

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

China Waterborne Transport Research Institute

2022 年 11 月

项目委托单位： 国际清洁交通委员会（ICCT）

项目承担单位： 交通运输部水运科学研究院

项目承担部门： 环境保护与节能技术研究中心

承担部门负责人： 陈俊峰（主任，教授级高工）

项目审核人： 杨献朝（总工、研究员）

项目负责人： 田玉军（副研究员、博士）

主要研究编制人 彭传圣（研究员）

员 ： 刘彩霞（助理研究员）

任利利（助理研究员）

段君雅（助理研究员）

目录

1.引言	1
1.1 国际社会大力推动航运减碳战略	1
1.2 中国积极开展“双碳”背景下的航运减碳工作	2
2.中国内河航运发展现状与趋势	6
2.1 中国内河航运发展现状	6
2.1.1 航道	6
2.1.2 港口	8
2.1.3 船舶	10
2.1.4 运输量	12
2.2 中国内河航运发展趋势	15
2.2.1 客运周转量发展趋势	18
2.2.2 货物周转量发展趋势	18
3.中国内河船舶碳排放及预测	20
3.1 碳排放控制情景设计	20
3.1.1 基准情景	20
3.1.2 2°C-情景	21
3.1.3 1.5°C-情景	24
3.2 减排措施情境	25
3.2.1 船舶能耗强度基本不变	26
3.2.2 老旧船舶淘汰，船舶的标准化	26
3.2.3 船舶大型化	27
3.2.4 蓄电池动力船及低碳燃料应用	28
3.2.5 岸电设施及应用	30
3.2.6 营运能效提高措施	31
3.3 核算方法	35
3.3.1 CO ₂ 排放量	35
3.3.2 船舶能耗强度	36

3.4 核算结果.....	36
3.4.1 货物周转量趋势	36
3.4.2 船舶能耗强度（2008-2021 年）	38
3.4.4 船舶能耗强度预测.....	39
3.4.5 船舶碳排放量预测.....	39
3.5 讨论.....	42
3.5.1 CO ₂ 排放量趋势	42
3.5.2 减排措施	43
3.5.3 减排目标的实现情况	45
4.内河航运中长期低碳发展路径结论和建议	46
4.1 结论	46
4.2 建议	47
5.参考文献.....	48

1.引言

1.1 国际社会大力推动航运减碳战略

当前，世界各国依据《巴黎协定》制定各自减排目标和行动计划，通报各自 2030 年的减排目标和行动，并提交各自到 21 世纪中叶的温室气体低排放发展战略。

因交通运输业碳排放规模大、占比高、增速快、发展强劲、点多、线长、面广、移动性强等特点，针对交通运输业的减排目标和计划机制尚未统一，特别是航运业。虽然与道路、铁路和航空相比，水路运输温室气体排放强度最少（船舶 $2\text{gCO}_2/\text{tkm}$ 、航空 $1700\text{gCO}_2/\text{tkm}$ 、客运 $20\text{-}300\text{ gCO}_2/\text{tkm}$ ）（《低碳交通》），但总排放量大，增长快，减排难度大。2018 年全球航运业温室气体排放总量 $10.76\times 10^8\text{t}$ （其中 CO_2 排放量为 $10.56\times 10^8\text{t}$ ，占温室气体排放总量的 98%），占全球温室气体排放总量的 2.89%（GHG4，IMO 第四次温室气体研究报告，MEPC75/7/15）；2019 年全球船队的燃油消耗量预计为 $2.65\times 10^8\text{t}$ ，碳排放量预计为 $8.19\times 10^8\text{t}$ 。预计到 2050 年航运业温室气体排放量约为 $25\times 10^8\text{t}$ ，占全球总排放量的 3.5%（GHG4）。

由于航运业具有高度流动性和跨国性特征，其温室气体排放责任难以归属至某一国家或地区，因此航运业并未纳入巴黎协定框架，属于备忘项目，不属于国家排放清单的统计范畴，《京都议定书》也没有将远洋船舶纳入到义务减排的框架中，而是将这个权力赋予了国际海事组织（IMO），力求限制或减少海运燃油消耗产生的温室气体排放。

IMO 进行了多次会议，旨在探讨全球远洋船舶温室气体减排措施。2011 年通过 MEP.203（62）决议将“船舶能效规则纳入 MAPROL 73/78 公约附则 VI，确定了新船船舶能效设计指数（EEDI）和营运船舶能效管理计划（SEEMP），2013 年 1 月 1 日生效。2018 年 MEPC.304(72)号决议通过了《IMO 船舶温室气体减排初步战略》，

确定了温室气体减排的量化目标及阶段性减排措施。2030年，与2008年相比，CO₂排放强度降低约40%；2050年，CO₂排放强度降低约70%，排放总量降低50%；本世纪内实现零碳排放。2019年通过决议MEPC.324(75)对某些船型的EEDI在第三阶段要求的时间期限和能耗降低比率进行了调整。2021年6月海环会76次会议通过MARPOL附则VI第四章国际航运碳强度规则的修正案引入船舶能效指数（EEXI）和碳强度指标（CII）评级，2022年11月1日正式生效；通过IMO温室气体减排战略路线图短期措施，从2023年开始生效。2021年11月召开的海环会77次会议审议了IMO温室气体减排初步战略修订（主要针对2050年减排目标）及中长期温室气体减排市场机制措施，并就修订后的设立国际海事研究与发展委员会（IMRB）和修改DCS数据收集系统的提案进行了讨论，对船舶燃料全生命周期温室气体和碳强度准则草案的制定给出了指示。

2000年6月，欧委会启动了第一个“欧洲气候变化计划”，在控制船舶温室气体排放方面，欧盟采取的政策措施包括：（1）海运温室气体排放补偿基金，船舶CO₂温室气体排放者要为其排放行为缴纳补偿费用。（2）明确船舶强制性减排目标。（3）温室气体排放交易机制（EUETS）。（4）增收航海碳排放税。2022年7月欧盟委员会发布“减碳55”（“Fit for 55”）计划，目标是在2030年底比1990年减少55%的温室气体排放量。“减碳55”计划中，欧盟FuelEU海事倡议将通过对船舶使用的燃料的温室气体含量设定最大限制，以刺激停靠欧洲港口的船只采用可持续海事燃料和零排放技术。欧盟将对海运燃料使用的温室气体强度进行越来越严格的限制，设定温室气体减排具体目标：到2025年为2%，到2030年为6%，到2035年为13%，到2040年为26%，到2045年为59%，到2050年为75%。

1.2 中国积极开展“双碳”背景下的航运减碳工作

2020年9月，中国政府在第七十五届联合国大会上承诺2030年

前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。为推动“双碳”工作，中国颁布了系列文件。2021 年 9 月，国务院印发了《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》；同年 10 月，国务院印发的《2030 年前碳达峰行动方案》提出推动运输工具装备低碳转型，构建绿色高效交通运输体系，加快绿色交通基础设施建设。同年 11 月中共中央 国务院印发的《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》提出要加快大宗货物和中长途货物运输“公转铁”、“公转水”，大力发展公铁、铁水多式联运；同年 12 月，国务院印发了《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》。交通运输部关于印发的《绿色交通“十四五”发展规划》（交规划发〔2021〕104 号）和《水运“十四五”发展规划》明确“十四五”时期新增及改善内河航道里程 5000km，内河高等级航道里程到 2025 年将达到 1.85×10^4 km，即到 2025 年将新增国家高等级航道 2500km；营运船舶单位运输周转量 CO₂ 排放较 2020 年下降 3.5%；加快现有营运船舶受电设施改造，不断提高受电设施安装比例。交通运输部印发的《内河航运发展纲要》提出了 2035 年和 2050 年建设现代化内河航运体系的发展目标，其中千吨级航道达到 2.5×10^4 km，内河货物周转量占全社会比重达 9%，打造绿色航运体系，新能源和清洁能源船占比显著提高。

为推进船舶减污降碳工作，中国印发了系列指导意见、纲要等。2015 年通过了《中华人民共和国大气污染防治法》，国家将采取财政、税收、政府采购等措施大大促进新能源在船舶上的应用推广。2018 年交通运输部发了《船舶大气污染物排放控制区实施方案》（交海发〔2018〕168 号）。同年交通运输部发布印发《船舶与港口污染防治专项行动实施方案（2015-2020 年）》，方案中提出出台船舶污染物排放、船舶发动机废气排放标准；配合国家质检总局、国家能源局修订船用燃料油强制性国家标准；加快淘汰老旧落后船舶，鼓励节能环保

船舶建造和船上污染物储存、处理设备改造；2021年起投入使用的内河船舶执行新修订的船舶污染物排放相关标准；2020年底前，完成对不符合新修订的船舶污染物排放相关标准要求的船舶有关设施、设备的配备或改造，对经改造仍不能达到要求的，限期予以淘汰；2018年底前，重点在珠三角、长三角、环渤海（京津冀）排放控制区主要港口推进建设岸电设施，鼓励其他港口积极推进船舶靠港使用岸电。2019年，交通运输部印发了《关于建设世界一流港口的指导意见》《关于推进长江航运高质量发展的意见》《智能航运发展指导意见》和《关于推进港口转型升级的指导意见》，2020年又印发了《内河航运发展纲要》。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CO₂排放限值及验证方法》和《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》，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》《船舶二氧化碳排放监测、报告和验证实施指南》和《水运企业船舶碳排放核查技术规范》等。

交通运输业碳排放占中国全社会碳排放的比重持续保持增长。2019交通领域的碳排放占中国总排放比例约为10%，其中水运碳排放量占交通领域碳排放的6.5%（李晓易等，2021）。中国内河航运发达，内河运输在水运货物货运量中所占比例约为50%。但内河船舶类型多，数量多，小型船舶占比高，航运企业多且规模小，减碳难度大（韦之杰，2022）；综合看来，（1）内河港口专业化程度低，全

国万吨级泊位专业化仅有 52.9%，内河泊位专业化低；（2）内河高等级航道占比少，标准化和智能化程度低；（3）船型标准化工作仍需加强。经过 30 多年的努力，内河船舶标准化局部成效明显，2019 年交通运输部颁布的《长江航运高质量发展指导意见》提出“到 2025 年，长江干线过闸运输船舶船型标准化率达到 95%；到 2035 年，达到 100%”。

2.中国内河航运发展现状与趋势

2.1 中国内河航运发展现状

中国是世界上最早发展水路运输和内河航道里程最长、货运量最大的国家。有长江（长度 6300km，流域面积 1782715km²）、黄河（5464km，流域面积 752773km²）、珠江（长度 2214km，流域面积 442527km²）、松花江（2308km，流域面积 561222km²）、辽河（1390km，流域面积 221097km²）、海河和淮河等水系（水利部），其中，流域面积 50 km² 的河流的 45203 条，总长度 150.85×10⁴km；100 km² 以上的河流有 22909 条，总长度 111.46×10⁴km；1000 km² 以上的河流有 2221 条，总长度 38.65×10⁴km；10000 km² 以上的河流有 228 条，总长度 13.25×10⁴km（中华人民共和国水利部、中华人民共和国国家统计局）。



图 2.1-1 中国水系分布

2.1.1 航道

中国内河航运发达。航道总里程约 12×10⁴km，其中，约 7×10⁴km

可通航机动船。根据《全国内河航道与港口布局规划》，中国有“两横一纵两网十八线”高等级航道。其中，长江干线、西江干线、京杭运河、长江三角洲和珠江三角洲高等级航道网，岷江、嘉陵江、乌江、湘江、沅水，汉江，江汉运河，赣江，信江，合裕线，右江、北盘江—红水河、柳江—黔江、淮河、沙颍河、黑龙江、松花江和闽江等主要干支流高等级航道。2020年末全国内河航道通航里程 1.28×10^5 km（图2.1-2）。其中，等级航道里程 6.73×10^4 km，占总里程比重为52.7%；三级及以上航道里程 1.44×10^4 km，占总里程比重为11.3%。各等级内河航道通航里程分别为：一级航道1840km，二级航道4030km，三级航道8514km，四级航道 1.12×10^4 km，五级航道7622km，六级航道 1.72×10^4 km，七级航道 1.69×10^4 km。约50%的航道是非等级航道，等外航道里程 6.04×10^4 km。

分析中国航道年变化趋势，大致可分两个阶段。2010-2015年航道发展速度快，航道总里程增加了约25000km；2015-2020年内河航道发展平稳，航道里程部分年份稍有降低（图2.1-3）。

分析主要水系的内河航道通航里程，长江水系 6.47×10^4 km，珠江水系 1.68×10^4 km，黄河水系3533km，黑龙江水系8211km，京杭运河1438km，闽江水系1973km，淮河水系 1.74×10^4 km（2020年交通运输行业发展统计公报）。

