

## 航运碳中和：碳中和政策对航运市场影响（二）

投资咨询业务资格：  
证监许可【2012】669号

### 报告要点

本系列专题主要探讨碳中和政策对航运业的影响，分为碳中和政策介绍、航运业碳排放趋势、航运业降碳路径、航运业降碳影响四个方面。

### 摘要：

碳中和政策大势所趋，航运业碳减排刻不容缓：船舶能效设计指数(EEXI)将于2023年1月1日正式实施，航运业的二氧化碳排放量将每年下降6%，到2050年降至1.2亿吨。国际海事组织(IMO)于2018年4月通过了航运业温室气体减排初步战略，以2008年碳排放为基准，提出到2030年将航运业碳排放强度降低40%，2050年碳排放强度降低70%（碳排放总量降低50%）的明确目标。

全球海运运力变动受政策影响不确定性增大：经济增长驱动海运需求提升，海运需求提升带动运力增长，分船型来看未来运力增长仍集中在集装箱、干散货和油轮主力船型。分燃料类型看，运力的增长不仅要考虑到经营效益，也须考虑航运碳减排政策要求，船东要在当前不确定的环境下决定扩张、更新何种类型的船只，要适应脱碳、零排放环境法规的变化，航运业需要更先进的技术或替代燃料来提高船舶能效，技术、可选燃料不确定性较大，未来运力的变动不确定性较大。

航运减碳影响深远：二氧化碳排放受船型、速度、大小、船体设计、压舱物、技术以及使用的燃料类型等因素影响。船东将在现有技术条件下根据难易程度选择适合自己的减碳方式，比如短期选择降速手段（只有约15%的船舶满足新规要求，85%的集装箱船需降低航速以满足EEXI要求，有效运力将减少6%到10%），中期LNG船舶、甲醇燃料应用增多、船舶大型化成为趋势，长期随着技术的发展航运减碳将向替换燃料倾斜，例如氢气、氨气燃料船舶。航速下降导致市场有效运力下降，船舶航行时间延长导致海运总成本提升，运力增加、替代燃料船舶需要资本支出提升来实现，运力不足导致经济增速回落、运费上涨概率提升，降速导致单船油耗下降，尽管运力提升，燃料油需求增速或较前期下调。

### 化工研究团队

研究员：  
胡佳鹏（甲醇、尿素）  
021-80401741  
hujiapeng@citicsf.com  
从业资格号：F3039655  
投资咨询号：Z0013196

黄谦（PTA、乙二醇）

021-80401738  
huangqian@citicsf.com  
从业资格号：F3063512  
投资咨询号：Z0014611

杨家明（燃料油、沥青）

021-80401704  
yangjiaming@citicsf.com  
从业资格号：F3046931  
投资咨询号：Z0015448

## 目 录

摘要:	1
一、 航运业碳排放趋势（碳排放强度）	4
免责声明	40

## 图目录

图 1:	2021 年全球航运燃料类型	4
图 2:	航运碳排放因子	5
图 3:	海运贸易量与航运二氧化碳排放	6
图 4:	航运二氧化碳排放与排放强度	6
图 5:	航运碳减排时间线	7
图 6:	航运业二氧化碳排放量展望 单位: 十亿吨/年	7
图 7:	航运新规时间线（旧版本）	8
图 8:	航运新规时间线（新版本）	9
图 9:	国际航运碳强度规则下的营运类和技术类碳强度指标对比	13
图 10:	碳转换系数 $C_F$	16
图 11:	样本船舶 2021 年相关航行及油耗数据	19
图 12:	样本船舶的 CII 计算结果 单位: $g/t \cdot n \text{ mile}$	19
图 13:	不同船型载重与营运碳排放强度 attained CII 单位: $g/t \cdot n \text{ mile}$	20
图 14:	船型大小与营运类碳强度 EEOI 关系	21
图 15:	2019 年不同船型 CII 参考基线计算参数	22
图 16:	相较于 2019 年 CII 参考基线的折减系数	23
图 17:	各船型 EEDI 基线值计算公式表	24
图 18:	要求的船舶能效指数 Required EEXI 公式示意图	24
图 19:	CII 评级边界	25
图 20:	CII 评级边界与要求营运碳强度变化	25
图 21:	各船型 CII 评级边界线参数表	26
图 22:	样本船舶 Reference CII 及 2023 年各评级边界值	26
图 23:	样本船舶 2023 年 CII 评级结果 %	27
图 24:	四种样本船型 2023-2026 年 C 级及以上船舶占比 %	28
图 25:	散货船 2023-2026 年 CII 评级占比变化 %	28
图 26:	集装箱船 2023-2026 年 CII 评级占比变化 %	28
图 27:	杂货船 2023-2026 年 CII 评级占比变化 %	29
图 28:	油船 2023-2026 年 CII 评级占比变化 %	29
图 29:	17.4 万方 LNG 船能效指数测算参数表	31
图 30:	2020 年 LNG 燃料集装箱船的燃油消耗数据	31
图 31:	Attained EEXI 计算方法	32
图 32:	2023-2026 各年折减率和 Required CII	33
图 33:	17.4 万方 LNG 船 2023 年碳强度指标评级边界示意图	33

图 34:	2020 年 LNG 燃料集装箱营运 CII 计算与评级结果.....	34
图 35:	2020 年 LNG 燃料集装箱船 LNG 的热能贡献率、碳排放贡献率及评级情况.....	34
图 36:	2012-2018 全球航运温室气体排放.....	38
图 37:	历年航运碳排放强度变化（较 2008 年）.....	38

## 一、航运业碳排放趋势（碳排放强度）

现有船舶燃料主要为化石燃料（低硫燃料油+高硫燃料油+柴油+LNG），航运业碳排放与船舶油耗密切相关。

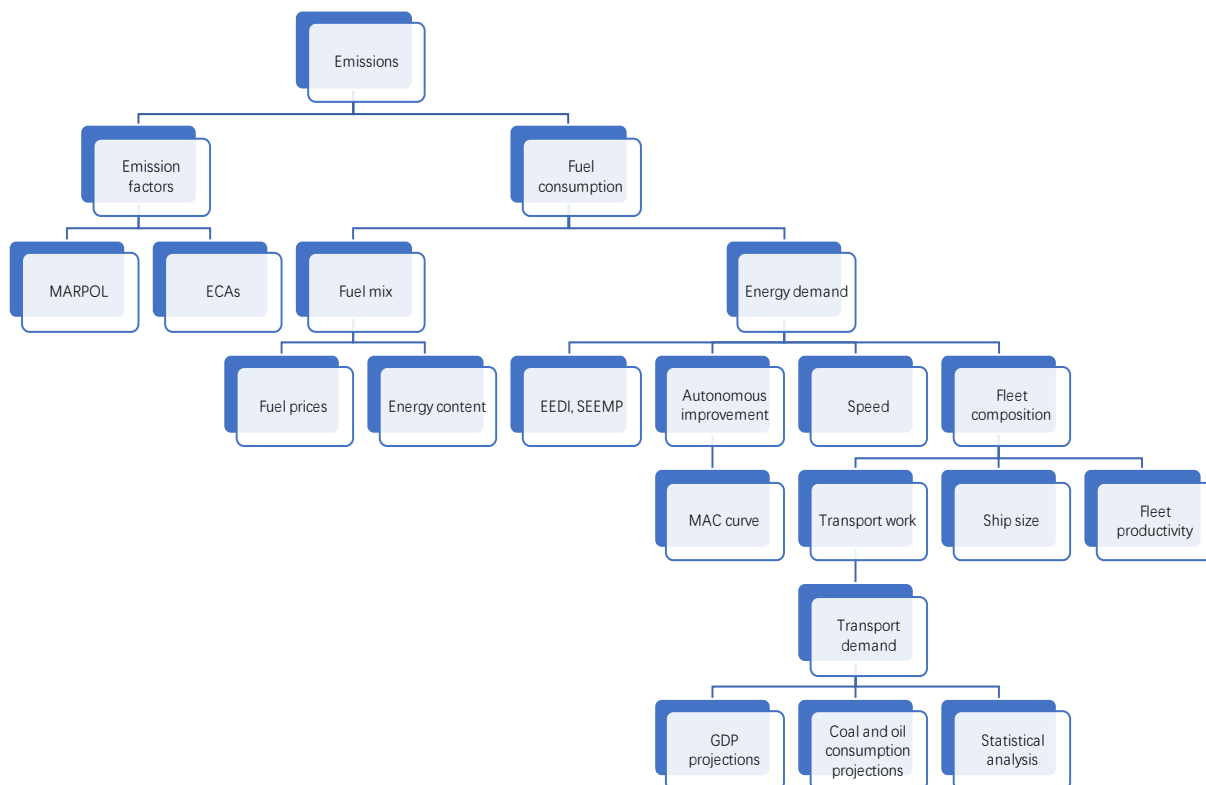
图 1：2021 年全球航运燃料类型

燃料类型	船只	吨位（GT）	标箱（TEU）	载重吨（dwt）	船只占比	GT%	TEU%	dwt%
Very Low-Sulphur (VLS)								
Intermediate Fuel Oil (IFO)	36 188	993 715 259	18 384 210	1 534 083 046	36.26	69.08	70.97	72.11
VLS Marine Diesel Oil (MDO)	33 118	29 698 675	149 929	27 886 341	33.18	2.06	0.58	1.31
IFO 380*	3 635	283 299 533	6 949 482	437 386 040	3.64	19.69	26.83	20.56
VLS Marine Gasoil (MGO)	2 539	7 441 142	34 467	6 769 951	2.54	0.52	0.13	0.32
Ultra-Low Sulphur (ULS) MDO	381	697 587	7 000	661 627	0.38	0.05	0.03	0.03
LNG, VLS IFO	373	36 964 811	144 014	30 159 817	0.37	2.57	0.56	1.42
LNG, VLS MDO	168	10 814 060	12 703	8 190 743	0.17	0.75	0.05	0.39
IFO 180	166	7 351 589	75 955	9 536 173	0.17	0.51	0.29	0.45
ULS IFO	43	352 580	15 617	438 639	0.04	0.02	0.06	0.02
LNG, VLS MGO	37	424 846	10	430 662	0.04	0.03	0	0.02
LNG	32	459 380	260	139 039	0.03	0.03	0	0.01
MDO	22	652 797	1 629	188 652	0.02	0.05	0.01	0.01
ULS MGO	22	26 594	16 571	0.02	0	0	0.03	0
Biofuel	18	360 677	11 684	386 434	0.02	0.03	0.05	0.02
MGO	12	880 222	122 003	0.01	0.06	0.01	0.02	0.06
Methanol, VLS IFO	11	336 377	552 044	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02
Ethane, VLS IFO	7	292 595	264 750	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
Nuclear	6	144 573	1 324	50 079	0.01	0.01	0.01	0
LPG, VLS IFO	5	236 752	272 690	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
Biofuel, LNG	4	43 851	3 907	0	0	0	0.01	0
Compressed Natural Gas (CNG), VLS MDO	3	111 058	105 325	0	0.01	0	0	0.01
IFO 380, LNG	2	251 144	18 400	0	0.02	0	0	0.02
MDO, MGO	2	183 254	16 030	0	0.01	0	0	0.01
Biofuel, VLS MGO	2	6 810	9 876	0	0	0	0	0
VLS IFO, Well Fuel	1	86 952	166 546	0	0.01	0.01	0	0.01
CNG, VLS MGO	1	30 742	31 473	0	0	0	0	0
LNG, MDO	1	65 314	600	22 437	0	0	0	0
IFO 380*, MGO	1	149 215	19 189	0	0.01	0	0	0.01
Methanol	1	51 837	10 670	0	0	0	0	0
Nuclear, VLS MDO	1	33 500	9 000	0	0	-	0	0
Unknown fuel type	22 998	63 435 988	115 238	69 356 421	23.04	4.41	0.44	3.26
<b>Grand Total</b>	<b>99 800</b>	<b>1 438 599 714</b>	<b>25 904 122</b>	<b>2 127 304 575</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<i>World total known fuel type</i>	<i>76 802</i>	<i>1 375 163 726</i>	<i>25 788 884</i>	<i>2 057 948 154</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>

资料来源：UNCTAD 中信期货研究所

从航运碳排放影响因子看，燃油消耗是影响航运碳排放较关键的因素，此外政策、全球经济增速、运力变动等因素均影响航运的碳排放水平。

图 2：航运碳排放因子

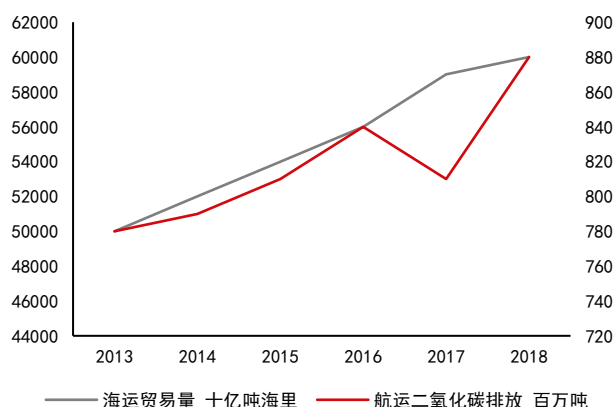


资料来源：IMO 中信期货研究所

IMO 认为航运二氧化碳排放评估有六步：

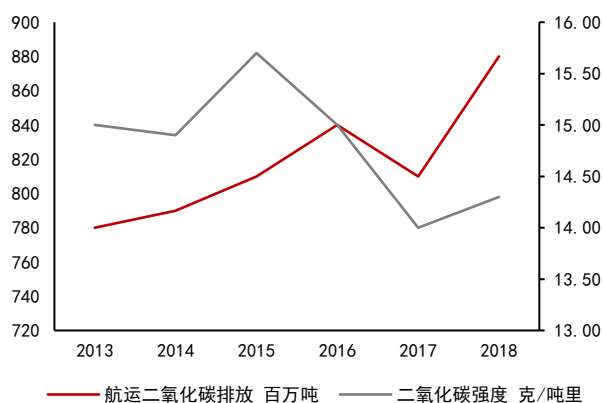
- 1) 建立航运量与经济增速、人口的相关关系。
- 2) 基于 GDP 与人口增速预测航运量
- 3) 收集政府间气候变化专门委员会（IPCC）对于能源消费演变和消费水平
- 4) 使用能源消费预测来预测航运量
- 5) 描述船队和活动、预测未来船队组成
- 6) 预测船舶能效

