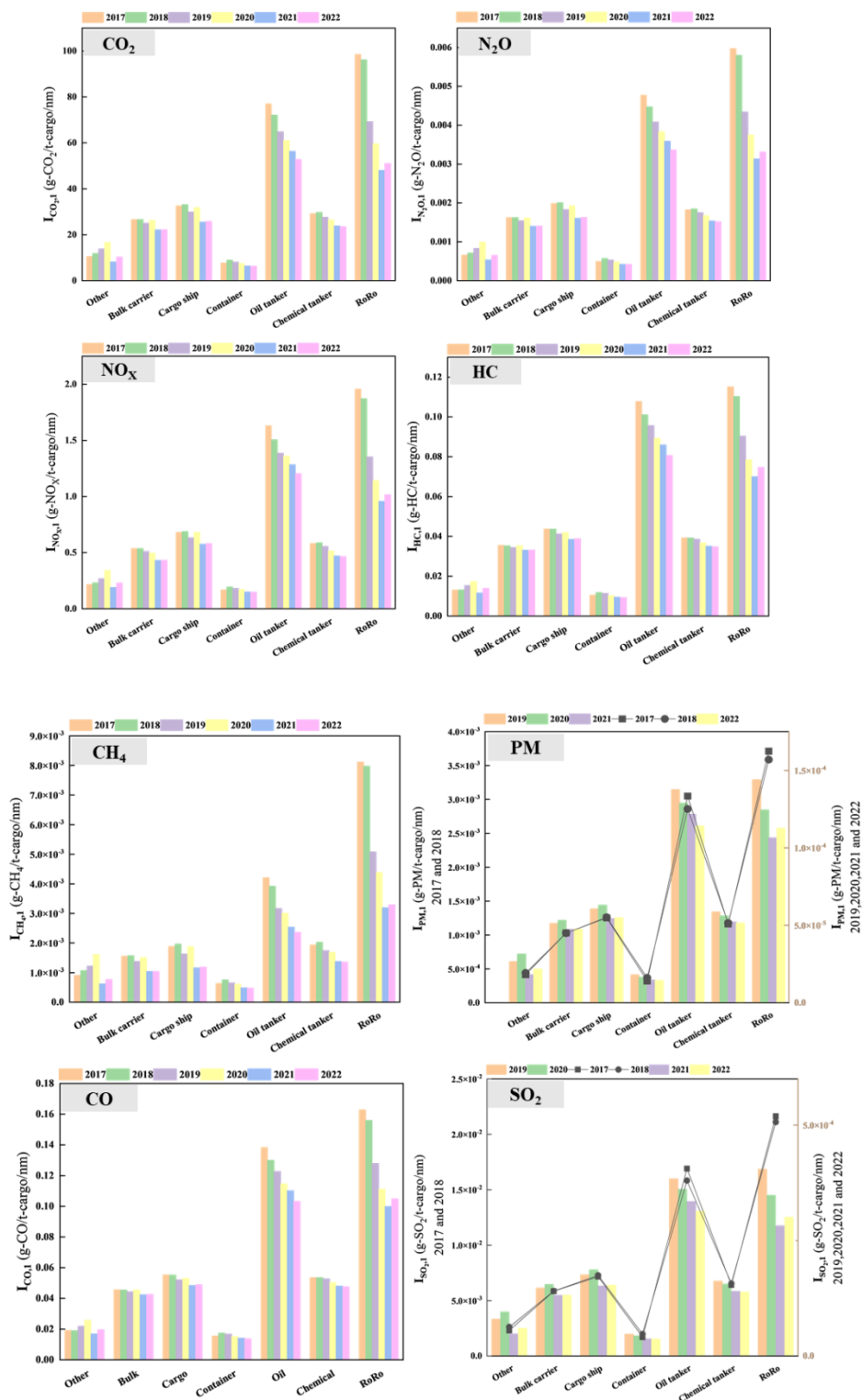


图 3.4-6 不同船型船舶排放强度

### 3.5 长江流域内河船舶排放计算

在 3.4 节中，统计了长江典型航道断面船舶排放强度。在本小节中，基于 3.4 节中计算的长江航道不同船型船舶排放强度，结合一系列长江流域内贸航运基础数据，统计分析了长江流域范围内包括 13 个省份的内河船舶从事内贸货物运输产生的大气污染物量。

#### 3.5.1 长江流域内贸航运基础数据概述

##### 3.5.1.1 长江流域不同船型的内贸港口货物吞吐量

在各年度的长江航运发展报告中，统计了长江流域内河港口内贸货物的吞吐量，该报告中属于长江流域的省市包括上海市、江苏省、浙江省、安徽省、江西省、山东省、河南省、湖北省、湖南省、重庆市、四川省、贵州省、云南省和陕西省。不同的货类其运输船型也是特定的，因此，本研究通过将货运与运输船舶类型相匹配，统计了长江流域内河港口的各类型船舶的货物吞吐量，统计结果如表 3.5-1。

表 3.5-1 长江流域内河港口不同船舶类型港口货物吞吐量（万吨）

船舶类型	运输货物	2017	2018	2019	2020	2021	2022
货船	煤炭及制品、金属矿石、钢铁、矿建材料、非金属矿石、粮食	397065	383371.1	317780.9	366392	409814	398793
	油船	石油、天然气及制品	22616.6	23557.2	14013.4	13525	13740
滚装船	滚装汽车	324.15	325.2	2072.58	1123	1690	2633
集装箱船	集装箱	28875	31027.5	32497.5	33045	38535	42225
货运总量		448880.75	438281	366364.38	414085	463779	456491

(注：1TEU≈15 吨，1 辆车≈1.5 吨)

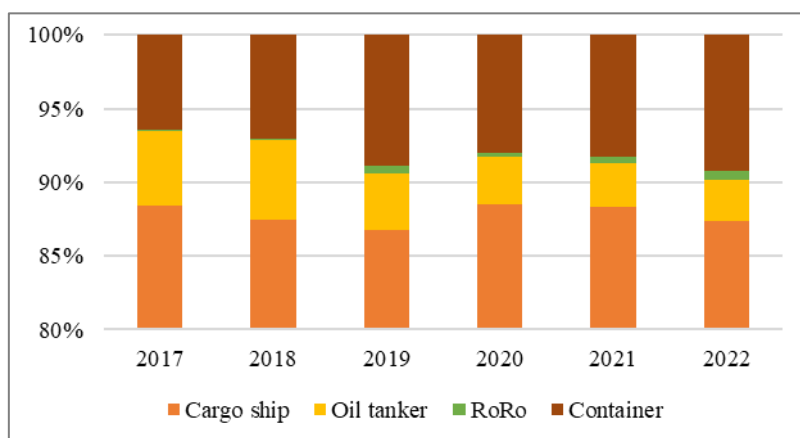


图 3.5-1 不同船型货运量占比

总的来看，长江流域的年内贸港口货物吞吐量呈现波动上升趋势。基于表 3.5-1 中的不同船舶类型的港口货物吞吐量，统计各年份内不同船型的港口货物吞吐量占比，结果如图 3.5-1 所示，可以看出，不同类型的船舶在港口货物吞吐量上表现出不同的变化规律。货船和集装箱船是港口货物吞吐量的主力船型，货船的年际港口货物吞吐量有所波动，在 2021-2022 年呈现下降的趋势；油船的港口货物吞吐量呈逐年下降的趋势，这主要由于长江流域能源结构的调整，新能源和其他替代能源的需求增加，使得以石油为代表的能源资源运量的逐年下降；滚装船的港口货物吞吐量在波动中略微增加；而集装箱船的港口货物吞吐量则呈现持续增长的趋势，这是由于长江流域经济的快速发展，推动了大宗货物运输的需求，另外中国政府也是通过不断加大对内河航运基础设施的投资，不断完善内河码头和航道的通行能力，同时政府还提供了一些优惠政策，如减免码头停靠费用，以降低运输成本，吸引更多货物通过内河集装箱进行运输，另外，技术进步和现代化的船舶、码头设施以及物流管理系统的引入，提高了集装箱运输的速度和效率。

### 3.5.1.2 长江流域各省份的内河航运运力概况

#### (1) 长江流域各省市的内河内贸货运量

在各年度的长江航运发展报告中，统计了长江流域内 14 个省份的内河航运年内贸货运总量和货物周转量，见图 3.5-2 和图 3.5-3。

可以看出，各省份的内河内贸货运量和货运周转量的年变化趋势是一致的，且都表现出了逐年上升的趋势。安徽省的内河内贸货运量居全流域省份的第一



名，且多年稳居第一梯队，这主要是由于安徽省有密集的水网，与浙江、江苏相邻，承接了这两个省份的大量货物运输量，且安徽省拥有丰富的自然资源和多样化的产业结构，其工农业都相对发达，这些产业的发展和产出依赖廉价的内河航运；另外，安徽省致力于加强航运设施建设和提升港口现代化水平，并不断建设航运枢纽工程，如：引江济淮、江淮运河、芜申运河等。位于第二梯队货运量的是江苏和湖北两个省份，这主要是由于两个省份的地理位置优势、经济发展水平、港口和航道建设，以及区位优势和产业集聚效应。

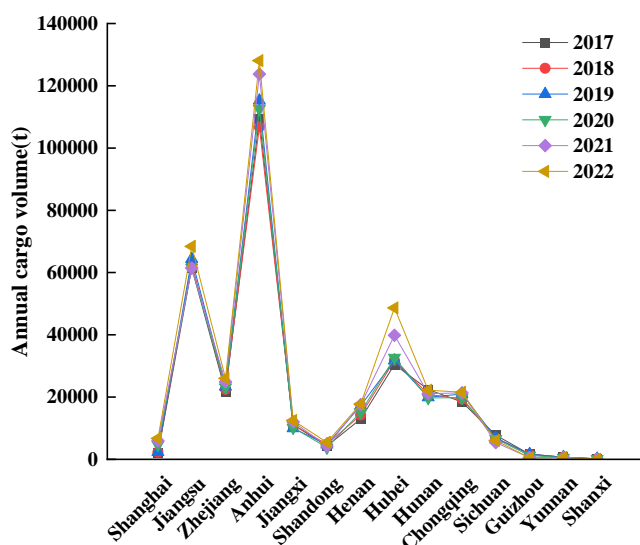


图 3.5-2 长江流域各省份的内河内贸货运量

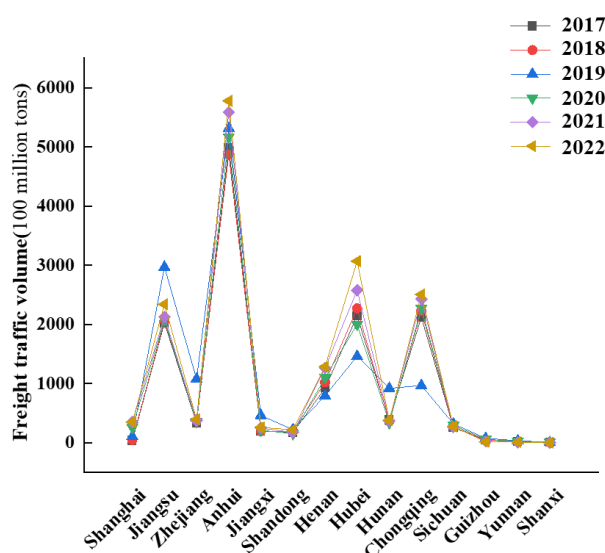


图 3.5-3 长江流域各省市的内河内贸货运周转量

## (2) 长江流域各省市船舶数量

图 3.5-4 长江流域和省市船舶数量年变化图，为各省市客船、货船、集装箱船和新能源船舶数量之和。可以看出各省市的船舶数量呈现逐年下降的趋势，2022 年的船舶总数量相较于 2017 年下降了约 21.2%。这主要是由于长江船舶更新换代，随着科技的进步和船舶技术的不断更新，新型船舶通常更加节能高效，运输效率更高。船舶所有者可能选择更新船队，以提高效率和降低运营成本，对老旧、高排放船舶进行逐渐的淘汰或限制。另外可以看出，江苏省和安徽省的船舶数量大，这是由于江苏省和安徽省临近上海，使得两省份的内河运输网络可便捷的与全球海运网络构成连接关系，且两省份拥有大量的企业和产业基地，航运是物资运输的重要方式之一，这些省份发展航运业可以满足工业产品和商品的运输需求。

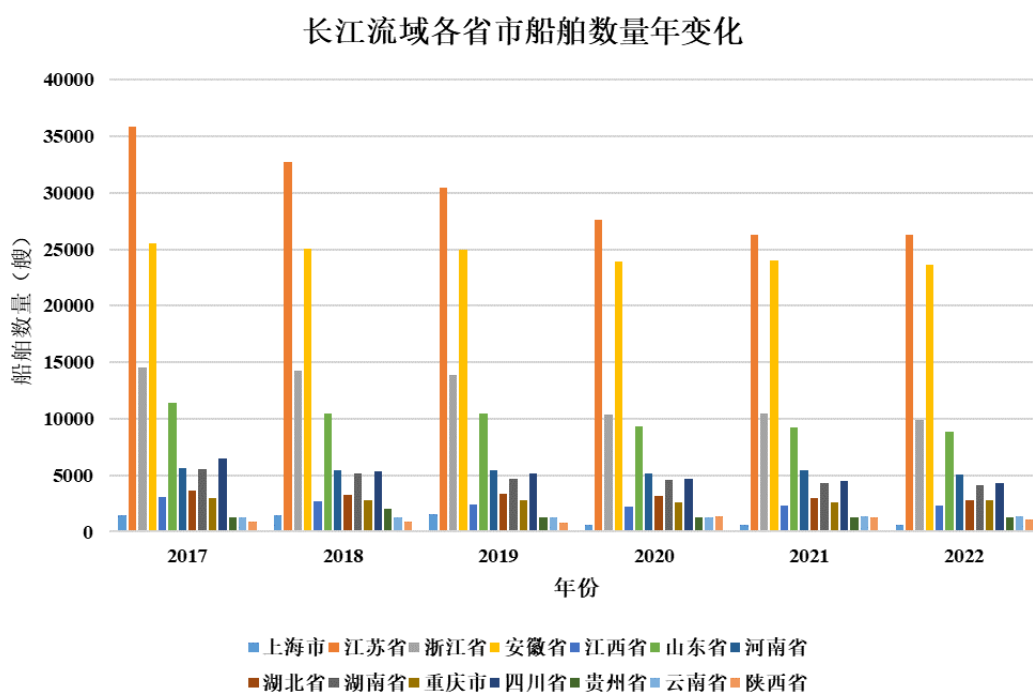


图 3.5-4 长江流域各省市船舶数量年变化图

### (3) 长江流域各省市内河船舶平均载重吨

图 3.5-5 为 2022 年长江流域各省市内河船舶平均载重吨，可以看出，内河货运船舶平均载重吨为 1577 吨，且不同省份的内河船舶平均载重吨存在明显的差异，这表明各地区的内河航运发展和船舶运输规模上存在较大的差异。

可以看出，重庆市、江西省和河南省的内河船舶平均在载重吨高，这是由于重庆市是内陆重要的港口城市，它位于长江上游，有着便捷和良好的水路交

通，因此平均载重吨数较高；江西省和河南省虽然位于长江中游，但它们有着丰富的内河水运资源，包括湖泊和河流，因此也具备较高的内河船舶运输能力。值得注意的是，江苏省、浙江省、上海市和山东省是沿海省份，他们的内河船舶平均载重吨在中等水平，这是由于这些省份主要承载了更多的国际贸易航运运输需求。内河水运对地区经济发展具有重要作用。高载重省市可以表明该地区拥有发达的内河水运体系，可以支撑更大规模的内贸货物运输，有助于促进内贸经济活动和贸易量。

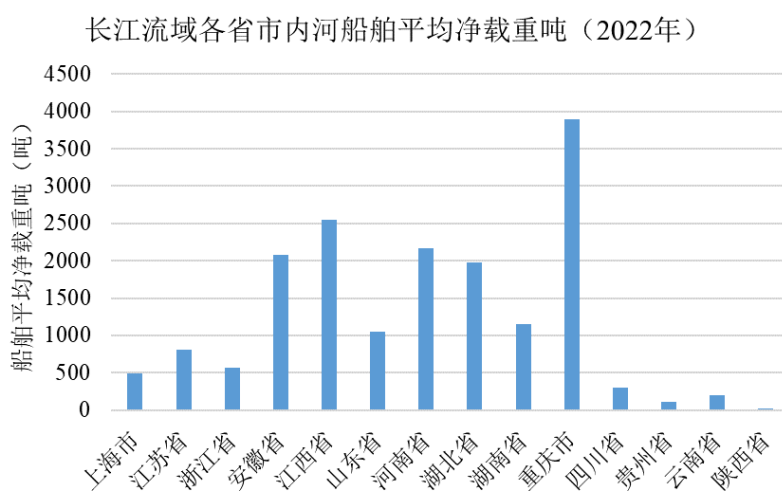


图 3.5-5 长江流域各省市内河平均载重吨

### 3.5.2 长江流域内贸运输船舶排放量

在 3.4 节中，以通过长江某航道断面船舶排放量、货运量和航行距离为基础，计算了该航道断面不同船型船舶的排放强度。在本小节中，以该排放强度作为长江流域船舶排放强度，并结合长江航道管理局发布的长江流域逐年港口货物吞吐量、长江流域逐年货运周转量、长江流域各省份逐年货运周转量等统计数据，以计算长江流域内贸运输船舶的排放量。具体计算流程如图 3.5-6 所示。