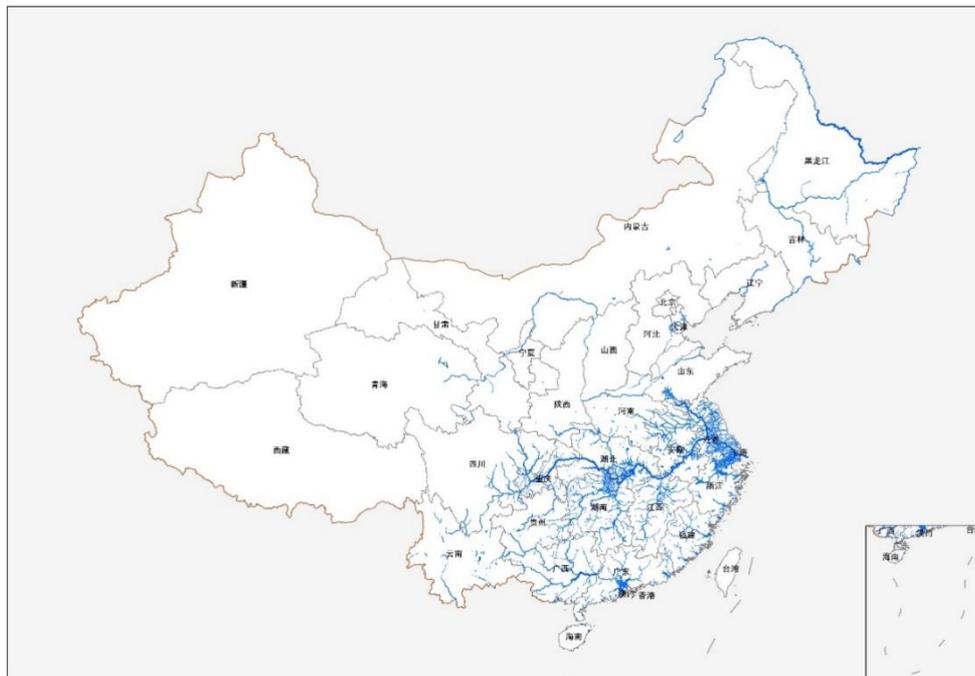


图 2.1-2 中国航道分布

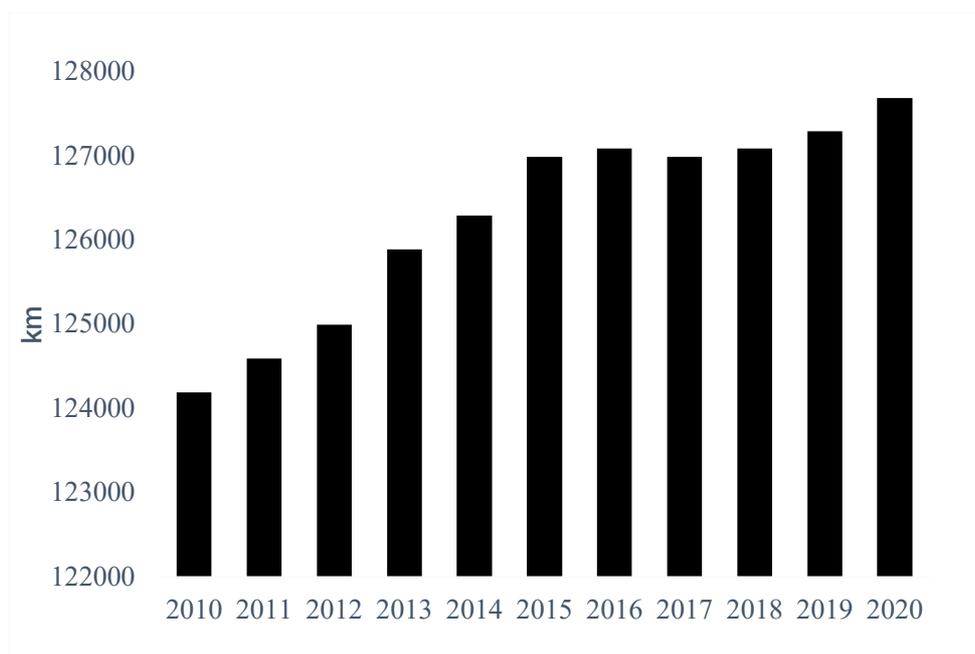


图 2.1-3 2010-2020 年中国内河航道通航里程

2.1.2 港口

截至 2020 年末，全国内河港口共有生产用码头泊位 16681 个，含万吨级及以上泊位 454 个，其中，1-3 万吨级（不含 3 万）泊位 193 个，3-5 万吨级（不含 5 万）泊位 124 个，5-10 万吨级（不含 10 万）

泊位 125 个，10 万吨级及以上泊位 12 个（图 2.1-4）。

内河港口主要分布在长江、珠江、京杭运河及淮河、黑龙江及松辽水系（图 2.1-5 和图 2.1-6）。

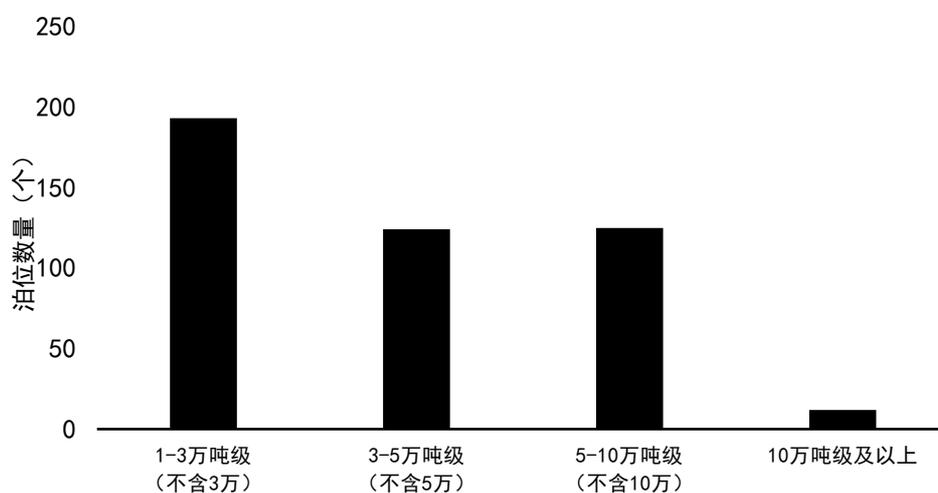


图 2.1-4 2020 年全国内河港口万吨级及以上泊位数量

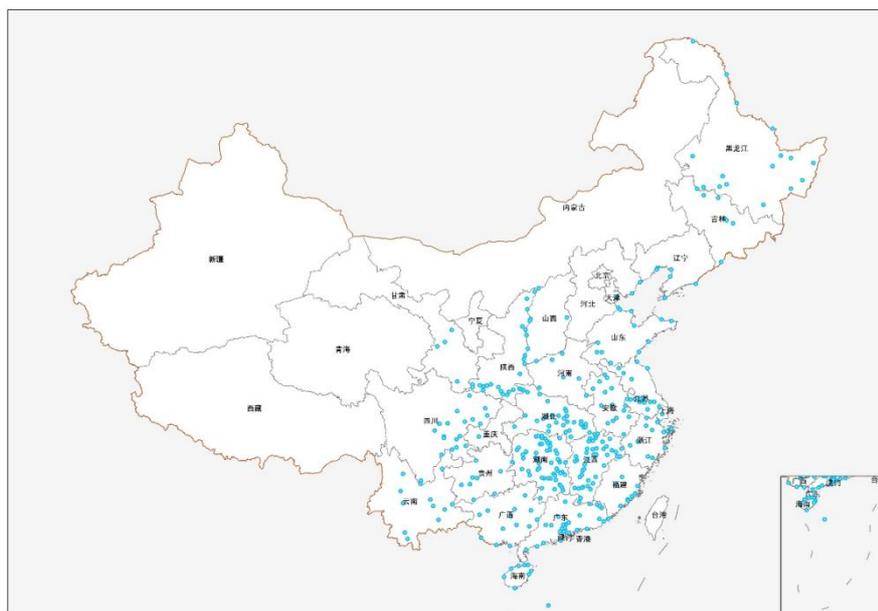


图 2.1-5 中国港口分布

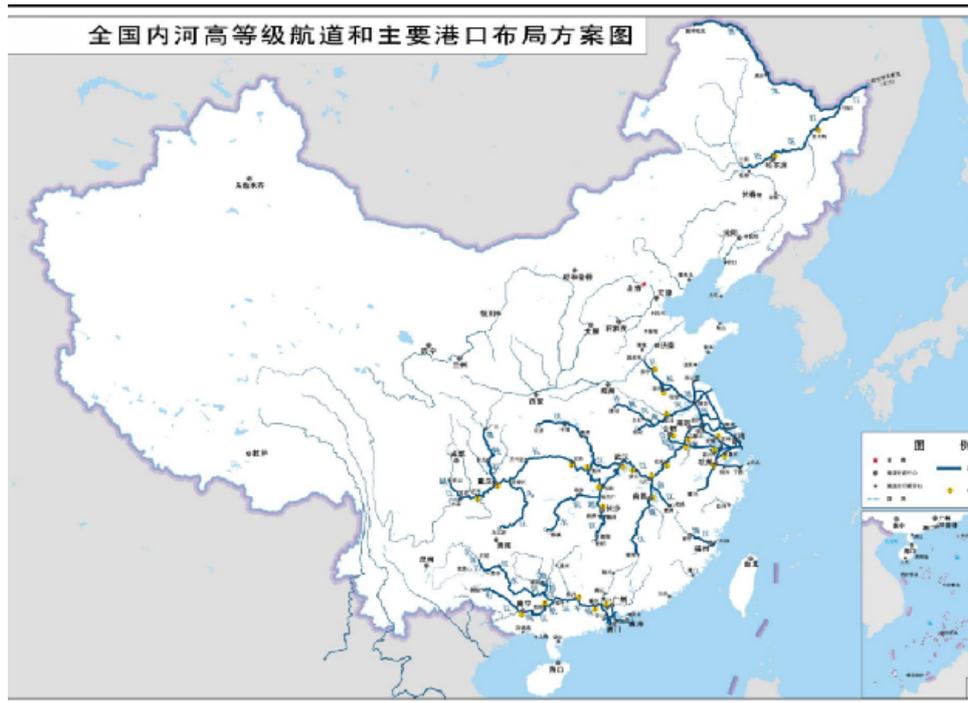


图 2.1-6 全国内河高级航道和主要港口布局方案

2.1.3 船舶

截至 2020 年末，全国拥有水上运输船舶 12.68×10^4 艘，净载重量 27060.16×10^4 t，载客量 85.99×10^4 客位，集装箱箱位 293.03×10^4 TEU；内河运输船舶 11.5×10^4 艘，约占总运输船舶的 90.69%，是沿海运输船舶数量的 11.1 倍，2020 年相比 2010 年船舶数量下降了 29%；内河净载重量 13673.02×10^4 t，是 2010 年的 1.5 倍（图 2.1-7）；内河载客量 60.07×10^4 客位，2020 年相比 2010 年载客量下降了 27%；内河集装箱箱位 51.31×10^4 TEU，2020 年相比 2010 年集装箱箱位增加了 301%（图 2.1-8）。内河船舶平均吨位从 2010 年的 448 净载重吨增长到 2020 年的 1188 净载重吨，增长率达 165%。

2010 年以来，内河运输船舶数量呈下降趋势，但船舶吨位逐年增加，船舶大型化发展趋势明显，船舶载客量也呈现下降趋势，但内河集装箱箱位却有稳步增长。

进一步分析内河船舶的结构，内河船以货船为主，2019 年货船占内河船舶总量的 76.75%，客船占 13.25%，驳船占 8.4%，客货船和

拖船分别占 0.19%， 1.4%（图 2.1-9）。

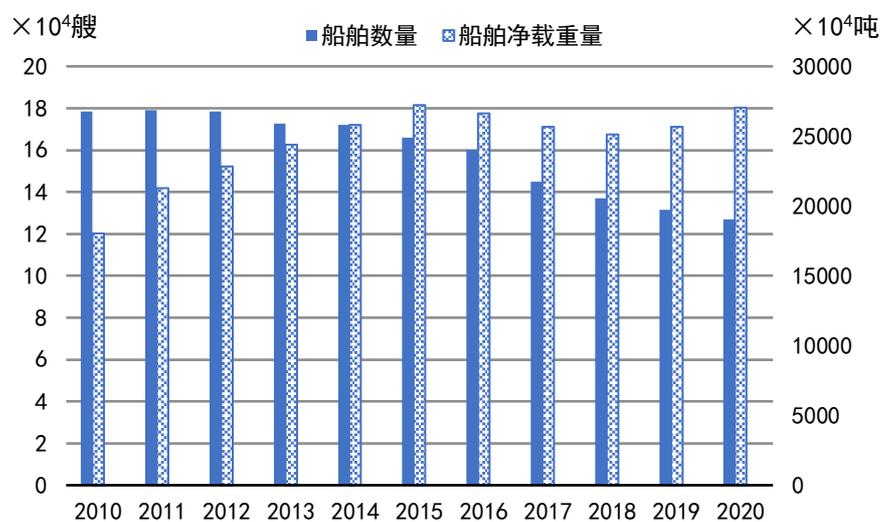


图 2.1-7 2010-2020 年中国内河船舶数量及船舶净载重量

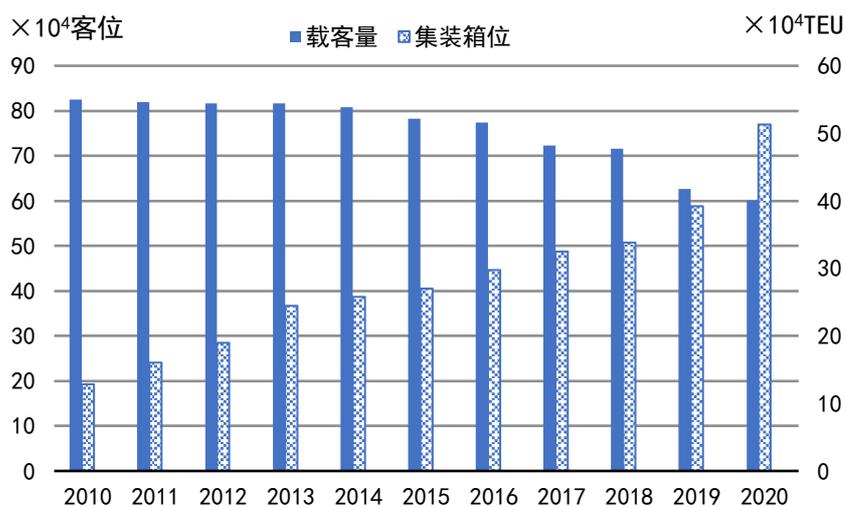


图 2.1-8 2010-2020 年中国内河船舶载客量及集装箱位

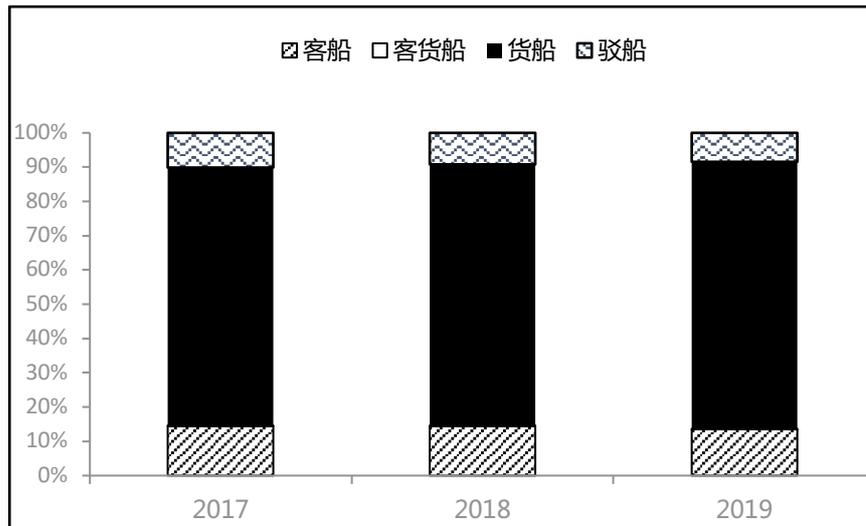


图 2.1-9 2017-2019 年内河运输工具占比

2.1.4 运输量

中国内河运输快速增长，主要为货物运输量的快速增长。2010-2020 年，内河港口货物增长了 54.2%，其中 2010-2017 年货物吞吐量呈持续增长趋势，2017-2019 年货物吞吐量年变化不大（图 2.1-11）。近些年内河集装箱运输量呈快速发展态势，2019 年集装箱吞吐量较 2010 年增长约 105%，2020 年完成集装箱铁水联运量 687×10^4 TEU，增长了 29.6%（图 2.1-12）。内河客运量总体呈下降趋势（图 2.1-10）。