图 3：海运贸易量与航运二氧化碳排放



资料来源：DNV 中信期货研究所

图 4：航运二氧化碳排放与排放强度



资料来源：DNV 中信期货研究所

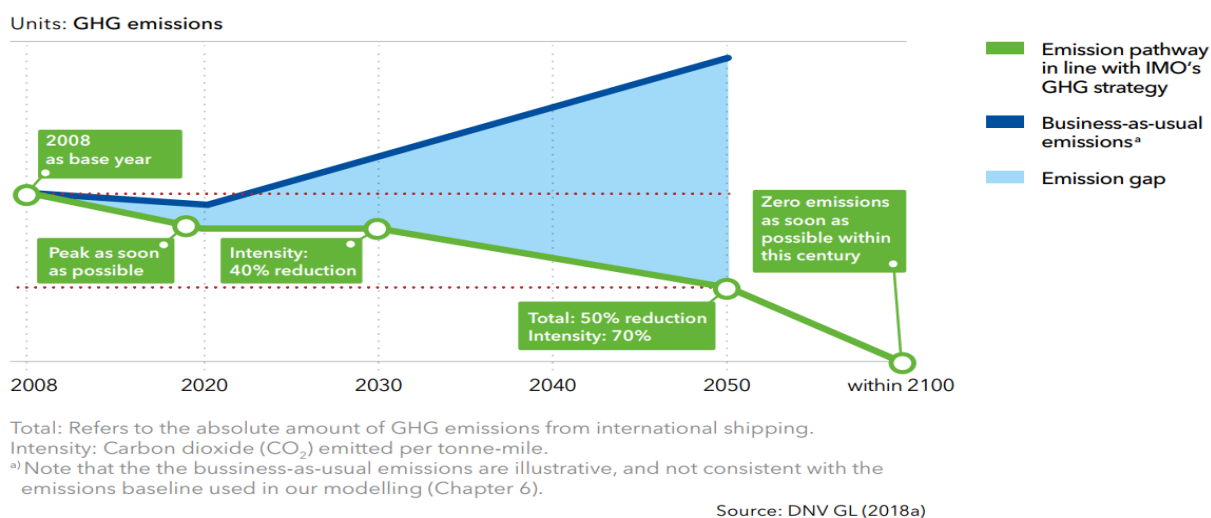
随着航运业减排进程不断推进，作为替代能源代表选手的液化天然气（LNG）逐步崭露头角。据全生命周期（Well-to-Wake）研究证实，使用 LNG 作为船用燃料可以带来显著的环境效益，与油基船用燃料相比，可减少 21% 的排放。与常规船用燃料相比，使用 LNG 作为船用燃料可以将硫氧化物降至几乎为零，氮氧化物降低 95%，颗粒物降低 99%。尤其近几年，全球 LNG 需求迎来爆发式增长，使得 LNG 在世界能源结构中的地位不断被拉高。尽管全球 LNG 消费再 2011-2016 年只增长了 1700 万吨，但在 2017 年和 2018 年，LNG 需求猛增至 6300 万吨，2018 年，全球 LNG 市场规模更是达到了 3.2 亿吨。究其原因，很大程度是因为 IMO 下属海上环境保护委员会在 2016 年 10 月召开的第 70 次会议上通过的一项决议——2020 年 1 月 1 日起，全球船用燃料硫排放上限从目前的 3.5% 下调至 0.5%。值得注意的是，2020 年 2 月，IMO 污染预防及响应分委会起草了有关防治船舶污染的《MRPOL 公约修正案》，禁止船舶运载不符合标准的燃料油，这意味着除安装废气处理装置的船舶外，禁止船舶运载任何硫含量超过 0.5% 的燃料油，这直接或间接地导致了 LNG 燃料需求的波动，将 LNG 应用推向了又一高潮，或暗示 LNG 船舶应用带来的碳排放强度下降对航运碳减排效果显著。

在 IMO MEPC75 会议前期，环保组织清洁航运联盟（Clean Shipping Coalition）向 IMO 递交了一份技术报告，声称 LNG 燃料中的甲烷成分将加快温室气体排放总量的增长，尽管它的含碳量较重燃油要低。该组织呼吁 IMO 将 LNG 从低碳替代燃料的名单中剔除，该联盟表示，从长远来看，在帮助航运业实现 2016 年巴黎协定设定的温室气体减排目标上，LNG 是没有未来的。该组织认为，IMO 的温室气体减排战略应当关注真正的“低碳燃料”。该联盟在提案中提到：“作为一种暂时呈现液态但在自然状态下为气态的化石燃料，LNG 大部分由甲烷构成，甲烷不仅是一种燃料，自身还是一种强大的温室气体……尽管其生命周期很短（大约 10 到 12 年），单以 100 年时间来计算，每克化石甲烷对气候造成的直接影响确实等量二氧化碳的 30 倍，换句话说，甲烷在 10 到 12 年里给地球产生的热量是等量二氧化碳的 30 倍，换句话说，甲烷在 10 到 12 年里给地球产生的热量是等量二氧化碳的 30 倍，换句话说，甲烷在 10 到 12 年里给地球产生的热量是等量二氧化碳的 30 倍。”

碳在 100 年里产生的 30 倍。”其实，有关对于 LNG “清洁”属性的质疑早已存在，但行业有一种观点认为，虽然 LNG 燃料并不是一种十全十美的最终方案，但在温室气体减排方面，LNG 确实有巨大优势，LNG 将是航运业通往零排放目标的最佳过渡能源。而且不可否认，在未来几年内，LNG 船舶将是所有替代燃料中应用最广泛的一种。

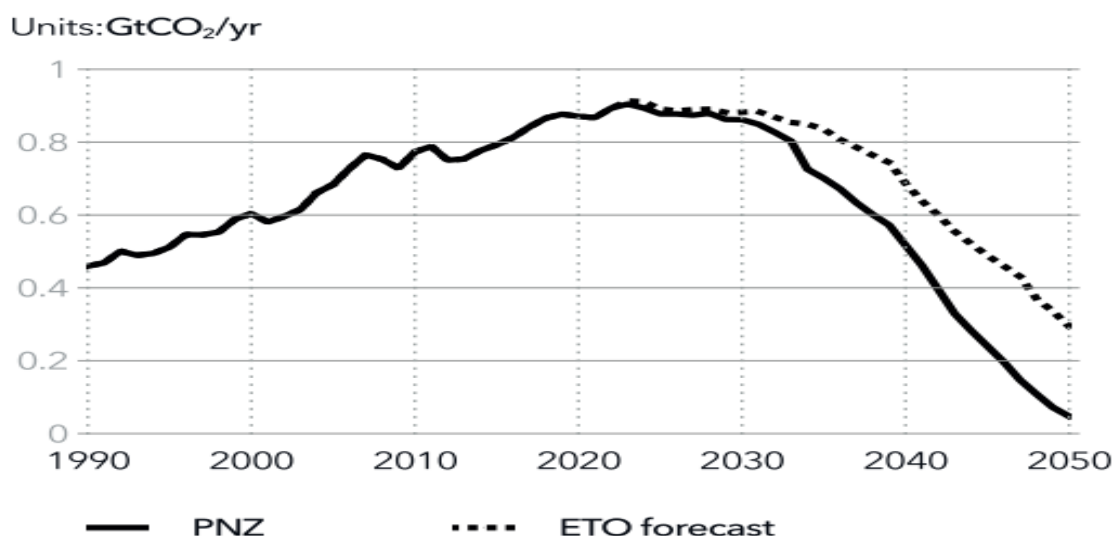
政策：

图 5：航运碳减排时间表



资料来源：DNV 中信期货研究所

图 6：航运业二氧化碳排放量展望 单位：十亿吨/年



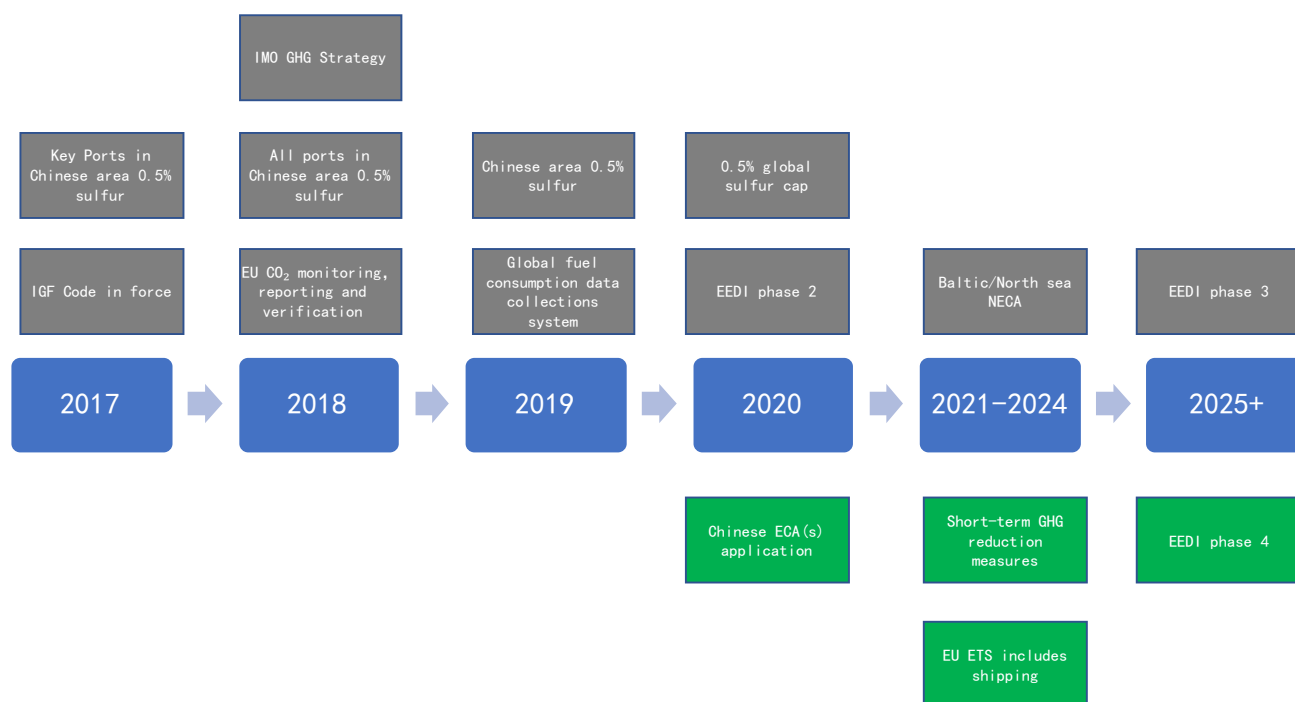
资料来源：DNV 中信期货研究所

为减少航运业温室气体排放，国际海事组织（IMO）于 2018 年 4 月通过了航运业温室气体减排初步战略。以 2008 年碳排放为基准，提出到 2030 年将航运业碳排放强度降低 40%，2050 年碳排放强度降低 70%（碳排放总量降低 50%）的明确目标。

国际海事组织（IMO）在海洋环境保护委员会（MEPC）解决船舶温室气体排放的历史追溯到 1997 年。重要的里程碑事件是 2011 年新造船只能效设计指数（Energy Efficiency Design Index）和船舶能效管理计划（Ship Energy Efficiency Management Plan），2018 年 IMO 温室气体减排战略（Initial IMO Strategy on Reduction of GHG emissions from ships）。

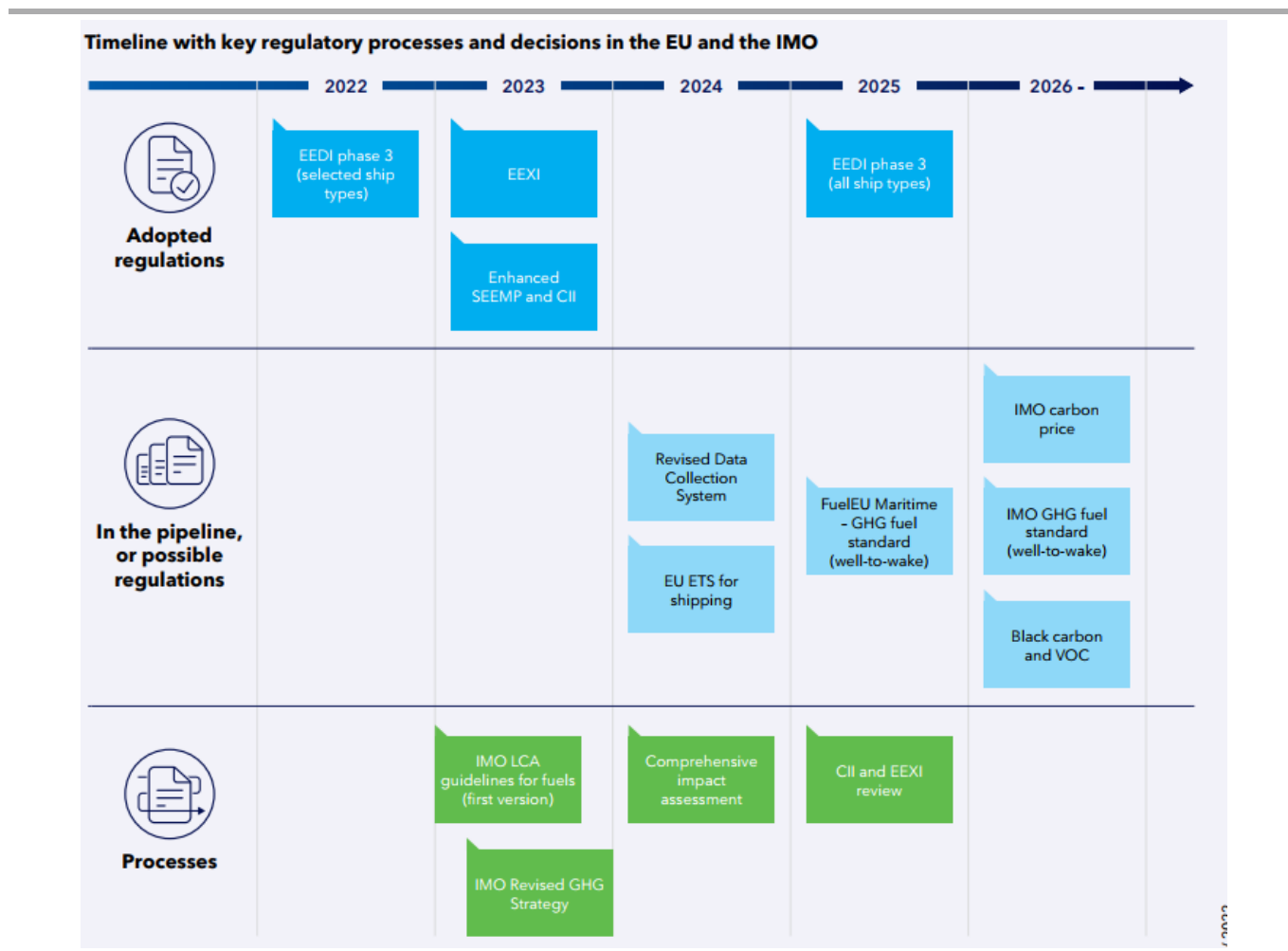
影响 CO<sub>2</sub>排放量的因素很多：船型、速度、大小、船体设计、压舱物、技术以及使用的燃料类型等。船东将在现有技术条件下根据难易程度选择适合自己的减碳方式，比如短期选择降速手段。

图 7：航运新规时间线（旧版本）



资料来源：DNV 中信期货研究所

图 8：航运新规时间线（新版本）



资料来源：DNV 中信期货研究所

船舶能效设计指数 (EEXI) 将于 2023 年 1 月 1 日正式实施，航运业的二氧化碳排放量将每年下降 6%，到 2050 年降至 1.2 亿吨。

国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 海上环境保护委员会于 2021 年 6 月召开第 76 届会议，对防污公约 (以下简称 MARPOL 公约) 附则 VI 进行了较大修订，其中新增的第 28 条引入了船舶营运碳强度指标 (Operational carbon intensity indicator, CII)，用以衡量船舶单位运输工作量二氧化碳的平均排放量，并将营运碳强度指标分为**达到的年度营运碳强度指标 (Attained annual operational carbon intensity indicator, Attained CII)**和**要求的年度营运碳强度指标 (Required annual operational carbon intensity indicator, Required CII)**两类。从 2023 年开始，对于 5000 总吨及以上适用的国际航行船舶，每年将根据船舶的 Attained CII 与 Required CII 的对比结果对其进行评级。对于评级较差的船舶，将可能影响其获得碳强度指标的符合声明，会给予其正常营运带来诸多不利影响。**船舶碳强度指标 (Carbon Intensity Indicator, CII)**可分为**营运类和技术类**两种。船舶营运碳强度指标