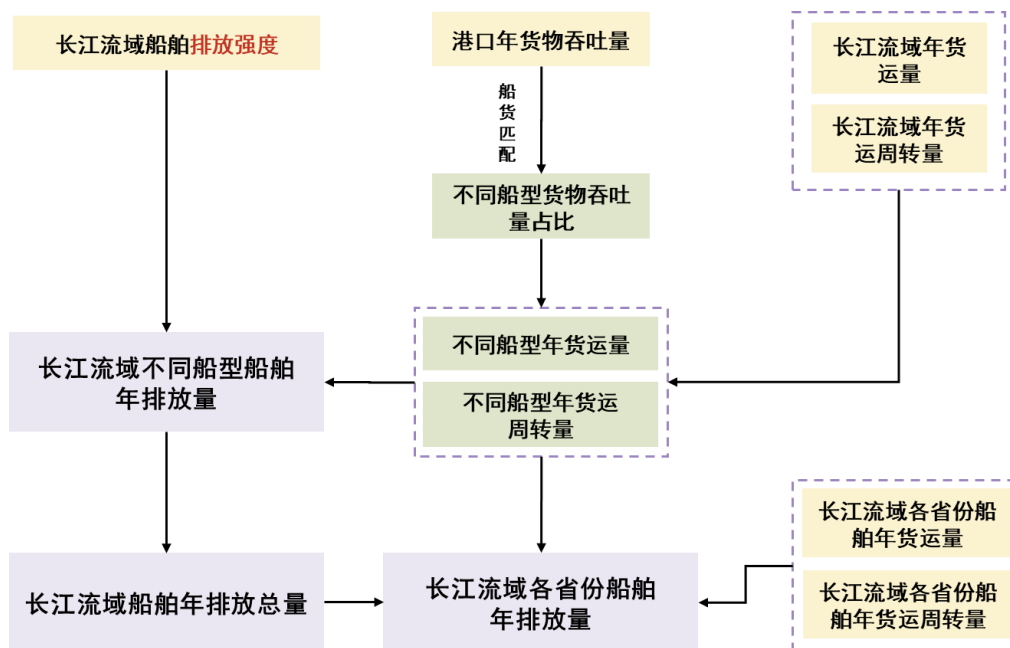


图 3.5-6 长江流域内贸运输船舶排放量计算流程图

### 3.5.2.1 总排放量

长江流域内贸船舶排放量 2017-2022 年分别为 17.1658 百万吨、17.2723 百万吨、17.7142 百万吨、17.0019 百万吨、18.5727 百万吨和 19.6901 百万吨，年平均增长率为 2.884%，2022 年的内贸船舶排放总量相较于 2017 增加了 2.5243 百万吨。从图 3.5-7 可以看出，货船和油船是排放主体，货船的排放量占总排放的比例较高，在各年份中排放占比均超过 80%；滚装船和集装箱船舶的排放占比较小，不到 1%。值得注意的是，油轮的排放量是呈现了逐年下降的趋势，表明石油及其制品的内河运输需求在逐年下降。

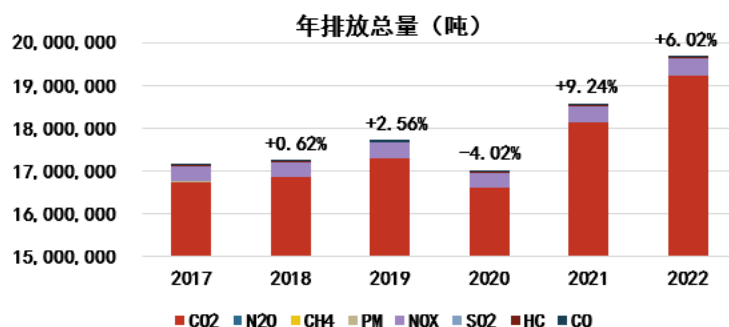


图 3.5-7 长江流域内贸船舶年排放量

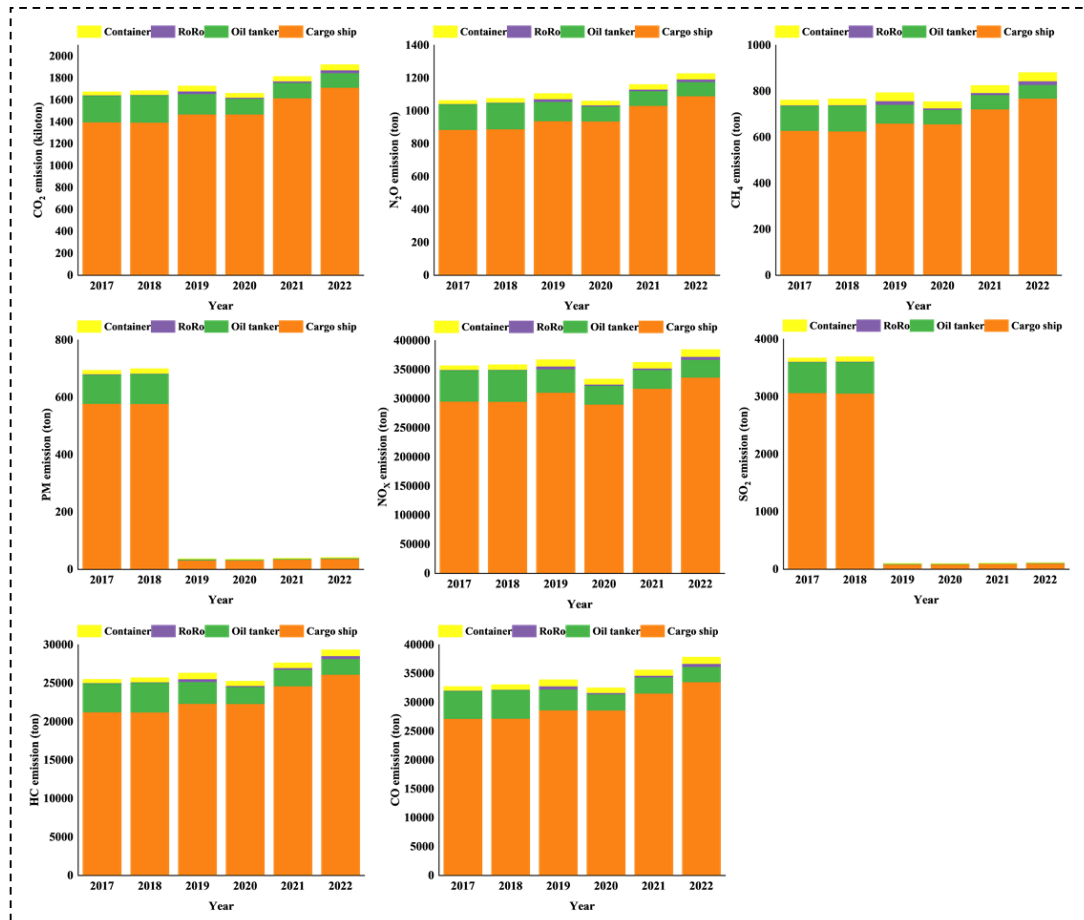


图 3.5-8 长江流域内贸运输船舶排放量

为讨论分析采用物质流方法和 AIS 方法计算的长江流域船舶排放结果的差异，本研究将采用两种方法计算的 2019-2022 年长江流域船舶 CO<sub>2</sub> 排放量进行了对比分析，分析结果如图 3.5-9 所示。结果表明，AIS 方法计算的排放量要大于物质流数据方法计算结果，两者的计算误差小于 35%，四年的平均误差为 27.88%，且误差呈现了逐年上升的趋势，误差年增长率为 2.7%。这主要是由于物质流数据计算方法是基于长江内贸货物运输数据为基础的，而 AIS 数据是计算包括了内贸和外贸货物运输船舶的整体排放量；长江航道中有较多的小型货运船舶，目前计算方法基于平均排放强度，可能低估了实际油耗；货运统计数据也可能有不完全现象，这也会导致基于物质流数据计算排放量偏低，但 AIS 同理。

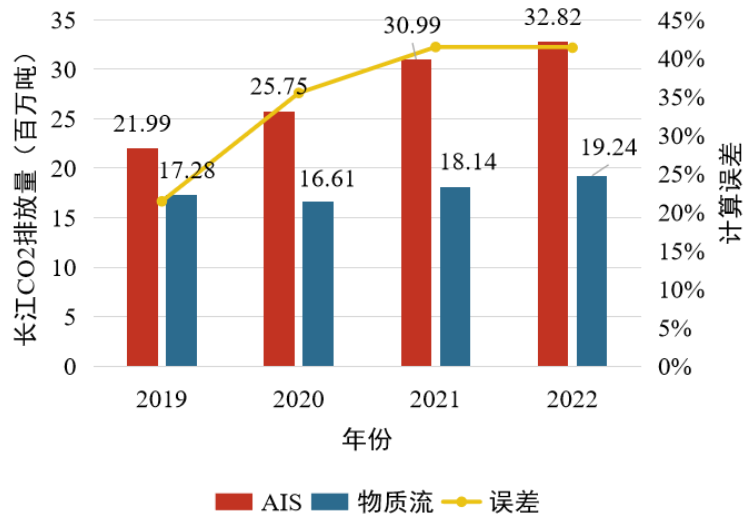


图 3.5-9 物质流方法和 AIS 方法计算的长江流域船舶排放结果误差分析

### 3.5.2.2 排放空间分布

安徽省连续六年都是长江流域 CO<sub>2</sub> 排放量最高的省份，CO<sub>2</sub> 年均排放量约为 6.2141 百万吨，且排放量远高于其他省份，江苏省和湖北省也是 CO<sub>2</sub> 排放量较高的省份，年 CO<sub>2</sub> 排放量分别为 2.5636 百万吨和 2.5556 百万吨。另外，可以看到，长江干线的流经的省份，高 CO<sub>2</sub> 排放省份数量逐年增加，在 2022 年整个长江干线流经省份都是均为 CO<sub>2</sub> 高排放省份。船舶 NO<sub>x</sub> 的排放空间年变化趋势与 CO<sub>2</sub> 排放趋势整体相似。

可以看出，区域船舶排放与经济发展水平呈现了正相关，经济发达的省市往往有更大规模的船舶运输需求，因此也会伴随更高的排放量。可以观察到，上海市、江苏省、浙江省、重庆市等经济相对发达的地区在船舶排放量上较为突出。交通网络的发达程度对船舶运输的效率和规模有着直接影响。交通便利的地区能够吸引更多的船舶运输，这会产生更高的排放量。这也是部分内陆省市的船舶排放量相对较低的原因，因为其交通网络可能不如沿海地区和河流沿岸省市发达。另外长江干线各省市的第一、二产业所占比重大，且内河航运条件好，内河航运以大综货运运输需求为主，因此，长江干线各省市的船舶排放量大。

结合 3.5.1 节中提供的长江流域各省市的内河船舶平均载重吨数据，可以看出，船舶平均载重吨与船舶排放量呈现了一定的正相关关系，且高排放区域的船舶平均载重吨也较高，这是因为船舶载重吨大，同时也需要消耗更多的燃料来维持船舶运行，使得排放量也较高。同时可以看出，重庆市和安徽省的船舶