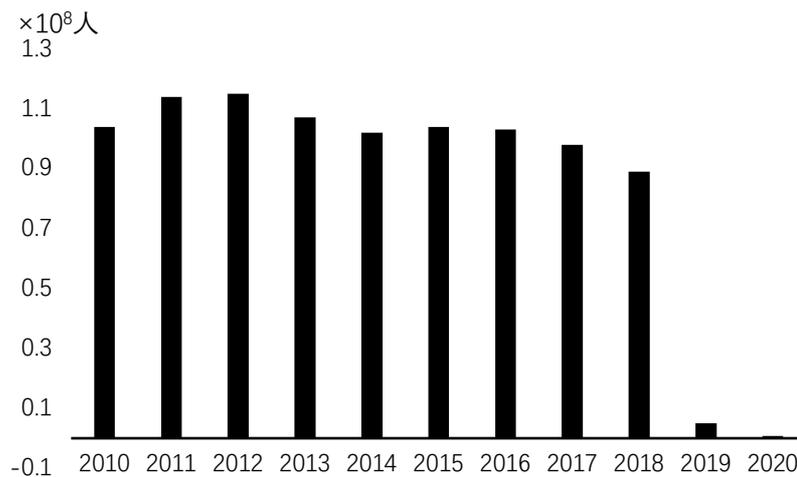


图 2.1-10 内河旅客吞吐量

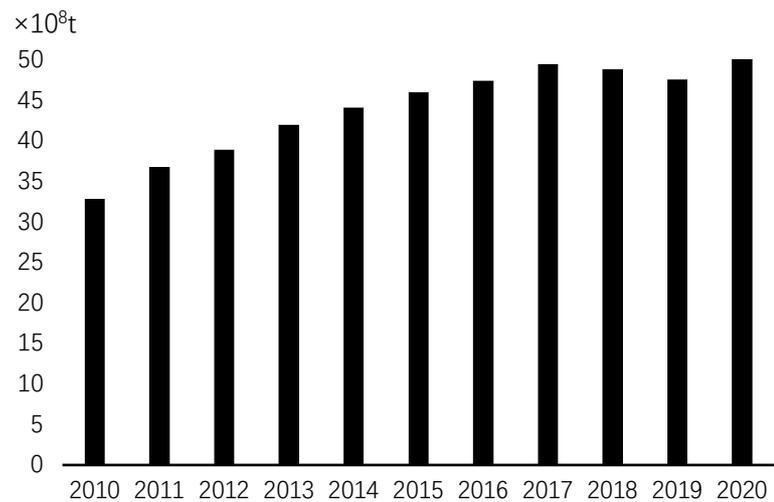


图 2.1-11 内河货物吞吐量

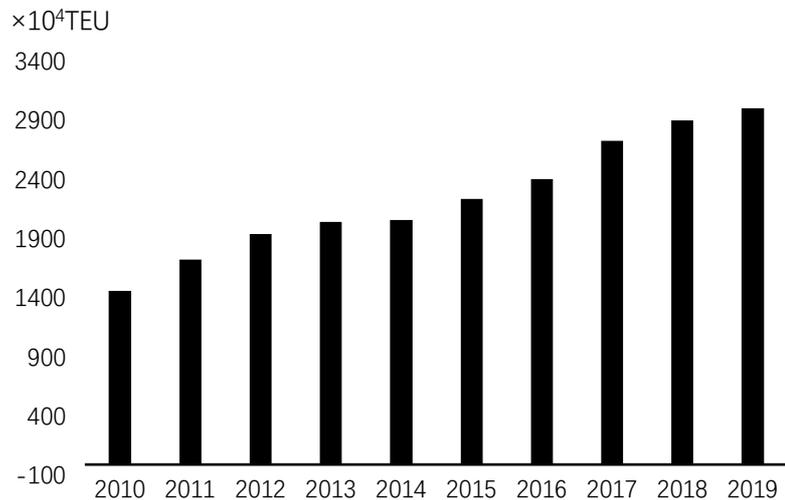


图 2.1-12 内河集装箱吞吐量

近几年，内河旅客和货物周转量在水路运输中占比变化趋势不明显。2019 年全国完成营业性货运量 $462.24 \times 10^8 \text{t}$ ，完成货物周转量 $194044.56 \times 10^8 \text{tkm}$ 。水路（内河，沿海和远洋）完成货运量 $74.72 \times 10^8 \text{t}$ ，货物周转量 $103963.04 \times 10^8 \text{tkm}$ ，水运货物周转量在营运货物周转量中占比较大，约占 53.58%，完成货物周转量 $103963.04 \times 10^8 \text{tkm}$ 。其中，内河运输完成货运量 $39.13 \times 10^8 \text{t}$ ，货物周转量 $16302.01 \times 10^8 \text{tkm}$ ；沿海运输完成货运量 $27.27 \times 10^8 \text{t}$ ，货物周转量 $33603.56 \times 10^8 \text{tkm}$ ；远洋运输完成货运量 $8.32 \times 10^8 \text{t}$ ，货物周转量 $54057.47 \times 10^8 \text{tkm}$ 。内河水路货运

量约占全国货运总量的 8.46%，占水路货运总量的 52.37%，货物周转量占全国货物周转总量的 8.4%，占水路货物周转总量的 15.68%。除去远洋部分，内河占水运（内河和沿海）货物货运量的 58.93%，但周转量仅占 32.67%（表 2.1-1）。2020 年全年完成营业性货运量 $464.40 \times 10^8 \text{t}$ ，完成货物周转量 $196760.92 \times 10^8 \text{tkm}$ 。其中，水路完成货运量 $76.16 \times 10^8 \text{t}$ ，完成货物周转量 $105834.44 \times 10^8 \text{tkm}$ ，内河货运量 $38.15 \times 10^8 \text{t}$ 、货物周转量 $15937.54 \times 10^8 \text{tkm}$ 。2020 年内河占全国货物货运量的 8.2%，周转量的 8.1%。

2010-2019 年，内河港口客运周转量变化幅度较小在 $300000-350000 \times 10^8 \text{人 km}$ 之间，但受疫情对旅客出行的影响，2020 年客运周转量急速减少（图 2.1-13）。2010-2020 年，全国内河港口货物周转量逐年增长，从 2010 年的 $5535.74 \times 10^8 \text{tkm}$ 增长至 2019 年的 $16302.03 \times 10^8 \text{tkm}$ ，增长约 2 倍（图 2.1-14）。

将旅客周转量换算成货物周转量，分析内河水路运输周转量占水路运输周转量的比例，结果表明 2010 年至 2013 年内河水运周转量占比呈快速增长态势，之后占比年变化趋势平缓，介于 30%-35%。

表 2.1-1 内河周转量在水路周转量占比 (%)

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
旅客周转量	47.42	52.19	53.96	59.27	54.32	53.53	45.13	52.55	52.56	51.94
货物周转量	24.68	25.18	27.00	37.47	34.70	35.47	35.89	34.34	32.61	32.67
周转量	24.69	25.19	27.00	37.47	34.71	35.47	35.89	34.34	32.61	32.67

注：以上表格水路包括沿海和内河，不包括远洋。周转量为内河旅客周转量为换算后的数值与货物周转量之和。客运周转量转换为货物周转量公式： $1 \text{tkm}=0.065 \times 1 \text{人 km}$ 。

旅客周转量占总周转量（换算后旅客周转量和货物周转量之和）比重较低，近十年均小于 0.05%（表 2.1-2）。

表 2.1-2 内河旅客周转量在内河总周转量中占比 (%)

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

旅客周转量占比	0.035	0.033	0.030	0.018	0.017	0.016	0.015	0.015	0.015	0.014	0.006
---------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

注：以上表格中内河旅客周转量为换算后的数值。客运周转量转换为货物周转量公式：

$$1 \text{ tkm} = 0.065 \times 1 \text{ 人-km}$$



图 2.1-13 2010-2020 年内河旅客周转量

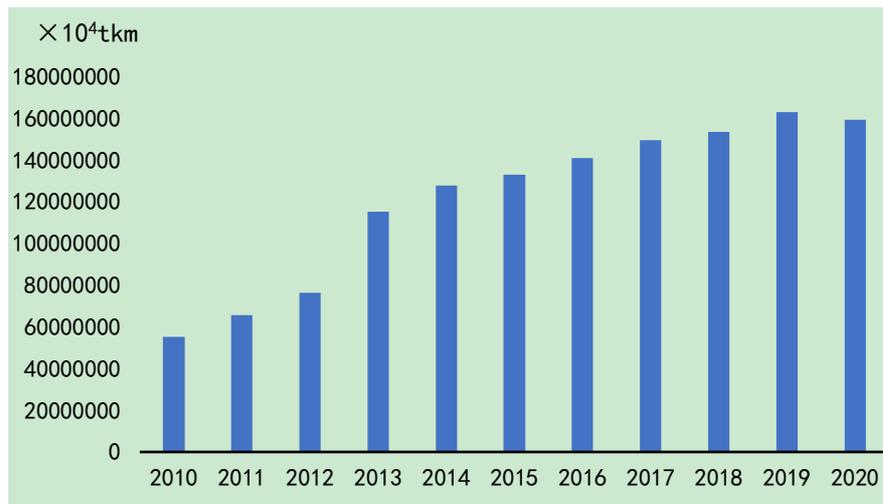


图 2.1-14 2010-2020 年内河货物周转量

2.2 中国内河航运发展趋势

总体来看，未来内河航运仍保持一个较快发展趋势。

(1) “双碳”战略将提升内河航运发展

《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》（中发〔2021〕36号，2021年9月22日）提出：加快推进低碳交通运输体系建设，优化交通运输结构；加快建设

综合立体交通网，大力发展多式联运，提高铁路、水路在综合运输中的承运比重，持续降低运输能耗和二氧化碳排放强度；推广节能低碳型交通工具；加快发展新能源和清洁能源车船，推广智能交通，推进铁路电气化改造，推动加氢站建设，促进船舶靠港使用岸电常态化；提高燃油车船能效标准，健全交通运输装备能效标识制度，加快淘汰高耗能高排放老旧车船。

（2）绿色交通运输体系建设推进内河航运发展

按货物周转量计算，船舶比其他交通运输方式更节能（自然保护协会，2020），货车货运能耗为 0.010-0.040 toe/1000tkm，船舶货运能耗为 0.0012-0.0018 toe/1000tkm（陆潘涛等，2021）。因此，发展内河水运有助于推进绿色交通运输体系建设。

2021 年 11 月发布的《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》提出：积极推动长江经济带成为中国生态优先绿色发展主战场，深化长三角地区生态环境共保联治；不断提高船舶靠港岸电使用率，加快大宗货物和中长途货物运输“公转铁”、“公转水”，大力发展公铁、铁水等多式联运，“十四五”时期，铁路货运量占比提高 0.5 个百分点，水路货运量年均增速超过 2%。

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》明确“十四五”期间的主要目标是“生产生活方式绿色转型成效显著”“主要污染物排放总量持续减少，生态环境持续改善”，到 2035 年实现“碳排放达峰后稳中有降，生态环境根本好转”。其中，主要污染物排放总量持续减少和生态环境质量的持续（根本）好转是关键性指标。

2019 年 9 月 14 日，中共中央国务院印发了《交通强国建设纲要》，为新时代海运业高质量发展指明了方向。2020 年 10 月，党的十九届五中全会提出，“十四五”时期经济社会发展要以推动高质量发展为主题。2021 年，习近平总书记接连强调高质量发展，做出一系列重

要指示，指出高质量发展是“十四五”乃至更长时间中国社会发展的主题，关系中国社会主义现代化建设的全局。李克强总理在 2021 年国务院政府工作报告中提出要推动高质量发展。2021 年 3 月 30 日，中共中央政治局召开会议，审议《关于新时代推动中部地区高质量发展的指导意见》。

为推进中国高质量发展，2020 年 2 月 3 日，交通运输部联合国家发展改革委、工业和信息化部、财政部、商务部、海关总署和税务总局七部门联合印发了《关于大力推进海运业高质量发展的指导意见》，提出到 2035 年，全面建成海运业高质量发展体系，绿色智能水平和综合竞争力居世界前列，安全发展水平和服务保障能力达到世界先进水平，基本实现海运治理体系和治理能力现代化的目标。

