



中国环境与发展国际合作委员会
专题政策研究报告

碳中和愿景下可持续蓝色经济
(海洋治理专题研究)

中国环境与发展国际合作委员会
2025 年 10 月

项目组成员*

姓名

单位及职务

项目组长

戴民汉

中国科学院院士，厦门大学讲席教授

Jan-Gunnar Winther

挪威极地研究所科研主任

顾问

苏纪兰

中国科学院院士，自然资源部第二海洋研究所名誉所长

Karina Barquet

斯德哥尔摩环境研究所资深研究员

项目协调员

刘慧

中国水产科学研究院黄海水产研究所研究员

Birgit Njåstad

挪威极地研究所项目主管

协调助理

盛华夏

鹭江创新实验室高级主管

项目组成员和专家

王菊英

生态环境部国家海洋环境监测中心主任

孙松

国际欧亚科学院院士，中国科学院大学教授

Kate Bonzon

美国环保协会全球海洋倡议副总裁

Alfredo Girno

世界经济论坛海洋行动议程全球负责人

邱景辉

最高人民检察院公益诉讼检查厅副厅长

杨松颖

亚洲公益创投网络气候行动总监

崔琳

长三角船舶与海工装备技术创新中心副主任

伏晴艳

上海市环境科学研究院副院长

李家彪

中国工程院院士，自然资源部第二海洋研究所名誉所长

曹玲

厦门大学特聘教授

Lars Johanning

普利茅斯大学教授

Jason Anderson

气候工作基金会资深项目主任

Pradeep Singh

亥姆霍兹波茨坦中心高级项目经理

Rod Fujita

美国环保协会资深科学家

Kristin Kleisner

美国环保协会海洋首席科学家

备注:

* 本项目组长和成员以个人身份参与项目工作。本报告中所表达的观点和意见仅代表参与此项专题政策研究团队专家个人立场，不代表其所在组织和国合会的观点和意见。

目录

一、 执行摘要与政策建议	1
(一) 背景	1
(二) 2025 年研究目标与项目组活动	2
(三) 重要发现	3
(四) 政策建议	4
二、 引言	5
三、 问题的提出	6
(一) 全球背景	6
(二) 中国背景	6
(三) 可持续蓝色经济	7
(四) 平等与公平	8
四、 可持续蓝色经济和基于海洋的碳中和解决方案	9
(一) 海洋经济与蓝色金融	9
(二) 基于海洋的碳中和解决方案	12
五、 海洋产业设计	20
(一) 海洋产业低碳转型	20
(二) 可再生能源	23
(三) 绿色航运	26
(四) 深海采矿	31
(五) 深远海养殖	34
参考文献	37
缩写词列表	40

一、 执行摘要与政策建议

（一）背景

海洋经济涵盖与海洋和海岸相关的广泛活动，从渔业、航运、沿海旅游等传统产业，到海洋生物技术、海上可再生能源等新兴领域，正日益成为推动全球可持续发展和低碳转型的重要力量。

最新估算表明，如果将海洋生态系统、沿海栖息地和海洋资源纳入全球“蓝色经济资产负债表”，则海洋自然资本的资产总值约为 24 万亿美元。海洋通过提供各类商品与服务的年均经济产出约 2.5 万亿美元，使其成为全球最具分量的经济体系之一。仅在 2023 年，海洋相关贸易额便达 2.2 万亿美元，占全球贸易总额的约 7%，其中海洋服务业与高新技术产业的战略作用日益凸显。

除经济价值外，海洋在减缓气候变化和实现碳中和方面同样具有巨大潜力。基于海洋的解决方案包括：保护和修复红树林、海草等高效碳汇生态系统；开发增强海洋碳吸收能力的二氧化碳去除技术；扩大海上可再生能源利用；推动航运业脱碳；保护海洋沉积物这一天然碳汇；以及推广提供低碳蛋白质的水生食品。这些举措凸显了海洋作为经济引擎与气候稳定器的双重功能。

展望未来，经济合作与发展组织（OECD）的预测显示，海洋经济在增加附加值和创造就业方面将持续领先于全球整体经济。在加速低碳转型的情景下，到 2050 年其规模预计将达到 1995 年的 2.5 倍。然而，这一潜力能否实现，取决于能否将可持续性置于海洋经济发展的核心。海洋经济的长期价值与基于海洋的气候缓解措施的有效性紧密相关，而不可持续的发展模式则可能破坏其赖以存在的生态系统服务功能。

要确保海洋经济的可持续繁荣，治理模式必须实现根本性转变——即将海洋视为一个动态且相互联系的生命系统进行管理。在海洋环境管理中，应更加注重维持其生产力与恢复力的关键生态过程。健康的海洋不仅是经济增长的基石，也是长期气候稳定与社会福祉的前提。未来的治理框架必须具备全面性、强适应性且兼具包容性，能够在环境保护、经济发展和社会公平之间取得平衡，并确保女性等传统边缘化群体，能够公平地分享海洋经济带来的机遇和收益。

在这一发展背景下，中国海洋经济的战略意义尤为显著。习近平总书记在 2025 年 7 月 1 日召开的中央财经委员会第六次会议上指出，推进中国式现代化必须深化全国统一大市场建设，并加快海洋经济高质量发展。此次会议彰显了中国政府在推动市场现代化与海洋经济转型方面的双重战略承诺，重申海洋经济高质量发展是实现中国式现代化和建设中国特色海洋强国的重要组成部分。将创新驱动的海洋产业与环境可持续性、碳中和目标相结合，凸显了海洋经济在国家发展议程中的战略地位。要释放这一潜力，亟需在生态管理、社会公平与可持续增长基础上制定协调一致的长期战略。

（二）2025 年研究目标与项目组活动

第七届国合会海洋治理政策研究——“面向碳中和的可持续蓝色经济”，继续聚焦海洋综合治理、蓝色金融与绿色技术如何加速海洋经济向可持续蓝色经济转型。研究探讨了契合碳中和目标的海洋发展框架与工具，并梳理跨产业协同效应，这些效应既能促进经济发展，又有助于气候行动。在本研究时段内，研究重点聚焦七大主题，尤其关注“30×30”目标及国家管辖范围以外区域海洋生物多样性协定（BBNJ 协定），旨在强化海洋保护并推动海洋资源的公平合理共享。

2025 年，本研究在推进海洋经济与蓝色金融、海洋可再生能源、深海采矿和近海养殖四个既有研究领域的基础上，新增了海洋碳解决方案和绿色航运两个新课题。同时，研究进入“湾区对比”案例研究阶段，将粤港澳大湾区与旧金山湾区进行比较分析。在此前香港和广州论坛的基础上，2025 年 1 月于澳门举办了一次高级别对话活动。今年 5 月，碳中和愿景下可持续海洋治理专题政策研究项目组（简称海洋 SPS）组织赴旧金山湾区考察，重点研究海洋综合治理与可持续蓝色经济实践。考察内容包括与利益相关方的研讨会、政策对话及对蓝色经济项目成功案例的实地走访。将此次调研与大湾区调研成果相结合，为下一阶段的跨湾区比较分析提供重要参考。