平均载重吨较高，同时排放量也大，这与这两个地区的第一、二产业占比大，船舶大宗货运运输需求大相关。

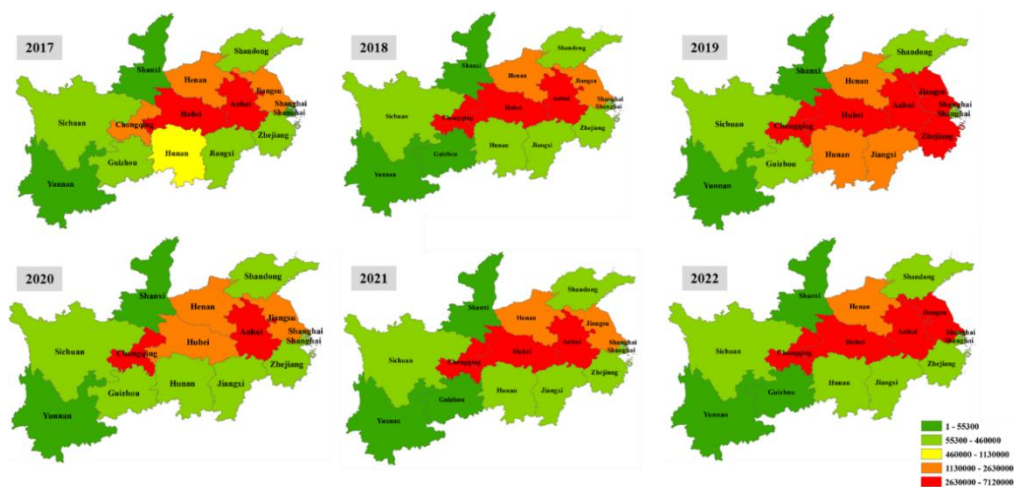


图 3.5-10 CO<sub>2</sub> 空间分布

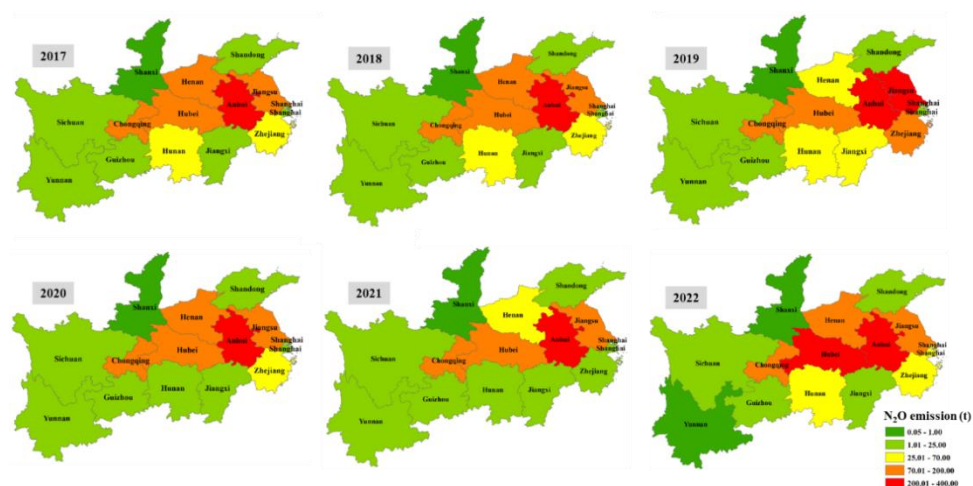


图 3.5-11 N<sub>2</sub>O 空间分布

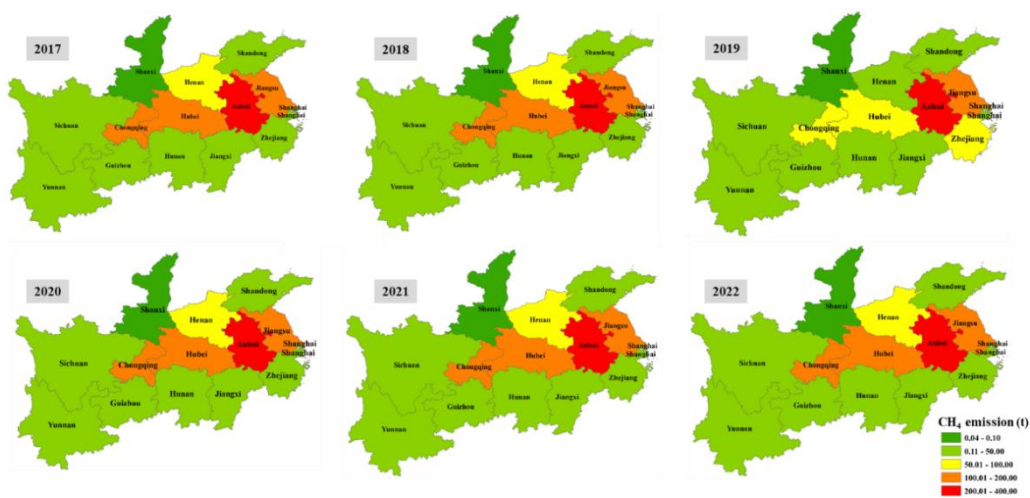


图 3.5-12 CH<sub>4</sub>空间分布

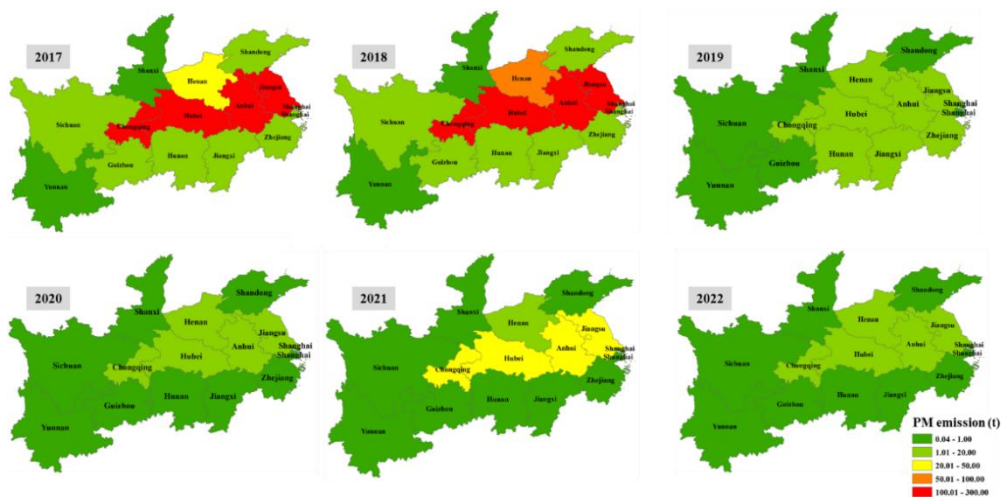


图 3.5-13 PM 空间分布

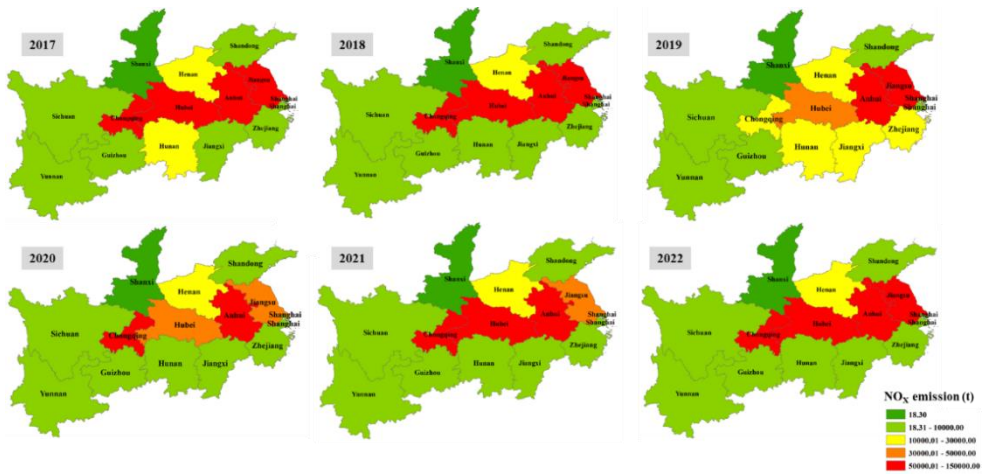


图 3.5-14 NO<sub>x</sub>空间分布

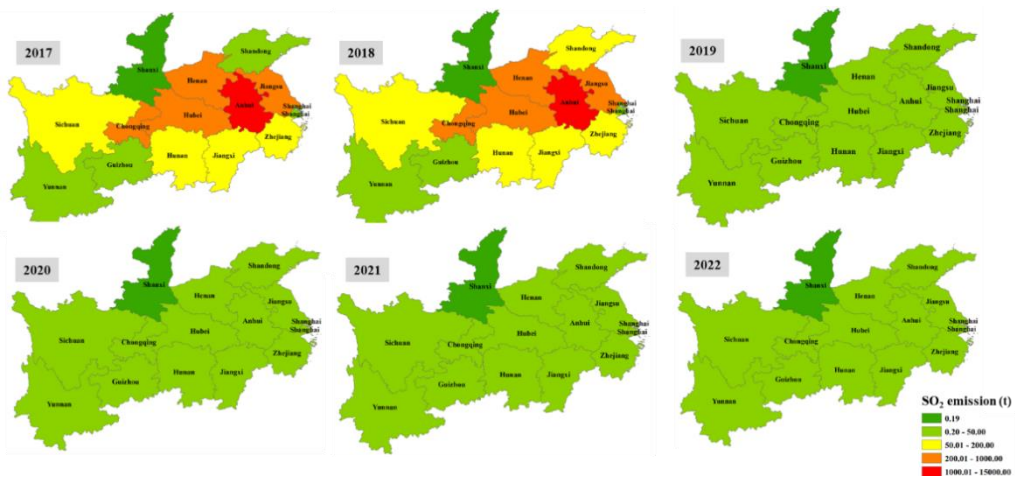


图 3.5-15 SO<sub>2</sub>空间分布



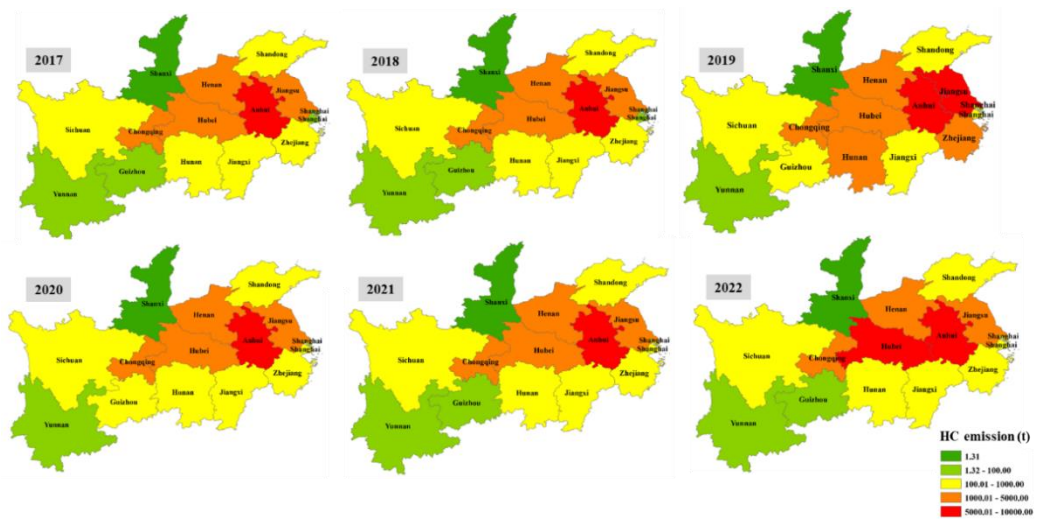


图 3.5-16 HC 空间分布

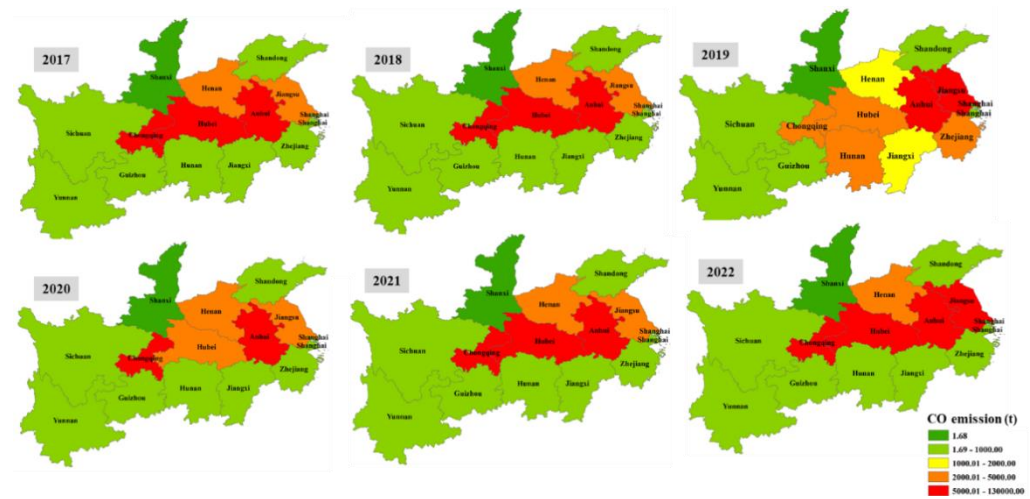


图 3.5-17 CO 空间分布

长江流域各省份船舶运力年变化

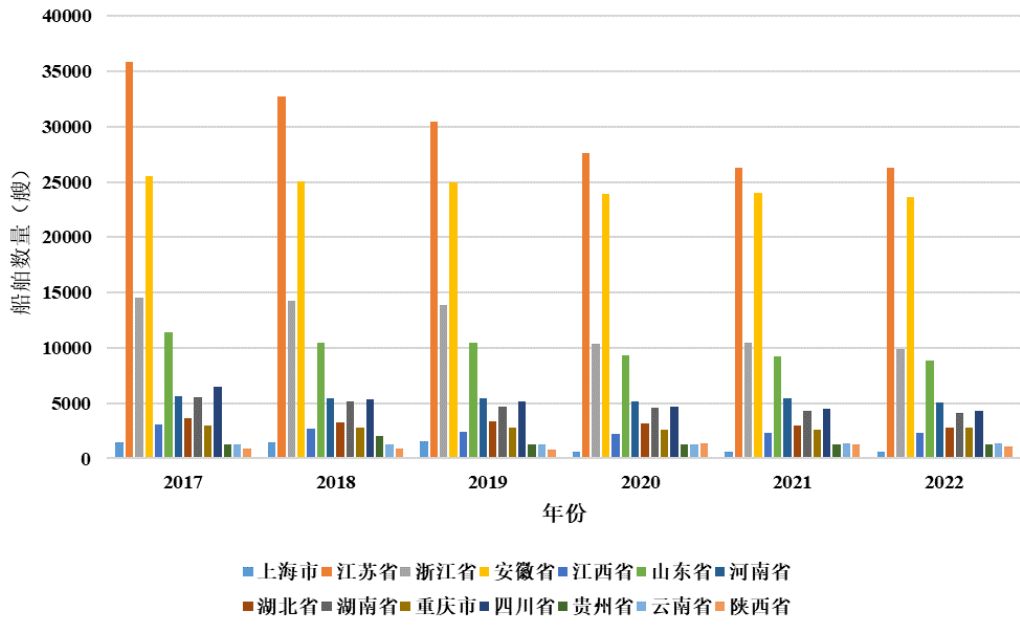


图 3.5-17 长江流域各省市船舶数量年变化图

---

## 第 4 章 内河和沿海船舶减排潜力评价

### 4.1 减排目标及相关政策指导

2023 年 7 月，IMO 在新的船舶温室气体减排战略中，提出了更为严格的排放标准，且将多个重要的时间节点提前。新的温室气体减排战略对时间节点和减排标准进行了修订，如船舶航运净零排放的时间压缩了 50 年，从 2100 年提前至 2050 年。此外，还设定了新的目标年，新增 2040 年全生命周期排放总量降低 70%，力争降低 80% 的目标。在新的目标中，修订了 2030 年的目标，提出在 2030 年全球航运排放强度降低 40%，排放总量降低 20%，力争 30%，替代燃料使用比例达到 5%，力争 10% 的目标。

《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》设定了到 2030 年实现碳达峰和到 2060 年实现碳中和的目标。到 2025 年，单位国内生产总值二氧化碳排放量比 2020 年下降 18%；非化石能源消费比重达到 20% 左右。到 2030 年，单位国内生产总值二氧化碳排放量比 2005 年减少 65% 以上。非化石能源消费比重达到 25% 左右，风电和太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上。到 2060 年，非化石能源消费比重达到 80% 以上。

在 2020 年，交通运输部印发了《内河航运发展纲要》（简称《纲要》），《纲要》在发展目标中明确指出：到 2035 年，内河千吨级航道达到 2.5 万公里，主要港口重点港区基本实现铁路进港，内河货运周转量占全社会比重达到 90%，新能源和清洁能源船占比显著提高；另外，《纲要》还指出要加大新能源清洁能源推广应用力度，主要是推广 LNG 节能环保船舶，探索发展纯电力、燃料电池等动力船舶，研究推进太阳能、风能、氢能等在行业的应用。推进船舶靠港使用岸电。完善水上绿色综合服务区、液化天然气加注码头等绿色服务体系建。加强港口节能减排技术应用。

2022 年，工业和信息化部、发展改革委、财政部、生态环境部、交通运输部印发了《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》（以下简称《意见》）。《意见》中将碳达峰、碳中和目标作为引领，并制定了中短期的发展目标，到 2025 年，液化天然气（LNG）、电池、甲醇、氢燃料等绿色动力关键技术取得突破，船舶装备智能技术水平明显提升，内河船舶智能标准规范体系基本形成；到 2030 年，内河船舶绿色智能技术全面推广应用，配套基础设施、

---

运营管理、商业模式等产业生态更加完善，标准化、系列化绿色智能船型实现批量建造，产业链供应链水平大幅提升，初步建立内河船舶现代产业体系。

《意见》也提出了优先发展绿色动力技术的指导意见，具体表现在，（1）积极稳妥发展 LNG 动力船舶：加快内河船用 LNG 发动机迭代升级，完善纯天然气船用发动机产品谱系，发展气电混合动力技术，强化甲烷逃逸和氮氧化物排放控制。加强 LNG 动力系统集成和优化设计，重点推动 LNG 动力技术在沿海、长江干线、西江干线、京杭运河等中长距离 2000 载重吨以上货船、工程船等应用；（2）加快发展电池动力船舶：加强船用动力电池、电池管理系统等技术集成和优化，推进高效节能电机、电力系统组网、船舶充换电等技术研究，提升船舶电池动力总成能力和安全性能，重点推动纯电池动力技术在中短途内河货船、滨江游船及库湖区船舶等应用。以货船为试点，开展标准化箱式电源换电技术研究与应用；（3）推动甲醇、氢等动力技术应用：加快船用甲醇发动机研发，降低甲醛等非常规污染物排放，提升船用甲醇燃料电池功率范围和燃料转化效率，推动甲醇动力技术在货船等应用。加强船用氢燃料电池动力系统、储氢系统、加注系统等技术装备研发，探索氢燃料电池动力技术在客船等应用，鼓励采用太阳能等可再生能源电解水产生的绿氢。

2017 年，交通运输部印发了《港口岸电布局方案》，计划重点对 493 个既有大型专业化泊位进行岸电改造。截至 2019 年年底，全国共建成岸电设施 5400 多套，覆盖泊位 7000 余个。

2014 年，交通运输部、财政部印发了《内河船型标准化补贴资金管理办法》（以下简称《办法》），《办法》的提出促进了内河运力结构调整和水运节能减排，并提高船型标准化率。在《办法》中，对小吨位船舶拆解、对老旧船舶拆解或改造、对新建大型示范船、对新建液化天然气（LNG）动力船等，都提出了明确的补贴范围和标准。

另外，中国船级社（CCS）于 2019 年 12 月发布的《内河绿色船舶规范》提出建立涵盖船舶资源循环利用、清洁能源及绿色技术应用、温室气体及污染物排放控制、生态环境友好的不同水系的绿色生态综合评价指标体系。

在船舶碳排放控制标准方面，交通运输部先后发布了《内河运输船舶标准船型指标体系》、《营运船舶燃料消耗限值及验证方法》、《营运船舶 CO<sub>2</sub> 排放限值及验证方法》、《内河运输船舶标准化管理规定》等。

---

在船舶能耗统计监测方面，交通运输部制定了《交通运输能耗监测统计报表制度》和《船舶能耗数据收集管理办法》。中国船级社先后发布了《水运企业船舶碳排放核查技术规范》、《船舶二氧化碳排放监测、报告和验证实施指南》等。

## 4.2 长江内河船舶碳减排发展路径研究

### 4.2.1 长江内河船舶碳减排预测模型构建

船舶碳排放计算方法在 1.2.1 节中进行了详细的综述，在本小节中，将结合船舶货运量、货物运输距离和船舶排放强度，计算航运碳排放量。长江内河航运碳排放计算模型主要分为三部分：

(1) 减排情景设置。在 2019 年中国交通部实施了更为紧缩的内河船舶排放控制政策，内河船舶需要使用不超过 0.001% $m/m$  的燃料油，该政策一直持续至今，因此，在本模型中，将最近的年份即 2022 年设置为基准排放年，首先需要计算 2022 年长江内河船舶碳排放清单；

(2) 参数预测：预测多减排情景下，研究区域内货运量、货物周转量、碳排放强度（Energy Efficiency Operation Index, EEOI）；

(3) 预测多减排情景下，研究区域内船舶碳排放量。

#### 4.2.1.1 长江内河船舶碳减排情景设置

在本研究中，设置 3 个长江内河船舶碳减排预测情景，分别为“基准情景（BUA）”、“2℃情景”和“1.5℃情景”，具体情景设置如下：

(1) **基准情景**：基准情景下依据现有发展模式，经济社会发展缓慢转型，水路运输需求仍保持相对稳定，长江内河航运仍延续当前低碳转型的趋势和政策的情况。市场主导的船舶能效下降集中在低成本减排技术领域，非化石能源燃料在水运业渗透率低，岸电部分应用。另外，国内交通组织模式优化，“公转水”货运量年均增长比例约 0.5%；

(2) **2℃情景**：是以实现全球控制升温 2℃目标为导向，以 21 世纪中叶深度脱碳目标下减排对策和路线图分析为基础，研究与之相适应的减排情景和路径。2℃情景下经济社会平稳发展，稳步转型，相关绿色低碳政策同步实施。长江内河航运在该情景下的主要表现为四点：

- 市场主导的船舶能效下降集中在低成本减排技术领域。

- 新造船能效标准主导船舶能效下降，电动船及新能源船舶逐步应用。
- 船舶运力结构优化，旧船加速淘汰，新造船舶大型化。
- 岸电充分应用，中长期长江内河船舶燃料碳强度稳步下降。

