

国际海事组织LCA导则的应用与发展

孙德平 张爽 苑海超 仇大志 黎泉 鞠恒

摘要：LCA导则是船用燃料全生命周期温室气体强度评价的根本依据，燃料温室气体强度评价结果将直接影响船用燃料在船舶上的推广使用，国际海事组织、欧盟等也会基于评价结果阶段性降低燃料的温室气体强度，将评价结果应用于船舶能效法规的指标计算也会产生较大影响。介绍LCA导则的主要内容，分析LCA导则的应用及发展方向，供行业内相关方参考。

关键词：LCA导则；船用燃料；生命周期；温室气体；排放强度

DOI:10.16176/j.cnki.21-1284.2024.06.004

一、引言

为满足联合国气候变化大会《巴黎协定》对全球平均温升的控制要求，国际海事组织（IMO）以MEPC.377（80）号决议通过了《2023年IMO船舶温室气体减排战略》（简称“减排战略”）。IMO在减排战略中规定了国际航运的减排力度，要求进一步改进新船能效，降低国际航运碳强度，增加零或近零温室气体排放技术、燃料和/或能源的应用，在2050年前后达到温室气体净零排放。此外，减排战略中还规定了2030年、2040年两个指标性校核点，检验国际航运温室气体减排的阶段性效果。减排战略中减排力度和指标性校核点都需要考虑到IMO制定的《船用燃料全生命周期温室气体强度导则》（LCA导则，MEPC.376（80）号决议）所确定的船用燃料全生命周期温室气体强度，由此可见LCA导则在国际航运温室气体减排过程中的重要性。

MEPC 81大会上通过的《2024年船用燃料全生命周期温室气体强度导则》（MEPC.391（81）号决议）是对LCA导则的进一步修订与发展。本文简要介绍LCA导则中船用燃料温室气体强度评价方法、燃料路径清单、可持续性指标、燃料生命周期标签等主要内容；结合LCA导则及IMO船舶营运碳强度

指标（CII）评级机制复审、中期减排措施制定的实际情况，分析LCA导则直接应用和潜在应用的方向；参考MEPC 81大会工作文件等，分析总结LCA导则在燃料路径、船上碳捕集及存储监管、下游非CO₂排放检测及验证、默认排放值确认和可持续性标准制定等的发展方向。

二、LCA导则的主要内容

LCA导则涉及内容繁多，包含了导则制定的一般原则、船用燃料温室气体排放强度的计算方法、初步燃料路径清单、燃料可持续性指标、燃料生命周期标签等内容，本文仅对主要内容做简要介绍。

（一）船用燃料温室气体强度评价方法

LCA导则以《2006年IPCC国家温室气体清单指南》为基本原则，利用ISO生命周期评价标准、归因理论方法及IPCC第五次评估报告中的100年全球变暖潜能值（GWP100）等，评价了船用燃料或能源载体（简称“船用燃料”）上游（陆上阶段或W_{tT}）、下游（船上阶段或T_{tW}）和全生命周期（W_{tW}）内的单位低热值CO₂、CH₄及N₂O三种温室气体总的二氧化碳当量（CO_{2eq}）排放强度（单位为g CO_{2eq}/MJ_{LCV}），其中燃料全生命周期温室气体

排放强度为上、下游温室气体排放强度之和，上、下游的分界点为燃料加装点，燃料加装过程中的温室气体排放计入上游排放，船用燃料上、下游及全生命周期温室气体强度间的关系如图1所示。为了对照显示燃料在20年范围内的温室气体排放强度，