此外，海洋 SPS 于 2025 年 6 月在尼斯召开的联合国海洋大会上举办了两场边会：一场在蓝区举行，主题为“碳中和愿景下的可持续蓝色经济”；另一场在绿区举行，主题为“蓝色协同：通过跨部门合作共同设计可再生蓝色经济”。两场活动均旨在推动有关基于海洋的解决方案的国际对话，以支持全球气候与可持续发展目标。在蓝区边会上，海洋 SPS 联合厦门大学、世界经济论坛、联合国全球契约组织、厦门大学海洋环境科学国家重点实验室、鹭江创新实验室、联合国开发计划署、香港科技大学、亚洲公益创投网络（AVPN）、中国海洋发展基金会及塔拉海洋等伙伴，共同发布了题为《共塑 2030 后全球海洋新议程》的行动倡议（框 1）。同时，项目组向全球发布了题为《推进中国可持续蓝色经济：为海洋核算和蓝色金融构建坚实政策基础》的政策报告，该报告包含了此项政策研究中第一工作组的全部成果，相关内容在本报告中亦有所述及。

这份报告属于海洋政策研究系列报告之一，应当结合其他涵盖更广泛海洋议题的报告一并理解和阅读，这些报告将为未来的治理规划提供重要参考。在第七届国合会政策研究工作结束时，海洋项目组还将汇总本项目的全部重要成果，提交一份综合报告。

框 1. 蓝区边会倡议

行动呼吁：共塑 2030 后全球海洋新议程

随着 2030 年可持续发展目标（SDGs）的临近，我们正处于重新审视海洋在气候调节、生物多样性维护、粮食安全和人类共同繁荣中所发挥基础性作用的关键时刻。海洋之于地球的重要性，正如水之于生命本身。展望 2030 年之后，我们必须前瞻性地构建一个全新、更具雄心、以科学为依据、由多方共同参与设计的全球海洋议程，使海洋成为推动可持续与公平未来的核心支柱。

呼吁各国政府、国际组织、私营部门、金融机构、科学界、民间社会以及沿海社区：

1. 将海洋作为 2030 年后全球可持续发展议程中的优先事项，全面审视并充分认识海洋在气候调节、生物多样性、可持续发展和粮食系统中的关键作用。

2. 秉持“繁荣海洋 = (科学 + 技术 + 治理 + 金融) × 共同设计²”的理念，通过科学、技术创新、政策与金融等领域的共同参与和设计，推动对海洋的保护和对海洋的可持续、可再生的利用。

3. 通过海洋经济的可再生转型和加速，使其与全球净零排放目标协同一致，同时提升资源利用效率，修复并促进生态系统健康，实现兼具包容性和公平性的经济增长，**推进可再生蓝色经济的全面发展。**

4. 在共同设计、科学可行的基础上，**加大对基于海洋的应对气候变化自然和技术解决方案的投资力度**——以修复海洋生态系统、提升沿海地区韧性为导向，加速向净零排放和碳中和转型。

我们必须将海洋置于 2030 年后全球可持续发展议程的核心。唯有携手共进，方能共创一个繁荣而具备再生力的海洋，使其在实现可持续、气候适应型与公平未来的进程中发挥关键作用。

（三）重要发现

- 发展可持续蓝色经济（即高质量海洋经济）虽已确立为中国的国家战略，但与其他重大战略（包括碳中和与生态文明建设目标）缺乏有效衔接，在一定程度上制约了其转型进程。
- 中国可持续蓝色经济的发展仍受多重因素制约，包括战略方向不够明晰，以及融资体系、投资者参与机制、信息披露制度和法律框架等支撑体系尚不完善。
- 中国超过 60% 的国内生产总值来自沿海地区。像粤港澳大湾区这样的战略枢纽具备得天独厚的优势，可在技术、金融和政策创新方面发挥引领作用，推动可持续蓝色经济发展，并促进海洋治理的高效协同。

（四）政策建议

1. 战略性建议

- 加强海洋领域与国家重大战略目标（如 2060 年碳中和目标）的统筹协调，将可持续蓝色经济发展目标纳入国家及地方绿色发展总体规划（包括“十五五”规划）中，推动形成政策与行动的一体化布局。促进海洋经济高质量发展与绿色低碳转型，例如规划并推进海洋基础设施建设，为海洋科技创新与产业发展奠定坚实基础。
- 通过建立健全的监管与信息披露体系、创新型保险机制以及多元化融资渠道，全面提升中国海洋经济的融资能力与资金使用效率。完善中国海洋经济核算体系，设立“国家蓝色发展基金”，以强化金融支撑，推动蓝色产业体系建设和海洋经济高质量发展。
- 将粤港澳大湾区等关键区域作为可持续蓝色经济发展的试点，发挥其在技术、金融和政策创新方面的引领作用，推动中国蓝色经济的高质量发展。

2. 针对性建议

- 为了充分发挥海洋在气候行动中的潜力，中国的碳中和战略应将海洋二氧化碳去除（mCDR）与海洋产业绿色转型有机结合，通过设定明确目标、加强跨部门协调、建立统一框架以及推动协同创新，来实现这一目标。
- 应制定国家可持续海洋能源及零排放航运战略，该战略需统筹考虑生态影响与环境承载能力，加快低碳技术的创新与应用（如海上光伏、绿色氢能、零排放船舶），并支持绿色基础设施建设、跨部门协同以及与碳中和目标相一致的国际合作。
- 应提供政策激励，促进关键海洋产业技术与运营模式的创新与优化，确保其可持续性、降低环境足迹，同时支持国家及国际碳中和目标的实现。
- 应通过有针对性的财政激励（如补贴、税收减免或其他提升技术经济可行性的措施）、支持性的监管框架和能力建设投资，鼓励海洋产业采用环境可持续和低碳新技术。
- 建立全面且综合的海洋核算框架，用于支持可持续蓝色经济的整体政策规划，并评估海洋环境承载力。在此基础上推动海洋产业发展，同时统筹考虑水质、生物多样性以及各行业对环境与社会的综合影响。
- 通过制定法规、签署协议、知识共享以及能力建设等多种方式促进政府、产业与研究机构的协作，扩大与深化国际合作，支持国内发展并促进全球向可持续蓝色经济转型。

二、引言

第七届国合会“碳中和愿景下可持续海洋治理专题政策研究（海洋 SPS）”，旨在提出并推动有助于加速蓝色经济的治理体系、蓝色金融体系和绿色技术应用，并以实现碳中和目标为契机，确保海洋经济全面地、公平地向可持续的蓝色经济（Sustainable blue economy, SBE）转型。我们的目标是研究海洋产业之间如何协同以促进可持续蓝色经济的发展，并推动落实面向碳中和的海洋解决方案。

海洋 SPS 将在 5 年研究期内围绕 7 个特定主题进行研究，前三个是综合性议题，后四个是针对特定行业的议题：

- 海洋经济与蓝色金融*
- 基于海洋的碳中和解决方案*
- 基于科学和基于社会公平的生态系统修复
- 产业设计和转型：海洋能源*
- 产业设计和转型：绿色航运*
- 产业设计和转型：海底采矿*
- 产业设计和转型：深远海养殖*
- 产业设计和转型：海洋旅游