**(3) 1.5°C情景：**是以控制 1.5°C 升温目标为导向，到 21 世纪中叶努力实现 CO<sub>2</sub> 净零排放和其他温室气体深度减排为目标，该情景下绿色发展政策力度空前，经济结构、能源结构加速调整。长江内河航运在该情景下的主要表现为四点：

- 市场主导的船舶能效下降扩展到中高成本减排技术领域，主要倾向于选择净零排放或零排放的清洁能源。
- 新造船能效标准以及再用船能效标准主导船舶能效下降，电动船及新能源船舶进一步推广应用。
- 船舶运力结构进一步优化，老旧船舶加速淘汰，新造船舶大型化；
- 岸电充分应用，中长期水运燃料碳强度加速下降。

#### 4.2.1.2 长江内河船舶碳减排计算

**(1) 长江内河船舶货运量预测：**

$$TW_{i,y} = \sum TW_{i,y-1} \times (1 + g_{i,y}) \quad \text{式 (4.2-1)}$$

式 (4.2-1) 中， $g_{i,y}$  为第  $i$  类船舶的货运周转量年变化率； $TW_{i,y}$  为第  $i$  类船舶在第  $y$  年的货运周转量，单位：tkm。

**(2) 长江内河船舶碳排放强度预测：**

$$EEOI_{i,y} = \frac{N_{newbuild_{i,y}} \times EEOI_{newbuild_{i,y}} + N_{existing_{i,y}} \times EEOI_{existing_{i,y}}}{N_{i,y}} \quad \text{式 (4.3-2)}$$

式 (4.2-2) 中， $N_{newbuild_{i,y}}$  表示第  $i$  类船舶在第  $y$  年的新造数量； $EEOI_{newbuild_{i,y}}$  为第  $i$  类新造船舶在第  $y$  年的碳排放强度，单位： $g-CO_2/tonne/km$ ； $N_{existing_{i,y}}$  为在第  $y$  年已有第  $i$  类船舶数量； $EEOI_{existing_{i,y}}$  为在第  $y$  年已有第  $i$  类船舶的碳排放强度，单位： $g-CO_2/tonne/km$ ； $N_{i,y}$  为第  $i$  类船舶在第  $y$  年的船舶总量。

**(3) 长江内河船舶碳排放量计算：**

具体计算方法如式 4.3-3 所示。

$$E_{CO_2,i,y} = \sum_{i=1}^n TW_{i,y} \times EEOI_{i,y} \quad \text{式 (4.2-3)}$$

---

式（4.3-3）中， $E_{CO_2,y}$ 为第*i*类船舶在第*y*年的碳排放量，单位：t。

#### 4.2.2 长江内河船舶减排措施情景确定

依据 4.1 节中针对中国内河船舶提出的一系列碳减排政策和相关研究，可以将长江内河船舶碳减排措施分为新能源船舶应用、老旧船舶淘汰、船舶大型化、岸电使用、营运节能转型。其中，基于现有的针对长江内河新能源船舶政策倾向于气化长江和电化长江这一现状，可将新能源船舶应用分为 LNG 船舶应用、电动船舶应用和其他新能源船舶应用。

##### 4.2.2.1 新能源船舶应用（S<sub>1</sub>）

据统计，95%以上的船舶是以柴油为主要动力能源，到 2030 年，化石燃料仍占主导地位，实现“碳中和”的发展目标，水运业需要充分摆脱对柴油动力的依赖，降低化石能源的比例，增加新能源（如 LNG、LPG、甲醇、电、氢、氨、生物燃料等）的比例。2021 年，国务院发布的《2030 年前碳达峰行动方案》提出，发展电动、液化天然气动力船舶，深入推进船舶靠港使用岸电，因地制宜开展沿海、内河绿色智能船舶示范应用，到 2030 年，当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具达到 40%。

基于 4.1.1 节中政策指导文件和相关对燃料替代能源的经济性、可得性、减排效益、安全性的相关研究来看，对长江新能源船舶应用发展路径短期来看，LNG 是最优选择，政策上对 LNG 的推动力也是最大的。这主要源于 LNG 燃料的技术成熟度、配套设施的完善度、试验船舶规模都显著优于其他燃料。但 LNG 并不是零碳燃料，因此，该燃料仅适用于当前仍处于起步阶段的环保要求，LNG 仅为短期到中长期的发展过程中的过渡燃料。中长期来看，绿甲醇、绿氨、锂电池是实现零碳的最终目标燃料。但中长期的发展角度来看，更关注于全生命周期的零碳排放，这意味着替代燃料应追求生产、运输、回收过程的完全或近零排放。

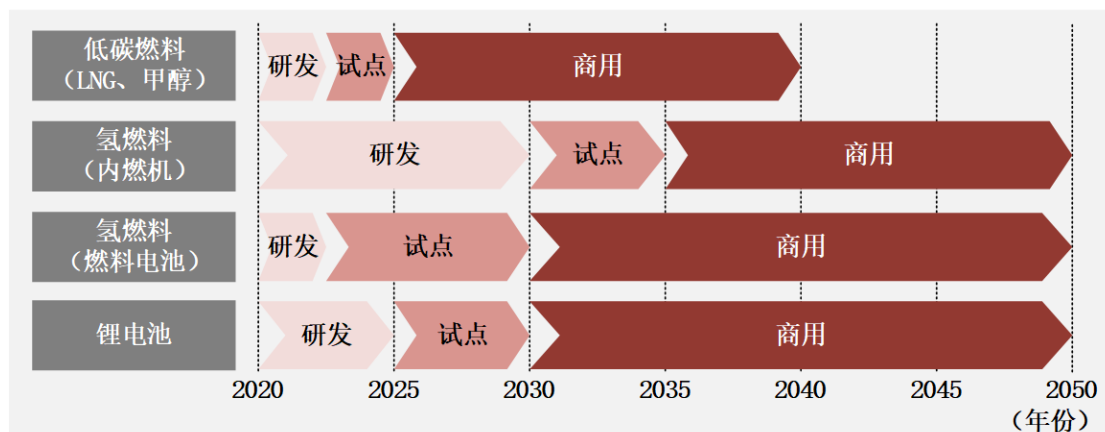


图 4.2-1 长江新能源船舶发展路径建议图

### ● LNG 动力船舶应用

2010 年以来，国家和交通运输部发布了一系列要求推广船舶使用 LNG 清洁能源的指导性文件。《大气污染防治行动计划》、《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》、《国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知》等 30 余项国家和交通运输部制定的政策法规中要求船舶使用 LNG 清洁燃料。LNG 燃料技术成熟度高、法规完备性好、能量密度高，近几年以 LNG 为主燃料的双燃料动力船舶呈较快增长趋势，截至 2021 年，长江经济带运行的 LNG 动力船共计约 200 艘，约占总船舶数量的 0.2%。相关研究表明，LNG 的温室气体减排效益为约 10%，因此，在本研究中，设置 LNG 碳减排潜力系数为 10%。

截至 2021 年，长江干线建成并运营 LNG 加注站 7 座，根据《长江干线京杭运河西江航运干线液化天然气加注码头布局方案（2017—2025 年）》，长江干线布局 45 处 LNG 加注码头，但 LNG 沸点低，碳减排潜力有限，且供应和价格尚不稳定，因此，在本研究中，预测未来长江 LNG 动力船舶的不会出现爆发式增长现象。

### ● 电动船舶应用

随着蓄电池能量密度的提高，且电能被视为零碳排放能源，电动船舶以充电便捷、低噪音的优势，电动船舶发展步伐加快，目前电动船舶主要应用于工程船、公务船、客船、渡船等。据研究表明，500 总吨、1000 总吨、2000 总吨船舶可实现电动化的最大比例为 80%、60%和 50%。在预测过程中，在 2℃情景中设置在 2060 年，电动船舶数量占总在航行船舶数量 30%，在 1.5℃情景中设



---

置在 2060 年，电动船舶数量占总在航行船舶数量 50%。电动船舶作为零碳排放船舶，本研究将电动船舶的碳减排潜力系数设置为 100%。

#### ● 其他能源动力船舶应用

相较于传统柴油，其他新能源低碳燃料均能显著降低 CO<sub>2</sub> 排放，但低碳燃料的使用存在较高的应用门槛，目前技术成熟度较低。在本研究中，考虑绿甲醇和绿氢燃料作为其他能源动力，据其他研究表明，从船舶末端排放来看，绿甲醇和绿氢的碳减排潜力为 100%，因此，本研究将这两种能源动力船舶的碳减排系数设置为 100%。

#### 4.2.2.2 老旧船舶淘汰 (S<sub>2</sub>)

在中国内河航道航行的老旧船舶较多，据 2017 年数据统计，船龄超过 20 的船舶占比达 26%。截至 2022 年底，长江干线过闸运输船舶主尺度符合率达到 91.4%，其中国家强制标准执行率达 100%，这表明长江干线船舶标准化执行率好，但长江支流老旧船舶比例仍较高。国务院 2018 年发布的“蓝天计划”和相应的地方计划，规定了一些针对内河航运业的措施，措施要求限制长江等主要内河流域的高排放船舶运营，并鼓励服役 20 年以上的船舶退役。2023 年 10 月发布的《2030 年前碳达峰行动方案》提出推动运输工具装备低碳转型，加快老旧船舶更新改造。

据研究表明，老旧船舶拆解新建后，即时选用燃油动力，其本身能效水平提高约 20%，因此，设置老旧船舶淘汰的碳减排潜力系数为 20%。2016 年至 2020 年老旧船舶淘汰率为 22%，逐年淘汰率为 4.4%。由于中国内河老旧船舶淘汰的驱动力为船龄，而非政策，因此，本研究在三个减排情景中设置的老旧船舶年淘汰率相同。

#### 4.2.2.3 岸电使用 (S<sub>3</sub>)

岸电的顺利使用需要以下几个条件：（1）船舶已安装受电设施；（2）停靠泊位已安装供电设备；（3）船舶和泊位成功匹配，对船舶类型、可使用泊位数量、电压等等都有一定的要求。

根据《长江经济带运输船舶岸电系统受电设施改造推进方案》的改造目标，截至 2025 年，内河集装箱船、滚装船、600 总吨及以上内河干散货船和多用途船将基本完成改造，总改造规模在 2.6 万余艘。2022 年长江 11 省市五种船型共

---

计 84158 艘，截至 22 年末改造规模 1 万余艘。预计 2025 年船舶改造数量将比 2022 年提高了 1.5 倍，改造船舶占比从 13% 上升至 31%。

2017 年发布的《港口岸电布局方案》，提出重点推进 5 类重点专业化泊位的岸电设施改造的目标：集装箱、客滚、邮轮、大型客运和干散货专业化泊位。2019 年底京杭运河水上服务区、三峡坝区基本实现岸电全覆盖。截至 2022 年，全国 5 类重点专业化泊位岸电设施覆盖率达 75%，广东省率先实现了中国内河港口泊位的岸电供电设施全覆盖。可以预计，到 2025 年长江沿线内河港口的岸电供电设施将基本覆盖。

《港口和船舶岸电管理办法》对除液货船外的船舶提出了应用尽用的要求，自 2020 年 2 月 1 日起，具备受电设施的船舶停靠在具备岸电供应能力的泊位且未使用有效替代措施时，在沿海港口停泊超过 3 小时或内河港口超过 2 小时，应当使用岸电。

结合以上对船舶受电设施改造、港口泊位供电设施建设、岸电使用推进政策的分析，预测 2025 年长江沿线内河船靠港停泊时，基准情景下 30% 的船舶使用岸电、2030 年 50%、2035 年 80%、2040 年 100%。船舶在靠港和待闸两个航行状态下可使用岸电以减少碳排放，据 3.3.3 节中典型航道断面航行船舶碳排放计算结果表示，由于待闸船舶调度优化的影响，2022 年，船舶在靠港和待闸两个航行状态下的碳排放量占整个航程排放量的 1.67%，因此，本研究设置岸电使用的碳减排潜力系数为 1.67%。

#### **4.2.2.4 营运节能转型 (S4)**

常用的营运减排措施主要包括航线运营管理优化、运输结构优化转型、降速航行、气象导航等

- **航线运营管理优化和运输结构优化转型**

在该类减排措施中，主要可以通过提高航运物流和数字化水平、降低航速、提高船舶利用率、优化船舶设计结构、优化航线、优化航线船舶载运结构。据研究表明，2010 年至 2019 年中国内河船舶单位载重吨所需功率降低了 24%，提高了船舶能效水平。2010 年至 2019 年内河船舶单位功率货运量增加了 56%，这表明了同等功率下船舶运载量提高了一倍，进一步降低了单位货物周转量的燃料消耗。

- **降速航行**

降低船舶航行速度，可以有效降低船舶阻力，从而降低单位油耗。船舶燃料消耗量与船舶航速的三次方成正比例关系，因此，航速与燃料消耗量关联性大。据研究表明，船舶航速下降 10%，可减少超过 25% 的燃料消耗，与此同时，船舶碳排放量也会降低。但对于内河船舶出现大型化，同时长江航运作为中东部地区强有力的大宗货物运输载体，国家也在大力推行和实施公转水、铁转水政策措施，因此，在货运量持续增加的发展形势下，船东为了追求经济效益，本研究预测未来长江航道航行船舶航速下降空间较小。

### ● 气象导航

气象导航指的是根据航道气象与船舶能效等的关系来优化计划航线，从而达到优化船舶能效的目的。有研究表明，结合航道环境数据和气象水文数据，再结合路径规划优化算法，推荐船舶采用优化航线航行，可使船舶节约约 18.4% 的燃料。

综上所述，通过将不同营运节能转型措施整合分析，设置营运节能转型的碳减排潜力系数为 15%。

具体的各项减排措施情景在基准情景、1.5℃情景、2℃情景下的不同年份的设置值如表 4.3-1 所示，年份以 5 年为间隔。

表 4.2-1 长江内河船舶各类减排措施在不同情景下的年变化和增长率（%）

情景	年份	新能源船舶年增长率 (S <sub>1</sub> )			老旧船舶年淘汰/改造占比 (S <sub>2</sub> )	船舶岸电使用占比 (S <sub>3</sub> )	营运节能转型船舶比率 (S <sub>4</sub> )
		LNG 动力船舶占比 (S <sub>1,1</sub> )	电动船舶占比 (S <sub>1,2</sub> )	甲醇、氢动力船舶占比 (S <sub>1,3</sub> )			
碳减排潜力系数		10	100	100	20	1.67	15
	2022	0.2	0.04	0	4.4	5	10
基准情景	2025	0.8	0.5	0.01	4.4	30	20
	2030	2.8	1	0.03	4.4	50	30
	2035	4.9	2	0.19	4.4	80	40
	2040	7	3	0.35	4.4	95	50
	2045	6	6	0.51	4.4	100	50
	2050	4	8.5	0.67	4.4	100	50

	2055	4	11	0.83	4.4	100	50
	2060	4	15	1	4.4	100	50
2℃情景	2025	1	1	0.03	4.4	33	25
	2030	4	3.5	0.05	4.4	60	35
	2035	7	7.9	0.45	4.4	90	45
	2040	10	12.3	0.85	4.4	100	55
	2045	8	16.7	1.25	4.4	100	55
	2050	6	21.1	1.65	4.4	100	55
	2055	5	25.5	2.05	4.4	100	55
	2060	5	30	2.5	4.4	100	55
1.5℃情景	2025	1	1	0.05	4.4	35	30
	2030	5.6	5	0.1	4.4	70	40
	2035	10.2	12.5	0.58	4.4	95	50
	2040	15	20	1.06	4.4	100	60
	2045	12	27.5	1.54	4.4	100	65
	2050	10	35	2.02	4.4	100	65
	2055	5	42.5	2.5	4.4	100	65
	2060	5	50	3	4.4	100	65

### 4.2.3 长江船舶内贸货运量预测

#### 4.2.3.1 2022 年长江内贸货物运输周转量

在 3.5 节中，对长江 2017-2022 年的船舶内贸货运量进行了统计分析，其中，通过船-货匹配，可以确定在 2022 年长江船舶内贸货运周转量，具体见表 4.2-2。

表 4.2-2 2022 年长江不同货物港口吞吐量及货运周转量

能源/非能源类货物	货类	运输船型	货物吞吐量（万吨）	货运周转量（亿吨公里）
能源类	煤炭及制品	货船	98174	3630.5897
能源类	石油	油船	12840	474.8382
非能源类货物	金属矿石	货船	83190	3076.4637
非能源类货物	钢铁	货船	27935	0.0612
非能源类货物	矿建材料	货船	155334	5744.4333

非能源类货物	非金属 矿石	货船	21812	806.6333
非能源类货物	粮食吨	货船	12348	456.6435
非能源类货物	滚装汽 车	滚装船	2633	97.3714
非能源类货物	集装箱	集装箱 船	42225	1561.5210

(注：1TEU=15吨，1辆车=1.5吨)

#### 4.2.3.2 未来长江船舶内贸货物运输周转量预测

在本小节中将参考 ICCSD 研究报告中关于对中国能源类货物运输周转量需求的预测结果（具体参考值见表 4.2-3），并结合长江船舶 2022 年内贸能源类货物运输周转量的统计结果，预测 2023-2060 年的长江船舶内贸能源类货物运输周转量，具体预测结果见表 4.2-5。