有船舶能效营运指数 (Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI)、船舶营运能效性能指数 (Energy Efficiency Performance Indicator, EEPI)、**年度营运能效指数 (Annual Efficiency Ratio, AER)** 等。船舶营运类碳强度指标是根据船舶在一段时间内的实际营运数据计算得到的，会随着船舶的营运状况而波动，具有一定的偶然性，可通过人为调控船舶营运状况来控制，可操作性很大。**船舶技术碳强度指标有新造船能效设计指数 (Energy Efficiency Design Index, EEDI)、现有船能效指数 (Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI)、现有船舶设计指数 (Existing Vessel Design Index, EVDI)** 等，是船舶在理论设计情况下的碳强度指标，表示船舶固有的设计能效特性，可视为常数，是恒定不变的（除非船舶经过重大改建）。

EEDI 新船设计能效指数、SEEMP 船舶能效管理计划，于 2015 年施行，所有 400 总吨或以上国际航行新船，必须达到新的 EEDI 要求，将能效指数降低 10%，2020 年-2024 年间再降低 10%，2024 年后要达到减排 30% 的目标，已下水的国际航行船舶，亦要符合 SEEMP 中列明的准则。EEDI 反映船舶满载正常航行过程中，单位载重吨（TEU 或人）、单位航程的主机和辅机消耗燃料排放 CO<sub>2</sub> 质量，计算公式为  $EEDI = CO_2 \text{ emission} / \text{Transport work}$ ，越大表明船舶能效水平越低。

伦敦时间 2020 年 11 月 17 日，国际海事组织 (IMO) 海洋环境保护委员会第 75 届会议 (MEPC 75) 正式批准了关于航运减排短期措施的 MARPOL 附则 VI 修正案草案，并拟在 MEPC 76 会议上正式通过。至此，对现有船实施能效要求的“靴子”终于落地。作为实现国际海事组织航运温室气体减排初步战略的第一项强制性要求，加之其自带的“追溯”属性，这一规则的出台得到了各方的广泛关注。与此同时，MEPC 75 会议还通过了对超大型散货船的 EEDI 基线修订和对部分船型修改 EEDI Phase 3 实施时间和实施要求的 MARPOL 附则 VI 修正案。后续这一系列船舶能效新规则的强制实施，将对未来现有船市场产生重大而深远的影响。

2021 年 6 月，IMO 通过了 CO<sub>2</sub> 排放新规应用于现行船只：现有船的技术能效 (EEXI: Energy Efficiency Existing Ship Index)、营运碳强度指标 (CII: the Carbon Intensity Indicator)、船舶能效管理计划 (SEEMP: the enhanced Ship Energy Efficiency Management Plan)。欧盟计划 2030 年碳排放削减 55%（较 1990 年），2050 年实现碳中和，中国计划在 2060 年前实现碳中和，美国计划 2030 年削减温室气体排放 50%（较 2005 年），日本、加拿大也有类似的削减 40%-45% 排放量的目标。为了保证船舶营运碳强度指标机制的顺利实施，四个相关导则，分别为《2021 年营运碳强度指标和计算方法导则》（以下简称 G1 导则）、《2021 年与营运碳强度指标联合使用的参考基线导则》（以下简称 G2 导则）、《2021 年与参考基线相关的营运碳强度折减系数导则》（以下简称 G3 导则）和《2021 年船舶营运碳强度评级导则》（以下简称 G4 导则），通过该四个导则的联合使用，可以对每一适用的船舶进行 CII 的计算和评级。

新规则具体的技术要求：

为加快航运温室气体减排的步伐，促使航运温室气体排放尽快达到峰值，IMO 基于对满足 EEDI 要求船舶的能效相关数据的收集和分析，将集装箱船、杂货船、LNG 运输船、具有非传统推进系统的豪华邮轮和 15000 载重吨以上的气体运输船五种船型的 EEDI 第三阶段（Phase 3）要求提前至 2022 年 4 月 1 日执行，并将其中具有较大减排潜力的集装箱船的 EEDI 第三阶段折减系数按照不同吨位从 30 提升到了 30~50 不等。同时，为了后续更好地评估 EEDI 规则的实施情况及其对航运减排带来的影响，本次通过的 MARPOL 附则 VI 修正案还加入了对 EEDI 船舶的数据收集强制性要求。

另一方面，对满足 EEDI 要求存在困难的超大型散货船，经过多轮 MEPC 会议讨论，最终确定采用与滚装船相同的处理方式，对 279000 载重吨以上的散货船，在计算船舶 EEDI 基线时取 279000 载重吨。

在现有船能效要求方面，与前期将现有船技术能效短期措施和营运能效短期措施分别进行讨论的模式不同，船舶温室气体减排会间会第 7 届会议（ISWG-GHG 7）经过多轮讨论，最终形成了针对现有船能效要求的基于目标型（goal-based）的技术能效和营运能效融合方案，并基于此起草了“关于强制实施目标型技术和营运措施以减少国际航运碳强度”的 MARPOL 附则 VI 修正案草案，要求规则生效后，现有营运船（包括 EEDI 要求生效前的船舶和已满足 EEDI 要求的船舶）既要满足技术能效（EEXI）要求，还要满足营运能效（CII）要求，同时船舶还需按照年度营运能效进行分级（A-E 级）。

现有船的技术能效（EEXI）要求框架参照新造船 EEDI 要求框架制定，是根据船舶固有技术参数并考虑主机限定后功率进行评估得到的能效指数，其所适用船型也与 EEDI 要求适用船型一致。目前 MARPOL 附则 VI 修正案草案对各船型的 Required EEXI 的设定基本等同于 2022 年 4 月 1 日生效的对新造船的 Required EEDI 要求，但对 200000 载重吨及以上的散货船和液货船、120000 载重吨以下的集装箱船，及滚装客船和滚装货船的要求有所放宽。

现有船 Attained EEXI 的计算和验证导则也参照新造船 Attained EEDI 的计算和验证方法制定，目前已基本成型，MEPC 75 后将成立通信工作组对其进行完善，并报 ISWG-GHG 8 和 MEPC 76 审核和批准。同时，考虑到限定主机功率很可能成为现有船为满足 EEXI 要求所采取的主要手段，通信工作组还将同步推出“为满足 EEXI 要求采用的轴功率/主机功率限定系统及其储备功率使用导则”草案。

营运能效方面，将采用 CII 作为指标以表征船舶实际的营运能效水平。在规则强制生效后，每个日历年需对船舶 CII 进行验证，同时还需根据该船营运能效在当年全球船队中的排名对船舶 CII 进行年度评级。根据目前的修正案草案，表现不佳的船舶暂时不会直接导致惩罚性后果，但需要制定改正计划并纳入船舶能效管理计划（SEEMP）。与 IMO 燃油数据收集机制和现有船技术能效要求相一致，针对现有船的营运能效要求及分级机制仅适用于 5000 总吨及以上的 EEDI 适用船型。

虽然针对船舶营运能效的规则要求已经推出，但是就 CII 的具体指标、要求基准线、为达到 IMO 温室气体减排初步战略要求所需达到的折减比例、Attained CII 的计算和验证方法、年度评级级别范围的设定，以及需要与之配套的 SEEMP 的制订和实施要求等，目前均尚无具体要求，有待 MEPC 75 会后通信工作组进一步制定，并在 ISWG-GHG 8 提交审核。

#### 新规则中的不确定因素

虽然针对现有船温室气体减排短期措施的 MARPOL 附则 VI 修正案草案已经明确，但其配套的技术文件仍在讨论之中，即使是技术能效 (EEXI) 已经相对成型的计算验证导则，也仍存在一定的不确定性。

与 EEDI 相同，在 EEXI 计算中船舶的 EEXI 航速也是决定船舶 Attained EEXI 值的关键参数。按照 ISWG-GHG 7/2/7 提供的 EEXI 计算导则草案，现有船的 EEXI 航速可以通过经符合 EEDI 验证指南要求的模型试验获得的速度功率曲线得到，也可以通过由 IHS Fairplay 数据库数据统计回归得到的估算方法获得。经前期对大量实船的 EEXI 航速计算评估发现，该 EEXI 航速估算方法对本身设计较好、技术能效较高的船舶而言，可能会出现 EEXI 航速被严重低估的问题。即使后续该方法在通信工作组中被修订和完善，基于数据统计回归得到的方法在其适用性上仍可能会存在一定的局限性。

在 EEXI 计算中的另一重要参数是计入其中的船舶主机功率。在 Attained EEDI 计算时，这一参数 PME 的取值是 75%MCR。考虑到主机功率限定将会成为现有船满足 EEXI 要求的主要途径，而限定后的主机功率 MCR (limit) 不像主机额定功率 MCR 一样留有一定的功率冗余，因此在对限定功率后的主机进行 Attained EEXI 计算时，PME 取 75%MCRlim 还是 87%MCRlim，有待进一步讨论。

而就 CII 而言，其具体指标的确定是基准线、折减率和相关计算验证导则等制定的先决条件。IMO 第四次温室气体报告中，对船舶的营运能效分别采用了 EE01 (Energy Efficiency Operational Indicator)、AER (Annual Efficiency Ratio)、DIST (CO<sub>2</sub> emissions per distance travelled) 和 TIME (CO<sub>2</sub> emissions per hour underway) 四个指标进行衡量，其中 EE01 和 AER 是目前用于船舶营运能效考核的主要参数，也是现有船营运能效指标的热门选项，但两者的计算方法使其在作为营运碳强度指标方面都并不完美。

EE01 是一段时间内船舶实际运营排放的二氧化碳总量与实际客货周转量之间的比值，亦即运输单位客货行进单位距离所产生的二氧化碳排放量。货物的装载率将对这一指标的最终数值产生重要影响。这一参数不仅反映了船舶的船型特征，还直接反映了船公司的经营状况，具有较高的经济敏感性。此外，如果将 EE01 作为船舶营运能效的计算指标，还需对船舶的实际载运数据进行收集和上报，这是目前的 IMO 数据收集机制尚未涵盖的。

AER 则是船舶年度二氧化碳排放量与船舶载重吨和航行距离乘积的比值，相

较 EEOI 计算更为简便，也不存在计算参数获取方面的问题，但这一计算模式却会导致船舶空载所获得的营运能效反而更好的问题。

CII 具体指标的选取并不是一个简单计算方法的选择，作为船舶的营运碳强度指标，它还将用于航运温室气体排放是否满足 IMO 温室气体减排初步战略要求的衡量。按照初步战略的要求，与 2008 年数据相比，全球航运的碳排放强度到 2030 年须降低 40%，2050 年降低 70%。按照 IMO 第四次温室气体报告的研究结论，对相同的航运数据，采用不同的营运碳强度指标所得到的减排比例也会不同。因此，CII 指标的选取将是整个船舶营运能效评价体系最大也最为重要的未知数。

关于营运能效要求需要关注的另一个问题是船舶 CII 年度 A-E 分级的“带宽”。按照 MARPOL 附则 VI 修正案草案要求，对于不满足 C 级要求的 D 级或者 E 级船舶而言，在其后续运营中可能会面临一系列问题，而 A-E 分级的“带宽”将直接决定会落在这一区域中的船舶的数量和比例。按照中国提案 ISWG-GHG 7/2/21 的建议，A、B、C、D 和 E 五级的船舶数量分别占船舶总数的 15%、20%、30%、20% 和 15%。按照欧盟提案 ISWG-GHG 7/2/27 的建议，则是根据该年度与前一年度某一船型所有船舶 Attained CII 的平均变化率三等分得到 B、C、D 三级的分布区间，超出部分分别为 A 级和 E 级。

图 9：国际航运碳强度规则下的营运类和技术类碳强度指标对比

碳强度指标		适用对象	CO <sub>2</sub> 排放量计算方法	数据来源	数值特征	单位形式	要求值	年折减率	证书
营运类	EEOI	船舶自愿试用	燃料法	船舶营运后统计得到的能耗和营运数据	实际变量，是波动的	g/(t·n mile)	无	无	无
	EEPI								
	cbDIST								
	clDIST								
	AER	5000 总吨及以上的 EEDI 适用船型国际航行船舶强制要求		船舶建造设计参数	理论变量，是固有的	g/(t·n mile)	有	有	符合声明
	cgDIST								
技术类	EEDI	400 总吨及以上的 EEDI 适用船型国际航行新造船强制要求							
	EEXI	400 总吨及以上的 EEDI 适用船型国际航行现有船强制要求							

资料来源：IMO 中信期货研究所

《防污公约》附件 VI 修正案草案将于 2021 年 6 月在 MEPC 76 中审议通过，预期于 2023 年 1 月 1 日生效。关于支持准则的进一步工作正在通信小组中进行，并将在 5 月的中期会议中进行讨论，然后在 MEPC 76 进行审议。目前还在与联合国贸易和发展会议（UNCTAD）合作拟订一项影响评估。本质上，EEXI 是 EEDI 对现有船只的应用，并提供额外的指导。它将应用于与 EEDI 相同的船舶类型，并将使用相同的 EEDI 基线。

船舶碳强度，也就是船舶 CO<sub>2</sub>排放指数（这里的“指数”是指任何两个数值对比所形成的相对数），即表明船舶单位运输工作量的 CO<sub>2</sub>排放量，其将船舶 CO<sub>2</sub>排放量与运输工作量联系起来。用船舶碳强度来等价表述船舶 CO<sub>2</sub>排放指数，更为简洁和形象。由于目前船舶消耗的能源基本是含碳燃料，非含碳燃料基本为零，船舶 CO<sub>2</sub>排放量与船舶燃料消耗量直接相关，船舶碳强度亦可提供船舶关于燃油效率方面的信息，因此船舶碳强度指标也是应用于特定船舶类型以表征船舶能效性能的指标，又可称船舶碳强度指标为船舶能效指标。船舶碳强度数值越低，则表示船舶能效水平越高。总的来说，船舶碳强度是一个抽象的、笼统的、宽泛的、指示性的概念，有多种具体表现形式，也就有了多种碳强度指标。船舶碳强度可以用以下公式来表示：

$$I = M(\text{CO}_2) / W(\text{transport})$$

其中：I 为船舶碳强度；M(CO<sub>2</sub>) 为一段时间内船舶 CO<sub>2</sub>排放量，t；W(transport) 为船舶运输工作量。

### 1. CII 的计算

船舶营运 CII 的计算与评级可分为 4 个步骤：

第一步，根据《CII 导则》和某船型船舶的基本信息及报告的日历年 y 的营运数据，计算该船舶日历年 y 达到的年度营运 CII。第二步，根据《CII 参考基线导则》，计算某船型船舶的营运 CII 参考基线。第三步，根据《CII 折减系数导则》，计算某船型船舶日历年 y 的要求的年度营运 CII。第四步，根据《CII 评级导则》，计算某船型船舶日历年 y 的 4 个评级边界值，比较该船舶日历年 y 的达到的年度营运 CII 与 4 个评级边界值，确定该船舶评级结果。