为将长江航运打造成交通强国建设先行区、内河水运绿色发展示范区和高质量发展样板区，交通运输部联合多部委印发《交通运输部关于推进长江航运高质量发展的意见》（以下简称《意见》），《意见》提出长江航运发展应坚持生态优先、绿色发展，走低碳、循环、可持续发展之路。强调要强化系统治理，促进航运绿色发展，推进港口船舶污染物接收转运设施、散货码头防风抑尘设施建设，加强港口节能环保设备、工艺应用，加强沿江港口与沿海港口联动，发挥长江主要港口的江海联运和干支中转作用。到 2025 年，基本建立发展绿色化、设施网络化、船舶标准化、服务品质化、治理现代化的长江航运高质量发展体系；到 2035 年，建成长江航运高质量发展体系。

根据国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知，到 2025 年，综合交通运输要基本实现一体化融合发展，智能化、绿色化取得实质性突破，综合能力、服务品质、运行效率和整体效益显著提升，交通运输发展向世界一流水平迈进。“十四五”时期综合交通运输发展主要指标中，营运船舶单位运输周转量 CO₂ 排放较 2020 年下降 3.5%；内河高等级航道里程到 2025 年达到

1.85×10⁴km, 约增加 2500×10⁴km。内河高等级航道承担全国内河 80% 以上的货运量。《内河航运发展纲要》明确 2035 年内河货运周转量在全国货物周转量占比达到 9% (2020 年为 8.1%)。

2.2.1 客运周转量发展趋势

目前, 中国人均年出行距离较低, 出行需求仍有增长潜力 (刘俊伶等 2018)。但内河客运占比较少 (刘俊伶等 2018), 且过去十年一直比较稳定, 均小于 0.05%。因此, 可推测未来内河水运的客运周转量年变化不显著, 保持约 0.1% 的水平, 因而以下预测计算中将重点讨论货物周转量的发展趋势及其造成的碳排放影响。

2.2.2 货物周转量发展趋势

内河货物运输量测算依据包括 (1) 港口吞吐量以及宏观经济、产业结构、能源结构及相关行业发展趋势; (2) 内河货运量与周转量保持一定增长, 随着基础设施不断完善, 经济结构转型高附加值货物长距离运输有所增长。

货物运输周转量受经济形势、煤炭、钢铁等大宗商品需求影响较大。当前全球经济增长面临人口增速放缓、老龄化加速和环境保护日益严格等诸多约束, 国际经济陷入长期停滞。2035 年中国将基本实现社会主义现代化, 经济保持较快增长, 能够实现经济总量或者人均收入翻番目标, GDP 年均增长 2020-2025、2025-2030、2030-2035、2035-2040、2040-2045、2045-2050 预计增速分别为 5%、4.8%、4.4%、4.0%、3.6%、3.2% (中国长期低碳发展战略与转型路径研究)。同时根据社科院相关研究, 中国人口将在 2030 年前后达到 14.5 亿的峰值, 年均增长 0.3%。产业格局逐步调整, 第三产业占比逐步攀升, 第二产业占比将有所下降 (2020 年年中国三次产业增加值比重为 7.7: 37.8: 54.5, 其中制造业占比为 26.2%)。经济增速放缓、产业结构调整、相关绿色发展要求直接影响经济对于煤炭、石油、矿石、钢铁等大宗货物的运输需求, 而高附加值在运输结构中的比重将进一步提

升，导致水路运输需求增长对于 GDP 增速的弹性进一步降低。

3.中国内河船舶碳排放及预测

水路运输的耗能设备主要是船舶以及港口装卸作业设备，消耗能源类型主要有柴油、重油、汽油、电力等。中国境内船舶使用的燃油主要包括普通柴油和船用燃料油。2010-2015年内河船舶燃油消耗量增长迅速，内河船用燃油大多数为普通柴油（中国船舶大气污染物排放清单报告）。

3.1 碳排放控制情景设计

根据《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》设计情景，对2020-2060年内河航运的温室气体排放量进行预测。设计以下情景：基准情景，“2°C情景”，“1.5°C情景”。情景设置中2020-2035年部分参考交通运输部水运科学研究院发展中心对内河船舶货运量的预测，2035-2060年部分根据2020-2035年预测量增长趋势进行计算而得。

3.1.1 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，以中国在《巴黎协定》下提出的NDC目标、行动计划和相关政策为支撑，延续当前低碳转型的趋势和政策的情景。综合运输结构优化，“公转水”年均比例约0.5%。

（1）经济增长与产业结构

2020-2035年经济年均增长4.7%，城镇化率大幅度提升，达到70-75%，产业结构调整慢于参考方案，2030年、2035年第二产业占比分别达到36%和35%。

（2）能源消费与能源结构

基准情景中，经济社会转型慢于预期，经济增长对于能源保持一定的需求，预计到2035年一次能源消费量达到 58×10^8 t标准煤。结构上2030年、2035年煤炭占比分别下降至47.0%和42.5%，油气能源消费占比保持在约30%，非化石能源占比有所提升至22.5%和27%。

1) 煤炭

2020-2025 年煤炭消费仍然处于峰值平台期，维持在 $40-41 \times 10^8 \text{t}$ （约 $28.5 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤），之后消费逐步下滑。2030 年、2035 年分别降至 $37.6 \times 10^8 \text{t}$ （ $26.3 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）和 $35.2 \times 10^8 \text{t}$ （ $24.7 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）。特高压与铁路运输对于现有煤炭运输格局影响不大。

2) 油气

石油与天然气在一次能源消费中的比重有所增长，超过 30%，2030 年前后中国石油消费达到峰值，约 $7.3-7.4 \times 10^8 \text{t}$ （ $10.4 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤），之后缓慢下降。到 2035 年中国石油需求量将降至 $6.1 \times 10^8 \text{t}$ （ $9.9 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）。天然气需求稳步增长 2030 年和 2035 年消费量将分别达到 $5200 \times 10^8 \text{m}^3$ （ $6.7 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）和 $6000 \times 10^8 \text{m}^3$ （ $7.8 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）。

3) 钢铁行业

房地产、基建、制造业等发展仍将保持较快发展态势，预计到 2030-2035 年中国人均粗钢产量将维持在 550-650kg，粗钢产量为 $9 \times 10^8 \text{t}$ 和 $8 \times 10^8 \text{t}$ ，废钢替代作用有所增长。

4) 其他行业

由于粮食加工需求的增长，粮食运输也将有较快增长，同时中国城镇化加快发展，城镇化率将达到 70-75%，对于水路运输相关货类有较强的支撑作用。非能源类货物的水路运输需求与社会经济发展同步，且弹性系数逐步下降。

(3) 内河航运

1) 市场主导的船舶能效下降集中在低成本减排技术领域；2) 非化石能源燃料在水运业渗透率较低，岸电部分应用。

3.1.2 2°C-情景

2°C情景是以实现全球控制温升 2°C目标为导向，以 21 世纪中叶深度脱碳目标下的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°C 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。

（1）经济增长与产业结构

2020-2035 年经济年均增长 4.7%。产业结构调整加快推进，第三产业占比稳步提升，第二产业占比有所下滑，到 2035 年和 2050 年三大产业占比将分别达到 6:34:60 和 5:32:63，2020-2035 年三大产业年均增速将分别达到 2%、4%和 6%。（BP：美国于 2007 年达到能源消费峰值，同年达到碳排放高峰，第三产业占比为 73.9%，制造业占比 12.7%；欧盟于 2006 年达到能源消费峰值，同年达到排放高峰，第三产业占比为 63.7%，制造业占比 15.8%）。中国城镇化率将由 2020 年的 63.9%进一步上升至 70%。

（2）能源消费与能源结构

根据国家能源局、中石油、清华大学等相关机构专家预计，能源消费需求将在 2030-2035 年约达到 $56 \times 10^8 \text{t}$ 的峰值平台期，年均增长约为 1%。非化石能源占比进一步提升，油气合计占比基本保持稳定，煤炭占比大幅下滑。2030 年煤炭：油气：非化石能源占比总体为 45：28：27，2035 年结构为煤炭：油气：非化石能源占比为 38.5：28.5：32.5 的比例。

1) 煤炭

2020-2025 年煤炭消费进入峰值平台期，维持在 $40-41 \times 10^8 \text{t}$ （ $28.5 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤），2025 年之后重化工产出规模减小，钢铁、建材、化工、供热等工业逐步加速脱碳，煤炭消耗降幅较大。预计 2030、2035 年煤炭消费量将保持在 $36 \times 10^8 \text{t}$ （ $25 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）、 $30 \times 10^8 \text{t}$ （ $21 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）（2020-2030 电煤占煤炭消耗比重基本保持 50%-55%）。且特高压输电发展稳步推进，对于煤炭运输起到初步替代作用，浩吉铁路对于北煤南运替代作用并不明显。

2) 油气

2025-2030 年中期中国石油需求将达到峰值，为 $7.3 \times 10^8 \text{t}$ （超过 $10 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤），2030、2035 年年分别降至 $7.0 \times 10^8 \text{t}$ （ $9.8 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）和 $6.3 \times 10^8 \text{t}$ （ $8.7 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）。国内原油产量约 $2 \times 10^8 \text{t}$ 。天然气是低碳转型的现实选择，中国天然气需求量将在 2040 年前后进入峰值平台期，约为 $5500 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中 2030、2035 年分别 $4500 \times 10^8 \text{m}^3$ （ $5.9 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）为 $5200 \times 10^8 \text{m}^3$ （ $6.8 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤）。

3) 钢铁行业

目前人均粗钢产量保持在 600-700kg。1973 年美国粗钢产量分别达峰在 $1.4 \times 10^8 \text{t}$ ，之后维持在 $8000-9000 \times 10^8 \text{t}$ ，同年日本粗钢产量达到 $1.2 \times 10^8 \text{t}$ 的峰值，之后维持在 $1 \times 10^8 \text{t}$ 波动。1940-1980 年美国人均粗钢产量基本维持在 500-600 千克的水平，之后逐步下降至 300kg。日本作为出口工业产品的制造强国人均粗钢产量始终维持在较高水平，20 世纪 50 年代以来日本人均粗钢产量逐步攀升，1970 年-1980 年基本维持在 900-1000 千克，1980 年以后在 800kg。目前欧盟人均粗钢产量在 300kg，其中德国为 500kg。中国粗钢生产、消费已经进入峰值平台期，但随着中国一带一路倡议的深入实施，钢铁行业转型重组和技术不断进步，工业化、城镇化仍有一定空间，预计到 2030-2035 年中国人均粗钢产量将维持在 500-600kg，粗钢产量为 $8.5 \times 10^8 \text{t}$ 和 $7 \times 10^8 \text{t}$ 。废钢替代作用进一步增强。《再生钢铁原料》国家标准发布后，根据中国废钢铁应用协会预测，中国废钢供给将在 2025 年、2030 年、2035 年分别达到 $2.9 \times 10^8 \text{t}$ 、 $3.4 \times 10^8 \text{t}$ 、 $3.9 \times 10^8 \text{t}$ 。

4) 其他行业

粮食需求平稳增长：十四五末中国可能出现 1.3 亿吨的缺口，中国人口将在 2030 年达到峰值为 14.4 亿人，年均增速为 0.3%，随着人民生活水平的提升，人均粮食消费量保持稳中略升，总体而言中国粮食需求将保持增长态势，但增速逐步放缓。其他行业平稳发展。中国城镇化率将达到 70%，有利于房地产等行业对于运输需求的拉动，水

路运输相关货类将继续保持平稳增长。非能源类货物的水路运输需求与社会经济发展同步，且弹性系数逐步下降。

（3）内河航运

1) 市场主导的船舶能效下降集中在低成本减排技术领域；2) 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；3) 船舶运力结构优化，旧船加速淘汰，新船大型化；4) 岸电充分应用，中长期水运燃料碳强度稳步下降。

3.1.3 1.5°C-情景

1.5°C情景以控制 1.5°C温升目标为导向，到 21 世纪中叶努力实现二氧化碳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。

（1）经济增长与产业结构

节能、减排、降碳加速推进，经济结构、能源结构加速调整。2020-2035 年经济年均增长 4.7%，城镇化率进一步提升，达到 65-70%，2030 年、2035 年第二产业占比分别下降至 32%和 30%。

（2）能源消费与结构

1.5°C情景中，能源消费与结构加快调整，绿色发展政策大规模实施，经济社会加快转型，经济增长对于能源需求有多降低，预计到 2035 年一次能源消费量达到 $54 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤（低于参考方案峰值）。结构上 2030 年、2035 年煤炭占比分别下降至 42.0%和 35%，油气能源消费占比保持 27%，非化石能源占比有所提升至 31%和 38%。

1) 煤炭

在一次能源中的消费占比仍呈现快速下降态势，清洁能源加速使用，十四五煤炭消费进入峰值平台期，消费量稳中略降，2025-2035 年煤炭消费加速下滑，2030 年和 2035 年煤炭消费量分别下降至 $32.4 \times 10^8 \text{t}$ ($22.7 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤) 和 $26.5 \times 10^8 \text{t}$ ($18.6 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤)，而特高压输电等技术逐步成熟对煤炭运输产生较强的替代作用，同时浩

吉铁路运输量逐步攀升，逐步取代一部分下水煤炭。油气：石油与天然气在一次能源消费中的比重缓慢增长，将接近 30%，2025-2030 年中国石油消费达到峰值平台期，2030 年和 2035 年石油消费分别为 $6.6 \times 10^8 \text{t}$ ($9.2 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤) 和 $6.1 \times 10^8 \text{t}$ ($8.5 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤)，天然气消费有所增长，将分别达到 $4200 \times 10^8 \text{m}^3$ ($5.4 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤) 和 $4500 \times 10^8 \text{m}^3$ ($5.8 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤)。