表 4.2-3 2023-2060 年能源类货物运输周转量增长率

情景	能源类货物运输周转量年增长率 (%)					
	煤炭		油		气	
	2023- 2030	2030- 2060	2023- 2030	2030- 2060	2023- 2030	2030- 2060
基准情景	-0.3	-2.2	1.2	-1.5	6.1	-0.5
2°C情景	-1.5	-5.3	-0.2	-1.7	5.1	-1.0
1.5°C情景	-4.1	-9.2	-2.4	-7.4	4.4	-4.2

对于非能源类的货物运输周转量预测，将参考 ICCT 研究报告中提供的三个情景的年增长率（具体值参见表 4.2-4），并参考 2022 年长江船舶内贸非能源货物运输周转量数据，计算 2023-2060 年的长江船舶内贸非能源货物运输周转量，具体预测结果见表 4.2-5。

表 4.2-4 非能源货物运输周转量年增长率预测值

情景	非能源货物运输周转量年增长率 (%)							
	2023- 2025	2025- 2030	2030- 2035	2035- 2040	2040- 2045	2045- 2050	2050- 2055	2055- 2060
基准	5.0	4.3	4.0	3.2	2.9	2.6	4.7	2.9

情景								
2℃情景	5.0	3.8	3.5	2.8	2.5	2.2	4.4	2.5
1.5℃情景	5	3.4	3.1	2.4	2.2	1.9	4.2	2.2

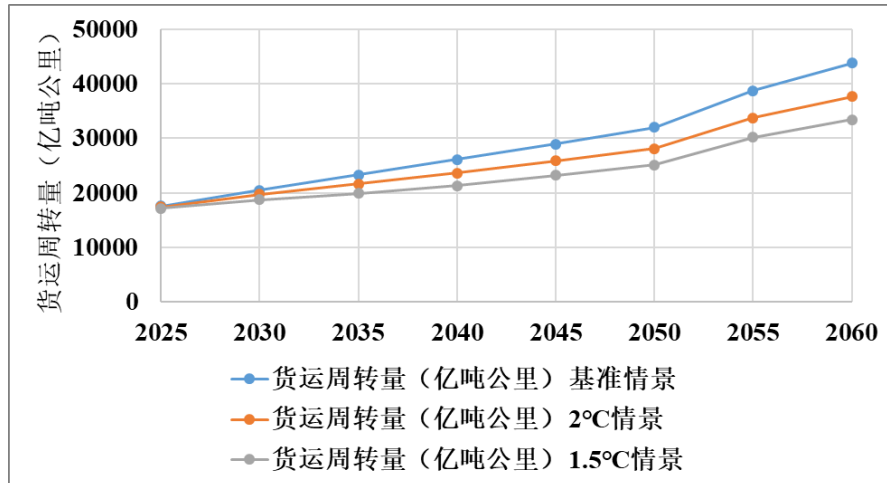


图 4.2-2 不同情景下长江内贸船舶年货运周转量预测结果

表 4.2-5 长江内贸货物运输周转量预测值

情景	年份	各类型货物运输周转量 (亿吨公里)			总货运周转量 (亿吨公里)
		能源类		非能源类	
		煤炭	油		
	2022	3630.5897	474.8382	11743.1274	15848.5553
基准情景	2025	3597.9144	491.9324	13504.5965	17594.4433
	2030	3543.9456	521.4483	16408.0848	20473.47875
	2035	3154.1117	482.3397	19689.7017	23326.1531
	2040	2807.1594	446.1642	22840.0531	26093.3776
	2045	2498.3718	278.8526	26151.8618	28929.0863

	2050	2223.5509	257.9387	29551.6039	32033.0935
	2055	1978.9603	238.5933	36496.2307	38713.7844
	2060	1761.2747	220.6988	41788.1842	43770.1577
2℃情景	2025	3467.2132	470.0898	13504.5965	17441.8995
	2030	3207.1722	465.3890	16070.4699	19743.0309
	2035	2357.2716	425.8309	18882.8021	21665.9045
	2040	1732.5946	389.6352	21526.3943	23648.6242
	2045	1273.4570	356.5162	24217.1937	25847.1670
	2050	935.9910	326.2124	26881.0850	28143.2882
	2055	687.9533	298.4843	32794.9237	33781.3613
2060	505.6457	273.1131	36894.2891	37673.0479	
1.5℃情景	2025	3184.0272	440.6498	13504.5965	17129.27353
	2030	2531.3016	387.7719	15800.3779	18719.4514
	2035	1366.9029	244.2963	18249.4365	19860.6356
	2040	738.1275	153.9067	20439.3689	21331.4031
	2045	398.5889	96.9612	22687.6995	23183.24952
	2050	215.2381	61.0856	24843.0309	25119.3544
	2055	116.2285	38.4839	30060.0674	30214.7798
	2060	62.7634	24.2449	33366.6748	33453.6831

#### 4.2.4 长江船舶内贸船舶碳排放强度预测

##### 4.2.4.1 2022 年长江船舶船舶货运碳排放强度计算

通过船-货匹配，可以将长江货物承运船舶分为四类，即货船、油船、集装箱船和滚装船，这四类船舶的单位货物运输的碳排放强度分别为 22.25616 g/t-cargo/nm、52.87912 g/t-cargo/nm、6.34138 g/t-cargo/nm、51.10131 g/t-cargo/nm，即为 11.9915 g/t-cargo/km，28.4910 g/t-cargo/km，3.4167 g/t-cargo/km 和 27.533g/t-cargo/km。但从表 4.3-2 中可以看出，各类船型在长江上航行的活跃度具有差异显著，因此，本研究在计算长江内贸船舶碳排放强度时，将以各类型船舶的货运周转量数量来确定各类船型的航行活跃度，并以活跃度作为排放强

度贡献系数，具体值见表 4.2-6，以确定 2022 年长江水域内贸船舶碳排放强度，结果为 11.7367 g/t-cargo/km。

表 4.2-6 长江内贸船舶碳排放强度和航行活跃度

	货船	油船	集装箱船	滚装船
碳排放强度 (g/t-cargo/km)	11.9915	28.4910	3.4167	27.533
船舶活跃度 (%)	86.54	3.00	9.85	0.61

#### 4.2.4.2 未来长江内贸船舶碳排放强度预测

在本研究中，设置了新能源船舶应用、老旧船舶淘汰、岸电使用、营运节能转型四类减排措施，各类型措施主要是针对四种类型的船舶实施，即传统燃油动力船舶、LNG 动力船舶、电动船舶、其他新能源船舶，各类型船舶的碳排放强度即 EEOI 分别受到不同措施执行的影响，具体见表 4.2-7 所示。

表 4.2-7 不同船舶类型的减排措施项

	传统燃油动力船舶	LNG 动力船舶	电动船舶	其他新能源船舶
S <sub>2</sub> : 老旧船舶年淘汰	√			
S <sub>3</sub> : 岸电使用	√	√		
S <sub>4</sub> : 营运节能转型	√	√	√	√

基于表 4.3-中提供的各减排措施项的碳减排潜力系数和未来实施力度，结合表 4.3-7 中整理的各类型船舶的分别实施的减排措施项，利用式 (4.2-2) 中提出的船舶碳排放强度 EEOI 的计算方法，计算长江内贸船舶在 2025-2060 年的碳排放强度，结果如图 4.2-3 所示。

从 EEOI 预测结果来看，在基准情景下，从 2025 年至 2060 年，长江内贸船舶的 EEOI 在逐年下降，从 2025 年的 11.51533 g/t-cargo/km，下降至 2060 年的 8.60925 g/t-cargo/km，降低了 25.24%。这意味着长江内贸船舶在该情景下逐步提高了能效，单位货运量所消耗的能源减少，导致更低的排放量；在 2℃ 情景下，EEOI 也呈现出逐年下降的趋势，从 2025 年的 11.09719 g/t-cargo/km，下降



至 2060 年的 6.70987 g/t-cargo/km，降低了 39.54%。这表明长江内贸船舶在 2℃ 的气温上升限制目标下，通过采用比基准情景更高效的能源利用方式和技术，进一步提高了能效，可进一步减少碳排放；在 1.5℃ 情景下，从 2025 年的 11.09254 g/t-cargo/km，下降至 2060 年的 4.60153 g/t-cargo/km，降低了 58.52%。

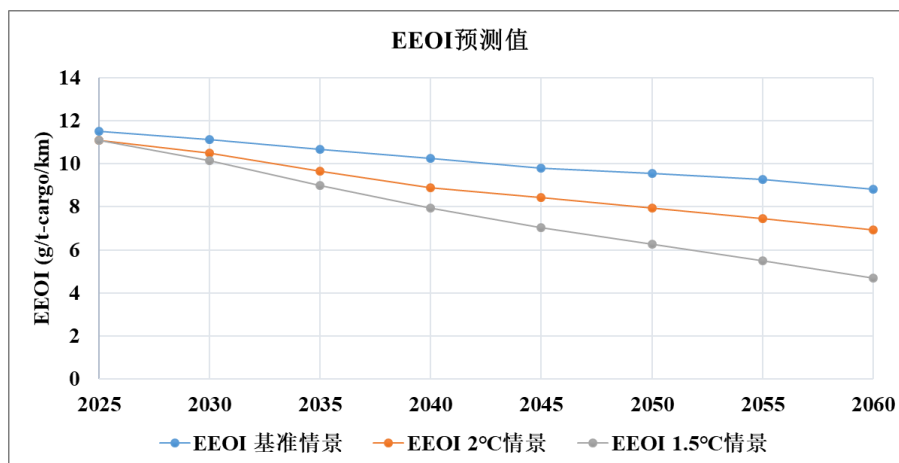


图 4.2-3 2025-2060 年长江内贸船舶碳排放强度预测

#### 4.2.5 长江内贸船舶碳排放量预测

基于 4.2.4.1 节长江内贸船舶货运量预测结果和 4.2.4.2 节长江内贸船舶碳排放强度预测结果，来计算长江内贸船舶碳排放量，计算结果如图 4.2-4 所示。预测结果表明，在基准情景情景下，CO<sub>2</sub> 排放量在随着货运周转量的增长逐年增加，到 2060 年仍旧未能达到碳达峰，尤其在 2050 年后，内河的货运周转量持续快速增加，但碳排放强度下降缓慢，导致 2050-2060 年碳排放量快速增长；在 2℃ 情景下，在各种节能减排措施下，CO<sub>2</sub> 排放量在 2030 年达到了 22.7714 百万吨，在 2030 年至 2050 年，CO<sub>2</sub> 排放量仍旧呈现持续缓慢增长的趋势，在 2050 年 CO<sub>2</sub> 排放量达到 21.9654 百万吨，表明在该情景下，仍需要持续加大新能源船舶的投入力度，加快船舶电动化水平和增加电动船舶和其他新能源船舶的保有量；在 1.5℃ 情境下，在 2030 年达到碳达峰，排放量为 18.96553 百万吨，比 2022 年 CO<sub>2</sub> 排放量下降 25.02%，下降约 0.27051 百万吨，到 2060 年，CO<sub>2</sub> 排放量下降至 15.39379 百万吨。

从图 4.2-3 中，可以看出，在 1.5℃ 情境下，长江内河船舶碳排放量在 2055 年出现了反弹回升的现象。造成该现象的原因是由于，在 2050-2055 年的货运周转量年增长率较 2025-2050 年明显增加，但长江内河船舶运输的 EEOI 并没有显

著的下降趋势，导致在 2055 年的长江内河船舶碳排放量呈现反弹增加的趋势，但在 2060 年又回到呈现下降趋势。具体表现于，在 1.5℃情景下，2025-2050 年，货运周转量年平均增长率约为 3%，在 2050-2055 年，货运周转量年平均增长率约为 4.2%。但在 2025-2050 年的长江内河船舶 EEOI 的年平均下降率为 2.163%，在 2050-2055 年的年平均下降率为 2.478%。

从图 4.2-3 中，可以看出，在 1.5℃情境下，长江内河船舶碳排放量在 2055 年出现了反弹回升的现象。造成该现象的原因是由于，在 2050-2055 年的货运周转量年增长率较 2025-2050 年明显增加，但长江内河船舶运输的 EEOI 并没有显著的下降趋势，导致在 2055 年的长江内河船舶碳排放量呈现反弹增加的趋势，但在 2060 年又回到呈现下降趋势。具体表现于，在 1.5℃情景下，2025-2050 年，货运周转量年平均增长率约为 3%，在 2050-2055 年，货运周转量年平均增长率约为 4.2%。但在 2025-2050 年的长江内河船舶 EEOI 的年平均下降率为 2.163%，在 2050-2055 年的年平均下降率为 2.478%。

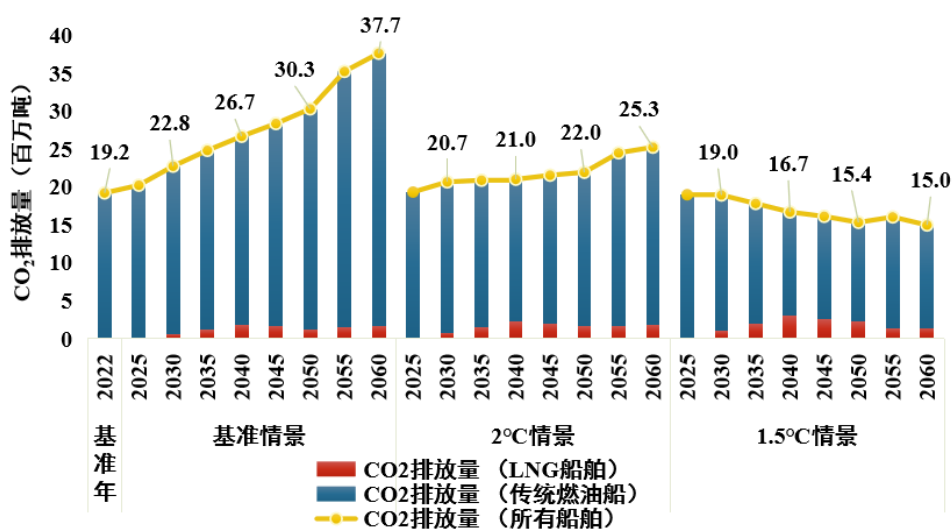


图 4.2-4 2025-2060 年长江内河船舶碳排放量预测结果

### 4.3 全球其他地区船舶减排路径

ABS 的 ZERO CARBON OUTLOOK 报告在首次设定低碳运输前景中，将可用的和新兴的燃料选择分为三条途径：轻质气体燃料、重气及甲醇、生物/合成燃料，以帮助船业实现其 2030 年及以后的脱碳目标。

轻质气体燃料路径包括液化天然气、生物液化天然气和合成天然气（SNG）或可再生天然气（RNG），可以从生物质能和/或使用可再生能源中生产。

重气及甲醇途径这一类燃料包括液化石油气、甲醇、乙醇和氨等燃料，它们由比轻气体组分更大的分子组成，具有更高的碳氢比，因此，能够降低减少碳排放的潜力，燃料储存和供应要求要求较低。

生物/合成燃料途径这类燃料包括由生物质生产的燃料，包括植物、废油和农业废物。从设计的角度来看，可以作为备用生物燃料使用，几乎不需要对船用发动机及其燃料输送系统进行改造就可以使用。

ABS 的报告基于甲醇、氨和氢将在 2030 年后占据中心阶段的假设，预测了未来航运的替代燃料路径。通过将船舶需求与航运燃料组合的预测相结合，将全球能源消耗的情景转化为船舶的全球燃料消耗，预测结果如图 4.3-1 所示。

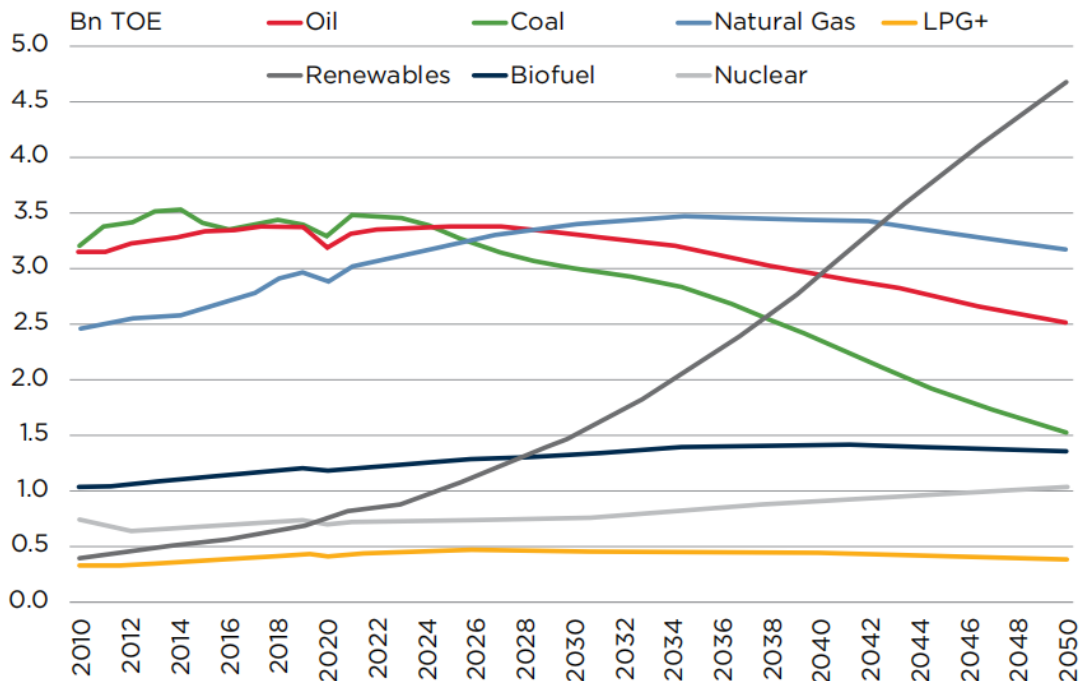


图 4.3-1 全球能源消耗预测

随着中国、欧洲和北美主导着能源需求，预计从 2020 年至 2050 年，全球能源消费将增长 30%。增长最快的地区预计将是南亚和非洲，未来十年，这些地区的能源消耗可能会翻一番。在此期间，零碳能源生产将增长近 6 倍，其中化石燃料消耗降幅最大的是来自煤炭（50%）和石油（20%）。