G1 导则对船舶 CII 的计算方法作了明确规定，即船舶在一个日历年排放的二氧化碳总质量与其所进行的总运输工作量之比，计算公式如下：

$$\text{attained CII}_{\text{ship}} = M / W$$

其中：M 为船舶一个日历年排放二氧化碳的总量，g；W 为船舶一个日历年所完成的总运输工作量，DWT · n mile 或 GT · n mile。

船舶一个日历年排放二氧化碳总量 M 的计算公式如下：

$$M = \sum FC_j \times G_j$$

其中：j 为燃油类型；FC<sub>j</sub> 为根据 IMO 数据收集系统公布的一个日历年燃油 j 消耗的总质量，g；G<sub>j</sub> 为燃油 j 的燃油质量与二氧化碳质量换算系数。

船舶一个日历年所做的总运输工作量 W 的计算公式如下：

$$W = C \times D_t$$

其中：对于散货船、液货船、集装箱船、气体运输船、LNG 运输船、滚装货船、杂货船、冷藏货船和兼用船， $C$ 为船舶的载重吨（DWT）；对于邮轮、滚装货船（车辆运输船）和滚装客船， $C$ 为船舶的总吨（GT）； $D_t$ 为船舶一个历年内的航行总距离，n mile。

### 船舶 CO<sub>2</sub>排放量的计算

计算船舶 CO<sub>2</sub>排放量的方法有燃料法和动力法两种。

#### （一）燃料法计算船舶 CO<sub>2</sub>排放量

用燃料法计算船舶 CO<sub>2</sub>排放量，就是根据船舶在一定时间内各种燃料的消耗量，计算出船舶 CO<sub>2</sub>排放量，其核心是计算各种燃料消耗量和选择各种燃料对应的碳转换系数。一定时间内，燃料法计算的船舶 CO<sub>2</sub>排放量等于船舶各种燃料消耗量与燃料对应的碳转换系数的乘积的总和。目前营运类和技术类碳强度指标皆采用燃料法来计算船舶 CO<sub>2</sub>排放量，只是获取燃料消耗量的方式有所不同，区别在于营运类碳强度指标根据船舶报告的燃料消耗量直接计算 CO<sub>2</sub>排放量，技术类碳强度指标则根据动力装置功率和燃油消耗率，间接计算出燃料消耗量，从而计算 CO<sub>2</sub>排放量。

##### 1. 燃料法计算营运类碳强度指标的船舶 CO<sub>2</sub>排放量

通过收集船舶能耗和营运数据，采用燃料法计算船舶 CO<sub>2</sub>排放量，进而可较为容易地实现营运类碳强度指标的计算。因此，目前营运类碳强度指标采用燃料法来计算船舶 CO<sub>2</sub>排放量，用以下公式表示

$$M_{RY, CO_2} = \sum_j FC_j \times C_{Fj}$$

其中： $FC_j$  为一定时间内船舶报告的消耗燃料  $j$  的质量，t； $C_{Fj}$  为燃料  $j$  的碳转换系数，t-CO<sub>2</sub>/t-Fuel。

##### 2. 燃料法计算技术类碳强度指标的船舶 CO<sub>2</sub>排放量

技术类碳强度指标是在设计的理想环境和标准工况下计算得到的。技术类碳强度指标采用燃料法计算船舶 CO<sub>2</sub>排放量，CO<sub>2</sub>排放量等于各种动力装置的功率、运行时间、燃油消耗率、碳转换系数等各项的乘积的总和，用以下公式表示：

$$M_{RJ, CO_2} = \sum_i \sum_j P_i \times SFC_i \times h_i \times C_{Fj}$$

其中： $P_i$  为动力装置  $i$  的功率，kW； $SFC_i$  为动力装置  $i$  在  $P_i$  状态下的燃油消耗率，g/kWh； $h_i$  为动力装置  $i$  在  $P_i$  状态下的运行时间，h； $j$  为动力装置  $i$  在  $P_i$  和  $SFC_i$  状态下使用的燃料； $C_{Fj}$  为燃料  $j$  的碳转换系数，t-CO<sub>2</sub>/t-Fuel； $P_i \times SFC_i \times h_i$  为动力装置  $i$  在  $P_i$  和  $SFC_i$  状态下，在  $h_i$  内消耗的燃料  $j$  的质量，t。

技术类碳强度指标是在设计的特定条件（条件恒定）下计算得到的， $P_i$ 、 $SFC_i$  都

是限定在理想环境和标准工况下的，这些参数视为定值，同时燃料 j 为 NOx 技术案卷中包括的适用试验报告中所列的 SFC<sub>i</sub> 时所使用的燃料，因此采用燃料法可以较为容易地计算技术类碳强度指标中的 CO<sub>2</sub> 排放量。对于 NOx 技术案卷中未包含试验报告且制造商未规定 SFC 或验证者未确认 SFC 的发动机，SFCME (主机的燃油消耗率) 的默认值为 190 g/kWh，SFC<sub>AE</sub> (副机的燃油消耗率) 的默认值为 215 g/kWh。

### 3. 燃料消耗量的其他计算方式

燃料消耗量的获取除了可以通过直接报告和利用动力装置功率、燃油消耗率计算得到外，还可以采用热值效率计算方法，用以下公式表示

$$M_{RQ, CO_2} = \sum_i \sum_j (P_i \times h_i / Q_j \times \eta_i) \times C_{Fj}$$

其中：P<sub>i</sub> 为动力装置 i 的功率，kW；η<sub>i</sub> 为动力装置 i 的效率；h<sub>i</sub> 为动力装置 i 在 P<sub>i</sub> 状态下的运行时间，h；j 为动力装置 i 在 P<sub>i</sub> 使用的燃料；C<sub>Fj</sub> 为燃料 j 的碳转换系数，t-CO<sub>2</sub> / t-Fuel；Q<sub>j</sub> 为燃料 j 的热值，kJ/kg。

热值效率计算方法与技术类碳强度指标中的 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法本质上是一样的。因为 1/(Q<sub>j</sub> × η<sub>i</sub>) 转换过来就是动力装置的燃油消耗率。

### 4. 碳转换系数

利用燃料中碳的质量分数(碳当量)以及 CO<sub>2</sub> 分子中碳和氧的质量比，可以计算得到燃料的碳转换系数。船舶在世界各地所加装的燃料的碳含量不尽相同，因此，碳转换系数最好由燃料供应商提供以更加精确。目前船舶使用的燃料等级已经标准化，各种燃料的碳转换系数也就相对固定。船舶常用的燃料类型及对应的碳转换系数见下表。

图 10： 碳转换系数 C<sub>F</sub>

燃料类型	参照等级	低热值 (KJ/kg)	碳当量	C <sub>F</sub> (t-CO <sub>2</sub> /t-fuel)
柴油/汽油	ISO 8217 DMX 级-DMB 级	42700	0.8744	3.206
轻燃油 (LFO)	ISO 8217 RMA 级-RMD 级	41200	0.8594	3.151
重燃油 (HFO)	ISO 8217 RME 级-RMK 级	40200	0.8493	3.114
液化石油气 (LPG)	丙烷	46300	0.8182	3.000
	丁烷	45700	0.8264	3.030
液化天然气 (LNG)		48000	0.7500	2.750
甲醇		19900	0.3750	1.375
乙醇		26800	0.5217	1.913

资料来源：IMO 中信期货研究所

用燃料法计算船舶 CO<sub>2</sub> 排放量的优势是相关数据较容易获得，计算方法简单。

缺陷是：燃料中的所有碳不是都充分燃烧转换成 CO<sub>2</sub> 的，也可转换成 CO、黑炭等其他含碳物质；有些燃料没有被燃烧而从发动机中逃逸出来，形成油泥、油渣或其他物质，这部分燃料在统计时也有被扣除，但不能被完全统计。燃料法计算的 CO<sub>2</sub> 排放量往往会偏大。因此，采用燃料法所计算的碳强度指标有一定的误差，而且燃料法不能实时反映船舶碳排放的空间分布特征和时间变化特征。这些缺陷值得后续深入研究，以便改进营运类碳强度指标。

## （二）动力法计算船舶 CO<sub>2</sub> 排放量

用动力法计算船舶 CO<sub>2</sub> 排放量，就是根据船舶在一定时间内各种动力装置的实时功率和 CO<sub>2</sub> 排放因子，计算出船舶 CO<sub>2</sub> 排放量，其核心是获取各种动力装置的功率、对应功率下的 CO<sub>2</sub> 排放因子。动力法计算船舶 CO<sub>2</sub> 排放量可用以下公式表示：

$$M_{D, CO_2} = \sum_i \sum_j P_i \times h_i \times R_{Fj}$$

其中：P<sub>i</sub> 为动力装置 i 的功率，kW；h<sub>i</sub> 为动力装置 i 在 P<sub>i</sub> 状态下的运行时间，h；j 为动力装置 i 在 P<sub>i</sub> 状态下使用的燃料；R<sub>Fj</sub> 为动力装置 i 在 P<sub>i</sub> 状态下的 CO<sub>2</sub> 排放因子，t/kWh。

动力法的核心是获取船舶的运行状态。利用船舶自动识别系统（Automatic Identification System, AIS），采集船舶实时航行数据，如航速、吃水、航行时间、地理位置（经纬度）等，获取船舶实时的运行状态，结合船舶静态信息，确定船舶主机、副机和锅炉等动力装置的负荷（功率）和工况条件，同时利用测量得到的 CO<sub>2</sub> 排放因子数据库，计算出船舶 CO<sub>2</sub> 排放量，这样可以更好地表征船舶碳排放的空间分布特征和时间变化特征。如果可以实时监测到主机转速，则对确定主机功率更为有利，因为主机功率与转速的三次方成正比（在不考虑海况影响的条件下）。如果用航速间接确定主机功率，虽然航速等于螺旋桨螺距与转速的乘积，但影响因素增多，会造成误差变大。根据船舶所处的经纬度，结合划定的船舶排放控制区和船舶距离海岸线的距离，可以大致判断出船舶所用的油品，从而选择合适的 CO<sub>2</sub> 排放因子。

船舶在营运过程中各动力装置的工况复杂多变，这极大增加了用动力法计算船舶 CO<sub>2</sub> 排放量的难度，同时计算所需的 AIS 数据量巨大，这样造成计算工作量也是巨大的。如要更为精确计算，所需信息的获取难度更大，如船舶主机转速、消耗的燃油品种等，这些都是船舶私密信息且较难实时获得，而且船舶 CO<sub>2</sub> 排放因子的准确度也较难把握。因此，营运类碳强度指标没有采用动力法计算船舶 CO<sub>2</sub> 排放量。而技术类碳强度指标是在设计的理想环境和标准工况下计算得到的，这也决定了采用动力法计算船舶 CO<sub>2</sub> 排放量对技术类碳强度指标不适用。综上，目前动力法在计算碳强度指标时没有被采用。

## 船舶运输工作量的计算

对于船舶碳强度指标，船舶 CO<sub>2</sub> 排放量可通过一定的方法来唯一确定，而船

船舶运输工作量因基于需求的载运量和基于供给的载运量的不同，以及船型、所载货物、运输距离的不同而含义多样，这就导致有多种碳强度指标，如 EE01、EEPI、AER、EEDI 等，因此船舶运输工作量的单位决定了碳强度指标的单位。一般地，船舶运输工作量为运输货物质量（或所作的功）与运输距离的乘积，用以下公式表示：

$$W_{\text{transport}} = \sum m_{\text{cargo}} \times D$$

其中： $m_{\text{cargo}}$  为船舶运输货物质量（或所作的功），t； $D$  为船舶运输距离，n mile。

船舶运输货物质量（或所作的功）表述如下：①对于散货船、气体运输船、液货船、集装箱船、杂货船、冷藏船、兼用船和滚装货船，为货物总质量，单位为 t；②对于滚装货船（车辆运输船）、滚装客船和豪华邮轮，可为总吨（GT）；③对于集装箱船，也可为集装箱标准箱数量，单位为 TEU；④对于混装集装箱及其他货物的船舶，为集装箱质量与其他货物质量的总和，单位为 t；⑤在无法获得箱货实际质量的情况下，一个重载标准箱可按 10 t 折算，一个空载标准箱可按 2 t 折算；⑥对于客船（包括滚装客船），为乘客数量，单位为人；⑦对于车辆运输船，可为车辆数量或占用的车道长度，单位为辆或 m；⑧对于豪华邮轮，为下铺数量，单位为个。船舶运输距离可以为实际载货航行距离（重载航程）或总的航行距离（重载航程加上压载航程），单位为 n mile（海里）。

对船舶运输货物质量（或所作的功）和船舶运输距离的定义不同，也就有了船舶运输工作量的不同计算方法和表现形式，总体上可分为基于需求的和基于供给的两大类船舶运输工作量计算方法。

#### （一）基于需求的船舶运输工作量的计算

所谓基于需求的船舶运输工作量，是指以航运市场实际需求的船舶运输货物质量（或所作的功）来计算船舶运输工作量。航运市场实际需求的船舶运输货物质量（或所作的功）就是船舶在营运中实际的载货量（或所作的功）。基于需求的船舶运输工作量用以下公式表示：

$$W_{\text{Demand, transport}} = \sum m_{\text{cargo}} \times D$$

其中  $W_{\text{Demand}}$  为船舶在营运中实际的载货量（或所作的功），t； $D$  为船舶运输距离，n mile。

#### （二）基于供给的船舶运输工作量的计算

所谓基于供给的船舶运输工作量，是指以船舶能为航运市场供给的运输货物质量（或所作的功）来计算船舶运输工作量。船舶能为航运市场供给的运输货物质量（或所作的功）就是船舶的装载能力（载重吨或总吨），基于供给的船舶运输工作量用以下公式表示：

$$W_{\text{supply, transport}} = \sum m_{\text{supply}} \times D$$

其中  $m_{supply}$  为船舶的装载能力（载重吨或总吨），t；D 为船舶运输距离，n mile

从上海地区航运公司的主营国际航行货船中随机挑选了典型的散货船、集装箱船、杂货船和油船各 4 艘，作为 CII 计算和评级分析的样本，其 2021 年相关的航行及油耗数据如表所示。

图 11： 样本船舶 2021 年相关航行及油耗数据

船舶类型		载重吨/t	航行距离/n mile	燃料类型		
				柴油/汽油/t	轻燃油/t	重燃油/t
散货船	A1	11588.00	40296.00	262.88	0.00	1860.75
	A2	24196.00	35540.72	208.08	0.00	2493.66
	A3	35300.00	52094.81	150.99	0.00	4349.89
	A4	53119.30	48263.37	160.92	0.00	3938.35
集装箱船	A1	11216.74	45770.18	93.44	1575.74	1258.07
	A2	23596.00	56777.01	50.23	0.00	3683.15
	A3	39528.00	65495.60	75.38	0.00	5881.80
	A4	49064.00	71347.11	124.17	0.00	6958.84
杂货船	A1	16957.00	60190.24	84.41	0.00	4076.08
	A2	23465.00	48850.94	27.82	0.00	4157.12
	A3	31963.00	44969.20	667.29	0.00	3892.09
	A4	50161.00	64658.00	61.99	0.00	5459.89
油船	A1	12447.00	36273.00	628.61	0.00	1328.75
	A2	22643.00	39323.60	589.45	0.00	2005.67
	A3	37996.81	27995.06	462.59	0.00	1949.79
	A4	51957.00	49185.62	54.28	0.00	5910.91