2) 钢铁行业

房地产、基建、制造业等发展仍将保持一定增长，2030-2035 年人均粗钢产量降至 450-550kg，2030 年和 2035 年粗钢产量降至 $8 \times 10^8 \text{t}$ 和 $6 \times 10^8 \text{t}$ 。且废钢替代作用逐步增大。

3) 其他行业

粮食运输需求趋于平稳，由于 2030 年之后人口下滑，粮食运输需求增长速度也将有所放缓，同时中国城镇化推进不及预期，城镇化率将达到 65-70%，对于水路运输相关货类支撑作用有所减弱。非能源类货物的水路运输需求与社会经济发展同步，且弹性系数逐步下降。

(3) 内河航运

1) 市场主导的船舶能效下降扩展到中高成本减排技术领域；2) 新造船能效标准以及在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；3) 船舶运力结构进一步优化，旧船加速淘汰，新船大型化；4) 岸电充分应用，中长期水运燃料碳强度加速下降。

3.2 减排措施情境

为实现 CO₂ 减排目标，需要将适应于船舶的技术、运营和创新解决方案组合。以下针对内河船舶特点，提出了适用于内河船舶 CO₂ 减排的措施及减排力度预测。

3.2.1 船舶能耗强度基本不变

根据以上对未来内河船舶能耗强度和未来货物周转量趋势的预测，先假设自 2020 年开始，内河船舶能耗强度不再出现大幅下降，取 2020 年内河船舶能耗强度 $9.32\text{gCO}_2/(\text{tkm})$ ，计算未来 2020-2060 年船舶 CO_2 排放量。

3.2.2 老旧船舶淘汰，船舶的标准化

中国内河航运老旧船舶较多，据 2017 年数据统计，10 年以上船舶占比 58%，20 年以上船舶占比 26%（数据来自交通运输部水运科学研究院环保节能中心数据中心）。国务院 2018 年发布的“蓝天保卫计划”和相应的地方计划，规定了一些针对航运的措施。这些措施包括促进“新能源”（如 LNG 或电力）用于船舶，鼓励内河船舶的改造，以及建设岸电供电设施。政府还要求限制长江等主要内河流域的高排放船舶的运营，并鼓励服役 20 年以上的内河船舶退役。2021 年 2 月《国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》提出，建立健全绿色低碳循环发展经济体系，促进经济社会发展全面绿色转型，是解决中国资源环境生态问题的基础之策，要求推广绿色低碳运输工具，淘汰更新或改造老旧船舶，加大推广绿色船舶示范应用力度，推进内河船型标准化建设。2021 年 10 月《2030 年前碳达峰行动方案》同样提出推动运输工具装备低碳转型，加快老旧船舶更新改造。

根据项目的研究，老旧船舶拆解新建后，即使重新选用燃油动力，能效水平提高约 20%，如果选用新能源清洁能源，则可能更低。2016 年至 2020 年新旧船淘汰率为 22%，年淘汰率为 4.4%，因内河船舶换新主要依靠船龄，而非政策，本文假设各情境下新旧船淘汰率相同，且保持不变，新旧船淘汰的权重系数设置为 20%（表 3.2-1）。

内河船舶标准化尽管经过 30 多年的努力，成效显著。2019 年三峡过闸船舶标准化率达到 88%，但与 2006 年《全国内河船型标准化

发展纲要》中提出到 2020 年基本实现标准化目标还有一定的差距。因此，最近几年交通运输部推进制定内河船舶新标准化率目标：2019 年部颁布的《长江航运高质量发展指导意见》确定的新目标是“到 2025 年，长江干线过闸（三峡船闸；显然降低了目标标准）运输船舶船型标准化率达到 95%；到 2035 年，达到 100%”。交通运输部 2020 年 6 月印发《内河航运发展纲要》纲要推进标准化、专业化运输船舶发展。继续推进船型标准化工作，推进水系或区域内运输船舶标准统一，引导现有各类非标船舶逐步退出航运市场。2018 年交通运输部联合广东、广西、贵州、云南四省（区）政府印发《推进珠江水运绿色发展行动方案（2018—2020 年）》中明确提出“到 2020 年，珠江水域过闸船舶（也降低了目标标准）船型标准化率达到 70%”；其他内河航道水域船舶标准化交通运输部没有具体目标。四川省 2020 年过闸船舶标准化率达到 58.7%。江苏内河船舶 2020 年标准化率达到 50%，长江干线和京杭运河船舶达到 70%标准化率。

本文对船舶标准化分为主要水系和其他水系，各占 90%和 10%。主要水系为：长江、珠江、京杭运河，其他水系的船型标准化尚未有要求和目标。在基准情景，2°C情景，1.5°C情景下，2025 年的船型标准化率在主要水系分别为 75%，85%和 95%。船舶标准化率的权重系数设置为 10%（表 3.2-1）。

3.2.3 船舶大型化

通常船舶吨级越大，单位油耗越低（聂育仁，2014），碳排放强度越小。2020 年，中国内河船舶平均净载重吨为 1188 吨，沿海船舶为 7660 吨。船舶大型化进展显著，推动航运单位周转量能耗持续下降。在国家船型标准化政策引导下，以及内河航运基础设施不断改善的推动下，中国内河船舶平均吨位 2010 年至 2020 年由 448 载重吨提高到近 1188 载重吨，增长率达 165%。运输船舶的大型化显著提升了单船一次性运载能力，降低了单位货物周转量能耗，规模经济社会

效益不断体现，航运绿色低碳优势更加凸显。

但中国的高等级航道占比明显偏小。2011 年《国务院关于加快长江及内河水运发展意见》的“发展目标”中明确提出“到 2020 年建成国家高等级航道 1.9 万公里”，此目标任务并未完成，因而受限于航道发展，以及供需限制，船舶大型化趋势并不持续。本文对船舶大型化的增长率预测，是以 2016 年至 2020 年船舶平均净载重为依据，在基准情景，2°C 情景，1.5°C 情景下，2025 年的船舶大型化的增长率分别为 6%，10% 和 12%，之后增长率降低。船舶大型化的权重系数设置为 20%（表 3.2-1）。

3.2.4 蓄电池动力船及低碳燃料应用

在“碳达峰”、“碳中和”的背景下，低碳能源转换将是航运业减少碳排放的根本性措施。现阶段，95%以上的船舶采用柴油为主动能源（严新平），2030 年，化石燃料仍然占据主导地位，实现“绿色发展、生态优先”和“双碳目标”需要摆脱对柴油动力的依赖，适当降低化石能源比例，增加 LNG/LPG、电、生物燃料、甲醇、氢、氨、风、光、水、核、地热、潮汐能等新能源和可再生能源比例，提高能源利用效率，增加燃料灵活性如桥接技术，从源头实现低碳排放。交通运输部 2020 年 6 月印发的《内河航运发展纲要》纲要提出要将新能源和清洁能源船占比显著提高，打造绿色航运体系。通过降低燃料碳强度的方式减排幅度大，但技术成熟度相对较低。2021 年国务院《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比例达到 40%，对于内河船舶，此目标实现难度较大。

国内船舶的新能源清洁能源船舶应用从无到有，电池技术适用于短距离和小规模操作，电气化难以应用到远洋航运。因而蓄电池动力船在内河航运中有较大优势。电动船动力技术包括气体燃料发动机、

锂电池、燃料电池以及多种混合动力与集成技术。目前已建成投运 LNG 动力船舶 300 余艘，电池动力船 50 余艘。甲醇、氢等燃料在船舶应用的研究和试点工作也已在局部开展。随着蓄电池能量密度的提升，使用过程中“零排放”，且噪音、振动控制表现出色，充电便捷等优势，蓄电池作为船舶动力已经在船舶市场初具规模，在旅游客船、客渡船、公务船和吨级较小货船等船型上得到广泛应用。据交通运输部水运科学研究院船舶中心对船舶电动化的估算，500 总吨，1000 总吨，2000 总吨船舶可实现电动化的最大比例可分别达 80%，60%，50%；500 总吨，1000 总吨，2000 总吨船舶在内河船舶的占比为 77%，13%，5%。预测过程中，取以上可电动化的一半作为 1.5℃ 情景船舶电动化趋势。基准情景下按照客船比例 14% 的一半作为逐步实现电动船转换。此外，还通过大力推动港口岸电设施同步建设和国内船舶加装受电设施，引导船舶靠港期间使用岸电。本文将船舶电动化的权重系数设置为 100%（表 3.2-1）。

2010 年以来，国家和交通运输部发布了一系列要求推广应用船舶使用 LNG 清洁能源的指导性文件。《大气污染防治行动计划》、《水污染防治行动计划》、《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，预计 2021 年 LNG 动力船订单接近总吨位 30%，2015 年全球手持订单中 LNG 动力船超过 60%。国内水域已覆盖沿海、长江、珠江和京杭运河等主要水域。但 LNG 燃料中含有 C 元素对 CO₂ 减排贡献有限，使用过程中甲烷逃逸会增加温室气体排放，而且供应和价格不稳定。国际气体燃料动力船协会报告表明，通过技术升级改进可使甲烷逃逸降至最低水平，LNG 作为船舶燃料的全生命周期减少温室气体排放最

高可达 24%（航运低碳发展展望 2021）。本文将 LNG 燃料船的权重系数设置为 24%（表 3.2-1）。虽然目前已建成投运 LNG 动力船舶已有 300 余艘，但 LNG 的沸点低，在储存和加油过程中会产生蒸发效应，减碳力度有限；LNG 燃料站的基础设施还没有完成；供应和价格尚不稳定，本文预测未来内河 LNG 船舶增长率有限（表 3.2-1）。

相较于传统柴油，其他新能源低碳燃料如甲醇、生物柴油、氢、氨等低碳燃料均能够显著降低 CO₂ 排放，但低碳燃料的使用存在较高的应用门槛，技术成熟度较低，实船应用与基础设施尚未同步发展。技术改造的高额费用制约了低碳燃料在老旧船舶上的应用，应在新建船设计时考虑使用低碳燃料。未来应逐步提高低碳燃料与零碳燃料的比例。表 3.2-1 对未来其他低碳燃料的使用的增长率做出了预测。

3.2.5 岸电设施及应用

2021 年国务院《2030 年前碳达峰行动方案》提出加快绿色交通基础设施建设。有序推进充电桩、配套电网、加注（气）站、加氢站等基础设施建设。为推进电动船及港口能源转化，应深入推进内河船舶受电设施改造，2025 年底前基本完成 6 百吨级以上内河干散货船和多用途船的改造；逐步推进海船集装箱船、客滚船、邮轮、3 千吨级以上客船和 5×10⁴t 级以上干散货船（海船五类船）受电设施改造。

2015 年交通运输部关于印发船舶与港口污染防治专项行动实施方案（2015-2020 年），提出到 2020 年，主要港口 90% 的港作船舶、公务船舶靠泊使用岸电，50% 的集装箱、客滚和邮轮专业化码头具备向船舶供应岸电的能力的目标。2017 年，交通运输部印发了《港口岸电布局方案》，提出 2020 年实现全国沿海和内河主要港口以及船舶排放控制区内港口 50% 以上已建的集装箱、客滚、邮轮、3 千吨级以上客运和 5×10⁴t 级以上干散货专业化泊位具备向船舶提供岸电的能力，对岸电需求较大、基础条件较好的港口，鼓励其加快岸电设施建设，争取实现 100% 的泊位岸电覆盖率，加大靠港船舶使用岸电的

力度。2018 年底交通运输部修订了我国船舶排放控制区（ECA）法规，要求 2019 年 1 月 1 日或之后所有新建内河船舶必须具备岸电受电能力，并从 2019 年 7 月开始在靠泊具有岸电供电能力泊位时连接岸电。不符合中国第二阶段排放标准的内河船舶，必须在 2022 年 1 月 1 日前对其进行岸电改造，并在可行的情况下使用岸电（交通运输部，2015）。这两项要求可以涵盖大多数内河船舶。为加快船舶岸电应用推广，交通运输部组织制定了码头岸电的相关标准规范，例如《码头船舶岸电设施建设技术规范》（JTS155-2012），《靠港船舶岸电系统技术条件》。

《2020 蓝港先锋：中国典型港口空气和气候协同力》对 4 个典型内河港口包括苏州港、芜湖港、九江港和岳阳港进行了评价，四个内河港均超额完成了 2020 年《港口岸电布局方案》，岸电覆盖率达到 100%。港作船舶岸电使用率方面，苏州港和岳阳港的港作船舶岸电使用率均达到 100%，超额完成《船舶与港口污染防治专项行动实施方案（2015-2020 年）》提出的 90% 的目标。截至 2020 年，三峡大坝及其附近的主要码头、锚泊区以及长江、珠江、京杭大运河沿岸港口正在建设岸电基础设施（国家电网有限公司，2018；六部委，2019）。长江及其主要支流的所有港口计划到 2035 年具备发电供应能力（交通运输部，2019）。随着岸电基础设施的建设，主要内陆港口已具备支持全面实施岸电的要求。

基于以上分析，对岸电使用率在基准情景下的预测值：2025 年 25%；2030 年 50%；2035 年 80%。靠港期间使用岸电，降碳效果约占航段碳排放量的 5% 估算（不考虑电力间接排放），本文将岸电使用的权重系数设置为 5%（表 3.2-1）。

3.2.6 营运能效提高措施

船舶能效包括技术能效和营运能效。技术能效措施中机械化动力系统方面包括：机械装置优化，废热利用，发动机估值下调，电池协

作；船体流体力学方面包括：船体涂层，船型优化，空气润滑，清洁等。例如通过改造老旧船设备可提高船舶节能水平。对于一些营运多年的船舶，船体阻力增大，主机磨损、负荷变重、转速下降、工作状态不良，致使船-机-桨匹配欠佳，推进效率下降。为了解决老旧船普遍存在的这些问题，可以采取在螺旋桨前上方的船体上加装节能补偿导管和螺旋桨削边的方法。还可改造大型船舶主机增压器，降低主机排气温度，可改善主机工况，使主机有效功率有所提高。还可以安装节能补偿导管，此种方法比较适宜在肥大型的旧船上安装，也可在新船上使用，节能效果可达 5%-7%（王志芳，2010），因此降低 CO₂ 排放效果显著，节能补偿导管结构简单，体积小，故投资少，见效快，回收周期短，是值得推广的一种节能减排措施。螺旋桨削边适宜在一些螺旋桨负荷变重的旧船上使用，方法简单，效果显著。内河船舶技术能效总体成熟度较差、可操作空间小，减排幅度有限。