标注星号的主题目前已形成相关研究成果，这些研究构成了本报告的基础。针对每一个此类政策主题，都已编制独立报告。本报告对其中六个主题的挑战、机遇和潜在政策方向进行概述，更为详尽的信息与背景资料可在相应的专题报告中查阅。

在这些主题的考量中，特别强调了海洋生物多样性。例如，遵循《生物多样性公约》第十五次缔约方大会（COP15）达成的“30×30”目标——到 2030 年保护 30% 的陆地和海洋，以及《公海生物多样性协定》（BBNJ 条约）中关于国家管辖范围以外海洋生物多样性的保护与可持续利用的要求。其核心目标在于推动海洋及其生物多样性的保护，并确保海洋资源与生态系统服务的公平合理分享。

此外，必须认识到气候变化对全球海洋生态系统的影响日益加剧。温度、酸碱度、溶解氧、盐度及水流格局等环境要素均发生着显著变化，这些变化正持续影响着生物的生长、繁殖、生存、迁徙，同时影响着物种间的相互作用以及栖息地的可利用性，并且这些变化充满不确定性。尽管部分生态系统（如珊瑚礁及其他依赖精细环境条件的生物性海岸栖息地）受到的冲击尤为严重，但所有海洋生态系统都不同程度地面临威胁。这些生态系统的改变不仅影响海水养殖和渔业捕捞的物种，也波及其他具有重要生物资源价值的种群。气候变化是一种系统性冲击，涉及跨部门管理与整体海洋生物资源政策；因此，必须在政策设计中充分纳入这些因素，以确保在不断变化的环境条件下保持政策的长期有效性^[1]。

三、问题的提出

（一）全球背景

海洋经济是围绕海洋开发、利用与保护开展的产业活动及其相关延伸的总和。全球海洋经济在 2018 年的估值为每年 2.5 万亿美元，占全球 GDP（86.69 万亿美元）的 3.3%，如果将其看成一个国家，那么在 2019 年海洋经济达到了全球第五大经济体的规模。根据联合国贸易和发展会议（2024）和经济合作与发展组织（2025）的数据，在全球加速向低碳能源转型的进程中，到 2050 年，海洋经济的规模预计将达到 1995 年的约 2.5 倍^[2]。然而，由于估值方法和数据来源的限制，这一数值仍可能被低估。经合组织预测，到 2030 年，蓝色经济在增加值和就业方面的增长速度将超过全球经济整体水平。海洋经济在创新、就业和长期增长方面展现出巨大的潜力。近年来，蓝色经济在政治话语体系中的影响力不断上升，但迄今尚未形成统一的标准化定义^[3]。

除了创造丰富的经济机遇，海洋还为实现碳中和目标提供了多种基于海洋的潜在气候缓解方案。此外，除了提供经济价值，在缓解气候变化方面，海洋还提供了一系列潜在的解决方案，助力人类实现碳中和目标。这些方案内涵丰富，至少包括：培育高效的碳汇生态系统（即“蓝色森林”或“蓝碳”），通过生物或地球化学的手段加速海洋碳吸收能力（即海洋减碳，mCDR），开发利用海洋能源，最大限度地减少航运等涉海活动的碳足迹，保持并且增强海底储碳的能力（即碳捕集与封存，CCS），以及调整粮食政策和渔业管理以体现渔业和水产养殖产品的应有价值，将其作为低碳海洋蛋白质和微量营养素的主要来源。

社会是构成一个地区或国家个人、社区和群体的集合。它包含了不同的利益攸关方，包括工人、雇主、政策制定者、民间社会组织、边缘化人群和其他弱势群体以及子孙后代等。他们在海洋的福祉和与海洋相关的机会方面都有不同的利益。所有这些群体的不同需求、权利和贡献都是海洋综合管理的重要方面，必须加以考虑。

考虑到健康的海洋环境是发挥海洋生态服务功能的先决条件，有必要通过海洋综合管理来实现环境和社会之间的平衡，以及短期经济收益和生态系统服务长期繁荣之间的平衡。因此，必须以全面且可持续的方式构建未来的海洋治理框架。实施谨慎、全面和战略性地海洋综合管理，可以使得海洋在减缓当前全球气候变化、生物多样性丧失和污染等三重危机方面发挥更加重要的作用。

（二）中国背景

海洋提供了不可替代的自然资产、商品和服务，海洋经济为中国的长期繁荣做出了重要的贡献。从海洋空间资源看，中国领海辽阔，大陆海岸线长约 1.8 万公里，天然深水岸线长 400 多公里，有 60 多个深水港，3.8 万平方公里的潮间带和 7300 多个 500 平方米以上的岛屿。中国有记录的海洋物种为 2 万多种，其中包括 3000 多种鱼类。中国拥有红树林、盐沼、海草床、珊瑚礁、巨藻林和牡蛎礁等多种海洋生态系统，它们的支持粮食安全、提升气候适应能力和支撑旅游业等方面发挥着重要作用。同时，多种多样的海洋生态系统支持着中国在总体规模上领先世界的海产品产业，包括野生捕捞渔业和水产养殖业。海岸线的魅力也支撑了不断发展的滨海旅游业。中国绵长的海岸线及其优良条件有利于发展海洋可再生能源产业。海洋可再生能源是中国增长最快的海洋产业，目前拥有全球近 40% 的海上风电装机容量，因此中国的海洋可再生能源也是世界上最大的海洋产业。此外，基于充分地研究和可持续地管理运行，蓝色经济或成为最具有开发价值和发展潜力的产业，包括新能源和生物活性物质开发等。

中国的滨海旅游、海洋运输、海洋渔业、海洋生物医药等产业的规模不断扩大，已成为国民经济的重要组成部分。此外，根据《振兴中国海洋经济：赋能可持续发展》报告，中国的海洋资产价值估计约为 54 万亿元人民币（7.7 万亿美元）。

中国 50% 以上的大城市、40% 以上的人口和 60% 以上的 GDP 集中在沿海省市。沿海（特大）城市能够并且应该成为发展蓝色经济和实现碳中和目标之间协同增效的引擎。随着世界范围内海洋产业的蓬勃发展，中国的沿海地区正在建立越来越多的海洋产业园区。海洋产业园区可以通过整合和协同海洋相关产业，成为中国海洋经济（海洋强省、海洋强市、海洋之都）发展规划的重要组成部分。

经过几十年的发展和产业的不断调整，目前中国海洋经济总体趋稳。然而，人们还没有充分认识到开发和利用海洋给海洋生态系统造成的巨大压力。气候变化、生物多样性丧失、环境污染等都直接或间接地威胁着海洋经济发展。

作为海洋大国和世界第二大经济体，中国正在积极建设“海洋强国”。在中国发展的新时代，海洋健康和海洋经济可持续发展被提升到新的战略高度。不断探索建设“海洋生态文明”，努力构建“海洋命运共同体”，体现了中国的大国意识和大国担当。这不仅需要政府的领导，也需要学术研究的支持、公众的理解与配合，还有环保非政府组织的协助。