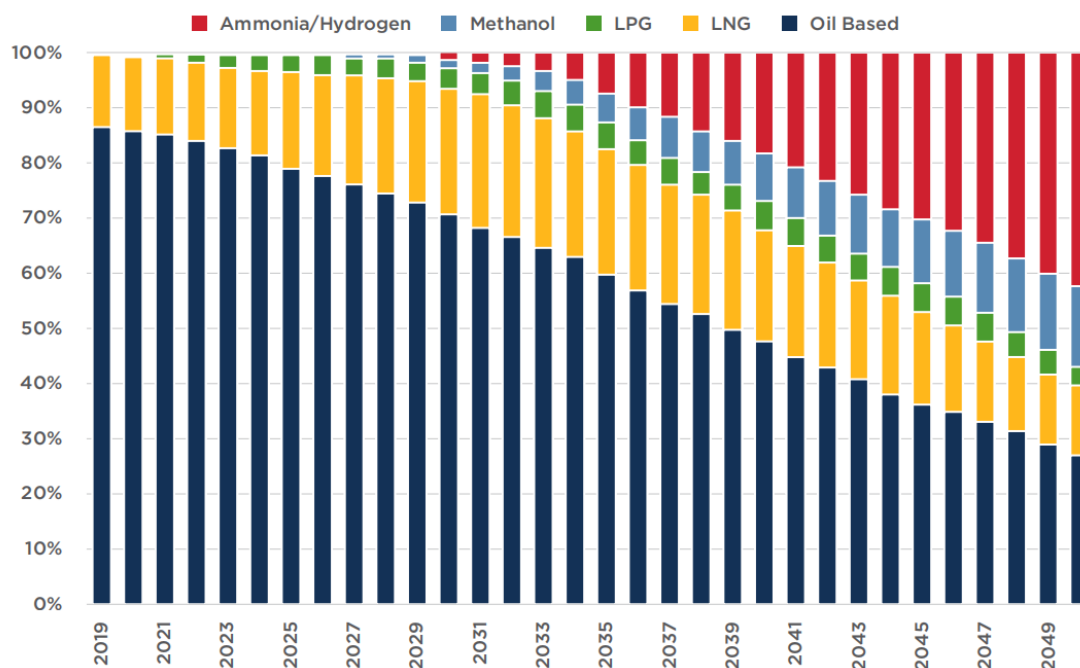


图 4.3-2 能源组合预测

DNV 关于船舶能源发展的一份报告《2060 海上预测：能源转型展望》分别对两个脱碳目标下的脱碳途径进行分析：一是实现当前国际海事组织温室气体战略中设定的目标，包括在 2050 年将温室气体总排放量减少 50%；二是到 2050 年船队实现零碳。报告对生物质燃料、电力来源燃料和化石燃料三大类燃料进行不同的能源组合，设立了 24 个情景进行分析，如图图 4.4-2 所示。

监管政策和初级能源价格是碳中和燃料市场份额和未来燃料组合的关键驱动力。碳中和燃料的市场份额需要在 2030-2040 年间有所增加，到 2050 年将达到 40% 以实现国际海事组织的目标，达到 100% 的份额以使运输完全脱碳。化石燃料中，极低硫燃料油（VLSFO）、船用天然气油（MGO）和液化天然气（LNG）的使用在本世纪中叶将迅速下降，或在 100% 脱碳的方案中被逐步淘汰。然而，在加速向碳中和燃料过渡之前，液化天然气的燃料组合将达到 20%-30% 左右。

鉴于价格和技术发展的不确定性，很难在许多不同的碳中和燃料选择中明确最终占优的选择，但可以通过每种燃料在不同情况下的优势进而给出参考。生物 LNG、生物 MGO 和生物甲醇是相对能量密集的碳氢化合物，如果有足够的可持续生物质，它们将是首选的燃料。与生物 MGO 和生物液化天然气相比，生物甲醇的市场份额对生产成本非常敏感。由于生物质燃料的制备原料稳定性和技术成熟度较低，生物燃料的价格可能无法与电燃料和化石燃料竞争。

电力来源燃料的清洁性需要考虑燃料的全生命周期，追溯到生产源头，使用来源于化石燃料燃烧的电力生产燃料可能导致更高的排放，需要逐步淘汰化石能源发电的占比，但这对于许多依赖煤炭等化石能源的地区来说需要较为长期的电力转型。

报告还提出了“绿色能源走廊”的建议，通过燃料供需双方的合作，增加连接地区的替代燃料的可用性来帮助航运脱碳。

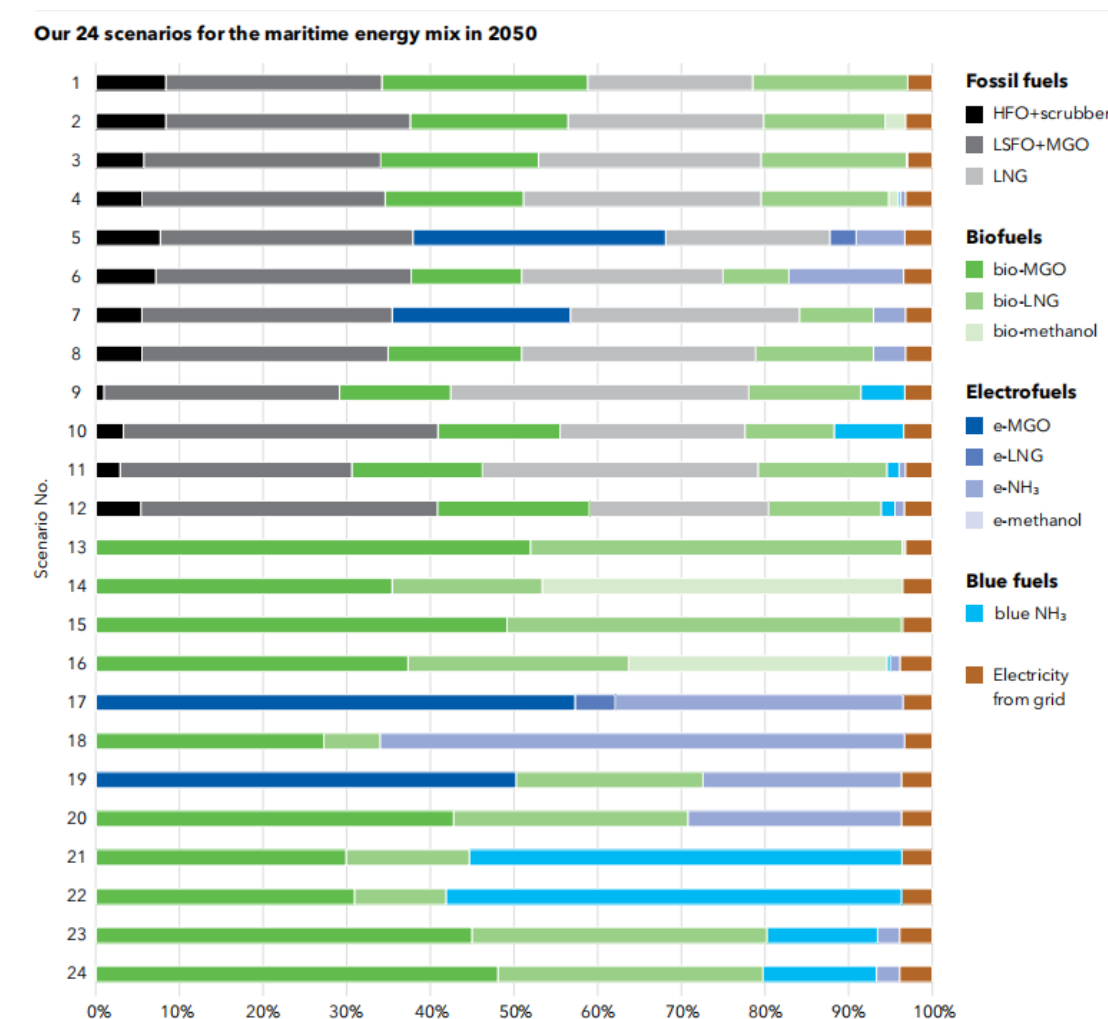


图 4.3-3 能源组合

除了全球航运减排路径的有关研究以外，还有一些地区出台了各自的水运减排路径报告。

CCNR 的莱茵河航运减排技术路径报告基于《曼海姆宣言》设立了减排目标：2035 年相对于 2015 年实现航运温室气体和大气污染物 35%的减排；2050 年实现内河航运零碳排放。

如表 4.3-1 所示，报告对目前已有的不同燃料和发动机控制技术进行了技术成熟度和减排潜力的分类，数字越高代表技术成熟度越高。

表 4.3-1 不同燃料和发动机控制技术的技术成熟度和减排潜力

技术	船舶应用 可行性等 级	燃料/能源 生产和供应 等级	减排潜力		
			GHG	NO <sub>x</sub>	PM
柴油	9	9	0	0	0
柴油, CCNR2+SCR	9	9	0	82%	54%
柴油, EU 第五阶段	9	9	0	82%	92%
LNG	9	9	10%	81%	97%
HVO (生物柴油)	9	9	100%	82%	92%
LBM (液化生物甲烷)	9	8	100%	81%	97%
电池	8	7	100%	100%	100%
H <sub>2</sub> +燃料电池	7	7	100%	100%	100%
H <sub>2</sub> +内燃机	5	7	100%	82%	92%
甲醇+燃料电池	7	6	100%	100%	100%
甲醇+内燃机	5	6	100%	82%	92%

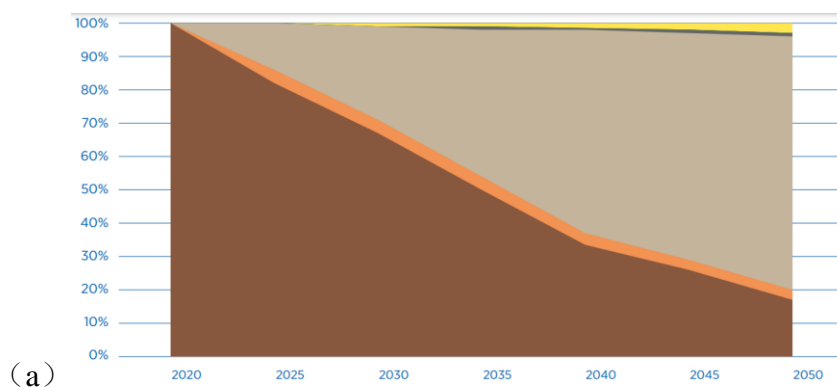
如图 4.3-4 所示，报告以 2015 年排放情况为基准，设立了三个情景进行燃料市场占比和技术路线的选择，分析减排情况，进而对燃料的选择提出建议。

BAU 情景遵循现有措施和政策。据估计，到 2050 年，超过 95% 的船只将继续使用化石燃料。预计燃料供应商将提供由生物燃料和化石柴油组成的柴油混合物，这使得整个船队对生物燃料的使用总体上略有增加，2035 年将使用传统柴油和 4% 生物燃料组成的混合燃料，2050 年将使用传统柴油和 7% 生物燃料组成的混合燃料。

保守发展情景所考虑的替代燃料和技术在短期内相对容易实现且具有成本效益。燃料选择倾向于选择可用于现有发动机的生物柴油，或可用于燃气发动机的液化生物甲烷 LBM，水处理植物油 HVO。

创新发展情景所考虑的燃料和技术目前仍处于起步阶段且价格更为昂贵，但未来可能有更高的减排潜力。倾向于发展电池、甲醇和氢动力推进系统等零排放技术。

BAU 情景下，相较于 2015 年，2035 年温室气体减排 14%，不能满足目标，而  $\text{NO}_x$  和 PM 减排可以达到目标，2050 年均不能达到目标，需要采取更多措施。保守发展情景下 2050 年温室气体减排 91%， $\text{NO}_x$  减排 90%，PM 减排 96%。创新发展情景下 2050 年温室气体减排 91%， $\text{NO}_x$  减排 94%，PM 减排 98%。



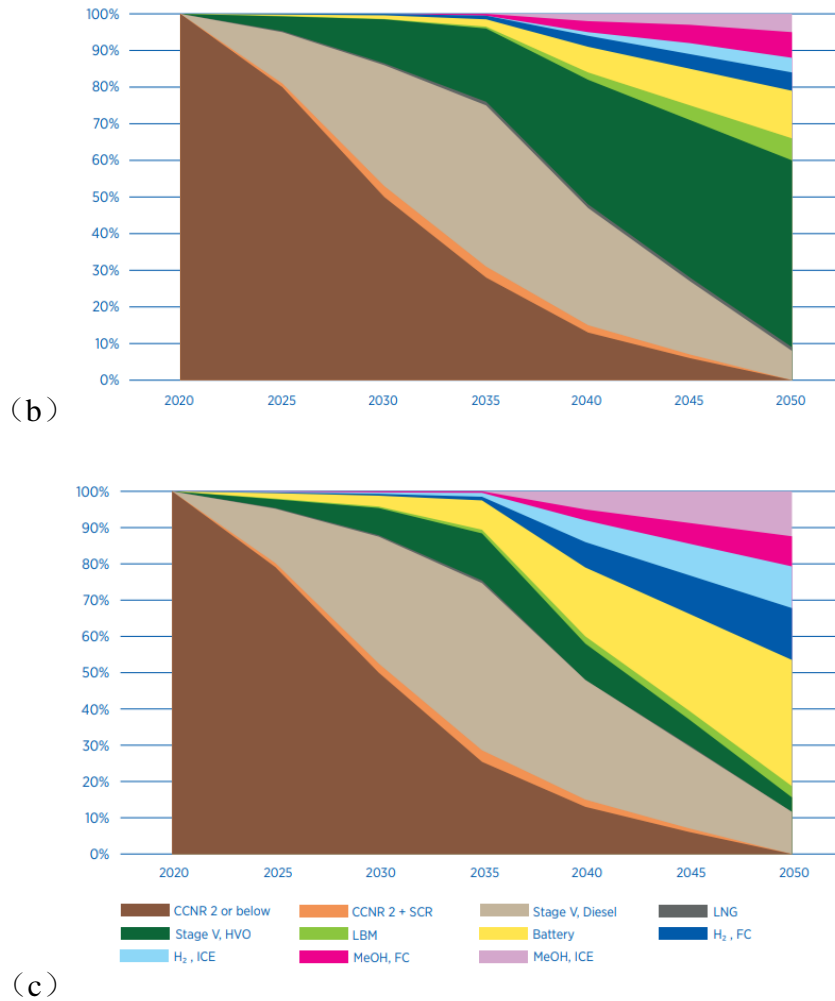


图 4.3-4 三种情景的能源占比（a 为 BAU 情景，b 为保守发展情景，c 为创新发展情景）

#### 4.4 中国内河和沿海船舶减排方案建议

从相关顶层政策指导文件中可以看出，内河航运减排应在保证内河客货运量稳步增长的前提下，加快推动内河航运绿色动力技术，积极推动内河船队结构优化，稳步淘汰老旧船舶，加快推进绿色动力船舶市场运营步伐，出台内河绿色航运相关标准与规范。中国内河和沿海船舶减排可从以下几个方面展开：

##### （1）推广清洁燃料和低碳技术

鼓励内河航运采用清洁燃料，如 LNG 或电动推进系统，以替代传统的高碳燃料。对于替代燃料的选择，需要考虑多方面的因素，主要包括技术成熟性、新造船舶经济成本、能源价格、能源可获取性等。不论是 LNG、氢、氨和甲醇，与传统的重油和低硫油相比，体积能量密度较低，意味着船舶设计需要留出更



---

多空间储存燃料，保持相等的续航能力。就经济性来看，不同燃料存储条件不一样，存储难度较大的燃料投资成本也相应较高，不同燃料对于船舶前期投资成本影响不同，这也是选择不同燃料路线时需要考虑的重要因素。另外，在日趋严格的船舶排放政策约束下，选择替代燃料时，不仅仅要考虑燃料使用时即船舶使用燃料时的温室气体排放量，还要关注燃料生产运输全生命周期产生的温室气体排放量。