资料来源：世界海运 中信期货研究所

## 2. Attained CII 的计算

对 12 艘样本船舶的 CII 进行计算，下表给出了样本船舶的 Attained CII 计算结果，表中 A1、A2、A3 和 A4 分别对应表中各船型下的船舶。

图 12： 样本船舶的 CII 计算结果 单位：g/t · n mile

	散货船	集装箱船	杂货船	油船
A1	14.21	17.89	12.70	13.63
A2	9.81	8.68	11.37	9.14
A3	7.63	7.17	9.92	7.11
A4	4.98	6.30	5.30	7.21

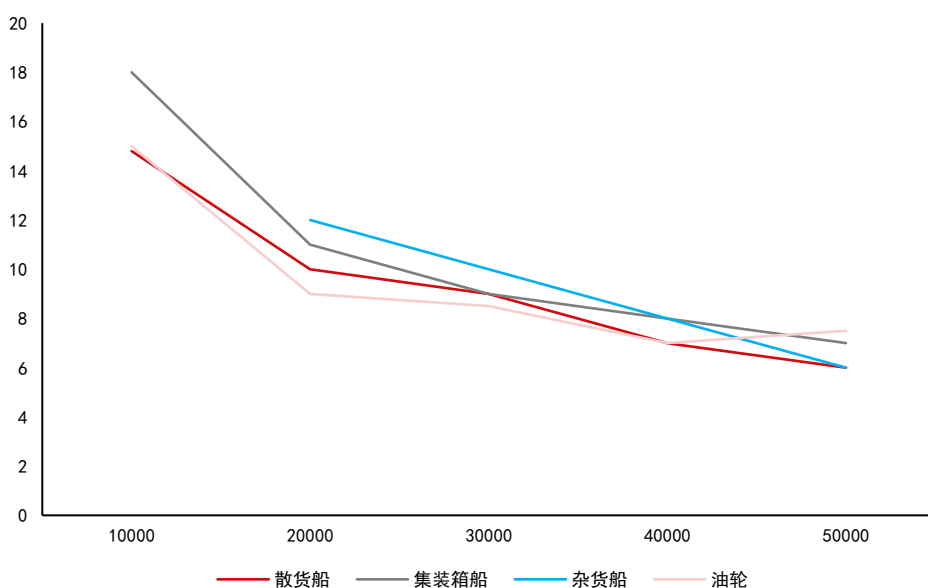
资料来源：世界海运 中信期货研究所

可以看出，即使船舶载重吨量级相当，但由于类型不同，计算得到的 Attained

CII 也相差较大，例如，杂货船、散货船和油船 A2 的 Attained CII 分别比集装箱船 A2 高约 31%、13%和 5%。调研期间发现，这种情况产生的主要原因是相较于其他三种类型的货船，集装箱在靠港期间可以使用岸电，即使不考虑不同船型船舶自身的相关要素，如船体线型、主机性能、航行条件和船舶维护管理等，船舶靠港期间使用岸电也可以节省大量燃油，即减少二氧化碳的排放，降低船舶自身的 Attained CII。

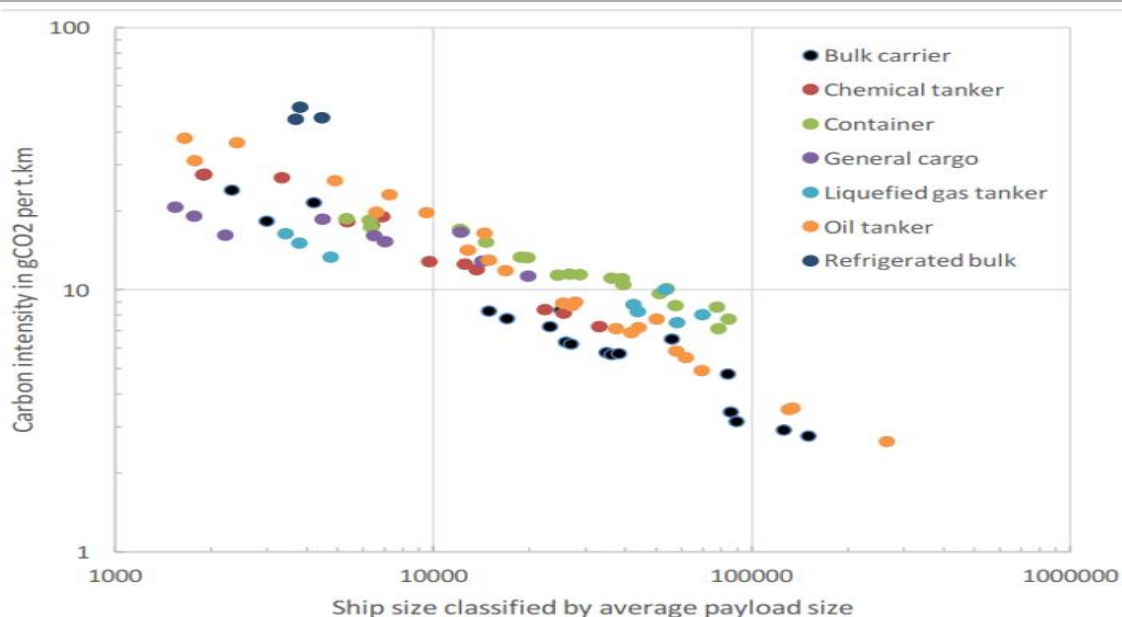
不同船型的载重吨与 Attained CII 的变化关系图可以看出，尽管船型不同且个别船舶由于自身营运状况导致其 Attained CII 可能会明显偏高，例如集装箱船 A1 和油船 A4，但不同船型的 Attained CII 整体随船舶载重吨的增大而呈现减小趋势。这是因为燃油消耗量主要受主机油耗率影响，同等工况下主机功率越大则油耗率越大，而样本船舶资料显示，船舶载重吨成倍增加后，主副机的功率并不会同比例增大，即同等营运状况下船舶的耗油量不会同比例增加，此时船舶的 Attained CII 将会变小，即船舶的大型化会降低自身的 Attained CII。

图 13： 不同船型载重与营运碳排放强度 attained CII 单位：g/t · n mile



资料来源：世界海运 中信期货研究所

图 14： 船型大小与营运类碳强度 EEOI 关系



资料来源：IMO 中信期货研究所

### 3. CII 的参考基线

CII 参考基线是指依据 G1 导则对 MARPOL 公约附则 VI 第 28 条所适用的每一船型制定的一条参考基线，该基线代表了 2019 年某一指定船舶组实际碳强度性能表现的中值曲线，是以船舶运载能力为变量的幂函数。当得知某单艘船舶的运载能力后，即可计算出该艘船舶 2019 年的具体 CII 参考基线值，其计算公式如下<sup>[2]</sup>：

$$CII_{ref} = aC^{-c} \quad (4)$$

其中：CII<sub>ref</sub> 为 2019 年 CII 的参考基线值，g/(DWT · n mile) 或 g/(GT · n mile)；C 指载重吨；a 和 c 是依据 2019 年 IMO 数据收集系统收集的单船 Attained CII 和运载能力为样本，通过中值回归拟合估计的参数，见下表：

图 15： 2019 年不同船型 CII 参考基线计算参数

船舶类型		C	a	c
散货船	279000DWT及以上	279000	4745	0.622
	小于279000DWT	DWT	4745	0.622
气体运输船	65000DWT及以上	DWT	$1.4405 \times 10^{14}$	2.071
	小于65000DWT	DWT	8104	0.639
液货船		DWT	5247	0.61
集装箱船		DWT	1984	0.489
杂货船	20000DWT及以上	DWT	31948	0.792
	小于20000DWT	DWT	588	0.3885
冷藏货船		DWT	4600	0.557
兼用船		DWT	40853	0.812
液化天然气	100000DWT及以上	DWT	9.827	0
	65000DWT及以上，但小于100000DWT	DWT	$1.4479 \times 10^{14}$	2.673
	65000DWT及以下	65000	$1.4479 \times 10^{14}$	2.673
滚装货船（车辆运输船）		DWT	5379	0.631
滚装货船（车辆运输船）		DWT	10952	0.637
滚装客船		GT	7540	0.587
邮轮		GT	930	0.383

资料来源：世界海运 中信期货研究所

#### 4. CII 的折减系数

CII 折减系数是指规定年份船舶的 Attained CII 相较于 2019 年参考基线值减少的百分比，该系数的设定主要是为逐步满足《国际海事组织船舶温室气体减排初步战略》(MEPC. 304(72)号决议)的目标，即 2030 年国际航运船队平均 CII 较 2008 年下降 40%。G3 导则对于确定 CII 折减系数的方法进行了详细介绍，并确定了 2023 年到 2030 年该系数的具体数值，该数值参与单艘船舶在某年份 Required CII 的具体计算，将影响船舶的年度评级。Required CII 计算公式如下：

$$Required\ CII = (1 - Z/100) \times CII_{ref}$$

其中： $CII_{ref}$  为 2019 年 CII 的参考基线值；Z 是 2023 年到 2030 年 CII 的折减系数，具体数值见下表：

图 16： 相较于 2019 年 CII 参考基线的折减系数

年份	Z	年份	Z
2023	5	2027	2023年生效， 2020-2022年设定Z 值为1、2和3。 2027-2030的Z值将 进一步研究和加强
2024	7	2028	
2025	9	2029	
2026	11	2030	

资料来源：世界海运 中信期货研究所

修正后的 MARPOL 公约附则 VI 第 23、25 条中引入了“Attained EEXI”和“Required EEXI”，分别表示每艘船经计算后达到的船舶能效指数值和各船型要求的船舶能效指数值。相关要求概括如下：

#### 1. Attained EEXI

由 MARPOL 公约附则 VI 第 23 条以及《Attained EEXI 计算方法导则(2021)》(后称导则)予以规定。如船舶已适用 EEDI 新船设计能效指数，则其经验证的 EEDI 可直接认定为 Attained EEXI。由此可见，船舶能效指数的计算规则与 EEDI 一脉相承，公式也基本相同。

#### 2. Required EEXI

MARPOL 公约附则 VI 第 25 条新增内容如下：

$$\text{Attained EEXI} \leq \text{Required EEXI} = (1 - X/100) \times \text{EEDI Reference Line}$$

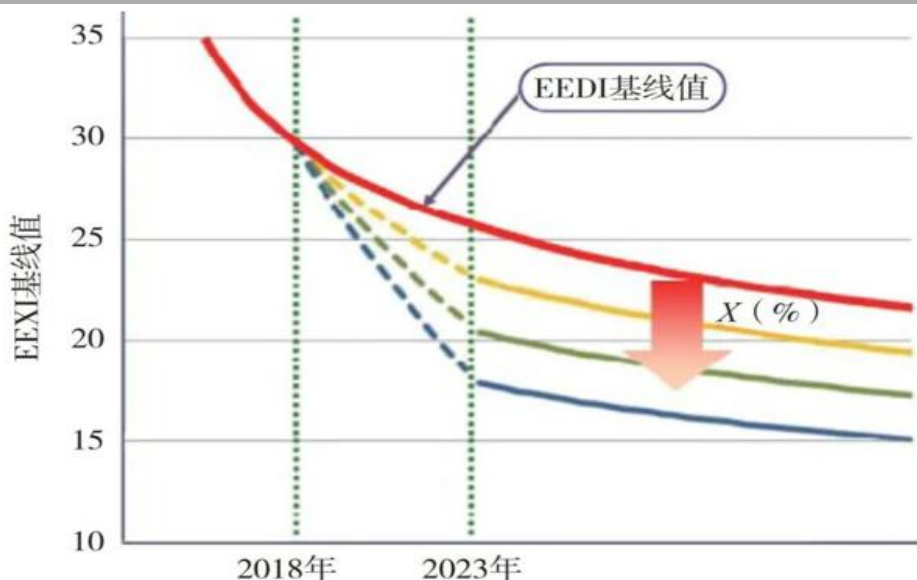
其中：X 为折减系数——MARPOL 公约附则对各种船型的折减系数有着不同的规定；EEDI Reference Line 即 EEDI 基线值，计算公式由附则 VI 第 24 条规定，如下表所示，要得到某种船型的 Required EEXI 值，先要求得其 EEDI 基线值，然后查找 X 对 EEDI 基线值折减。

图 17： 各船型 EEDI 基线值计算公式表

船型	基线值计算公式
散货船	$DWT \leq 279000t$ $961.79 \times DWT^{-0.477}$
	$DWT > 279000t$ $961.79 \times 27900^{-0.477}$
气体运输船	$1120 \times DWT^{-0.456}$
油船	$1218.8 \times DWT^{-0.488}$
集装箱船	$174.22 \times DWT^{-0.201}$
杂货船	$107.48 \times DWT^{-0.216}$
冷藏船	$227.01 \times DWT^{-0.244}$
兼用船	$1219 \times DWT^{-0.488}$
滚装汽车船	$DWT/GT < 0.3$ $(DWT/GT)^{-0.7} \times 780.36 \times DWT^{-0.471}$
	$DWT/GT \geq 0.3$ $1812.63 \times DWT^{-0.471}$
滚装货船	$DWT \leq 17000t$ $1686.17 \times DWT^{-0.498}$
	$DWT > 17000t$ $1686.17 \times 17000^{-0.498}$
滚装客船	$DWT \leq 10000t$ $902.59 \times DWT^{-0.381}$
	$DWT > 10000t$ $902.59 \times DWT^{-0.381}$
LNG船	$2253.7 \times DWT^{-0.474}$
非常规推进的豪华邮轮	$170.84 \times GT^{-0.21}$

资料来源：世界海运 中信期货研究所

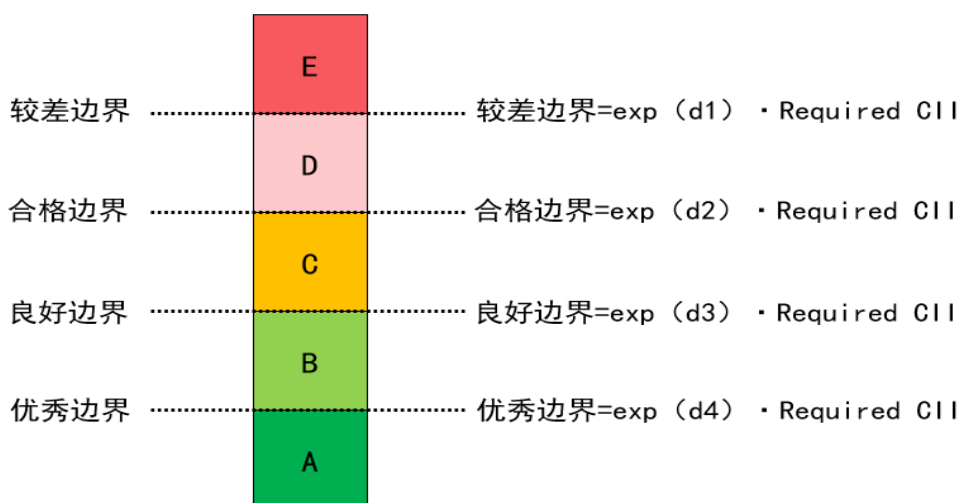
图 18： 要求的船舶能效指数 Required EEXI 公式示意图



资料来源：世界海运 中信期货研究所

最新修订的 MARPOL 公约附则 VI 要求将船舶的 Attained CII 与 Required CII 进行对比验证，根据对比结果将船舶的 CII 分为 A、B、C、D 和 E 五级，分别表示优秀、良好、普通、稍差或不合格绩效水平。为方便评级，从 2023 年到 2030 年，5 级评级机制每年定义 4 个边界，分别为优秀边界 (superior boundary)、良好边界 (lower boundary)、合格边界 (upper boundary) 和较差边界 (inferior boundary)。据此，可通过比较船舶的年度 Attained CII 与边界值来确定等级，如图所示：