具有战略意义的是，中央财经委员会于 2025 年 7 月 1 日召开第六次会议。习近平总书记在会上强调，要加快建设全国统一大市场，推动海洋经济高质量发展。会议指出，高质量海洋经济（本报告中称为可持续蓝色经济，即 SBE）是中国现代化的重要支柱，需要强化顶层设计，完善政策支持，吸引更多社会资本参与。重点任务包括提升海洋科技自主创新能力，培育龙头企业和专精特新中小企业，推动海上风电、远洋渔业、海洋生物医药、文化旅游和航运等产业发展。同时，会议强调推进湾区经济规划、优化港口集群、加强生态保护、实施分层海洋空间利用以及完善海洋碳汇核算。中央财经委员会还提出，要进一步深化中国在全球海洋治理、科学研究、防灾减灾及蓝色经济合作中的参与。此次里程碑式会议表明，中国海洋经济正进入加速发展阶段，并已全面纳入国家海洋治理与政策研究框架。

（三）可持续蓝色经济

可持续发展是关系到社会发展和人民福祉的全球性议题。蓝色经济和绿色经济都是不同时期为促进可持续发展而提出的发展理念。在全球气候变化的背景下，污染和其他人类活动影响也加剧了气候变化，生物多样性和人们的生计都面临着越来越大的风险和挑战。如若缺乏有效监管，当前的海洋经济可能会对海洋生态环境健康造成威胁，因此海洋经济部门亟需向可持续的蓝色经济（SBE）转型，并成为应对气候变化的一种解决方案。**为了更加积极并切实推动海洋经济的蓝色转型，应该明确可持续蓝色经济的定义和原则，将其纳入国家最高级别政策框架中，并纳入下一个“五年计划”。**

世界银行对蓝色经济的定义是“可持续利用海洋资源以促进经济增长、改善生计和就业以及海洋生态系统健康。”但是，该定义并没有为确保和实施经济发展的可持续性、性别和社会公平性以及环境保护等在内的多重目标提供原则或指导。蓝色经济的核心是通过海洋相关的产业和活动实现社会经济发展，并将此过程中的环境和生态系统退化和威胁降到最低^[4]，因此“蓝色经济”的概念对海洋经济的可持续发展提出了新的要求。

随着可持续蓝色经济概念在全球范围内的广泛传播，发展可持续蓝色经济的国际共识正日益增强，蓝色经济逐渐被纳入区域发展战略框架，一些组织已经提出了蓝色经济发展的指导原则、重点优先领域以及倡议和建议。例如，世界自然基金会于 2015 年发布了《可持续蓝色经济原则》，并于 2018 年与欧盟委员会、欧洲投资银行和威尔士亲王的国际可持续发展联盟共同制定了《可持续蓝色经济金融原则》；自 2019 年以来，联合国环境规划署财政倡议（UNEP FI）一直在推广可持续蓝色经济的财务原则；二十国集团也于 2023 年发布《二十国集团可持续和气候适应型蓝色经济高级别原则》。

（四）平等与公平

不论性别、能力、性取向、年龄、种族和宗教，所有人都有平等的权利和机会参与社会活动。性别平等被认为是有效保护海洋、可持续管理海洋与海洋资源以及实现联合国可持续发展目标（SDGs）的关键。其中，SDG5 指出，性别平等包括男女之间权力、影响力和资源的公平分配。通过制定促进性别平等的办法和执行框架，使所有妇女和女孩有平等的机会和能力参与到各级行动的决策过程中，这将更有可能促进整体的社会福利。因此，海洋治理，包括可持续蓝色经济的转型，需要在项目、政策和基层群众等层面充分考虑性别敏感性、性别差异和需求，并依此制定规划和实施方案，并开展监测和评价。

包括中国在内的大多数国家都签署了国际承诺，有义务促进性别平等，消除歧视，并将性别问题纳入立法、政策和项目（包括环境和气候变化项目）。这些承诺包括《联合国气候变化框架公约》、《联合国生物多样性公约》、《联合国消除对妇女歧视公约》、《北京行动纲要》和可持续发展目标（SDGs）。

面对上述种种承诺，女性在蓝色经济中的代表性依然严重不足，无论是从业人数还是可从事的工作类型，女性都远远落后。海洋领域中的文化规范与实践持续偏袒男性，导致女性在资源获取、决策参与及权益保障方面均处于弱势地位。

在海洋领域，妇女更多地从事工资较低、非正式和仅能维持生计的活动，如小规模渔业、海产品加工和沿海旅游；而男性则主导较正式、工资较高的部门，如工业化捕鱼、海上运输、近海石油和天然气、以及海洋工程。男性主导的这些部门通常有更大的工作保障和更高的潜在收入。同时，男性更有可能担任领导角色，影响并塑造蓝色经济的政策和决策过程。这种差异降低了与女性及其社区相关问题处理的优先度。

因此，海洋产业中妇女的经济利益往往较低，因为她们主要从事工资较低的工作。这导致了更广泛的经济不平等，并限制了她们的经济赋权。因此，未来的海洋治理框架必须考虑到这些不平等现象，并积极努力为社会各阶层，包括妇女和其他的边缘化群体，争取公平参与蓝色经济的机会和利益。

任何实现男女平等的有效行动，首先需要确保获得清晰可靠的数据，以便在决策过程中更清晰有效地面对性别挑战。此外，我们所倡导的平等还涉及确保女性在与小企业有关的活动中获得平等的教育、培训的机会以及参与决策过程和享有财政资源。据此，2024 年联合国海洋十年会议和第三届联合国海洋大会特别关注了可持续海洋的性别平等问题，该会议提出了建议并呼吁采取行动，以缩小性别差距，为年轻女科学家提供教育机会，并承认妇女在海洋保护工作中的贡献^[5]。

在全球最佳实践的基础上，性别响应型治理应制度化性别相关数据的收集，确保女性在领导岗位上的公平代表性，并在蓝色经济各领域为其提供平等的资金支持、能力建设和培训机会。

四、可持续蓝色经济和基于海洋的碳中和解决方案

（一）海洋经济与蓝色金融¹

1. 中国可持续蓝色经济的演进

可持续蓝色经济（SBE）是一个跨领域的综合性概念，涵盖海洋产业、蓝色金融、海洋生态系统、海洋治理与管理以及海洋价值核算等方面。围绕其发展，已有多个国际组织提出了指导方针与原则。例如，世界自然基金会于 2015 年发布《可持续蓝色经济原则》，联合国环境规划署金融倡议（UNEP FI）自 2019 年起主导推出《可持续蓝色经济金融原则》。2023 年，二十国集团（G20）亦发布了《关于可持续且气候适应型蓝色经济的高级原则》^[6]。