目前内河航运电气化已得到来自多方面的推动和支持。在政府方面，在《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》中，提出加快发展电池动力船舶，重点推动纯电池动力技术在中短途内河货船、滨江游船及库湖区船舶等应用；以货船为试点，开展标准化箱式电源换电技术研究与应用。2023年2月8日，工信部与湖北省人民政府签署了《加快内河船舶绿色智能发展合作备忘录》，以发展新能源清洁能源标准化船型为重点，带动长江内河船舶绿色智能转型升级，重点发展2000载重吨以上LNG动力货船、标准化箱式电源换电货船、滨江及库湖区纯电池动力游船与公务船等；且相关企业也积极布局电动船市场，近年来，我国电动船舶时长规模不断扩大。但内河船舶电动化的应用虽然在航运脱碳和能源效率方面占据优势，但也存在安全隐患，主要表现在电池故障、电力系统故障和漏电、充电设施安全、电池存储和处理、电动船舶的水上救援与应急处理等，为应对这些问题，需要制定和执行严格的安全规范和措施，包括定期检查和维护、培训乘员、设立紧急救援措施等，以确保内河电动船的安全运营。此外，行业监管机构和政府应密切关注并加强对内河电动船安全的监管和规范。

### **(2) 强化排放标准和监管**

制定更为严格的内河航运排放标准，并确保监管机构有效执行。通过监测和追踪排放水平，对不符合标准的船舶进行处罚或限制，以促使航运业减少排放。

### **(3) 鼓励船舶更新换代**

推动航运公司逐步淘汰老旧、高排放的船舶，并鼓励更新换代为更环保的船舶。为船舶拆解和更新提供经济激励措施，以促进船队的绿色升级。

### **(4) 支持绿色港口发展**

---

投资于绿色港口基础设施建设，包括电动充电设施、岸电供应和废物处理设施等，以支持内河船舶在停靠港口期间的低碳运营。

#### **(5) 促进多式联运**

鼓励内河航运与其他运输模式（如铁路和公路）实现无缝衔接，以减少长途货运的依赖。多式联运可以降低内河航运的总体能耗和排放量。

#### **(6) 提高意识和教育水平**

加强公众对内河航运排放问题的认识，提高环保意识。通过教育和宣传活动，促使船舶运营者和船员采取环保措施，降低排放并保护内河生态环境。

这些措施的实施可以帮助中国内河航运行业减少排放，并推动其向更可持续和环保的方向发展。同时，政府、行业协会和航运公司之间的合作也至关重要，以确保这些措施的有效执行和持续改进。

---

## 第 5 章 结论与展望

### 5.1 结论与建议

#### 5.1.1 结论

从全球典型内河流域的货运水平来看，中国长江内河年均货运量约为美国密西西比河的 7 倍，约为欧洲莱茵河的 21.3 倍，但从排放角度来看，中国的内河航运 CO<sub>2</sub> 排放量仅为美国内河航运 CO<sub>2</sub> 排放量的 2.34 倍。从船队构成来看，中国内河船舶船龄要明显较美国和欧洲小，这表明中国内河航运在全球范围来看具有低碳、年轻的特点。

从排放标准和法规的制定来看，欧洲、美国和中国三个地区都制定了一系列针对常规污染物的限值标准或法规，但我国在 HC, NO<sub>x</sub>, PM 限值方面仍相对落后；目前欧洲在颗粒物数量 PN 控制方面的标准领先，我国在对船机 CH<sub>4</sub> 的排放控制标准方面领先。

远洋船、沿海船、内河船在 2022 年 NO<sub>x</sub> 排放比约为 62%/13%/25%，CO<sub>2</sub> 排放的比例约为 58%/11%/31%。内河船占 PM 和 SO<sub>2</sub> 的比例非常小。船舶内河网格排放强度是中国 200Nm 海洋网格平均网格排放强度的 2.3 ~ 3.8 倍。

据本研究预测结果表明，随着未来货运需求的增长，船舶能源的转型应用是实现内河航运有效减碳的关键。当电动船舶占比达到 50% 时，再联合应用其他减排措施，长江船舶的碳排放强度可从 2025 年的 11.09 g/t-cargo/km 减少至 2060 年的 4.60 g/t-cargo/km，减幅达到 58.52%。船舶在等待过闸状态时的排放量要显著大于停靠泊状态，如果在待闸锚地或待闸泊位推行全岸电覆盖，可以在 2022 年的水平上降低 1.41% 的长江干线船舶碳排放。

#### 5.1.2 建议

围绕内河船舶排放在我国碳中和与空气质量目标中的贡献展开进一步研究。本研究表明，2022 年，中国内河流域船舶排放的空间强度明显大于沿海区域，且内河两岸多分布较为密集的城市群，人口密度大，因此，有必要通过精准解析船舶排放的重点船型和燃油类型、船舶排放的逐日变化规律、结合空气质量和健康模型，量化船舶污染物排放对空气质量和人群健康影响，为未来交通部门的结构优化、减污降碳提供数据支撑。

---

新能源船舶的应用是内河船舶零碳转型的关键。减污和降碳是两个相互关联但又有区别的问题，从长期发展来看，LNG 的减污效果显著，但降碳收益非常有限，因此，需要加大内河其他零碳能源的技术投入力度，以提高未来零碳能源船舶在内河航运市场占有率。

进一步提高船机尾气排放限值标准。欧盟颁布标准 NRMM Stage V 和美国颁布的 EPA Tier 4 均进一步收紧 HC 和 NO<sub>x</sub> 限值，同时对 PM 进行了大幅削减。我国也应该在提高船机尾气排放限值方面做出努力。另外，从欧盟 NRMM Stage V 和美国 EPA Tier 4 来看，超细颗粒物排放是未来船机的一个挑战，逐步引入颗粒物数量 PN 排放控制，未来船机排放控制需要向精准化方向发展。

## 5.2 展望

该研究主要对全球内河及沿海航运管理、船舶排放现状进行了资料收集、整理与分析，并提出了内河及沿海船舶大气污染排放计算方法，对中国内河及沿海船舶排放进行了量化评价分析，最后通过提出适用于中国的内河及沿海船舶减排路径，以长江作为典型案例，评价了各类型减排策略的实施对长江内河船舶的碳减排潜力。该研究的进行为中国内河航运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内河船舶排放管理与控制政策的制定与实施提供了数据支持。

但该研究还存在一下需要改进的地方，主要体现在以下三点：

**(1) 需要更多关注船舶排放污染物对港口城市空气质量和人群健康的影响。**从本项目的研究结论可以看出，中国远洋船、沿海船、内河船在 2022 年 NO<sub>x</sub> 排放比分别为 67%/13%/20%，且内陆地区的内河流域船舶排放的空间强度明显大于沿海区域，可以看出内河船舶为不可忽视的排放源，且内河两岸多分布较为密集的城市群，人口密度大，因此，建议项目组在下一阶段重点围绕沿海和内河船舶污染物排放对空气质量和人群健康影响展开研究，以更深入地响应可持续发展理念。

**(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) 内河船舶减排潜力评价不全面。**本研究收集了中国内河和沿海船舶减排相关政策，提出了多项减排途径，并设计了短期、中期和长期的中国内河和沿海不同替代燃料的发展时间进度，但这些减排策略还有待进一步完善，减排策略的逐年设置系数还有待进一步优化，这将在未来研究中继续完成该内容。

---

## 参考文献

- [1] Corbett J J, Fischbeck P. Emissions from Ships. *Science*, 1997, 278(5339): 823-4.
- [2] Corbett J J, Winebrake J J, Green E H, et al. Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(24): 8512-8.
- [3] W.J. Collins M G S, C.E. Johnson. Impact of increasing ship emissions on air quality and deposition over Europe by 2030. *Meteorologische Zeitschrift*, 2009, 18(1): 25–39(15).
- [4] Eyring V, Isaksen I S A, Bernsten T, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(37): 4735-71.
- [5] Bernsten T, Fuglestedt J. Global temperature responses to current emissions from the transport sectors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(49): 19154-9.
- [6] Liu H, Fu M, Jin X, et al. Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1037-41.
- [7] 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. *Atmos Chem Phys*, 2019, 19(9): 6167-83.
- [8] Aritua B, Lu C, Richard L, et al. Blue Routes for a New Era: Developing Inland Waterways Transportation in China. *International Development in Focus*. Washington, DC: World Bank, 2020.
- [9] 交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报. 2023.
- [10] EPA U. Non-road Engine and Vehicle Emission Study—Report and appendixes. 1991.
- [11] 刘欢, 商轶, 金欣欣, 等. 船舶排放清单研究方法及进展. *环境科学学报*, 2018, 38(01): 1-12.
- [12] Liu H, Shang Y, Jin X, et al. Review of methods and progress on shipping emission inventory studies. *Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1): 1-12.
- [13] Streets D G, Carmichael G R, Arndt R L. Sulfur dioxide emissions and sulfur deposition from international shipping in Asian waters. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(10): 1573-82.
- [14] Wang X, Liu H, Lv Z, et al. Trade-linked shipping CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Climate Change*, 2021, 11(11): 945-51.
- [15] Corbett J J, Koehler H W. Updated emissions from ocean shipping. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D20).
- [16] Endresen Ø, Sørgård E, Sundet J K, et al. Emission from international sea transportation and environmental impact. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D17).
- [17] 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. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(9): 3226-32.
- [18] 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. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9(23): 9209-23.
- [19] Jalkanen J P, Johansson L, Kukkonen J. A comprehensive inventory of ship traffic exhaust emissions in the European sea areas in 2011. *Atmos Chem Phys*, 2016, 16(1): 71-84.
- [20] 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. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12(5): 2641-59.
- [21] Faber J, Hanayama S, Zhang S, et al. Forth IMO Greenhouse gas study. London: IMO, 2020.

- 
- [22] Li H, Jia P, Wang X, et al. Ship carbon dioxide emission estimation in coastal domestic emission control areas using high spatial-temporal resolution data: A China case. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 232: 106419.
- [23] Corbett J J, Wang H, Winebrake J J. The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, 14(8): 593-8.
- [24] Tetra Tech I. Draft, use of shore-side power for ocean-going vessels, white paper. Authorities A A O P, 2007.
- [25] Central Committee for Navigation on the Rhine River. Possibilities for reducing fuel consumption and greenhouse gas emissions from inland navigation. 2012.
- [26] Vaishnav P, Fischbeck P S, Morgan M G, et al. Shore Power for Vessels Calling at U.S. Ports: Benefits and Costs. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(3): 1102-10.
- [27] Lathwal P, Vaishnav P, Morgan M G. Environmental and health consequences of shore power for vessels calling at major ports in India. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(6): 064042.
- [28] Hall W J. Assessment of CO<sub>2</sub> and priority pollutant reduction by installation of shoreside power. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(7): 462-7.
- [29] Winkel R, Weddige U, Johnsen D, et al. Shore Side Electricity in Europe: Potential and environmental benefits. *Energy Policy*, 2016, 88: 584-93.
- [30] 交通运输部水运科学研究院. 靠港船舶使用岸电和低硫油效益分析, 2019.
- [31] Chang C, Wang C. Evaluating the effects of green port policy: Case study of Kaohsiung harbor in Taiwan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(3): 185-9.
- [32] Wang H, Mao X, Rutherford D. Costs and benefits of shore power at the port of Shenzhen. *International Council on Clean Transportation*, 2015.
- [33] 曾凡涛, 吕靖. 厦门港船舶排放清单及港口生态效率评价. *中国环境科学*, 2020, 40(05): 2304-11.
- [34] Bazari Z L T. MEPC 63/INF.2. IMO, 2011.
- [35] Meng X M a Z. Decarbonizing China's coastal shipping: The role of fuel efficiency and low-carbon fuels. *International Council On Clean Transportation*, 2022.
- [36] 田玉军, 彭传圣, 刘彩霞, 等. 中国内河航运中长期低碳发展路径研究: 交通运输部水运科学研究院, 2022.
- [37] 交通运输部. 船舶大气污染物排放控制区实施方案. 2018.
- [38] 中华人民共和国海事局. 2020 年全球船用燃油限硫令实施方案. 2019.
- [39] Lack D A, Cappa C D, Langridge J, et al. Impact of Fuel Quality Regulation and Speed Reductions on Shipping Emissions: Implications for Climate and Air Quality. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(20): 9052-60.
- [40] Xiao Q, Li M, Liu H, et al. Characteristics of marine shipping emissions at berth: profiles for particulate matter and volatile organic compounds. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18(13): 9527-45.
- [41] 本刊讯. DNV GL:脱碳将是海运业未来十年关键主题. *中国航务周刊*, 2021, (02): 21.
- [42] Central Committee for Navigation on the Rhine River. CCNR roadmap for reducing inland navigation emissions. 2022.
- [43] 国务院. 中华人民共和国航道管理条例. 1987.
- [44] 交通运输部. 水运“十四五”发展规划. 2022.
- [45] 国务院. 国内水路运输管理条例. 2012.

- 
- [46] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国港口法. 2003.
- [47] 交通运输部. 港口规划管理规定. 2007.
- [48] 交通运输部. 中华人民共和国航道管理条例实施细则. 1991.
- [49] 环境保护部. 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）（GB 15097-2016）. 2016.
- [50] 中国船级社. 船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南（GD 01）. 2020.
- [51] 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（中国第三、四阶段）（GB 20891-2014）. 2014.
- [52] 国家能源局. 船用燃料油（GB/T 17411-2015）. 2015.
- [53] 交通运输部. 全国内河航道与港口布局规划. 2007.
- [54] 国家统计局. 年度数据，运输和邮电，民用运输船舶拥有量. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [55] 中国民用航空局，国家邮政局 交 国. 中国交通运输年鉴（2022）. 北京: 人民交通出版社, 2023.
- [56] Aritua, Bernard, 卢成, RichardvanLiere, HarriedeLeijer. 新时代的蓝色航道：中国内河水运发展. 国际发展聚焦, 世界银行, 2020.
- [57] 交通运输部. 2022年沿海省际货运船舶运力分析报告. 2023.
- [58] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报（2022年）. 2022.
- [59] 中华人民共和国生态环境部，国家统计局，中华人民共和国农业农村部. 第二次全国污染源普查公报. 2020.
- [60] 黄志辉，王宏丽，唐祎骅，等. 中国船舶大气污染物排放清单报告. 北京: 环境保护部机动车排污监控中心，能源基金会，2017.
- [61] 王征，张卫，彭传圣等. 中国近周边海域船舶排放清单及排放特征研究. 交通节能与环保, 2018, 14(01):11-15.
- [62] Chen D, Wang X, Li Y, et al. Highspatiotemporal-resolution ship emission inventory of China based on AIS data in 2014, *Sci. Total Environ.*, 609, 776–787, 2017a.
- [63] Wang X, Yi W, Lv Z, et al. Ship emissions around China under gradually promoted control policies from 2016 to 2019 *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 13835–13853, 2021.
- [64] UNECE 2018. 2018 Inland Transport Statistics FOR EUROPE AND NORTH AMERICA. Available at [https://unece.org/DAM/trans/main/wp6/publications/2018\\_INLAND\\_TRANSPORT\\_STATISTIC\\_S.pdf](https://unece.org/DAM/trans/main/wp6/publications/2018_INLAND_TRANSPORT_STATISTIC_S.pdf)
- [65] NAIADESII Implementation Expert Group 2019. AN INLAND WATERWAY TRANSPORT AGENDA FOR EUROPE 2021-2027. Available at <https://www.inlandnavigation.eu/wp-content/uploads/2021/06/N3-recommendations-20191220.pdf>
- [66] Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR) 2022. CCNR roadmap for reducing inland navigation emissions. Available at [https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap\\_en.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap_en.pdf)
- [67] Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR) 2022. Second revised draft CCNR roadmap for reducing inland navigation emissions, as envisaged by the Mannheim Declaration. Available at <https://www.cemr.eu/res/CCNR%20roadmap%20for%20reducing%20inland%20navigation%20emissions%20-%20Jul%202022.pdf>
- [68] Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR) 2021. 2021 edition of the European Inland Navigation Market Observation report. Available at [https://www.ccnr.eu/files/documents/om/om21\\_II\\_en.pdf](https://www.ccnr.eu/files/documents/om/om21_II_en.pdf)
- [69] MILOSLAVSKAYA, Svetlana & Plotnikova, Elena. (2018). Current situation and optimization of inland waterway infrastructure financing. *Transport Problems*. 13. 51-63. 10.20858/tp.2018.13.3.5.
- [70] Danube Commission 2023. D2.1 Report on the zero – emission strategy IWT, update of STEERER work. Available at [https://www.danubecommission.org/uploads/doc/Platina3/02\\_Fleet/D2.1-Zero-emission-strategy-SRIA-ZEWT-IWT-incl-disclaimer.pdf](https://www.danubecommission.org/uploads/doc/Platina3/02_Fleet/D2.1-Zero-emission-strategy-SRIA-ZEWT-IWT-incl-disclaimer.pdf)