常用的营运减排措施主要有：运营管理优化和运输结构优化转型、降速航行和气象导航等。根据《营运船舶燃料消耗限值及验证方法》 JT/T 826-2012，《营运船舶 CO₂ 排放限值及验证方法》（JT/T 827-2012），对营运船舶的 CO₂ 排放，提出了规定及验证程序，建立了拟投入营运船舶的市场准入机制，但该标准为推荐性标准，目前在内河标准船型强制执行。对拟投入营运市场、国内航行、以柴油机为主推进动力运输船舶燃料消耗限值和碳排放限值总体降低 10%以上。

1) 航速降低

船舶燃油消耗量与船舶航速的 3 次方成正比例关系，因此航速对燃油的消耗影响很大。如果船舶航速平均放慢 10%，那么整个船队燃料油可以节约 25%以上，而船舶排放 CO₂ 量也会大幅度降低（王志芳，2010）。Lindstad (2015) 研究结果表明，仅利用减速航行就能够使 CO₂ 的排放减少约 26%。

降速航行可以有效降低船舶的阻力，航速降低，单位油耗呈现逐步下降趋势。国家统计局结果显示，自 2010 年后航速的降低是货运船舶平均单位油耗下降的主要原因（聂育仁，2014）。但是在内河船舶出现大型化，运力增加的同时，市场供需失衡，船舶实际航速下降，因而单位能耗进一步下降，2010 年单位能耗较 2005 年下降约 30%。长江水系船舶千吨公里油耗在 2012 年较 2007 年下降 44%（贾大山，2015）。内河船舶航速已然降至较低水平，约为 10 节，因而未来航速下降空间较小。

2) 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航线从而优化船舶能效的方法。Takashima (2009) 等利用一艘海船的主机数据和通航环境参数，结合 Dijkstra 算法，研究表明，船舶采用经济航线航行能够节省约 18.4% 的油耗。

3) 运营管理优化和运输结构优化转型

在物流及数字化方面降低航速，减少船舶活动水平，提高船舶利用率，合理设计利用船体大小，航线优化，营运方式调整，将不同船舶类型优化组合，并加快铁水联运发展，十三五期间，集装箱铁水联运量年均增长超过 20%。2021 年国务院《2030 年前碳达峰行动方案》提出发展智能交通，推动不同运输方式合理分工、有效衔接，降低空载率和不合理客货运周转量；大力发展铁水联运，加快内河高等级航道网建设，推动货物运输“公转铁”、“公转水”；“十四五”期间，集装箱铁水联运量年均增长 15% 以上。但以上目标都需持续性政策支持。

船舶运输组织不断优化，船舶营运能效水平不断提升，船舶大型化、码头装卸效率提升、运输组织能力提高，均有利于提升船舶实载率，减少船舶空驶、待港时间，提升船舶运输效率和船舶的营运能效水平。一般随着载货量利用率上升，单位油耗也呈现逐步下降趋势（聂

育仁，2014)。2010年至2020年内河船舶单位载重吨货运量增加了10%，单位载重吨周转量提高56%。相比内河船舶平均吨位和货运量的提升，船舶单位载重吨货运量及周转量的提升率相对较低，反映了市场供需的失衡，应积极推广应用基于大数据的货运信息平台等物流新技术减少船舶空驶率，优化航线和减少靠港待泊时间，以提高单位载重吨运力完成的货物周转量。

船舶单位功率载货量的提高，进一步推动船舶技术能效水平提升。以内河船舶为例，随着航道条件改善、船舶设计建造技术不断提高及大型化发展，中国内河船舶单位载重吨所需功率不断降低，2010年至2019年中国内河船舶单位载重吨所需功率降低了24%，提升了船舶能效水平。2010年至2019年内河船舶单位功率货运量增加了56%，意味着同等功率下船舶运载量加大一倍，可以使用更少的功率载运更多的货物，进一步降低了单位周转量的燃料消耗。

综上所述，因营运能效提高中的单位载重吨利用率、降低航速和气象导航措施等均属于运营管理优化和运输结构优化范畴，为避免营运能效提高带来计算重叠，本文在计算过程中将不同营运节能措施打包，权重系数设置为10%（表3.2-1）。

表 3.2-1 各种减排措施在不同情境下的占比及增长率（%）

情境	年份	标准化比例			老旧船舶年淘汰率	船舶大型化年增长率	电动船比例	LNG船增长率	其他新能源船增长率	岸电使用率	营运节能转型率
		主要水系	其他水系	平均							
权重系数		10			20	20	100	24	50	5	10
	2020	70	50	68	4.4	6.2	0.04	0.25	0	5	10
基准	2025	75	50	72.5	4.4	6	0.5	0.8	0.05	25	20
	2030	80	50	77	4.4	3	1	1	0.1	50	30
	2035	85	50	81.5	4.4	2	2	1	0.2	80	40
	2040	90	50	86	4.4	1	3	1	0.3	90	50
	2045	95	50	90.5	4.4	0	4	1	0.5	95	50
	2050	100	50	95	4.4	0	5	1	0.7	100	50
	2055	100	50	95	4.4	0	6	1	0.9	100	50
2060	100	50	95	4.4	0	7	1	1	100	20	
2℃	2025	85	52	81.7	4.4	10	1	1	0.5	30	30

	2030	90	54	86.4	4.4	7	3.4	1	0.5	60	40
	2035	95	56	91.1	4.4	5	5.8	1	1	90	50
	2040	100	58	95.8	4.4	3	8.2	1	1	95	60
	2045	100	60	96	4.4	2	10.6	1	1	100	60
	2050	100	62	96.2	4.4	1	13	2	2	100	60
	2055	100	64	96.4	4.4	1	15.4	2	2	100	60
	2060	100	66	96.6	4.4	1	18.0	2	2.5	100	30
1.5°C	2025	95	55	91	4.4	12	2	1.5	1	35	40
	2030	100	60	96	4.4	8	6.8	2	1	70	60
	2035	100	65	96.5	4.4	6	11.6	2	2	100	70
	2040	100	70	97	4.4	5	16.4	2	2	100	70
	2045	100	75	97.5	4.4	3	21.2	2	2	100	70
	2050	100	80	98	4.4	2	26	2	2.5	100	70
	2055	100	85	98.5	4.4	2	30.8	2	2.5	100	70
2060	100	90	99	4.4	1	36.0	2.5	3	100	10	

注：权重系数为减排措施全部使用后最高可减少温室气体排放量。

3.3 核算方法

3.3.1 CO₂ 排放量

计算 CO₂ 排放量有两种方法：

一是根据统计部门提供的燃油消耗量并结合燃料种类的排放因子计算。

另一种。根据移动源实际行驶里程并结合排放因子。具体可分两种方法，一种为排放因子直接与行驶里程相关，但这种情况需要大量实验数据支持，或由相关部门发布权威的官方排放因子；第二种则根据排放源实际行驶里程推算出其消耗的燃油量，进而结合燃料种类的排放因子计算。

本文通过移动源实际行驶里程并结合排放因子计算：

$$CO_{2i} = \sum Y_i \times FE_i \times Cl$$

公式中：

CO_{2i} 为 i 船型 CO₂ 排放量，g；

Y_i 为 i 船型货运周转量，tkm；

客运周转量转换为货物周转量公式：1 tkm=0.065×1 人 km（非

道路移动污染源排放清单编制技术指南（试行））；

FE_i 为 i 船型单位吨公里燃油消耗量，g/tkm；

CI 为燃料碳强度，g（CO₂）/g 燃油；

$FE_i \times CI$ 为船舶能耗强度 gCO₂/(tkm)。

3.3.2 船舶能耗强度

船舶能耗强度根据历史数据获取：2008 年数据通过交通运输部公开数据及调研方式获得；2017 年数据来源第二次全国污染源普查公报公布营运内河船舶 SO₂ 排放量计算燃油消耗量，以此估算 CO₂ 排放量和船舶能耗强度；2021 年数据采用 62 艘内河抽样船数据；2008 年-2017 年及 2017 年-2021 年间船舶能耗强度数据通过等比例内插计算。

船舶能耗强度预测以 2020 年为基准，结合各种减排措施的降碳效果进行计算。

$$EC = \{100 - [(GR_i \times w_i) \times IEB + GR_{EB}] \times e\} / 100 \times EC_{2020}$$

EC 为船舶能耗强度；

EC_{2020} 为 2020 年船舶能耗强度；

GR_i 为 i 减排措施的增长率，值为比例/100；

w_i 为 i 减排措施的权重系数，权重系数为该措施 100%应用后可以降低船舶能耗强度的比例，值为比例/100；

IEB 为非电动船比例，值为比例/100；

GR_{EB} 电动船增长率，值为比例/100；

e 为弹性系数，0.8（假设下文提到的减排措施仅覆盖未来减排措施的 80%）。

3.4 核算结果

3.4.1 货物周转量趋势

根据以上预测参考以及情景设计，对内河货运量货运周转量进行了预测：基准情境下，预计 2035 年内河运输船舶货运量将达到

51.5×10⁸t，货物周转量达到 25835×10⁸tkm。2035 年之后内河周转量会有逐步增长，但增长速率明显下降，内河货运量增量放缓，到 2060 年内河周转量达到 32962×10⁸tkm。2℃情境下，预计 2035 年内河运输船舶货运量将达到 46.3×10⁸t，货物周转量达到 23530×10⁸tkm。到 2060 年内河周转量达到 29421×10⁸tkm。1.5℃情境下，预计 2035 年内河运输船舶货运量将达到 43.9×10⁸t，货物周转量达到 22082×10⁸tkm。到 2060 年内河周转量达到 26781×10⁸tkm。

表 3.4-1 各情景下内河货运量 (×10⁸t)、周转量 (×10⁸tkm)及预测

参考情景	年份	货运量	年增长率 (%)	货物周转量	年增长率 (%)
	2010	18.86	15.69	5536	22.16
	2015	34.59	16.68	13312	28.09
	2020	38.15	2.06	15938	3.95
基准	2025	44.8	3.3	19999	5.10
	2030	49.4	1.9	23542	3.54
	2035	51.5	0.8	25835	1.95
	2040	53.39	0.74	27703	1.45
	2045	54.93	0.57	29295	1.15
	2050	56.2	0.46	30674	0.94
	2055	57.28	0.38	31886	0.79
	2060	58.21	0.32	32962	0.67
2℃	2025	43.3	2.6	19109	3.98
	2030	46	1.2	21727	2.74
	2035	46.3	0.1	23530	1.66
	2040	46.51	0.09	24839	1.11
	2045	46.67	0.07	25912	0.86
	2050	46.81	0.06	27028	0.86
	2055	46.95	0.06	28197	0.87
	2060	47.07	0.05	29421	0.87
1.5℃	2025	42.30	2.1	18745	3.52
	2030	43.50	0.6	20805	2.20
	2035	43.90	0.2	22082	1.23

2040	44.32	0.19	23155	0.97
2045	44.60	0.13	24013	0.74
2050	44.81	0.09	24903	0.74
2055	44.97	0.07	25826	0.74
2060	45.08	0.05	26781	0.74

基于以上分析及国家综合立体交通网规划纲要判断，中国内河货物运输需求将保持持续平稳增长；江海运输得到进一步发展；货类结构持续调整，集装箱和商品汽车运输较快增长；内河货运量仍集中在“两横一纵两网”地区，并加快向支流延伸。分区域看，中西部增长快于东部，支流快于干流。中国东中西部经济发展阶段不同，在长江、珠江等流域，体现为上游、中游、下游梯度发展态势；未来这种发展态势仍将持续，部分产业将继续从东部地区向中西部转移，长江、珠江中上游的经济增速快于下游地区，水运量增长也将呈现中西部快于东部的特点。

3.4.2 船舶能耗强度（2008-2021 年）

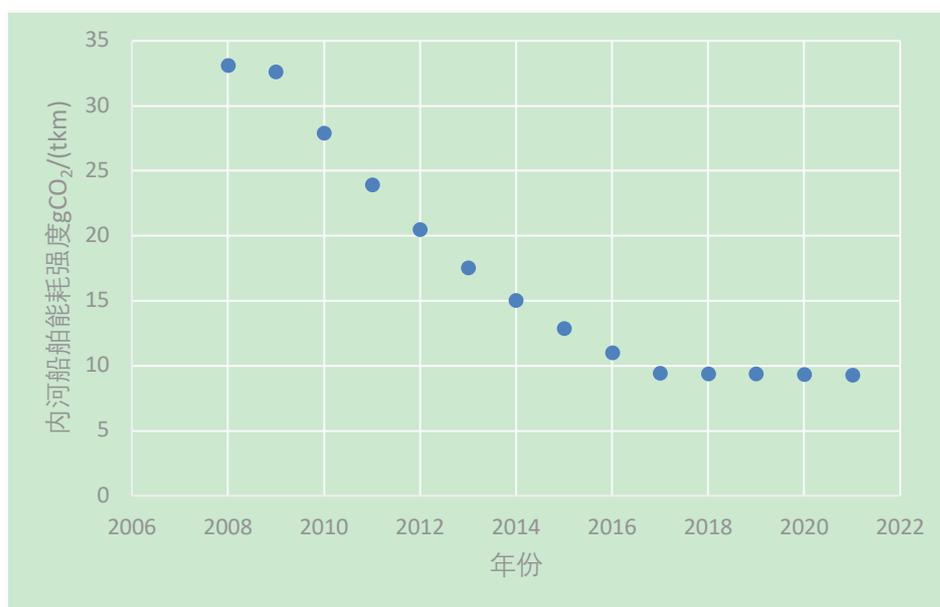


图 3.4-1 内河船舶能耗强度 gCO₂/(tkm)