（1）中国政策和规划中的可持续蓝色经济

在中国，蓝色经济最初与海洋经济几乎同义，直到 21 世纪初才逐渐出现差异。2009 年 4 月，山东半岛蓝色经济区设立，山东半岛蓝色经济区建设随即上升为国家战略。由此，蓝色经济与海洋经济的区分逐步明晰。蓝色经济开始更加突出可持续发展，强调生态与社会经济系统的协调，并推动陆地与海洋发展的有机结合。当前，“可持续蓝色经济”这一表述在国际上日益获得广泛认可，它为推动可持续发展所需的优先行动提供了交流与合作的平台。因此，建议在中国推动该术语的标准化使用，尤其是在政策制定与行业实践中加以采纳。

目前，中国的 SBE 战略更多体现为一种强调绿色增长的发展理念，而非具备可操作性的政策安排。由于缺乏明确的定义、共同的目标、责任分工及运作框架，其实施效果受到制约，难以实现可持续实践与资源配置的有效衔接。目前，不同部门分别承担相关职能，易造成政策碎片化与潜在冲突。例如，自然资源部负责整体海洋经济发展，生态环境部负责生态保护与污染防治，而农业农村部则主管水产养殖与渔业。这样的分散治理模式缺乏系统性和协调性，可能阻碍可持续蓝色经济战略的有效推进。设立一个统筹主导的部门，不仅能够简化决策流程，还能确保政策的协调与一致性。构建一个融合海洋经济发展与生态保护的综合治理体系，对于推动中国的可持续蓝色经济战略，回应海洋问题的复杂性与跨领域特征，具有关键意义。

（2）可持续蓝色经济发展中的包容性与性别平等

海洋产业的扩张可能导致当地社区，尤其是妇女和边缘群体的迁移，并加剧社会不平等。沿海社区往往依赖渔业和旅游等传统生计，这些行业易受到工业化活动的冲击^[7]。为确保蓝色经济转型的公平性，治理模式和利益共享机制必须明确纳入性别平等与社会包容的考量^[8]。

将性别指标纳入海洋经济统计体系至关重要。系统地收集和整合按性别分类的数据（以及其他包容性指标，如年龄、种族和残疾状况等）到海洋劳动力统计数据中^[9]，将使政策制定者能够追踪妇女在渔业、旅游业和蓝色科技等领域的参与情况，包括她们在领导职位上的代表性^[10]。通过在海洋经济重

¹ 本章总结了任务小组 1（海洋经济与蓝色金融）工作的重要成果。任务小组 1 的主要成员包括：白韫雯（北京绿色金融和可持续发展研究院）、Karina Barquet（斯德哥尔摩环境研究所）、陈尚（自然资源部第一海洋研究所）、Alfredo Giron（世界经济论坛）、韩国义（斯德哥尔摩环境研究所）、Louise Heaps（世界自然基金会-英国）、刘大海（中国人民大学）、Philip A. S. James（新南威尔士大学可持续发展改革与全球海洋账户合作中心）、Yujie Ren（中央财经大学）、John Virdin（杜克大学）、Mengyao Wen（北京绿色金融和可持续发展研究院）、谢茜（世界经济论坛）、邢文秀（自然资源部第一海洋研究所）、Xiaoquan Zhang（大自然保护协会）、韩宝龙（中国科学院海洋研究所）、杨松颖（亚洲公益创投网络气候行动平台）、张亦默（世界自然基金会北京办公室）、周洲（中央财经大学）

点行业中绘制这些人口与经济特征，可为政策决策提供坚实的证据基础，并识别蓝色经济发展过程中需要重点干预的领域。

最后，在中国背景下制定可持续蓝色经济的定义与原则时，应明确体现性别平等和社会包容的要求，确保妇女、男性及边缘化群体能够公平分享基于海洋的发展机遇。

2. 完善海洋核算以支持可持续发展

有四类关键的统计账户将海洋资产与治理工作同可持续经济实践相衔接。其一是海洋资产账户，用于评估海洋资源的存量与健康状况；其二是海洋经济账户，用于追踪相关经济活动与产出；其三是海洋废弃物账户，用于记录流入海洋的废弃物与排放；其四是海洋治理账户，用于界定管理责任并监测治理成效。这四类账户相互作用，形成有机整体，共同推动可持续蓝色经济的发展。通过在这些账户间实现平衡，利益相关者能够在促进经济增长的同时，保护海洋生态系统并保障其长期可持续性。

（1）完善海洋经济核算

在中国，目前纳入战略规划与政策制定的核算组成部分主要集中在经济类核算，其余部分要么仅在地方层面开展有限试点，要么仍停留在研究探索阶段。尽管生态系统生产总值（GEP）在中国已进行了不同规模的试点和开发，但其在海洋领域的应用方法和范围与陆地相比仍十分有限。因此，有必要构建一套全面的海洋核算体系，为政策制定提供科学依据，并确保经济增长不以牺牲海洋健康为代价。改进海洋核算对于 SBE 的科学决策至关重要。对中国而言，除推动海洋产业的可持续转型外，迈向 SBE 的重要一步是将更多与环境和自然资本相关的信息纳入现有的核算体系。

此外，中国还需与其他国家在海洋相关活动的范围界定上加强协调，明确各类活动的比例（直接影响），并进一步分析投入产出关系（间接影响）。这一范围应涵盖劳动力投入、科技创新等多维度指标。与此同时，定期修订海洋产业统计核算体系，并推动行业数据的数字化采集与处理，同样是必不可少的。

（2）推进中国海洋生态系统服务价值评估

海洋的价值不仅体现在提供基础性资源，还体现在其关键的生态系统服务功能上，包括气候调节、海岸防护、水资源涵养、食物供给、生计维系以及文化价值。全面认识并纳入这些价值，是推动海洋可持续发展的关键。为此，中国有必要制定国家层面的海洋生态系统服务价值评估方法，并将其系统地嵌入政策制定与经济发展决策中。全面而高质量的海洋数据，对于科学规划可持续蓝色经济和提升海洋产业效率同样至关重要。应通过政策调整来加强数据收集与分析，推动公私合作，并充分利用技术创新来应对这些挑战。

然而，中国在海洋观测与数据网络建设方面仍面临两大瓶颈：一是海洋观测设施不足，二是缺乏健全的海洋信息共享与服务相关法律政策。现行海洋法律体系尚未建立完善的海洋信息管理框架，涉及信息所有权、采集权、归属与转让等关键问题。由此产生的信息垄断现象，不仅造成国家资源浪费，也直接制约了可持续蓝色经济的发展。

3. 发挥蓝色金融力量，助力产业蓝色转型

要将资本和发展政策有效引导至可持续蓝色经济路径，亟需建立一套广泛认可的基于海洋的原则、问责框架、指导方针、标准与指标，并辅以强有力的监管措施，包括适当的激励与约束机制。尽管海洋尚未充分纳入全球金融体系，但已有若干蓝色金融框架和指导方针陆续出台或正在制定中，这些探索为新兴蓝色金融生态系统的发展做出了重要贡献。

（1）挑战与政策不足

推动可持续海洋项目的融资仍面临多重挑战，包括高昂的前期成本、不确定的回报、缺乏先例案例、数据不足以及高风险的治理环境。市场动态（如大宗商品价格波动）也会影响海洋相关产业的可