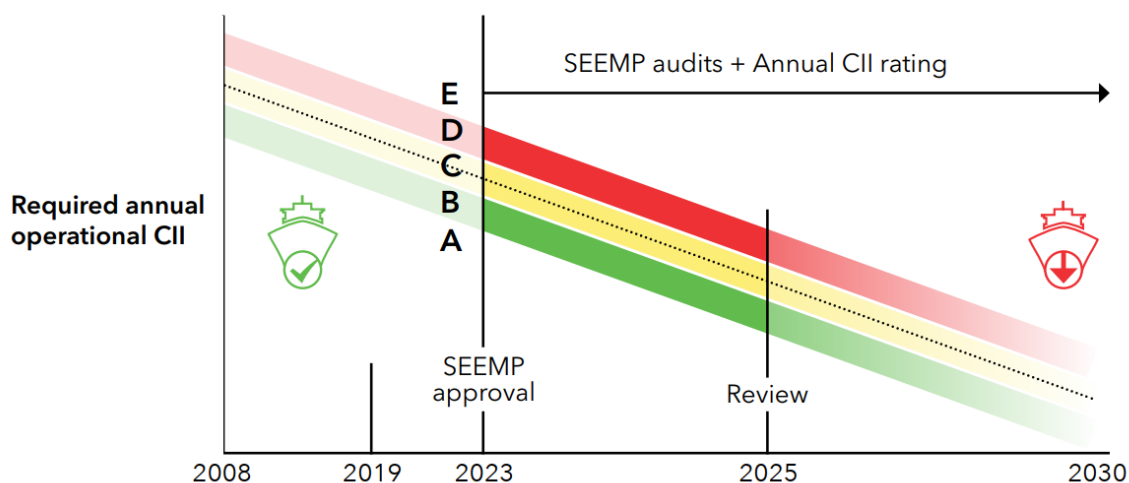
图 19： CII 评级边界



资料来源：世界海运 中信期货研究所

图 20： CII 评级边界与要求营运碳强度变化

#### Visual summary of the IMO measures Energy Efficiency Design Index and Carbon Intensity Indicator



资料来源：DNV 中信期货研究所

图 21： 各船型 CII 评级边界线参数表

船型		大小	d1	d2	d3	d4
散货船		DWT	0.86	0.94	1.06	1.18
气体运输船	DWT ≥ 65000t	DWT	0.81	0.91	1.12	1.44
	DWT < 65000t		0.85	0.95	1.06	1.25
油船		DWT	0.82	0.93	1.08	1.28
集装箱船		DWT	0.83	0.94	1.07	1.19
杂货船		DWT	0.83	0.94	1.06	1.19
冷藏船		DWT	0.78	0.91	1.07	1.2
兼用船		DWT	0.87	0.96	1.06	1.14
LNG船	DWT ≥ 100000t	DWT	0.89	0.98	1.06	1.13
	DWT < 100000t		0.78	0.92	1.1	1.37
滚装汽车船		GT	0.86	0.94	1.06	1.16
滚装货船		DWT	0.66	0.9	1.11	1.37
滚装客船		GT	0.72	0.9	1.12	1.41
豪华邮轮		GT	0.87	0.95	1.06	1.16

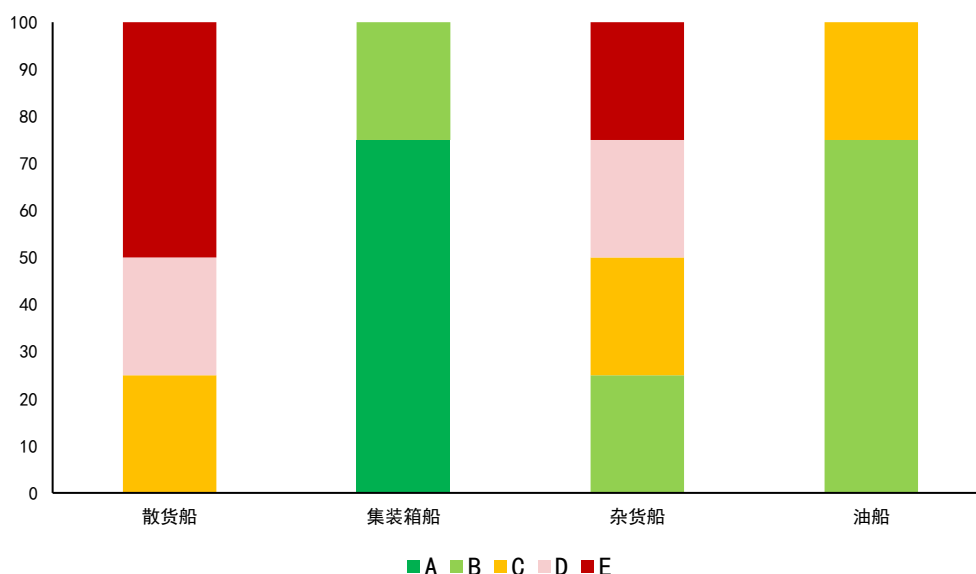
资料来源：世界海运 中信期货研究所

图 22： 样本船舶 Reference CII 及 2023 年各评级边界值

船舶类型		参考CII	优秀边界	良好边界	合格边界	较差边界
散货船	A1	13.56	11.66	12.74	14.37	16.00
	A2	8.55	7.35	8.04	9.06	10.09
	A3	6.75	5.81	6.35	7.16	7.97
	A4	5.23	4.49	4.91	5.54	6.17
集装箱船	A1	20.76	17.23	19.51	22.21	24.70
	A2	14.43	11.98	13.56	15.44	17.17
	A3	11.21	9.31	10.54	12.00	13.34
	A4	10.09	8.37	9.48	10.79	12.00
杂货船	A1	13.37	11.10	12.57	14.18	15.92
	A2	11.04	9.17	10.38	11.71	13.14
	A3	8.64	7.18	8.13	9.16	10.29
	A4	6.05	5.02	5.69	6.41	7.20
油船	A1	16.67	13.67	15.50	18.00	21.34
	A2	11.57	9.49	10.76	12.50	14.81
	A3	8.44	6.92	7.85	9.12	10.81
	A4	6.97	5.72	6.48	7.53	8.52

资料来源：世界海运 中信期货研究所

图 23： 样本船舶 2023 年 CII 评级结果 %



资料来源：世界海运 中信期货研究所

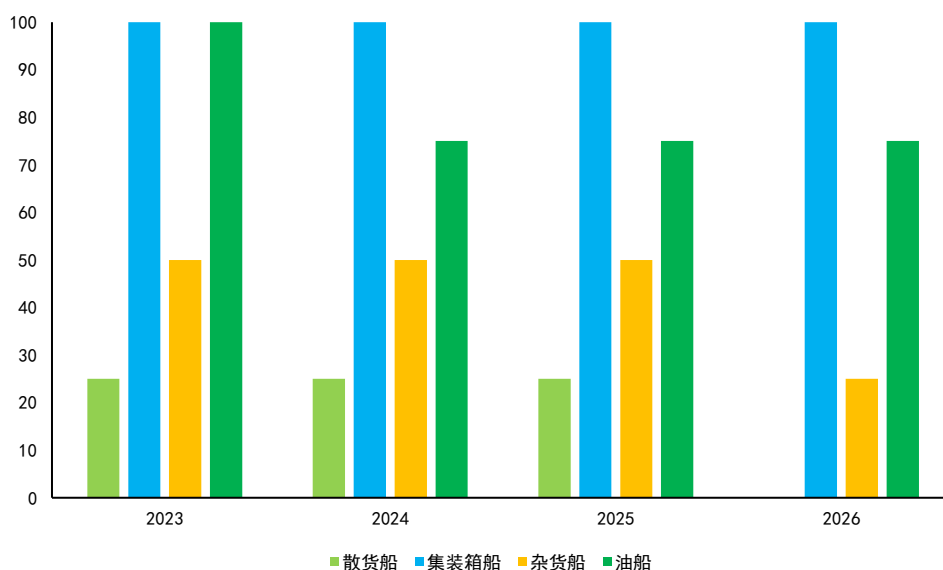
在船舶实际营运期，船舶年度 Attained CII 会受诸多因素的影响，如船舶性能、营运方式和天气因素等，2023 年按照修正案要求对样本船舶进行评级时，CII 评级总体表现最优的船型为集装箱船，该船型 100% 的船舶都在 B 级及以上，有 75% 的船舶评级为 A，且只有此一种船型评级时有船舶达到 A 级。油船的 CII 评级次之，但所有船舶也均在 C 级及以上，且有 75% 的船舶评级为 B。杂货船的 CII 评级在 B、C、D、E 四级中分布比较均匀，各级船舶占比一致，但有一半的船舶位于合格线以下。散货船的 CII 评级在四种船型中表现最差，有 50% 的船舶评级为 E，且只有 25% 的船舶在合格线以上，评级为 C。

G4 导则在确定各评级边界时划分了 15% 的营运船舶会处于 E 级，20% 的船舶会处于 D 级，但此比例是依据 2019 年 IMO 数据收集系统中的数据得出，实践中不同国家和地区的不同类型船舶的 CII 评级比例分布可能会存在较大差异。

#### CII 评级的变化

假设船舶自身不受所有外部因素的影响，能持续维持当前的 Attained CII 表现水平，但由于 G3 导则中 CII 折减系数的存在，各船型 CII 的评级边界值依然会逐年递减，这将导致船舶的 CII 评级会随着评级边界的递减而发生变化。下图给出了四种样本船型 2023—2026 年 CII 评级在 C 级及以上船舶的占比变化。

图 24： 四种样本船型 2023-2026 年 C 级及以上船舶占比 %

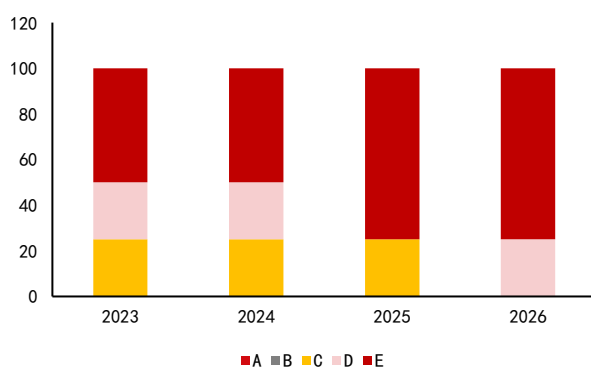


资料来源：世界海运 中信期货研究所

可以看出，若船舶在碳强度管理方面不做出任何改变，2023—2026 年样本船舶中集装箱船的评级能 100% 维持在 C 级及以上，这是因为样本船舶中集装箱船的 Attained CII 与评级边界对比裕度较大，因此全部船舶在 2023—2026 年能始终保持良好的评级表现。油船虽然在 2023 年评级时能满足所有船舶在 C 级及以上，但随时间推移依然会有相当比例船舶跌至 C 级以下评级。杂货船和散货船 C 级及以上船舶在评级之初便占比不高，在 2026 年时，两种船型 C 级及以上船舶占比均出现下滑导致其占比更低，其中样本船舶中所有散货船评级均在该年跌至 C 级以下。

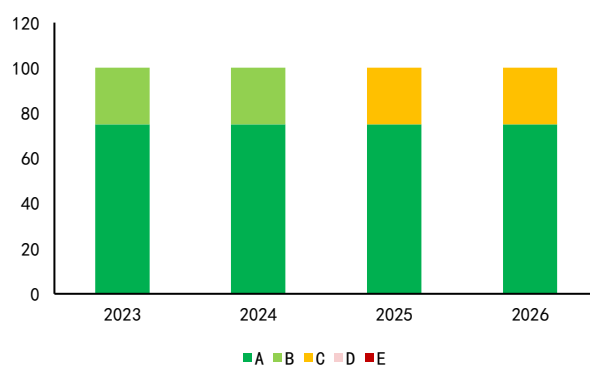
样本船舶在能持续维持当前 Attained CII 表现的前提下，四种不同货船船型在 2023—2026 年 CII 评级占比变化情况。

图 25： 散货船 2023-2026 年 CII 评级占比变化 %



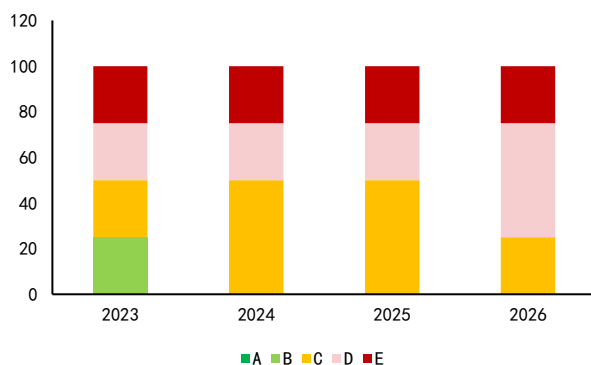
资料来源：世界海运 中信期货研究所

图 26： 集装箱船 2023-2026 年 CII 评级占比变化 %



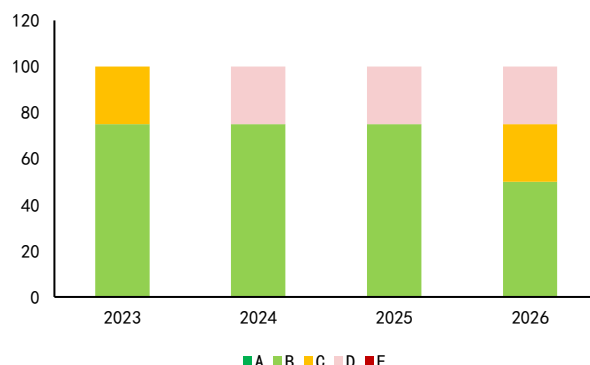
资料来源：世界海运 中信期货研究所

图 27： 杂货船 2023-2026 年 CII 评级占比变化 %



资料来源：世界海运 中信期货研究所

图 28： 油船 2023-2026 年 CII 评级占比变化 %



资料来源：世界海运 中信期货研究所

图中可看出所有典型货船船型的 CII 评级均呈现下滑趋势，即使集装箱船整体表现良好，但随着时间推移依然有相当比例的船舶可能面临 C 级以下的评级。对于散货船和杂货船，该两种船型随着时间推移会较快地出现大比例船舶评级跌至 C 级以下的情况，而 MARPOL 附则 VI 的最新修正案要求，不得向连续三年被评为 D 级或 E 级的船舶签发营运碳强度符合声明，除非已适当制订纠正行动并反映在船舶能效管理计划（Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP）中，并由主管机关或经其正式授权的任一组织进行了验证，即船舶的 CII 评级只有为 C 级及以上才能在当前机制下可暂不做改进。其中，SEEMP 作为船舶安全管理体系的一部分，是 CII 机制实施的重要载体，每年需要对其进行验证和公司审核。对于连续三年被评为 D 级或 E 级的船舶，需修订其 SEEMP 以包括纠正行动计划，并提交至主管机关或经其正式授权的任一组织以供验证，船舶需按照经修订的 SEEMP 采取相关的纠正行动。