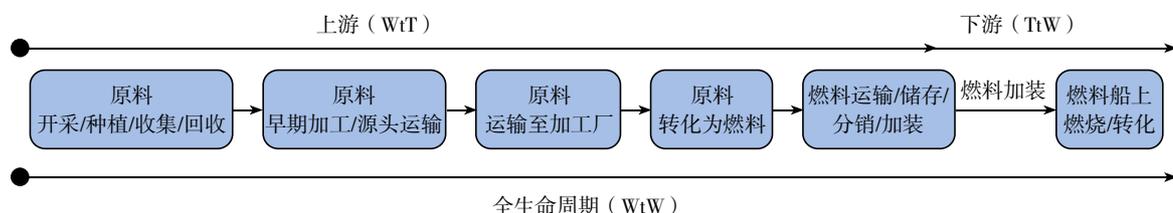


图1 船用燃料上、下游及全生命周期温室气体强度关系示意图

1. 上游温室气体强度

船用燃料上游温室气体强度的评价计算可分为两部分：一是上游所产生的温室气体排放；二是上游所产生的碳排放信用，也就是存储起来的碳。在进行船用燃料上游温室气体排放强度计算时，需要从上游所产生的温室气体排放中扣除所产生的碳排放信用。其中，第一部分包括原料在开采、种植、收集、回收过程中产生的温室气体排放，原料种植所产生的土地利用变化导致的土壤碳储量年化减少量，原料源头加工处理等所产生的温室气体排放，燃料储存、交付、加装以及原料、燃料运输等所产生的温室气体排放；第二部分包括通过提高农业管理使得土壤碳储量的年化增加量，以及燃料在生产、运输、加工和分配环节中，通过碳捕集和封存技术避免排放CO₂而产生的碳排放信用（但需扣除所产生的额外排放，并避免重复统计）。

2. 下游温室气体强度

船用燃料下游温室气体强度的评价计算可分为四部分：一是燃料燃烧使用所产生的温室气体排放；二是具有温室效应的燃料（目前仅指CH₄）逃逸所产生的温室气体排放；三是具有碳信用的燃料在燃烧过程中产生的CO₂排放；四是船上使用碳捕集和存储技术所产生的碳排放信用。

其中，第一部分是参与燃烧的燃料完全燃烧后所产生的CO₂、CH₄、N₂O排放，参与燃烧的燃料不包括泄漏到大气中的燃料；第二部分是船舶燃用甲烷燃料时，经管路系统、发动机曲轴箱及发动机排气管逸散到大气中的甲烷所造成的温室气体排

LCA导则在选取GWP100作为主要评价计算的同时，还给出了采用GWP20的温室气体排放强度对照计算公式，其只是使用GWP20代替了GWP100，其他项目没有变化。

放；第三部分是生物质燃料或捕集碳合成燃料在船舶燃烧过程中产生的CO₂排放，根据是否考虑燃料中碳的来源，决定该部分产生的CO₂是否计入温室气体排放；第四部分是从下游排放中扣除因为使用船上碳捕集与存储技术所产生的碳排放信用（但需扣除整个过程中所产生的额外排放）。需要特别指出的是，第一部分所产生的CH₄、N₂O排放及第二部分经发动机（或称为“能量转换装置”）所产生的泄漏都与发动机的类型、性能等直接相关。

根据上述第三部分是否考虑燃料中碳的来源，LCA导则将船用燃料下游温室气体强度分为TtW强度1和TtW强度2。

TtW强度1是在计算过程中不考虑燃料中碳的来源，将燃料在船舶上燃烧使用所排放的CO₂计入下游排放，即不扣除具有碳信用的燃料在下游所产生的CO₂排放。

TtW强度2是在计算过程中，将具有碳信用的生物含碳燃料或捕集碳合成燃料在船舶上燃烧使用所产生的CO₂从下游排放中扣除。此种情况下认为生物燃料中的碳是植物在生长过程中从大气中吸收的CO₂，燃烧后产生的CO₂直接排放不会增加大气中CO₂的含量；捕集碳合成燃料中的碳来源于大气、生物或者已经计入了其他行业的排放，同样不计入下游排放当中。

3. 全生命周期强度

燃料全生命周期温室气体强度是将上游温室气体强度和下游温室气体强度相加得到的，用来衡量船用燃料在全生命周期内的温室气体排放强度。计

算全生命周期温室气体强度时，燃料下游温室气体强度使用TtW强度2。

(二) 船用燃料路径清单

LCA导则按照船用燃料组别、燃料类型、原料类型、原料来源、燃料生产工艺、燃料生产耗电种类六个因素，将船用燃料划分成128种不同路径，每种特定路径的燃料因为原料性质、生产工艺等的不同，在进行温室气体排放强度评价计算时要考虑的评价边界也不同。同一种化学成分的燃料可以有不同燃料路径，不同燃料路径的燃料通常具有不同的温室气体排放强度；同一燃料路径的燃料也会因为国家、地区或生产厂商不同，能源利用效率不同，原料生产地点到燃料加工厂距离等的不同，最终得到不同的上游温室气体排放强度。燃料路径的确定有助于规范燃料温室气体排放强度的评价活动，有利于相同路径燃料查找温室气体排放强度差距，降低上游温室气体排放强度。