行性^[11]。此外，技术能力不足、数据缺失、成本与收益不匹配、缺乏统一标准以及政策滞后等问题，进一步阻碍了对海洋经济的金融支持，使风险识别、资本配置和产品创新复杂化。

在融资政策层面，有必要在国家层面制定技术标准或蓝色金融分类体系，以明确定义和识别蓝色产业及相关活动。目前，中国尚缺乏蓝色金融的国家性指导方针，导致评估偏差并制约了规模化发展。建立全面且标准化的蓝色信息披露机制，并参考 TNFD 等国际标准，将有助于评估和排名企业的环境效益，从而激励金融机构投资于蓝色项目。同时，需要设计相应的风险缓释机制，以增强私营部门的参与度。由于对海洋经济认知不足，人们往往低估海洋生态退化、生物多样性丧失及其他海洋危机所带来的风险，却高估蓝色项目投资的风险。为此，应推动海洋生态产品价值核算方法的标准化应用，并加快建立蓝色碳市场，以激励早期投资。通过发行蓝色债券（如中国银行 2020 年的先例），可以进一步促进对可持续蓝色经济的投资。

（2）中国的蓝色金融分类标准的制度及其未来应用

目前，中国尚缺乏有效的激励政策来鼓励金融机构支持可持续蓝色经济活动。将可持续性纳入海洋保护区评估，并建立地方政府的激励机制以推动可持续项目发展，已成为必要举措。尽管部分标准借鉴了国际准则，但大多数地方政策仍主要回应国内需求，且与国际碳市场缺乏衔接，限制了跨境合作。同时，多数政策缺少动态跟踪与定期评估机制，削弱了市场对蓝色金融举措成效的信心。值得注意的是，近两年来，中国地方政府在蓝色金融标准方面已展开积极探索与实践。2024 年，烟台市政府与可持续金融与环境研究所（IFS）联合编制并发布了《蓝色投资与融资行业支持目录》^[12]，首次为金融机构识别与投资蓝色经济活动建立了兼具定性与定量指标的系统框架。

4. 政策建议

- *应将可持续蓝色经济全面纳入国家海洋治理体系。*在“十五五”规划中，应研究并采纳适合中国国情的可持续蓝色经济定义与原则，并据此设计政策驱动因素，包括多层级综合治理、可持续蓝色经济转型规划以及海洋可持续管理计划。建议由自然资源部、生态环境部、科学技术部和国家发展改革委员会共同组建可持续蓝色经济工作小组，负责设计合作路径，制定《可持续蓝色经济发展行动计划》，并统筹初步政策协调。同时，可依托厦门、深圳等先行城市建设“可持续蓝色经济示范区”，探索与发达国家在标准和管理模式方面的试点合作，如在战略规划、海洋会计及蓝色金融中应用可持续蓝色经济原则。进一步加强与国际社会的合作，将可持续蓝色经济议程与气候行动和生物多样性保护相结合，对于实现《巴黎协定》《生物多样性公约》和《2030 年议程》所确立的目标具有关键意义。

- *构建完善的海洋核算框架是实现可持续蓝色经济目标的重要前提。*有效的海洋核算依赖于核心概念和测量方法的标准化，亟需开发与《国民账户体系（SNA）》《环境经济核算体系（SEEA）》及现有海洋核算技术指南相衔接的改进方法。将环境指标与经济指标相结合，有助于全面评估海洋对经济的贡献，以及经济活动对海洋生态系统的影响。与此同时，还需开发更完善的工具来应对不确定性和数据缺口，确保在数据有限或不完整的情况下，海洋核算系统仍能提供可靠信息。提升机构能力同样至关重要，包括加强统计部门与环境部门之间的协调、完善数据收集与管理机制，以及提升开展综合环境—经济分析的技术水平。为充分发挥海洋核算的政策价值，还需强化会计信息在决策过程中的应用，确保政策制定者能够获得及时且相关的数据。基于会计数据开发先进的规划工具，将有助于推动更加有效、基于证据的政策制定。

- *在国家政策和全球合作层面推动蓝色金融发展。*首先，应明确蓝色金融的定义，并在现有框架（如《可持续蓝色经济金融原则》）基础上加以构建。国家蓝色标准应遵循《国家蓝色标准框架》原则，并结合最新发展趋势，充分考虑资源禀赋、生态承载力及生物多样性脆弱性。建议成立“蓝色金融协调委员会”，以统筹沿海各省政策制定并推动标准互认。同时，应出台《蓝色金融项目环境效益核算指南》，统一碳汇、污染物减排等指标的核算方法；并要求蓝色债券发行方披露资金用途、环境影响和第三方评估结果，以提升透明度与公信力。在全球合作方面，可考虑在深圳设立国际海洋发展银行，以推动全球海洋经济的可持续扩张。同时，应探索多元化的合作融资模式：一是整合多渠道资金支持生态保护；二是推动解决公海治理的融资缺口；三是与 OECD 发展援助委员会（DAC）成员

国合作，为 SBE 倡议提供优惠融资。通过“一带一路”国际绿色发展联盟，中国还能够发挥引领作用，推动国际协议的达成，从而促进全球可持续发展目标（SDGs）的实现。

（二）基于海洋的碳中和解决方案²

1. 研究背景

海洋在吸收大量人为碳排放方面发挥着关键作用，并具备进一步吸收和储存碳的巨大潜力，为实现全球碳中和目标提供了多种减缓途径。基于海洋的解决方案主要包括三个领域：1）海洋二氧化碳去除技术（marine Carbon Dioxide Removal, mCDR），2）海洋产业脱碳策略；3）海洋可再生能源（ORE）的开发。这些措施可为减排、降低大气二氧化碳浓度及推进能源转型作出重要贡献。然而，这些方法在国际气候谈判中的代表性尚显不足，且在中国国内的规划与实施中也未得到充分重视。

海洋二氧化碳去除技术涵盖了一系列旨在增强二氧化碳在海洋中储存的生物或非生物途径的方法，为降低大气中二氧化碳浓度提供了可能。据模型预测，部分 mCDR 技术具备每年去除十亿吨二氧化碳的潜力，但这些预测仍存在较大不确定性。更为复杂的是，所有碳移除（CDR）方法都会遭遇效率降低的问题。这种现象被称作“CDR 税”（CDR tax），它主要是由地球系统中负反馈效应所导致的^[13]。针对多种海洋碳去除方法，其有效性及可能带来的正面与负面社会——生态效应仍缺乏充分研究与明确描述。此外，对于这些方法在气候相关尺度上（如材料、能源及其他投入成本，以及部署的政治可行性）的应用，也尚未得到系统评估。当前亟需进一步探索，以评估海洋碳去除方法在可持续限度内的有效性、社会可接受性、持久性和可扩展性。未来，应建立完善的监管与监督体系，对相关研究与开发活动进行系统管理和评估^[13, 14]。

海洋碳循环是全球碳循环的重要组成部分，涉及碳在大气、海洋与地球内部之间的转移过程，其核心在于维持海洋表层溶解二氧化碳浓度与大气中二氧化碳含量之间的动态平衡。由于人类活动向大气中排放了大量二氧化碳，海洋每年约吸收 10 亿吨二氧化碳。