计算 LNG 船舶能效指数案例：

$$EEXI = \frac{\text{机器功率} \times \text{燃油单耗} \times \text{碳转换系数}}{\text{载重量} \times \text{航速}}$$

分子与分母

分子部分是计算主机和副机单位时间产生的 CO<sub>2</sub> 量（单位：g/h），需分别计算后求和。LNG 船一般较少采用导则认可的减少推进能耗的技术，因此分子部分不必考虑扣减项。分母是船舶夏季载重线吃水时载重量与该吃水点的计算航速之乘积（单位：t · n mile/h），由此得到船舶能效指数值（单位：g/t · n mile）。

主机功率（PME）

根据导则的规定，对于配置低速二冲程主机+发电机组的 LNG 船，主机功率以

75% MCR 为准。对于以推进电机替代常规主机的电力推进 LNG 船，导则规定其主机功率计算公式为：

$$PME=0.83 \times MPP / \eta$$

其中：MPP 为推进电机额定功率； $\eta$  为电推系统效率，为 91.3%。

#### 副机功率（PAE）

根据导则规定，对于总推进功率为 10000kW 或以上的船舶，副机功率计算公式为：

$$PAE=0.025 \times \text{主机 MCR} + 250 + (0.02 \times PME)$$

其中：(0.02×PME) 是蒸发气压缩机为 XDF 主机燃气系统供气所需的附加功率。

#### 燃料单耗

主机按 75% MCR 点时的单耗计算，副机按各台发电机 50% MCR 点时的平均单耗计算。值得注意的是，LNG 船主、副机除使用天然气为主燃料外，还有少量的点火油也需计算 CO<sub>2</sub>排放量并加入分子部分。

#### 碳转换系数

LNG 的碳转换系数为 2.75，点火油碳转换系数按柴油取 3.206。作为燃料，LNG 热值高于其他品种，但碳转换系数只有 2.75，减排效应明显。值得注意的是，甲醇的碳转换系数最小，只有 LNG 的一半，其热值也最低，只有 LNG 的 41.5%。基于此，人们对甲醇作为碳减排替代能源的有效性存在质疑。因为燃烧热值过低的燃料获得能量，即便燃料本身的碳含量很低（碳转换系数小），其消耗量也是非常大的，机器的燃烧效率将难以提高，总的碳排放量不一定降低。

#### 载重量

指夏季载重线吃水的载重量。

#### 航速

指夏季载重线吃水时主机在 75%MCR 下的船舶航速，一般需要从船模试验报告中求得。

#### LNG 船能效指数测算实例

以某 17.4 万 m<sup>3</sup>LNG 船为例，测算船舶能效指数并判断其是否符合新规。该船的基本配置为 2 台 XDF 双燃料柴油机主机，双桨双舵，4 台双燃料四冲程发电机组，无轴带发电机，无再液化装置，且不考虑其他节能措施。所需要的基本参数（均为实船数据）如表：

图 29： 17.4 万方 LNG 船能效指数测算参数表

项目	数据	说明
Capacity/t	91400	夏季载重线载重量
v/kn	19.24	夏季载重线吃水75%MCR时航速
MCR <sub>ME</sub> /kW	26200	主机额定功率MCR
P <sub>ME</sub> /kW	19650	75%MCR
CF <sub>gas</sub>	2.75	主机天然气燃料碳转换系数
SFC <sub>AE gas</sub> /(g/kWh)	147	主机天然气燃料消耗率
CF <sub>pilotfuel</sub>	3.206	主机点火油（MGO）碳转换系数
SFC <sub>ME pilotfuel</sub> /(g/kWh)	0.54	主机点火油消耗率
P <sub>AE</sub> /kW	1300	副机计算功率
CF <sub>gas</sub>	2.75	副机天然气燃料碳转换系数
SFC <sub>AE gas</sub> /(g/kWh)	166	副机天然气燃料消耗率
CF <sub>AE pilot</sub>	3.206	副机点火油（MGO）碳转换系数
SFC <sub>AE pilotfuel</sub> /(g/kWh)	3.3	副机点火油消耗率

资料来源：世界海运 中信期货研究所

图 30： 2020 年 LNG 燃料集装箱船的燃油消耗数据

船舶编号	载重吨/t	航行距离/n mile	燃料种类及消耗量/t			
			重/轻柴油	LF0	HF0	LNG
202001	220000	31534	2795	3515	0	3859
202002	220000	19933	2071	2637	0	2680
202003	20000	72394	606	0	0	5788
202004	20000	69919	696	0	0	5837
202005	20000	69481	682	0	0	5467
202006	20000	63890	1111	0	0	4605
202007	13000	61344	1098	0	0	3364
202008	33000	113865	1448	0	0	15232
202009	160000	25567	597	3620	0	3053

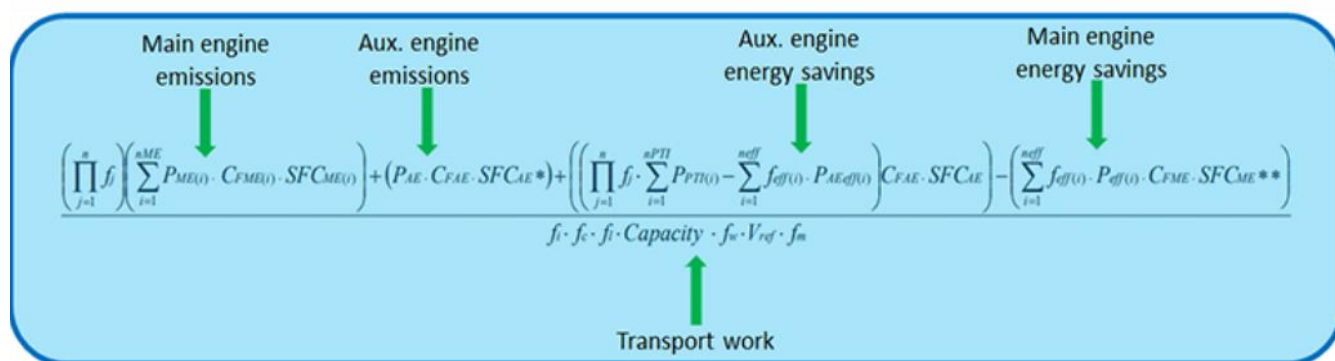
资料来源：世界海运 中信期货研究所

计算步骤如下：

①计算 Attained EEXI：得到 Attained EEXI=4.882

图 31： Attained EEXI 计算方法

$$\text{Attained EEXI} = [\text{gCO}_2/\text{t} \cdot \text{nm}]$$



资料来源：世界海运 中信期货研究所

②计算 EEDI 基线值：该船的 EEDI 基线值为  $2\,253.7 \times 91400^{-0.474} = 10.03$

③折减系数（X）：MARPOL 公约规定 10000 载重吨及以上 LNG 船 Phase 3 阶段  $X=30$ 。

④计算 Required EEXI：Required EEXI =  $(1-30/100) \times \text{EEDI Reference Line} = 7.023$ 。

⑤测算结果及分析：该船 Attained EEXI（4.882）<Phase 3 的 Required EEXI（7.023），完全满足 2023 年起生效的船舶能效指数新规则要求。

通过计算可知，影响船舶能效指数合规性的主要因素是船型、燃料种类、机器的功率和燃料单耗、航速和载重量，特别是在船型和主、副机配置基本确定的情形下，选择以天然气为主燃料可以降低 14% 的碳转换系数，机器燃料消耗率会更低，对降低船舶能效指数的贡献最显著；反之，同样的船型和机器配置的 LNG 船若只能使用燃料油，其船舶能效指数可能会超过要求，船舶必须采取主机功率限制 (EPL) 等方式来满足合规性要求。

#### LNG 船碳强度指标计算和评级

仍以 17.4 万  $\text{m}^3$  LNG 船为例，因为计算需要有营运数据，故以该船欧洲—中国某航次的数据为准。航线：Zee Brugge—大连；往返航程：23000 n mile（经苏伊士运河）；航次天数：56 天；平均航速：17 kn；货舱蒸发率：满载航行 0.10%/天；日平均 BOG 量：75 t；夏季吃水线载重量：91400 t。

计算步骤如下：

#### 1. 计算 Attained CII

该航次 Attained CII = 5.66

## 2. 计算碳强度指标基线值

公式参数  $a=1.4479 \times 10^{14}$ ,  $c=2.673$ , 由此可得到该船 2019 年基线值  $CII_{ref}=7.95$ 。

$$CII_{ref}=1.4479 \times 10^{14} * 91400^{-2.673}=7.95$$

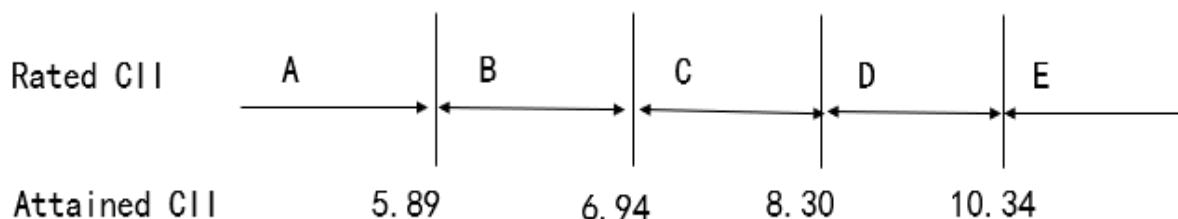
## 3. 计算 2023—2026 各年 Required CII

图 32: 2023—2026 各年折减率和 Required CII

年份	Z%	Required CII(g/t·n mile)
2023	5	7.55
2024	7	7.39
2025	9	7.23
2026	11	7.07

资料来源: 世界海运 中信期货研究所

图 33: 17.4 万方 LNG 船 2023 年碳强度指标评级边界示意图



资料来源: 世界海运 中信期货研究所

查到该船对应的 10 万载重吨以下 LNG 船的 4 个边界值  $d1 \sim d4$  分别是 0.78、0.92、1.10、1.37, 以 2023 年为例,  $Required\ CII=7.55$ , 则该年度碳强度指标各级别的边界如上图。该船航次营运  $Attained\ CII=5.66$ , 可知其落在 A 级区域。也就是说, 该船 2023 年如果在类似参数的航线保持营运, 其年度碳强度指标评级将是 A 级; 2024 年也可以保持在 A 级, 但从 2025 年起将降为 B 级, 因为 A 级边界线每年折减 2%。

碳强度指标评级是基于船舶每年的实际营运数据, 并对照该年度要求的碳强度指标值确定的评级边界来定级。通过选取典型航线模拟自测可知, 船舶营运相关的航线、航速等可变因素对年度达到的碳强度指标值影响很大, 特别是 LNG 船使用货舱蒸发气为燃料, 如果航速保持在每天自然蒸发气供给的能量范围内 (一般为 17~18.5kn), 则既能提高航次周转效率, 又无燃料额外消耗, 航线营运碳

强度指标将保持在理想水平。如果租家发出的航次指令时间过于宽裕，平均航速很低，同样的航线每多跑一天，就要多消耗一天的蒸发气，相应带来的 CO<sub>2</sub> 排放就多出一天的量，一年下来对营运碳强度指标的负面影响不小。比如前面测算的 17.4 万 m<sup>3</sup>LNG 船的典型航线，每多用 1 天，航次 Attained CII 值就将增加 0.1 g/t·n mile，最直接的后果则是尽管船舶设计建造完全具有达到 A 级的技术标准，机器效率也没有恶化，但船舶年度碳强度指标评级也无法达到 A 级。

航运业已面临碳减排战略的重大抉择，各种不同的观点和争议此起彼伏，包括对 LNG 能否成为终极清洁燃料的质疑和对甲醇等替代燃料的宣传。然而，通过对 LNG 船能效指数的分析和试算，以及对不同燃料的碳转换系数的比较，都显示了 LNG 高热值和低碳的本质特征。可以说，LNG 是当之无愧的优质清洁能源。未来船东投资建造新船选择哪种燃料，应该从中得到启发。现代化的大型 LNG 船不仅自身船舶能效指数优异，营运碳强度指标达到 A 级，更是运输海上清洁能源的战略投送部队，是实现“双碳”目标和“美丽中国”的重要力量。

图 34： 2020 年 LNG 燃料集装箱营运 CII 计算与评级结果

船舶编号	CO <sub>2</sub> 排放总量/t	运输工作量/(t·n mile)	达到的营运CII g/t·n mile	营运CII评级结果
202001	30648.79	$6.94 \times 10^9$	4.42	B
202002	22318.81	$4.39 \times 10^9$	5.09	C
202003	17859.83	$1.45 \times 10^9$	12.36	A
202004	18283.12	$1.40 \times 10^9$	13.07	B
202005	17220.74	$1.39 \times 10^9$	12.39	A
202006	16255.62	$1.28 \times 10^9$	12.7	A
202007	12771.19	$7.79 \times 10^9$	16.01	B
202008	46530.29	$3.76 \times 10^9$	12.38	C
202009	21716.35	$4.09 \times 10^9$	5.31	C

资料来源：世界海运 中信期货研究所

图 35： 2020 年 LNG 燃料集装箱船 LNG 的热能贡献率、碳排放贡献率及评级情况

船舶编号	LNG的热能贡献率/%	LNG的碳排放贡献率/%	营运CII评级结果
202001	41.22	34.63	B
202002	39.49	33.02	C
202003	91.48	89.12	A
202004	90.41	87.8	B
202005	90.01	87.3	A
202006	82.33	78.05	A
202007	77.5	72.44	B
202008	92.2	90.02	C
202009	45.63	38.66	C

资料来源：世界海运 中信期货研究所

## 附 1. EEOI

根据 MEPC.1/Circ.684《船舶能效营运指数（EEOI）自愿使用导则》，计算周期内营运的船舶滚动平均 EEOI 用以下公式表示：

$$I_{EEOI} = \sum_i \sum_j (FC_{ij} \times C_{Fj}) / \sum_i (m_{cargo} \times D_{laden, i})$$

其中：i 为计算周期内的航次号，j 为燃料种类， $FC_{ij}$  为在航次 i 消耗燃料 j 的质量，t； $C_{Fj}$  为燃料 j 的碳转换系数，t-CO<sub>2</sub>/t-fuel； $m_{cargo}$  为所载货物质量（t）或所作的功； $D_{laden, i}$  为在航次 i 与  $m_{cargo}$  相对应的航行距离，即载货航行距离，n mile。

EEOI 的单位取决于所载货物或所作的功的测量，可以为 t/（t·n mile）、t/（TEU·n mile）、t/（人·n mile）、t/（GT·n mile）等。对于所载货物质量或所做的功为零的航次，仍需要将该航次中使用的燃料油计入，因此，船舶装载率会对 EEOI 有很大影响。EEOI 是 IMO 确定的获得营运船舶、船队能效水平的定量测量工具。