- 
- [71] Panagakos, G. (2016). Emissions and Inland Navigation. In Green transportation logistics (chapter 14 pp. 479- 514). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3_4)
- [72] European Parliament 2022. Inland waterway transport in the EU. Available at [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698918/EPRS\\_BRI\(2022\)698918\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698918/EPRS_BRI(2022)698918_EN.pdf)
- [73] World Bank 2015. Inland Waterways Transport : Good Practice Manual and Reference Guide . Available at <https://documents1.worldbank.org/curated/en/332181538034793651/pdf/Inland-Waterway-Transport-Good-Practice-Manual-Reference-Guide-2015.pdf>
- [74] UNECE 2020. White Paper on the Progress, Accomplishment and Future of Sustainable Inland Water Transport. Available at <https://unece.org/transport/publications/white-paper-progress-accomplishment-and-future-sustainable-inland-water>
- [75] European Commission & Ce Delf 2011. Medium- and long-term perspectives of Inland Waterway Transport in the European Union. Available at <https://cedelft.eu/publications/medium-and-long-term-perspectives-of-inland-waterway-transport-in-the-european-union/>
- [76] EU Horizon 2020 research and innovation program 2015. List of operational profiles and fleet families Identification of the fleet, typical fleet families & operational profiles on European inland waterways. Available at: [https://www.prominent-iwt.eu/wp-content/uploads/2015/06/2015\\_09\\_23\\_PROMINENT\\_D1.1-List-of-operational-profiles-and-fleet-families-V2.pdf](https://www.prominent-iwt.eu/wp-content/uploads/2015/06/2015_09_23_PROMINENT_D1.1-List-of-operational-profiles-and-fleet-families-V2.pdf)
- [77] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL FOR MOBILITY AND TRANSPORT 2020. LIST OF EU LEGISLATION IN THE FIELD OF INLAND WATERWAYS. Available at: [https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Vodni-doprava/Legislativa/Dopravni-politika-EU-vnitrozemska-vodni-doprava/summary\\_of\\_eu\\_legislation\\_in\\_the\\_field\\_of\\_inland\\_waterways.pdf.aspx](https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Vodni-doprava/Legislativa/Dopravni-politika-EU-vnitrozemska-vodni-doprava/summary_of_eu_legislation_in_the_field_of_inland_waterways.pdf.aspx)
- [78] UNECE 2011. White Paper on Efficient and Sustainable Inland Water Transport in Europe. Available at: <https://unece.org/info/publications/pub/2673>
- [79] European Commission 2016. 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions/fit-55-delivering-eus-2030-climate-target-way-climate-neutrality>
- [80] Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR) 2021. STUDY ON FINANCING THE ENERGY TRANSITION TOWARDS A ZERO-EMISSION EUROPEAN IWT SECTOR. [https://www.ccr-zkr.org/files/documents/EtudesTransEner/Deliverable\\_RQ\\_I.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/documents/EtudesTransEner/Deliverable_RQ_I.pdf)
- [81] Némethy, S.A.; Ternell, A.; Bornmalm, L.; Lagerqvist, B.; Szemethy, L. Environmental Viability Analysis of Connected European Inland–Marine Waterways and Their Services in View of Climate Change. *Atmosphere* 2022, 13, 951. <https://doi.org/10.3390/atmos13060951>
- [82] Mako, Peter, and Andrea Galieriková. "Inland navigation on the Danube and the Rhine waterways." *Transportation Research Procedia* 55 (2021): 10-17.
- [83] Činčurak Erceg, Biljana. "Legal framework of European inland waterways and Croatian legislation on inland waterways navigation–problems of non-harmonized rules." *European Scientific Journal* (2018).
- [84] Jessen, Henning. (2015). The Multilayered Institutional Framework of Inland Waterway Transport in Europe - Challenges in Promoting River Transportation. *MarIus* (Scandinavian Institute of Maritime Law) 0332-7868. *MarIus* No. 459.
- [85] UNECE 2019. European Agreement on Main Inland Waterways of International Importance (AGN). Available at: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2019/wp24/II.4-AGN.pdf>
- [86] Hendrickson, Chris & Boske, Leigh & Bronzini, Michael & Corbett, James & Dickey, G. & Kruse, C. & McMullen, B. & Shabman, Leonard & III, Thomas & Godwin, Stephen & Welch-Ross, Melissa & Mathis, Amelia & Sauls, Claudia. (2015). TRB Special Report 315: Funding and Managing the U.S. Inland Waterways System: What Policy Makers Need to Know.
- [87] Canter, Larry W., Manroop K. Chawla, and Carl Thomas Swor. 2011. Review of USACE Institutional Information Related to Evaluation of Incremental Changes in Water Resources Planning. ERDC/CERL TR-11-3. Champaign, IL: U.S. Army Engineer Research and Development Center – Construction Engineering Research Laboratory
- [88] Uzarski, Donald & McKay, David & Foltz, Stuart. (2009). Role of Inspection and Condition Assessment in U.S. Army Corps of Engineers Civil Works Infrastructure Management: Current Practices and Opportunities for the Future. 78.

- 
- [89] Talley, Wayne & Jin, Di & Kite-Powell, Hauke. (2005). The US Coast Guard Vessel Inspection Programme: A Probability Analysis. *Maritime Economics and Logistics*. 7. 156-172. 10.1057/palgrave.mel.9100127.
- [90] US Coast Guard website. Available at <https://uscga.edu/careers/roles-and-missions/>
- [91] Cairns, William. (2005). AIS and Long-Range Identification & Tracking. *Journal of Navigation*. 58. 181 - 189. 10.1017/S0373463305003267.
- [92] Čampara, Leo & Frančić, Vlado & Maglic, Lovro & Hasanspahić, Nermin. (2019). Overview and Comparison of the IMO and the US Maritime Administration Ballast Water Management Regulations. *Journal of Marine Science and Engineering*. 7. 283. 10.3390/jmse7090283.
- [93] National Vessel Movement Center Website. Available at: <https://www.nvmc.uscg.gov>
- [94] EPA website. Available at <https://www.epa.gov/aboutepa/our-mission-and-what-we-do>
- [95] Segal, Cecilia. (2015). CLIMATE REGULATION UNDER THE CLEAN AIR ACT IN THE WAKE OF UTILITY AIR REGULATORY GROUP V. EPA. *The Harvard environmental law review: HELR*. 39. 1-8.
- [96] Rechtschaffen, C. (2003). Enforcing the Clean Water Act in the twenty-first century: Harnessing the power of the public spotlight. *Ala. L. Rev.*, 55, 775.
- [97] Miller CA. Fifty years of EPA science for air quality management and control. *Environ Manage*. 2021 Jun;67(6):1017-1028. doi: 10.1007/s00267-021-01468-9. Epub 2021 Apr 9. PMID: 33837478; PMCID: PMC8106583.
- [98] Chaudet, Roy & Clark, Chris. (2008). Using Exchange Network and CDX Services: Key Steps for Exchanging Emissions Inventory Data.
- [99] Rosario, Joao Lopes do., "The role of maritime administration in ensuring quality shipping services: a guide to Cape Verde Maritime Administration" (2000). World Maritime University Dissertations. 156. [http://commons.wmu.se/all\\_dissertations/156](http://commons.wmu.se/all_dissertations/156)
- [100] Maritime Administration website. Available at: <https://www.maritime.dot.gov/about-us>
- [101] USACE website. Available at: <https://www.mvr.usace.army.mil/Portals/48/docs/regulatory/Permits/ILApplicationPacket2011.doc>
- [102] Robert Sulski# Ronald French. USE ATTAINABILITY ANALYSIS OF THE CHICAGO AREA WATERWAY SYSTEM. Alexandria, VA 22314-1994, USA: Water Environment Federation, 2018. Web. 31 May. 2023. <https://www.accesswater.org?id=-290339>
- [103] Anas S. Alamoush, Aykut I. Ölçer, Fabio Ballini, Ports' role in shipping decarbonisation: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emissions reduction, *Cleaner Logistics and Supply Chain*, Volume 3, 2022,100021, ISSN 2772-3909.
- [104] Kapaciauskaite, Ieva. "Environmental governance in the Baltic Sea Region and the role of non-governmental actors." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 14 (2011): 90-100.
- [105] Frank J. Trelease, Water Rights of Various Levels of Government - States' Rights vs. National Powers, 19 Wyo. L.J. 189 (1965) Available at: <https://scholarship.law.uwyo.edu/wlj/vol19/iss3/1>
- [106] Fredriksson, Per G., and Daniel L. Millimet. "Is there a 'California effect' in US environmental policymaking?" *Regional Science and Urban Economics* 32.6 (2002): 737-764.
- [107] Vandenberg JJ. The role of air quality management programs in improving public health: a brief synopsis. *J Allergy Clin Immunol*. 2005 Feb;115(2):334-6. doi: 10.1016/j.jaci.2004.11.038. PMID: 15696091.
- [108] Smith, & Allen, Richard. (2023). The Jones Act: an economic and political evaluation.
- [109] Rindner, Leah. (2011). Forcing Adaptation through the Rivers and Harbors Act. *Ecology Law Quarterly*. 38.
- [110] Office for Coastal Management, 2023: Rivers and Harbors Act, <https://www.fisheries.noaa.gov/inport/item/59646>.
- [111] Allen, Craig. (2014). U.S. Coast Guard Amends Inland Rules of the Road. *SSRN Electronic Journal*. 10.2139/ssrn.2464116.
- [112] Burnett, Miles. (1998). The Pollution Prevention Act of 1990: A Policy Whose Time Has Come or Symbolic Legislation? *Environmental Management*. 22. 213-224. 10.1007/s002679900098.
- [113] EPA 1990: Pollution Prevention Act <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-pollution-prevention-act>

- 
- [114] Fowler, Nicholas Luke, "States and Federal Environmental Policy: A Hierarchical Linear Model of CAA And
- [115] CWA Implementation" (2013). Theses and Dissertations. 4045.
- [116] Kapp, Robert. (2014). Clean Air Act (CAA), US. Encyclopedia of Toxicology. 10.1016/B978-0-12-386454-3.00829-0.
- [117] Walsh, Riley & Ward, Adam. (2022). An overview of the evolving jurisdictional scope of the U.S. Clean Water Act for hydrologists. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. 9. 10.1002/wat2.1603.
- [118] US. CONGRESS: Inland Waterway Revenue Act: Available at: <https://www.congress.gov/95/statute/STATUTE-92/STATUTE-92-Pg1693.pdf>
- [119] United States Government Accountability Office 2016. INLAND WATERWAYS FUEL TAX. Available at <https://www.gao.gov/assets/680/678785.pdf>
- [120] Congress (2011), Harbor Maintenance Trust Fund Expenditures. Available at: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R41042>
- [121] Congress (2020), Distribution of Harbor Maintenance Trust Fund Expenditures. Available at: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11645>
- [122] US senate Committee on Environment & Public Works, The Water Resources Development ACT of 2022. Available at: <https://www.epw.senate.gov/public/index.cfm/the-water-resources-development-act-of-2022>
- [123] Şahin, Volkan & Bilgili, Levent & Vardar, Nurten. (2020). AN EXAMINATION OF FOCUS PROGRESS OF STUDIES ON MARPOL ANNEX IV AND ANNEX VI: A REVIEW. Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi. 47-64. 10.18613/deudfd.775129.
- [124] EPA, Designation of North American Emission Control Area to Reduce Emissions from Ships . Available at: Designation of North American Emission Control Area to Reduce Emissions from Ships: Regulatory Announcement (EPA-420-F-10-015) (March 2010)
- [125] EPA: Overview of EPA's Emission Standards for Marine Engines. Available at: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1002K40.PDF?Dockey=P1002K40.PDF>
- [126] Cornell Law School, USCG Certificate of Inspection, available at <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/46/2.01-5>
- [127] National Waterway Foundation (2014), Inland Navigation in the United States an Evaluation of Economic Impacts and the Potential Effects of Infrastructure Investment. Available at: <https://nationalwaterwaysfoundation.org/file/4/inlandnavigationintheusdecember2014.pdf>
- [128] Asborno, M. I. (2020). Commodity-based Freight Activity on Inland Waterways through the Fusion of Public Datasets for Multimodal Transportation Planning. Theses and Dissertations Retrieved from <https://scholarworks.uark.edu/etd/3760>
- [129] USACE 2021. WATERBORNE TRANSPORTATION LINES OF THE UNITED STATES USACE 2021. Available at the USACE digital Library <https://usace.contentdm.oclc.org/>
- [130] National Waterways Foundation (2021)/ A Modal Comparison of Domestic Freight Transportation Effects on The General Public: 2001–2019 National Waterways Foundation. Available at <https://www.nationalwaterwaysfoundation.org/file/28/tti%202022%20final%20report%202001-2019%201.pdf>
- [131] USACE (2021). The U.S. Coastal and Inland Navigation System 2021 Navigation and Civil Works Decision Support Center U.S. Army Corps of Engineers. U.S. Army Corps of Engineers Digital Library.
- [132] USACE (2020). The U.S. Coastal and Inland Navigation System 2020 Navigation and Civil Works Decision Support Center U.S. Army Corps of Engineers. U.S. Army Corps of Engineers Digital Library.
- [133] Bureau of Shipping (ABS), 2021. Decarbonization of the Inland Waterway Sector in the United. Prepared by Vanderbilt University
- [134] Blue Sky Maritime Coalition (2023), PATHWAYS TO NET-ZERO 2050 IN THE NORTH AMERICAN MARINE SHIPPING INDUSTRY: Optimizing Technology and Operations to Achieve Emission Reductions. Available at: <https://www.bluesky-maritime.org/pathways-to-net-zero-2050-in-the-north-american-marine-shipping-industry>
- [135] UMAS – Future Maritime Fuels in the USA: Options and their Potential Pathways, January 2022. Available at [https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2022/04/oc\\_fuels\\_final\\_report\\_20220117.pdf](https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2022/04/oc_fuels_final_report_20220117.pdf)

- 
- [136] EPA (2020), CATEGORY 1 AND 2 COMMERCIAL MARINE VESSEL 2020 EMISSIONS INVENTORY. Prepared by Eastern Research Group, Available at: [https://gaftp.epa.gov/air/nei/2020/doc/supporting\\_data/nonpoint/CMV/2020NEI\\_C1C2\\_Documentation.pdf](https://gaftp.epa.gov/air/nei/2020/doc/supporting_data/nonpoint/CMV/2020NEI_C1C2_Documentation.pdf)
- [137] 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).
- [138] 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): 6075-6093.
- [139] 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*, 2017a, 609: 776-787.
- [140] Huang L, Wen Y, Geng X, et al. Integrating multi-source maritime information to estimate ship exhaust emissions under wind, wave and current conditions [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 59: 148-159.
- [141] 生态环境部. 2017年中国生态环境统计年报 [R/OL]. (2021-08-27). [https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202108/t20210827\\_860994.shtml](https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202108/t20210827_860994.shtml).
- [142] 生态环境部. 2018年中国生态环境统计年报 [R/OL]. (2021-08-27). [https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202108/t20210827\\_861011.shtml](https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202108/t20210827_861011.shtml).
- [143] 生态环境部. 2019年中国生态环境统计年报 [R/OL]. (2021-08-27). [https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202108/t20210827\\_861012.shtml](https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202108/t20210827_861012.shtml).
- [144] 生态环境部. 2019年中国生态环境统计年报 [R/OL]. (2021-08-27). [https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t20220218\\_969391.shtml](https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t20220218_969391.shtml).
- [145] Shan Y, Huang Q, Guan D, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016–2017 [J]. *Scientific Data*, 2020, 7 (1): 54.
- [146] Lv Z, Wang X, Deng F, et al. Source–Receptor Relationship Revealed by the Halted Traffic and Aggravated Haze in Beijing during the COVID-19 Lockdown [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54 (24): 15660-15670.
- [147] Wang X, Yi W, Lv Z, et al. Ship emissions around China under gradually promoted control policies from 2016 to 2019[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(18): 13835-13853.
- [148] 徐文文, 殷承启, 许雪记, 等. 江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征. *环境科学*, 2019, 40(06): 2595-606.
- [149] 浙江省交通运输厅. 浙江省水运发展“十四五”规划. 2021.
- [150] 江苏省交通运输厅. 江苏省“十四五”水运发展规划 (苏交港航〔2021〕35号). 2021.
- [151] 安徽省交通运输厅. 安徽省交通运输“十四五”发展规划. 2021.
- [152] 湖北省交通运输厅. 湖北省水运发展“十四五”规划. 2022.
- [153] 江西省交通运输厅. 江西省水运“十四五”发展规划. 2021.
- [154] 重庆市人民政府. 重庆市综合交通运输“十四五”规划 (2021—2025年). 2021.
- [155] 四川省交通运输厅. 四川省内河水运发展规划 (2022~2035年). 2022.
- [156] 湖南省交通运输厅. 湖南省“一江一湖四水”水运发展规划. 2021.
- [157] 贵州省发展和改革委员会. 贵州省“十四五”综合交通运输体系发展规划. 2022.
- [158] 云南省交通运输厅. 云南省水路交通“十四五”发展规划. 2021.
- [159] EPA. Proposal to Designate an Emission Control Area for Nitrogen Oxides, Sulfur Oxides and Particulate Matter. 2009.
- [160] 长江航务管理局. 长江经济带运输船舶岸电系统受电设施改造推进方案. 2021.