碳进入海洋的主要途径有两种：一是通过二氧化碳溶解于海水，成为浮游植物光合作用的碳源，构成海洋食物网的基础；二是部分碳经呼吸作用重新释放到大气中，或通过“生物泵”（如浮游植物、浮游动物及其他海洋生物的生物过程）和“物理泵”（由海洋环流驱动）输送至深海。到达深海的碳部分将形成沉积物，或在地质尺度上被带入地幔。

海洋碳去除技术（mCDR）大体可分为两类：一类是利用并强化自然系统的生物方法，如近岸蓝碳生态系统或生物碳泵；另一类是通过化学途径调控生物地球化学过程的非生物方法（见表 1）。各类方法均具有特定的优势、局限性和潜在风险，并在可扩展性及碳去除的持久性方面存在差异。持久性指碳从大气中被去除后在系统中保持的时间和稳定程度。

目前尚无单一技术能够达到《巴黎协定》所要求的碳去除规模，以支撑全球气温控制目标^[15]。因此，实现这一目标可能需要多种方法的协同组合，以形成互补的减缓路径。

（1）生物方法

² 本章总结了任务小组 5（基于海洋的碳中和解决方案）工作的重要成果。任务小组 5 的主要成员包括：Kristin Kleisner（美国环保协会）、戴民汉（厦门大学）、关大博（清华大学）、梁希（伦敦大学学院）、叶观琼（浙江大学）、柴扉（厦门大学）、李姜辉（厦门大学）、Douglas Wallace（美国达尔豪斯大学）、Wil Burns（美国美利坚大学碳移除法律与政策研究所）、Marine Thomas（大自然保护协会，香港）、David Keller（碳入海计划）、Mark Wells（美国缅因大学）、Diane Hoskins（碳入海计划）

- **营养盐加富：**向海洋表层添加微量营养物质（如铁）或大量营养物质（如磷酸盐、硝酸盐）已被证明能够促进浮游植物的光合作用，从而提高其生物量产出。这一过程将海水中的无机碳转化为有机碳（主要以浮游植物生物量的形式存在），旨在增强生物碳泵功能，即促进碳向深海输送。表层浮游植物的碳固定活动会增强海洋对大气二氧化碳的吸收能力，因为空气—海洋气体交换系统会自动调节，以补充被生物利用的溶解无机碳。然而，生物封存碳的最终去向仍不确定，尤其是其是否能被有效输送并长期储存于深海尚无确凿证据。如果这一机制得到验证，该方法可能成为具有潜力的大规模碳去除途径，据估计，数百年内可从大气中移除数十亿吨碳^[6]。尽管通过少量营养物质投入即可显著增强大气二氧化碳的自然清除过程，但此类干预也伴随潜在的化学与生态风险，包括生物多样性变化、食物网结构扰动、下游海域营养耗竭、有害藻华暴发以及深海缺氧等。目前，针对这些风险的定量数据仍然不足。此外，初级生产力的提升可能带来一定的协同效益，如促进高营养级生物的繁衍。一些研究认为，净初级生产力的增加或将提升渔业资源量，但这一结论仍存在较大争议，亟需进一步研究验证。

- **人工上升流：**上升流是一种在特定区域自然发生的海洋过程，可将深层富营养水体带至表层，刺激浮游植物生长，从而促进二氧化碳吸收。人工增强这一过程可能会进一步提升浮游植物产量，但同时也可能将深层储存的二氧化碳重新释放到大气中。就大气二氧化碳浓度而言，这种相互抵消的效应使其总体影响仍不明确，因而该方法的减碳有效性存在高度不确定性。此外，上升流会将冷水带至海表。模拟研究显示，这一冷却效应对碳循环的影响可能远大于任何“施肥效应”。进一步的模拟结果还表明，大规模强化上升流可能扰乱海洋环流，改变地球热量平衡，并对局地生态系统造成破坏。一旦此类干预被中止，可能会引发突发且剧烈的全球变暖，其程度甚至可能超过当前气候变化情景预测。

- **大型海藻养殖：**大规模养殖大型藻类被视为一种潜在的负排放途径，能够通过快速生长加速二氧化碳向生物质的转化。随后将这些生物质沉入公海，其碳封存时间尺度与海洋施肥方法相近。然而，这种方法的碳封存潜力仍存在较大不确定性。大规模实施可能对底栖生态系统造成不利影响，并通过改变营养物质分布而降低浮游植物的净初级生产力。因此，亟需建立完善的管理体系并进行长期监测。目前，这种方法几乎未显示出显著的协同效益。将大型藻类用于食物生产而非沉入海底，无法实现持久的碳去除，因为其碳将在短期内重新释放至大气中。然而，将藻类生物质转化为低碳产品（如生物燃料、生物塑料），以替代碳排放更高的产品（例如以生物刺激剂替代化肥），或加工成可主动吸收温室气体的材料（如用于降低牲畜甲烷排放的饲料添加剂，或用于混凝土中吸收二氧化碳的掺合物），这些路径在量化性、经济性和可行性方面更具潜力。此外，还有研究提出，将藻类生物质转化为生物燃料并在燃烧过程中同步捕获碳（即“海洋生物能源与碳捕获和封存”，BECCS）是一种实现碳封存的可能方案。

表 1: 基于文献的方法学“成熟度”的评估 (NASEM, 2022^[16] 和 Doney et al., 2025^[17])

	生物方法					非生物方法			
	营养盐加富	大型海藻养殖	陆源生物量沉降	生态修复	人工上升流	海洋碱化	电化学方法	直接海洋碳捕获	人工下降流
认知基础	中高	中高	中	中低	中高	中低	中低	中低	低
有效性	中高	中低	中	低	中低	高	高	高	低
功效耐久性	中	低	中	中低	低	中高	中高	中	中
潜在去除规模	中高	中	中	中	中低	中高	中高	中高	中
环境风险	中	中高	中高	中高	低	中	中高	中	中高
社会认知	富有挑战	富有挑战+积极影响	富有挑战	富有挑战	较低挑战 + 积极影响	富有挑战	富有挑战	中	富有挑战
协同效益	中	中高	中低	中高	高	中	中高	中高	中高
扩大规模的成本	低	中	中	中高	低	中高	高	中高	高
碳核算的成本与挑战	中	中低	中	高	中	中低	中低	中高	高
环境监测的成本	中高	中	中高	中	中	中	中	中高	中高
额外的资源需求	中低	中	中	中高	中	中高	中高	中高	中高
颜色尺度:	更糟 更好								

来源: NASEM (2022), National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press; Doney et al. (2025) Principles for Responsible and Effective Marine Carbon Dioxide Removal Development and Governance. Washington, DC: World Resources Institute.