EEOI 是一种基于需求的船舶运输工作量来计算的营运碳强度指标，能够客观、准确地反映船舶实际的碳强度（能效水平）。因此，EEOI 是最符合 IMO 船舶温室气体减排初步战略中碳强度定义的，可以其作为市场措施的支持指标。但是计算 EEOI 需要收集船舶载货量等商业敏感信息，同时增加了船员工作负担，且 EEOI 直接反映船舶经营水平和船型特征，以其代表营运碳强度会带来很大争议，因此没有被作为强制指标使用，目前欧盟《海运 CO<sub>2</sub>排放测量、报告和核实规则》和中华人民共和国海事局《船舶能耗数据收集管理办法》涵盖了计算 EEOI 所需的营运数据。随着 IMO GHG 减排力度的加强和数据收集机制的完善，相信 IMO 用 EEOI 代表营运碳强度将会实现。

## 2. cDIST

IMO 各成员国提出各种 EEOI 替代指标，其中 cDIST 是基于供给的船舶运输工作量（船舶装载能力和总航行距离的乘积）来计算的营运碳强度指标。“c”代表船舶装载能力，“DIST”代表总航行距离，计算周期内营运船舶滚动平均 cDIST 用以下公式表示：

$$I_{cDIST} = \sum_i \sum_j (FC_{ij} \times C_{Fj}) / (M_{capacity} \times \sum_i D_i)$$

其中：i 为计算周期内的航次号；j 为燃料种类； $FC_{ij}$  为营运船舶在航次 i 消耗燃料 j 的质量，t； $C_{Fj}$  为燃料 j 的碳转换系数，t-CO<sub>2</sub>/t-Fuel； $M_{capacity}$  为船舶载重吨或总吨，t； $D_i$  为航次 i 的航行距离，n mile。

当船舶装载能力用载重吨（DWT）表示时，cDIST 可表示成 cwDIST（适用于散货船、气体运输船、液货船、集装箱船、杂货船、冷藏货船、兼用船、LNG 运输船和滚装货船），单位为 t/（t·n mile）。若计算周期为日历年，cwDIST 就变成了

AER。当船舶装载能力用总吨（GT）表示时，cDIST 可表示成 cgDIST（适用于滚装货船（车辆运输船）、滚装客船和豪华邮轮），单位为 t/（GT · n mile）。当船舶装载能力用标准箱（TEU）总量表示时，cDIST 可表示成 ctDIST（适用于集装箱船），单位为 t（TEU · n mile）。当船舶装载能力用车道长度（Lanemeter）表示时，cDIST 可表示成 clDIST（适用于滚装船），单位为 t/（m · n mile）。当船舶装载能力用可用下铺数量（available lower berths）表示时，cDIST 可表示成 cbDIST（适用于邮轮），单位为 t（个 · n mile）。

cDIST 这一系列的营运碳强度指标不依赖实际货运数据，商业敏感性较弱，计算较 EEOI 简单，实用性更强。在 IMO 数据收集机制下，很容易计算得到 AER 和 cgDIST。因此，IMO 选定 AER 和 cgDIST 作为强制的营运碳强度指标，并对其进行评级。AER 和 cgDIST 的最大弊端在于其有利于空载营运船舶获得较高的碳强度评级，对载货率高、重载航行距离长的营运船舶很不利，甚至给这些船舶带来惩罚性评级结果。因此，需要对 AER 和 cgDIST 造成的评级偏差进行校正，这方面值得深入研究。

### 3. EEPI

EEPI 是张爽提出的营运碳强度指标，并被 IMO 推荐为自愿指标以供船舶试用，计算周期内营运船舶滚动平均 EEPI 用以下公式表示：

$$I_{EEPI} = \sum_i \sum_j (FC_{ij} \times C_{Fj}) / (M_{capacity} \times \sum_i D_{laden, i})$$

其中：i 为计算周期内的航次号；j 为燃料种类； $FC_{ij}$  为营运船舶在航次 i 消耗燃料 j 的质量，t； $C_{Fj}$  为燃料 j 的碳转换系数，t-CO<sub>2</sub>/t-Fuel； $M_{capacity}$  为船舶载重吨或总吨，t； $D_{laden, i}$  为航次 i 载货航行距离，n mile。

EEPI 的单位为 t（t · n mile）或 t/（GT · n mile），是基于供给的船舶运输工作量（船舶装载能力和载货航行距离的乘积）来计算的碳强度指标。EEPI 是介于 EEOI 和 cDIST 之间的折中融合方案，作为 EEOI 的替代，其摆脱商业敏感数据，是 EEOI 的近似值，是对 cDIST 的修正。EEPI 面临的难点在于如何准确界定船舶的装载状态，避免人为刻意增加船舶载货航行距离。

### 技术类碳强度指标的计算

EEDI 与 EEXI 的计算和验证的框架基本相同，只是在计算系数获取和验证上略有不同，可以看作是 EEXI 将 EEDI 由新造船扩展到现有船，EEDI、EEXI 也将走向高度的融合。EEDI 与 EEXI 的计算分别详见 MEPC. 308 (73)《2018 年新船达到的能效设计指数 (EEDI) 计算方法导则》和 MEPC. 333 (76)《2021 年达到的现有船能效指数 (EEXI) 计算方法导则》。

$$M_{RJ, CO2} = \sum_i \sum_j (P_i \times SFC_i \times h_i \times C_{Fj})$$

$$W_{supply, transport} = \sum m_{supply} \times D$$

船舶运输距离由航速乘以运行时间得到，这样分子和分母中的运行时间就可以约掉，在理想环境和标准工况下，便可计算得到 EEDI 和 EEXI。EEDI、EEXI 的单位为  $t/(t \cdot n \text{ mile})$  或  $t/(GT \cdot n \text{ mile})$ ，是基于供给的船舶运输工作量来计算的技术碳强度指标。EEDI、EEXI 反映的是船舶在代表性的特定工况点下的碳强度水平，不能全面反映船舶在其他工况和海况环境下的碳强度水平，更不能决定船舶在实际营运中的碳强度性能，但其作为碳强度监测工具，便于不同船舶统一执行，可操作性强，有一定合理性。

EVDI 是澳大利亚第三方船舶检验与评估机构 RightShip 给船舶 GHG 评级使用的碳强度指标，没有要求值，不属于 IMO 碳强度规则下的碳强度指标，其计算方法与 EEDI、EEXI 基本相同，不同的是 EVDI 对主机最小功率有限制。RightShip 对 EVDI 有一套主机功率限制 (Engine Power Limit, EPL) 验收标准，避免船东和船公司为达到符合要求的 EEXI 而完全依赖 EPL，从而推动低碳、零碳技术的创新和应用。

IMO 的船舶油耗数据收集机制已于 2019 年 1 月 1 日开始实施，新造船的 EEDI 数据收集机制也即将启动，随着 EEXI 规则的强制实施，相信也会收集现有船的 EEXI 数据。我国的船舶能耗数据收集机制已于 2019 年 1 月 1 日开始实施。下一步，建议 IMO 与政府主管部门基于收集到的航运大数据（如船舶运输工作量数据、油耗数据、AIS 数据、设计能效数据、航线气象数据等），对比分析营运碳强度（AER、EEOI 等）和技术碳强度（EEDI、EEXI）各指标之间的关联性，用数据说明分别使用 AER、EEOI 作为营运碳强度评级指标的评级结果的偏差。船舶航运大数据分析与应用将是未来的研究重点，可参照 IMO 船舶 GHG 减排成熟做法，利用船舶航运大数据制定适合我国国情的船舶 GHG 减排政策。

四种衡量碳强度的方法：Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI,  $g \text{ CO}_2/t/nm$ )，Annual Efficiency Ratio (AER,  $g \text{ CO}_2/dwt/nm$ )，DIST ( $kg \text{ CO}_2/nm$ ) and TIME ( $t \text{ CO}_2/hr$ )。这些计算方法通过数据收集系统数据计算。这些计算方法用于计算 2012-2018 年全球航运碳排放，其他的形式像 AER、cDIST、EEPI (energy efficiency performance indicator 用载重里程而非航行里程)。EEOI、AER、cDIST、EEPI 适用于货船和乘用车，DIST、TIME 适用于公务船或渔船。

图 36： 2012-2018 全球航运温室气体排放

Inventory of GHG Emissions from International Shipping 2012-2018

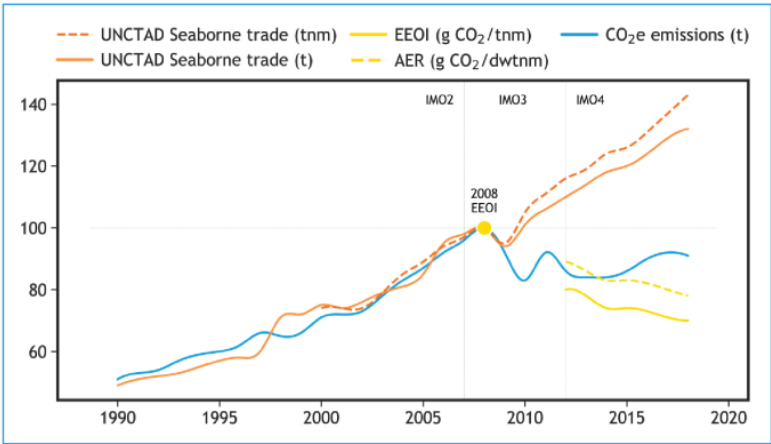


Figure 2 – International shipping emissions and trade metrics, indexed in 2008, for the period 1990-2018, according to the voyage-based allocation<sup>1</sup> of international emissions<sup>2</sup>

资料来源：IMO 中信期货研究所

1990-2008，CO<sub>2</sub>e 排放增速和排放翻倍。

2008-2014, 贸易需求增长的情况下实现 CO<sub>2</sub>e 减排，因为碳强度削减（EEOI、AER）时期削减了一倍。

2014-2018，碳强度（EEOI、AER）降幅不及预期，随着贸易增长，CO<sub>2</sub>e 排放重新增长。

图 37： 历年航运碳排放强度变化（较 2008 年）

Table 2 – Estimates on carbon intensity of international shipping and percentage changes compared to 2008 values

Year	EEOI (gCO <sub>2</sub> /t/nm)				AER (gCO <sub>2</sub> /dwt/nm)				DIST (kgCO <sub>2</sub> /nm)				TIME (tCO <sub>2</sub> /hr)			
	Vessel-based		Voyage-based		Vessel-based		Voyage-based		Vessel-based		Voyage-based		Vessel-based		Voyage-based	
	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change	Value	Change
2008	17.10	—	15.16	—	8.08	—	7.40	—	306.46	—	350.36	—	3.64	—	4.38	—
2012	13.16	-23.1%	12.19	-19.6%	7.06	-12.7%	6.61	-10.7%	362.65	18.3%	387.01	10.5%	4.32	18.6%	4.74	8.1%
2013	12.87	-24.7%	11.83	-22.0%	6.89	-14.8%	6.40	-13.5%	357.73	16.7%	380.68	8.7%	4.18	14.6%	4.57	4.1%
2014	12.34	-27.9%	11.29	-25.6%	6.71	-16.9%	6.20	-16.1%	360.44	17.6%	382.09	9.1%	4.17	14.4%	4.54	3.5%
2015	12.33	-27.9%	11.30	-25.5%	6.64	-17.8%	6.15	-16.9%	366.56	19.6%	388.62	10.9%	4.25	16.6%	4.64	5.7%
2016	12.22	-28.6%	11.21	-26.1%	6.58	-18.6%	6.09	-17.7%	373.46	21.9%	397.05	13.3%	4.35	19.3%	4.77	8.7%
2017	11.87	-30.6%	10.88	-28.2%	6.43	-20.4%	5.96	-19.5%	370.97	21.0%	399.38	14.0%	4.31	18.2%	4.79	9.2%
2018	11.67	-31.8%	10.70	-29.4%	6.31	-22.0%	5.84	-21.0%	376.81	23.0%	401.91	14.7%	4.34	19.1%	4.79	9.2%

资料来源：IMO 中信期货研究所

参考文献：

- [1]DNV.Pathway to net zero emissions energy transition outlook [EB/OL], 2021
- [2]DNV.Maritime forecast to 2050 energy transition outlook[EB/OL], 2022
- [3]碳交易网. 2020 船舶动力的脱碳之路[EB/OL], 2020-01-03
- [4]薛树业. 国际航运碳强度指标综述[EB/OL]. 世界海运, 2022-03-17
- [5]丁一文, 邹婕. 典型船舶年度营运碳强度模拟计算及评级[EB/OL]. 世界海运, 2022-04-12
- [6]郭慧茹, 薛树业. 使用 LNG 燃料对船舶碳强度指标评级的影响[EB/OL]. 世界海运, 2022-05-06
- [7]朱闻达, 朱小松. LNG 船舶加注产业发展现状与策略[EB/OL]. 世界海运, 2022-01-18
- [8]宋源. LNG 船能效指数和碳强度指标计算[EB/OL].世界海运, 2021-12-14
- [9]苏玉马. 一种船舶经济航速实测方法夏明华[EB/OL]. 世界海运, 2020-05-07
- [10]IMO. Fourth IMO GHG Study 2020[EB/OL], 2021

## 免责声明

除非另有说明，中信期货有限公司拥有本报告的版权和/或其他相关知识产权。未经中信期货有限公司事先书面许可，任何单位或个人不得以任何方式复制、转载、引用、刊登、发表、发行、修改、翻译此报告的全部或部分材料、内容。除非另有说明，本报告中使用的所有商标、服务标记及标记均为中信期货有限公司所有或经合法授权被许可使用的商标、服务标记及标记。未经中信期货有限公司或商标所有权人的书面许可，任何单位或个人不得使用该商标、服务标记及标记。

如果在任何国家或地区管辖范围内，本报告内容或其适用与任何政府机构、监管机构、自律组织或者清算机构的法律、规则或规定内容相抵触，或者中信期货有限公司未被授权在当地提供这种信息或服务，那么本报告的内容并不意图提供给这些地区的个人或组织，任何个人或组织也不得在当地查看或使用本报告。本报告所载的内容并非适用于所有国家或地区或者适用于所有人。

此报告所载的全部内容仅作参考之用。此报告的内容不构成对任何人的投资建议，且中信期货有限公司不会因接收人收到此报告而视其为客户。

尽管本报告中所包含的信息是我们于发布之时从我们认为可靠的渠道获得，但中信期货有限公司对于本报告所载的信息、观点以及数据的准确性、可靠性、时效性以及完整性不作任何明确或隐含的保证。因此任何人不得对本报告所载的信息、观点以及数据的准确性、可靠性、时效性及完整性产生任何依赖，且中信期货有限公司不对因使用此报告及所载材料而造成的损失承担任何责任。本报告不应取代个人的独立判断。本报告仅反映编写人的不同设想、见解及分析方法。本报告所载的观点并不代表中信期货有限公司或任何其附属或联营公司的立场。

此报告中所指的投资及服务可能不适合阁下。我们建议阁下如有任何疑问应咨询独立投资顾问。此报告不构成任何投资、法律、会计或税务建议，且不担保任何投资及策略适合阁下。此报告并不构成中信期货有限公司给予阁下的任何私人咨询建议。

### 中信期货有限公司

深圳总部 地址：深圳市福田区中心三路 8 号卓越时代广场（二期）北座 13 层 1301-1305、14 层

邮编：518048

电话：400-990-8826