基于 2008 年，2017 年及 2021 年船舶能耗强度，并在三个年份间数据通过等比例下降方式计算获得其他年份数据，得到 2008-2021

年内河船舶能耗强度（图 3.4-1）。船舶能耗强度从 2009 年到 2017 年急速下降，从 32.6 gCO₂/tkm 下降到 9.4 gCO₂/tkm，2017 年-2021 年变化趋势较小。

3.4.4 船舶能耗强度预测

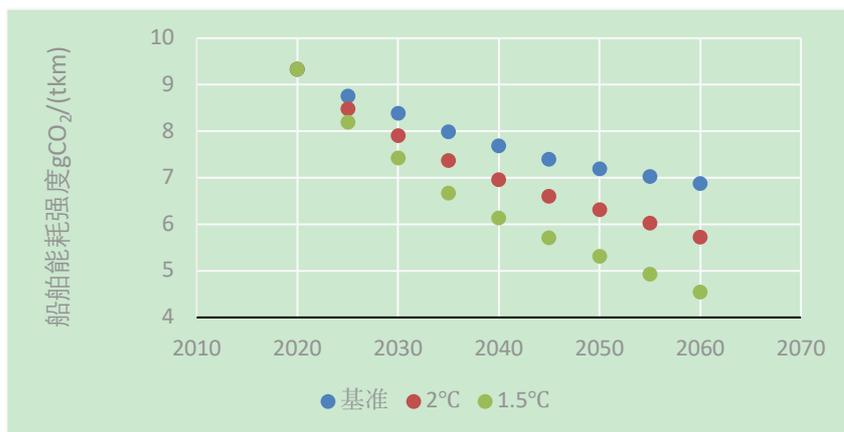


图 3.4-2 减排措施下船舶能耗强度 gCO₂/(tkm)

在各种减排措施作用下，2020-2060 年船舶能耗强度在三种情景下均呈现较快下降，尤其是 1.5°C 情境下降速最快。

3.4.5 船舶碳排放量预测

根据内河船舶客货运周转量，以及船舶能耗强度，计算得到 2020 年船舶碳排放量为 1486×10⁴t。

3.4.5.1 假设船舶能耗强度不变

根据以上对内河船舶能耗强度预测和货物周转量趋势的预测，首先假设未来内河船舶能耗强度不再出现大幅下降，取 2020 年内河船舶能耗强度 9.32gCO₂/tkm，计算未来 2020-2060 年船舶 CO₂ 排放量，结果见图 3.4-3。

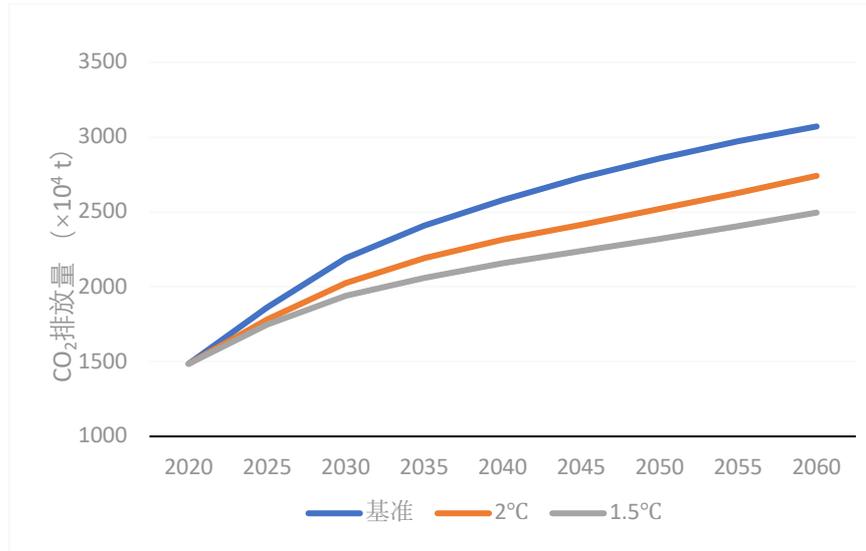


图 3.4-3 内河船舶 CO₂ 排放量预测 (2020-2060)

在船舶能耗强度不变的情况下，随着内河货物运距的持续下降，即使货物运输量在 2°C 和 1.5°C 情境下增速缓慢，但周转量依旧有持续增加趋势，CO₂ 的排放量会持续增加。

3.4.5.2 根据船舶能耗强度预测

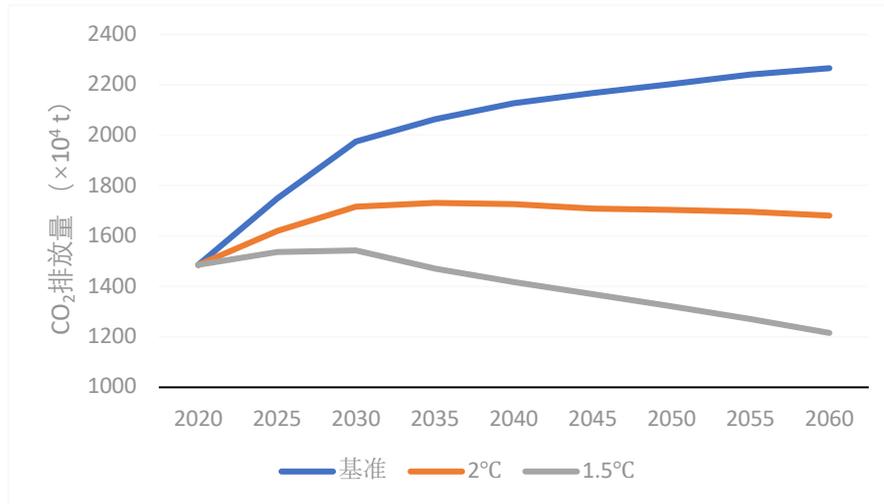


图 3.4-4 减排措施下 CO₂ 排放量预测 (2020-2060)

由图 3.4-4 可以看出，基准情景下，CO₂ 排放量在 2020-2030 年急速增长，2030 年达到 1874×10⁴t，之后虽碳排放强度下降，但因货物周转量依然在增加，CO₂ 排放量增速放缓，但维持稳定增长的状态，到 2060 年达到 2266×10⁴t。在 2°C 情境下，在各种节能措施作用下，CO₂ 排放量在 2030 年达到 1717×10⁴t，之后 CO₂ 排放量开始缓慢下降，

到 2060 年降至 $1682 \times 10^4 \text{t}$ 。在 1.5°C 情境下，在各种节能措施作用下， CO_2 排放量在 2030 年达到 $1543 \times 10^4 \text{t}$ ，随后急速下降，到 2060 年降至 $1215 \times 10^4 \text{t}$ 。

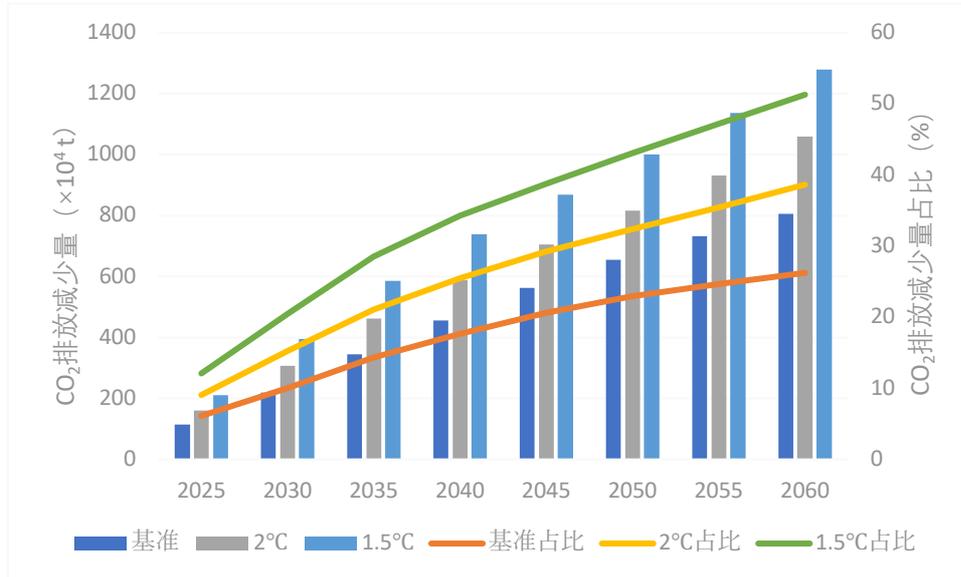


图 3.4-5 所有减排措施的 CO_2 减排量预测 (2025-2060)

由图 3.4-5 可见，在内河各种减碳措施作用下：基准情境下，到 2060 年 CO_2 排放量可以降低 $806 \times 10^4 \text{t}$ 由周转量增加带来的 CO_2 ，为 2060 年 CO_2 排放量的 26%； 2°C 情境下，到 2060 年 CO_2 排放量可以降低 $1060 \times 10^4 \text{t}$ 由周转量增加带来的 CO_2 ，为 39% 的 CO_2 ； 1.5°C 情境下，到 2060 年 CO_2 排放量可以降低 $1280 \times 10^4 \text{t}$ 由周转量增加带来的 CO_2 ，为 51% 的 CO_2 。

从各减排措施的 CO_2 减排量占比（图 3.4-6）看，电动船比例的增加对 CO_2 减排贡献量较大，尤其是 1.5°C 下，电动船对 CO_2 减排贡献量最显著，其次为 2°C 情境（表 3.2-1）。船型大型化在未来近 5 年内仍会贡献较多的 CO_2 减排量，但未来随时间推移，随着大型化趋势的不可持续，减碳力度随之减小。船舶淘汰虽受减排情景影响小，但在基准情境下对 CO_2 减排贡献量仍然显著。

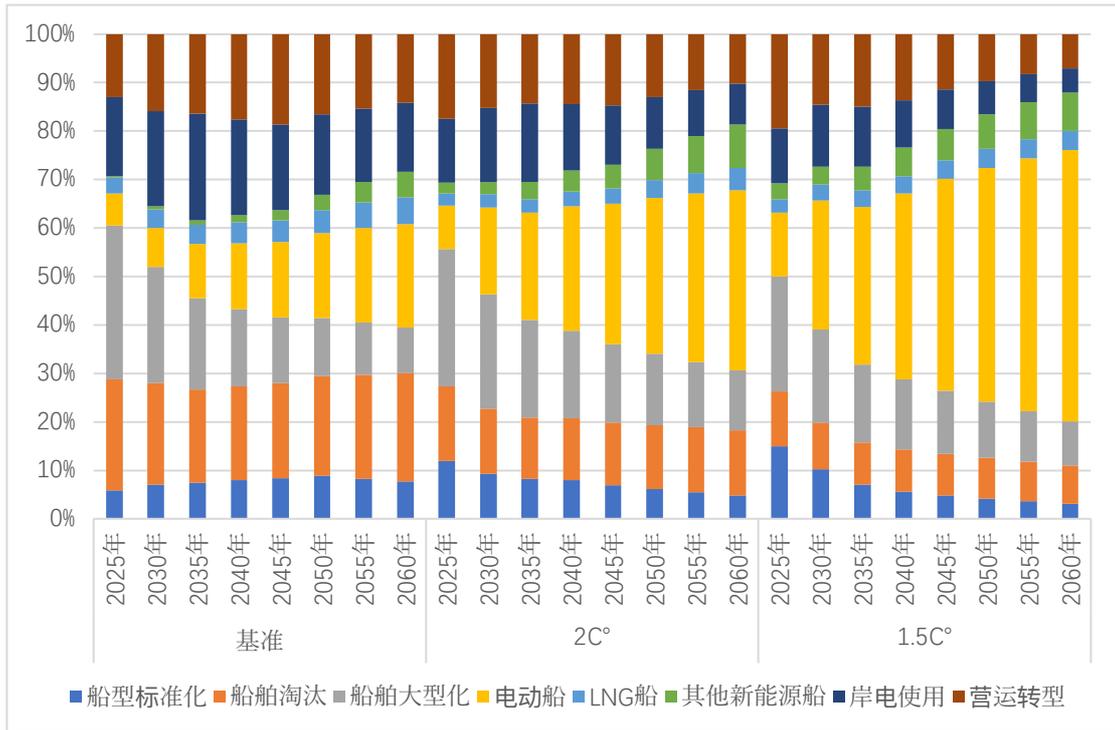


图 3.4-6 各减排措施的 CO2 减排量占比 (2025-2060)

3.5 讨论

3.5.1 CO₂ 排放量趋势

未来水运在综合运输中的承运比重将进一步增加，因而未来较长时期内内河水运货运周转量将持续增加，导致 CO₂ 排放量呈现较快增长；但随着船舶大型化、标准化及老旧船舶淘汰，营运能效提高，电动化及低碳能源的使用，船舶能耗强度快速下降，CO₂ 排放量增速放缓，在 2°C 和 1.5°C 情境下，船舶能耗强度加快下降，CO₂ 排放量在 2030 年之后甚至开始出现下降趋势。

从货物周转量预测（图 3.5-1）看出，2030 年前周转量增速较快，2030 年后增长趋势放缓。而减排措施下船舶能耗强度在 2030 年之前降速较快（图 3.4-2），2030 年后降速降低。因而 CO₂ 排放量在 2030 年出现较明显的拐点。