(三) 燃料可持续性指标

LCA导则还从可持续发展的角度，给出了船用燃料可持续性评价指标体系，除温室气体强度之

外，指标体系还包括燃料碳源、电力来源、直接土地使用碳汇变化、间接土地使用碳汇变化、水、空气、土壤、废弃物及化学品、生物多样性指标及各个指标基本评价原则等。

(四) 燃料生命周期标签

LCA导则中还提供了用于收集和传递船用燃料生命周期评价信息的燃料生命周期标签（英文缩写为“FLL”）。FLL分为五部分（参见表1）：A部分填写燃料自身的相关信息；B部分填写燃料碳信用的相关信息；C部分填写船上相关信息，包括下游排放强度及能量转换装置类型（现指发动机类型）；D部分填写燃料全生命周期排放强度；E部分填写燃料经认证的可持续性评价结果信息。需要特别说明的是，FLL并不是燃料供应商能够独自完成的，下游排放中所涉及的能量转换装置形式及下游排放强度计算公式中的CH₄、N₂O和船上捕集碳等都不是燃料供应商所能提供的，所以这个标签将来很有可能需要几方共同填写完成，或者FLL需要拆分成几个模块分别填写。

表1 燃料生命周期标签构成

项目	分类	内容	单位	填写内容（该列所填内容仅做示例说明用）
A部分	A-1	燃料类型（混合燃料）	—	重质燃料油（非混合燃料）
	A-2	燃料路径代码	—	HFO（VLSFO）_f_SR_gm
	A-3	燃料低热值	MJ/g	0.040 2
	A-4	混合燃料占比	%（MJ/MJ）	100%
	A-5	WtT强度	g CO _{2eq} /MJ _{LCV}	16.8
B部分	B-1	生物碳源燃料的碳排放信用	g CO ₂ /g	0
	B-2	捕集碳燃料的碳排放信用	g CO ₂ /g	0
C部分	C-1	TtW强度1	g CO _{2eq} /MJ _{LCV}	78.68
	C-2	TtW强度2	g CO _{2eq} /MJ _{LCV}	—
	C-3	能量转换装置	—	低速二冲程-狄塞尔循环柴油机
D部分	（D=A-5+C-2）	WtW强度	g CO _{2eq} /MJ _{LCV}	95.48
E部分	—	可持续性（认证）	—	非可持续燃料

三、LCA导则的应用

LCA导则是船用燃料全生命周期温室气体排放强度评价和燃料可持续性评价的依据。评价结果可以为船舶营运碳强度计算等提供基础数据，使LCA导则的应用得到拓展。

(一) LCA导则的直接应用

LCA导则最直接的应用是在统一的框架下，为船用燃料全生命周期温室气体排放强度和可持续性表现提供评价依据，公开、公正、规范地评价船用燃料的温室气体排放强度或可持续性，方便国际航行船舶在中、长期减排措施中选用生命周期温室气

体强度低或可持续性好的燃料，确保国际航运能够达到IMO提出的减排目标。

(二) LCA导则的潜在应用

根据LCA导则对船用燃料全生命周期温室气体排放强度进行评价，能够得到一些中间评价结果和最终评价结果，进而可以得出不同的潜在应用。

1. 计算船舶营运碳/温室气体强度

2023年7月IMO发布了关于使用生物燃料的临时指南（MEPC.1/Circ.905号通函），其中规定可持续生物燃料可以使用经国际认证计划认证的全生命周期温室气体排放强度值计算CII值，并指出如利用LCA导则评价燃料全生命周期温室气体排放的方法一经实施，该生物燃料临时指南将立即废止。由此可见，生物燃料依据LCA导则算得的生命周期温室气体强度将用在CII计算中，其他船用燃料依据LCA导则算得的生命周期温室气体强度值，也有可能在未来代替燃料与CO₂排放之间的碳转换系数（C_F）计算CII。

2. 作为中期减排措施的基础数据

ISWG-GHG 16/2/7与ISWG-GHG 16/2/14等提案都使用依据LCA导则算得的船用燃料生命周期温室气体强度值来制定IMO中期减排措施中船用燃料温室气体标准或燃料可持续性标准，还依据燃料生命周期温室气体强度值计算船舶获得的年度燃料强度值，并根据船舶获得的年度燃料强度值等执行相应的经济措施。中期减排措施还将基于目标性燃料标准设定船用燃料温室气体强度基线和温室气体强度降低曲线，促使船用燃料不断降低生命周期温室气体强度。

3. 为燃料生产等提供分析数据

根据燃料温室气体强度的中间评价结果，可以对比相同路径燃料在相同过程环节（或子环节）中的温室气体排放强度，分析温室气体排放强度存在差距的原因，为燃料在生产、运输、储存及燃烧使用等环节不断降低温室气体强度提供改进建议。