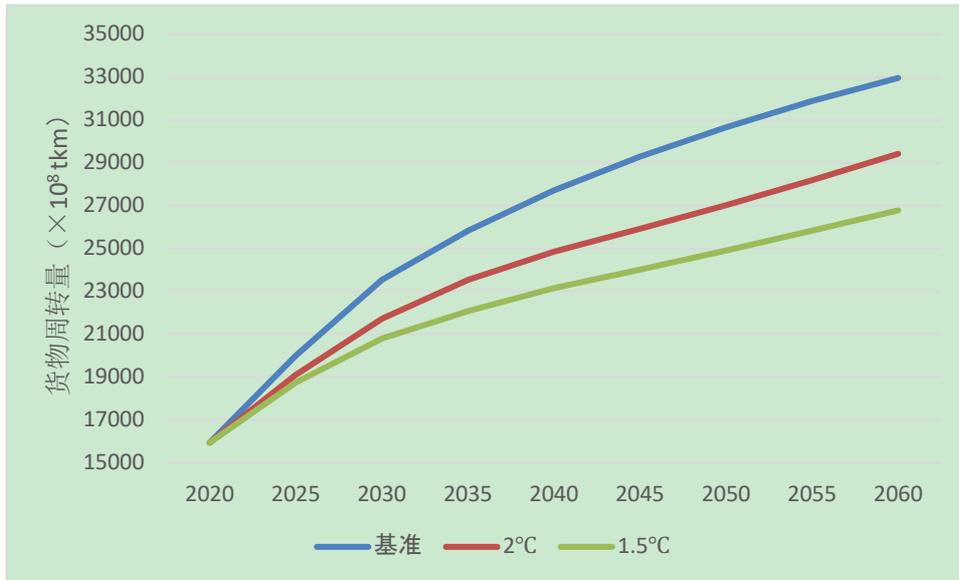


图 3.5-1 货物周转量趋势预测

3.5.2 减排措施

各减排措施在不同情景下的作用力度不同。每种技术和不同船型组合的生命周期及其收益能力和成本影响需进一步研究探讨，根据对航运业利益攸关者的调查，多数船东认为船舶减排技术的可靠性、可扩展性比成本因素更为重要，但减排成本提升最好不超过 10%（Mestemaker 等，2019）。总体来看电动船比例的提升对 CO₂ 减排贡献量最大，随后依次为船舶大型化，船舶淘汰，岸电使用和营运能效提高。内河船舶相对远洋及沿海船舶船型较小，且航行距离短，对能源密度要求相对较低，因而电力及新能源较易应用于内河船舶。电力及新能源对船舶 CO₂ 的减排力度较大，随着技术成熟度的提高，未来电力和新能源将是内河船舶碳减排的主要因素。因而，未来内河低碳发展政策可逐步鼓励推进内河船舶电动化及新能源燃料的应用。

交通运输部水运科学研究院船舶运输技术研究中心对新能源电动船的经济可行性进行了分析：不享受鼓励政策情况：双电船考虑按照当前普通船舶执行的政策情况下（不享受优先过闸和船舶减排带来的碳交易收入），相比于普通船舶增加的收入主要来自于年燃料节省费用，1000 载重吨的船舶投资回收期最短也需 15 年，因而现有技术经济条件下，电动船舶从财务上来看尚不具备可行性。在享受优先

过闸及免费的情况下，800-1000 吨级的船舶投资回收期可控制在 8 年以内。现阶段 1000 吨级以下船舶，尤其是 800-1000 吨级的船舶采用电动的经济性优势比较突出。同时考虑由于船舶吨级增大，增加的电动系统投资大幅增加，因此现阶段建议新能源电动船优先在 1000 吨级以下的普通货船进行推广。此外，由于船舶进行改造相比新建船舶增加了施工改造费用、停航损失费，且部分老旧船舶可能在技术安全水平方面难以达到要求，因此建议优先发展新建新能源电动船。交通运输部海事局已积极开展电动船及船舶用动力电池等技术标准制定工作（交海建字〔2019〕110 号）。

新能源中氢，生物质燃油，和氨燃料在欧洲、美国、日本和英国研究和讨论较多，小船需要的能量密度低，以上新能源均比较适合，从全生命周期看，碳排放量较少。因为氢和氨在不使用引燃物情况下的燃烧不会排放 CO₂，可在减少国际航运温室气体总排放量方面发挥重要作用。2021 年 1 月，武汉众宇动力获得中国首张船用燃料电池产品型式认可证书，填补了空白，也标志着氢燃料电池船舶商业化应用向前迈进了一大步；2021 年 11 月，中国船级社编制的《氢燃料动力船舶技术与检验暂行规则》通过专家评审，为船舶设计、审图、建造与检验提供了有效依据，对船舶推广和应用氢燃料提供了重要法规支撑。但氢在内燃机中高温燃烧会产生大量氮氧化物，因而氢燃料电池会是更好的应用燃料的方式。单台氢燃料电池的功率为百千瓦级别，适合应用于内河船等功率需求较小的船舶上。氨作为船用燃料的研究也在进行，有较好的储存优势，但目前没有实船，MAN、瓦锡兰和 WINGD 等主机研发单位正在进行氨燃料发动机的研究，预计将于 2024 年出现示范样机。但对于氨作为船用燃料的船型研究主要集中在大型远洋运输船上。

营运减排措施主要有：运营管理优化和运输结构优化转型，降速航行等，但是因为内河船舶航速较低，未来航速下降空间有限。未来

营运减排措施将主要集中在运营管理优化，运输结构优化转型，大力发展铁水联运和大数据的货运信息平台建设等方面。

3.5.3 减排目标的实现情况

《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》简称《研究》预测了在政策情景，2°C和 1.5°C下的 CO₂排放量。内河货运周转量在水运（内河和沿海）货运周转量中的占比约为 32%-35%，以 2020 年 32.33%为基数，预测 2030 年和 2050 年内河货运周转量在水运货运周转量中的占比增长至 33%和 36%，以货运周转量占比和 CO₂排放占比相同为假设计算内河运输 CO₂排放量，结果见表 3.5-1。

通过对本文核算结果表 3.5-2 和表 3.5-1《研究》中结果进行对比，可见，在减碳措施下 2030 年内河运输 CO₂排放量完成《研究》指标，2050 年内河运输 CO₂排放量在 2°C和 1.5°C情境下达标，但基准情境下仍有 116×10⁴t 的目标值未完成。

表 3.5-1 《研究》中水路（内河和沿海）运输 CO₂排放量预测（×10⁴t）

情景	水路（内河和沿海）			内河运输		
	2020 年	2030 年	2050 年	2020 年	2030 年	2050 年
基准	8600	11000	5800	2780	3630	2088
2°C	8600	10000	4800	2780	3300	1728
1.5°C	8600	9600	4800	2780	3168	1728

表 3.5-2 预测的内河运输 CO₂排放量（×10⁴t）

情景	2020 年	2030 年	2050 年
基准	1486	1974	2204
2°C	1486	1717	1704
1.5°C	1486	1543	1321

2021 年交通运输部《绿色交通“十四五”发展规划》中“十四五”发展具体目标为营运船舶单位运输周转量 CO₂排放，即船舶能耗强度较 2020 年下降 3.5%。2021 年国务院《2030 年前碳达峰行动方案》提出到 2030 年，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比 2020 年下降 9.5%。根据本文船舶能耗强度预测，2025 年在基准，2°C和 1.5°C情境下的船舶能耗强度较 2020 年分别降低了 6.11%，9.05%和

12.08%，超预期完成规划目标。2030年在基准，2°C和1.5°C情境下的船舶能耗强度较2020年降低了10.02%，15.21%和20.41%，完成方案目标。

2018年《IMO船舶温室气体减排初步战略》，确定了温室气体减排的量化目标，目标是与2008年相比，国际航运每单位运输活动的平均CO₂排放量到2030年至少降低40%，并力争到2050年降低70%。从核算结果发现（图3.4-1），在基准情境下，与2008年相比，2020年船舶能耗强度已经降低72%，达到温室气体减排初步战略要求。

4.内河航运中长期低碳发展路径结论和建议

4.1 结论

（1）随着“双碳”战略的实施，未来中国内河航运仍保持一个较快发展趋势。

1) 基准情境下，2035年内河运输船舶货运量约 $51.5 \times 10^8 \text{t}$ ，货物周转量达到 $25835 \times 10^8 \text{tkm}$ ；2035年之后内河周转量会有逐步增长，但增长速率明显下降，内河货运量增量放缓；到2060年内河周转量达到 $32962 \times 10^8 \text{tkm}$ 。

2) 2°C情境下，2035年内河运输船舶货运量约 $46.3 \times 10^8 \text{t}$ ，货物周转量达到 $23530 \times 10^8 \text{tkm}$ ；2060年内河周转量达到 $29421 \times 10^8 \text{tkm}$ 。

3) 1.5°C情境下，2035年内河运输船舶货运量约 $43.9 \times 10^8 \text{t}$ ，货物周转量达到 $22082 \times 10^8 \text{tkm}$ ；到2060年内河周转量达到 $26781 \times 10^8 \text{tkm}$ 。

（2）未来内河船舶能耗强度依然会受各减排措施的影响，不同情境下内河船舶碳排放量变化趋势如下：

1) 基准情景下，CO₂排放量在2020-2030年急速增长，2030年达到 $1874 \times 10^4 \text{t}$ ，之后虽碳排放强度下降，但因货物周转量依然在增加，CO₂排放量增速放缓；2060年达到 $2266 \times 10^4 \text{t}$ 。

2) 2°C情境下, 在各种减排措施作用下, 2030年 CO₂排放量约 1717×10⁴t, 之后 CO₂排放量呈缓慢下降趋势; 2060年降至 1682×10⁴t。

3) 1.5°C情境下, 在各种减排措施作用下, 2030年 CO₂排放量约 1543×10⁴t, 随后急速下降, 2060年降至 1215×10⁴t。

4.2 建议

实现内河船舶碳减排目标, 需要将适应于船舶的技术、运营和创新等解决方案进行组合。中国内河船舶碳排分阶段实施, 具体如下:

(1) 短期重点提高岸电使用率, 加快电动船试点, 同时推进船型标准化;

(2) 中期重点推广新能源船的使用, 积极提高在用船舶营运能效, 加速老旧船舶淘汰, 提高船型标准化;

(3) 长期重点降低燃料碳强度, 加强电动船舶及其他新能源应用的政策及技术支持。

5.参考文献

- (1) 《低碳交通》，中国低碳发展丛书。中国环境科学出版社，2015年
- (2) 水利部，2002-2005 第二次水资源评价数据
- (3) Mestemaker B, Castro B, Blom E V, et al. Zero emission vessels from a shipbuilder's perspective. Glasgow: 2nd International Conference on Smart & Green Technology for the Future of Marine Industries, 2019
- (4) 中华人民共和国水利部、中华人民共和国国家统计局，第一次全国水利普查公报，2013年，中国水利水电出版社
- (5) 李晓易,谭晓雨,吴睿,徐洪磊,钟志华,李悦,郑超蕙,王人洁,乔英俊.交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(06):15-21
- (6) 韦之杰，内河之间（一）：内河水运是综合运输体系的短板[J].珠江水运,2022(06):22-26
- (7) Lindstad H, Eskeland G S, Psaraftis H, et al. Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach[J].Ocean Engineering, 2015, 110: 94-101
- (8) Takashima K, Mezaoui B, Shoji R. On the fuel saving operation for coastal merchant ships using weather routing[J]. Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2009, 3(4): 401-406
- (9) 非道路移动污染源排放清单编制技术指南（试行），2014.6，环境保护部机动车排污监控中心
- (10) 2020年交通运输行业发展统计公报
- (11) GHG4, IMO 第四次温室气体研究报告，MEPC75/7/15: Fourth IMO GHG Study 2020 – Final report. <https://docs.imo.org/>.
- (12) 黄志辉、丁焰、尹航、王宏丽、马冬、肖寒，2016年，中国船舶大气污染物排放清单报告，环境保护部机动车排污监控中心
- (13) The Institute of Energy Economics. EDMC Handbook of Energy & Economic Statistics in Japan 2008[R]. The Energy Conservation Center, Japan.
- (14) 清华大学气候变化与可持续发展研究院，2021年，中国长期低碳发展战略与转型路径研究，中国环境出版集团
- (15) 刘俊伶，孙一赫，王克，等．中国交通部门中长期低碳发展路径研究 [J]. 气候变化研究进展，2018，14(5): 513-521
- (16) 2017-2020年全国交通运输统计资料汇编
- (17) 《综合能耗计算通则》（GB/T 2589-2008）
- (18) 安迅思，2015，中国燃料油市场年度报告
- (19) 聂育仁. 2014. 2013年水路运输船舶油耗监测分析[J]. 水运管理，2014，

36(9): 10 - 12

(20)肖笑,李成,叶潇等.2019.内河船舶大气污染物排放特征实测研究[J].环境科学学报, 39(1):13-24

(21)王志芳.内河船舶减少 CO₂ 排放的策略研究[J].船海工程, 2010, 39(06):145-147

(22)中共中央、国务院,2021,《国家综合立体交通网规划纲要》

(23)交通部,2007,《全国内河航道与港口布局规划》

(24)引领绿色航运发展—国内航运低零排放政策的国际经验,自然保护协会,2020.7

(25)《亚太绿色港口实践精选》,彭传圣,于秀娟,2019,人民交通出版社.

(26)陆潘涛,韩亚龙,戴瀚程,1.5°C和2°C目标下中国交通部门2050年的节能减排协同效益.北京大学学报自然科学版.2021,57(3):517-528

(27)夏冬飞,王秋霞,成慧慧,2022,2020蓝港先锋:中国典型港口空气和气候协同力评价,亚洲清洁空气中心

(28)交通运输部,2015,珠三角、长三角、环渤海(京津冀)水域船舶排放控制区实施方案

(29)国家电网有限公司,2018,港口岸电 描绘绿色长江新画卷,网址:
<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588159/c9379452/content.html>

(30)六部委,2019,交通运输部,财政部,国家发展改革委,国家能源局,国家电网公司,南方电网公司,关于进一步共同推进船舶靠港使用岸电工作的通知,交水发(2019)14号

(31)交通运输部,2019,交通运输部关于推进长江航运高质量发展的意见,交水发(2019)87号

(32)交海建字(2019)110号,交通运输部海事局关于十三届全国人大二次会议第5889号建议的答复函。