四、LCA导则的发展方向

由于LCA导则涉及燃料生产运输、船上能量转换装置、船舶上后处理装置及燃料可持续性等诸多方面内容，虽然IMO已经在LCA导则制定方面进行

了大量的工作，但有些问题还需要进一步讨论与完善，ISWG-GHG 16次会议及MEPC 81会议都对LCA导则的相关内容进行了讨论，并决定成立专家组和通信组等继续解决LCA导则的一些遗留问题，初步确定的发展方向主要有：

1. 制定专门的船上碳捕集监管框架

考虑到船上碳捕集相关问题的复杂性及船上碳捕集在国际航运实现温室气体减排过程中的重要性，IMO计划以中国等提交的MEPC 80/7/7提案为基础，在进一步制定LCA导则的背景下，澄清船上碳捕集系统的边界，进一步考虑碳捕集至碳存储整个过程中的排放问题，单独制定包括船上碳捕集系统测试、检验、认证等在内的监管框架等。

2. 下游CH₄、N₂O等排放的测量和验证

燃料燃烧所产生的CH₄和N₂O排放跟燃料种类、柴油机类型及柴油机负荷等都密切相关，尽管LCA导则建议参考使用IMO第四次温室气体研究报告的相关排放系数来考虑CH₄和N₂O的排放，但还有一些燃料及柴油机类型等在第四次温室气体研究报告中没有涉及，需要进行必要的补充完善，因此IMO决定成立一个通信组，制定燃料燃烧所产生的CH₄、N₂O等非CO₂温室气体排放的框架，研究这些温室气体排放的测量和验证等工作。

3. 制定船用燃料可持续性标准

LCA导则给出了可持续性评价中环境相关的十项指标，但并没有给出具体的环境评价标准，另外现有的LCA导则中没有考虑可持续性评价相关的经济影响、社会影响。IMO会在后续综合考虑环境、经济及社会影响的前提下，继续制定船用燃料的可持续性评价标准，全面、科学评价船用燃料的可持续性。

4. 燃料路径的补充

目前LCA导则中列举了128种不同路径的燃料，但可能还有一些不同原料、不同生产工艺的燃料没有被统计进来，LCA导则还将在燃料路径方面进行补充，以便于将一些具有发展潜力的燃料引入船用燃料清单。

5. 确认不同路径燃料的默认排放值

虽然LCA导则中给出了船用燃料上、下游及全生命周期温室气体排放强度的计算公式，但现阶段

很难根据公式计算出燃料温室气体排放强度。为了使LCA导则能够尽快服务于船舶温室气体减排工作，LCA导则制定工作通信组已经在LCA导则中给出了一些燃料的默认排放值，但还需要继续完善默认排放值确定的相关工作。

6. 其他发展方向

LCA导则还将在LCA方法审查、土地使用变化间接影响风险分类、燃料路径认证及上下游实际强度认证等方面开展相应的工作。

五、结束语

2023年欧盟通过了旨在促进船用燃料脱碳的FuelEU Maritime法规，该燃料法规将于2025年1月1日起，对5 000总吨及以上适用船舶所用燃料的生命周期温室气体强度进行限制，并要求实现阶段性降低。IMO也将于2025年通过一揽子中期减排措施，其中所包含的目标性燃料标准与欧盟燃料法规在燃料温室气体强度评价方法方面有很多相通之处，燃料标准对温室气体强度的限制及降低要求也与欧盟燃料法规类似。LCA导则是船舶温室气体排放控制的一个基础性导则，如将燃料根据LCA导则

评价得到的温室气体强度值应用于船舶能效设计指标（EEDI）、现有船舶能效指标（EEXI）和CII等能效法规的指标计算，所得到的指标值会有较大变化，将对这些能效法规的实施产生较大影响。

所以，我国船用燃料生产商、船舶设计单位、船东等其他相关人员等有必要及时了解LCA导则的相关内容及其评价流程，关注LCA导则在船用燃料标准及能效法规等方面的应用，关注LCA导则在碳捕集、默认值确定等方面的发展，及时做好制度、政策方面的准备，完善燃料的立法、燃料生产标准等，为应对欧盟燃料法规及IMO中期减排措施的实施做好准备，为我国船用燃料在国际航运市场上推广使用、提高我国国际航行船舶的竞争力提供支持。

作者简介：

孙德平，大连海事大学，副教授。

张爽，大连海事大学，研究员。

苑海超，大连海事大学，副教授。

仇大志，大连海事大学，副教授。

黎泉，大连海事大学，副教授。

鞠恒，大连海洋大学，副教授。