- **大型海藻养殖：**大规模养殖大型藻类被视为一种潜在的负排放途径，能够通过快速生长加速二氧化碳向生物质的转化。随后将这些生物质沉入公海，其碳封存时间尺度与海洋施肥方法相近。然而，这种方法的碳封存潜力仍存在较大不确定性。大规模实施可能对底栖生态系统造成不利影响，并通过改变营养物质分布而降低浮游植物的净初级生产力。因此，亟需建立完善的管理体系并进行长期监测。目前，这种方法几乎未显示出显著的协同效益。将大型藻类用于食物生产而非沉入海底，无法实现持久的碳去除，因为其碳将在短期内重新释放至大气中。然而，将藻类生物质转化为低碳产品（如生物燃料、生物塑料），以替代碳排放更高的产品（例如以生物刺激剂替代化肥），或加工成可主动吸收温室气体的材料（如用于降低牲畜甲烷排放的饲料添加剂，或用于混凝土中吸收二氧化碳的掺合物），这些路径在量化性、经济性和可行性方面更具潜力。此外，还有研究提出，将藻类生物质转化为生物燃料并在燃烧过程中同步捕获碳（即“海洋生物能源与碳捕获和封存”，BECCS）是一种实现碳封存的可能方案。

- **陆源生物量沉降：**通过光合作用固定在陆地上的碳，可被储存在深海沉积物中，或通过将生物量有意沉入海底的方式加以封存。部分研究还提出利用生物炭进行沉降或掩埋。然而，在富氧海域中，这些碳能否实现长期储存仍存疑虑，因为生物可能会分解并释放碳。为规避这一问题，有研究探索将陆地生物量沉降至缺氧海域，已有证据表明在该海域碳能够长期保存，甚至可能持续数千年。但这一方法也伴随潜在副作用，包括：底栖生态系统缺氧、破坏底栖食物网，以及生物量被再矿化时可能导致氧气消耗并引发水体缺氧。

- **生态修复：**保护和恢复蓝碳生态系统不仅能够增强碳储存能力，还能促进生物多样性（包括沿海渔业资源）的恢复与可持续利用。这一举措与中国《国家生物多样性战略与行动计划》高度契合，尤其有助于落实《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》中的目标 1、2 和 3。然而，尽管应尽一切努力保护蓝碳栖息地并维护其自然碳汇功能，恢复工作的效果仍存在差异，其可扩展性与持久性问题尚待验证。退化生态系统的恢复本身具有高度挑战性，往往需要数十年才能见效，并需依托严格的制度和科学框架以确保成功。鉴于蓝碳储存主要集中在沿海生态系统（红树林、潮滩盐沼和海草床等），恢复与保护工作还必须结合气候变化预测和海平面上升趋势，评估其长期稳定性和适应能力，例如通过设立生态缓冲区来防止“海岸挤压”现象。此外，沿海蓝碳生态系统虽然具有极高的生态生产力，但在沿海人类活动日益密集的背景下，其空间和资源竞争愈发激烈。尽管生态修复总体上具有广泛共识与积极意义，但仍需深入评估其社会经济层面的权衡与潜在影响，以实现真正的可持续平衡。

（2）非生物的方法

- **海洋碱化（Ocean alkalinity enhancement, OAE）：**向海水中添加碱性矿物质能够改变海水的碳化学组成，促进溶解二氧化碳向碳酸氢根离子和碳酸根离子转化，从而降低海洋表层的二氧化碳分压。这一过程可增强海洋对大气中二氧化碳的吸收，而不会像自然吸收人为排放时那样引发海洋酸化——因为碱度的提升能够有效抵消酸化效应。该方法可视为自然岩石风化过程在水文循环中的人为放大版，是一种具有潜力的重要碳去除路径。其显著优势在于碳封存的持久性可达数千年，远超多数依赖生物过程的碳去除方法（通常仅能实现几十年至数百年的存储）。理论上，氧化亚铁沉淀等碱度增强方法具有极高潜力：一方面，碱性矿物资源丰富；另一方面，海洋化学条件允许在数十亿吨的量级实现碳去除。然而，扩大部署面临严峻的后勤挑战——包括需处理的大量物质以及确保增强碱度的表层海水与大气充分接触所需的时间尺度较长等问题。此外，该方法的生态影响目前仍处于初步研究阶段，其潜在风险与可能带来的环境协同效益尚未得到充分评估和量化。

- **电化学方法：**作为海洋碱化技术的一个分支，电化学碱化法的原理是通过电化学过程去除海水中的酸性组分，从而提升海水的碱度。碱度提升所产生的作用机理，与前述基于矿物质的 OAE 方

法在功能上基本相同。目前，对电化学碱化的有效性和潜在风险的评估仍处于非常早期阶段，其中部分风险与矿物质型 OAE 所面临的环境与生态风险类似。

- **直接海洋捕获 (Direct Ocean Capture, DOC)**：与海洋碱化 (OAE) 技术类似，DOC 旨在利用海水的化学特性促进大气中二氧化碳的去除。然而，与 OAE 不同，DOC 的目标是**直接从海水中提取二氧化碳**。海洋中绝大部分碳以溶解无机碳 (Dissolved Inorganic Carbon, DIC) 的形式存在。DOC 技术通过电化学或其他方法从海水中分离并去除 DIC。以电化学过程为例，海水经电解后被分为两股流：一股富含氢离子 (H^+)，另一股富含氢氧根离子 (OH^-)。将酸性 (H^+) 流重新引入海水可显著降低其 pH 值，使几乎全部 DIC 转化为二氧化碳 (CO_2)，随后可通过真空泵将 CO_2 从水中分离为气态。之后，可将电化学分解产生的碱性流 (OH^-) 重新注入海水，以恢复其碱度^[18]。与其他基于海气平衡机制的碳去除方法类似，大气中的二氧化碳会因气液平衡而持续被海水吸收，并以溶解二氧化碳的形式储存在其中。二氧化碳在海洋中的储存时长因方法而异，一些技术可实现长达数千年的封存，而其他方法则可能仅具短期效果。溶解性有机碳 (DOC) 在特定区域内可在一定程度上缓解海洋酸化，但其对海洋生态系统（如食物网结构）的潜在环境风险仍需进一步研究。该过程通常能源需求较高，部分技术还依赖特定材料。总体而言，尚存在较大不确定性，特别是在能否以安全、经济的方式实现规模化应用方面。

- **人工下降流 (Artificial downwelling)**：该方法通过将表层海水输送至深层水域，从而携带并转移其中与大气平衡状态下的二氧化碳。其实际碳去除效果尚未得到充分量化，且整体可行性可能仅限于小规模区域应用。一个潜在优势在于，人工下降流能够下移因人类活动导致富营养化的表层水体，从而在一定程度上改善近岸和沿海生态系统健康状况。然而，该技术亦存在一系列潜在环境风险，包括：海洋酸化程度加剧、缺氧（低氧）现象的发生、其他温室气体（如氧化亚氮、甲烷）的产生、海洋生态系统扰动等。人工下沉系统的耐久性差异较大。目前多数技术由于成本高昂、维护复杂及潜在机械故障风险，难以实现长期、大规模应用。不过，在某些封闭性环境（如海湾）中，部分系统已实现了多年稳定运行。

2. 认知缺口

（1）碳去除的有效性和持久性评估

量化监测 mCDR 在大气二氧化碳去除中的可靠性与有效性至关重要，尤其是在涉及货币补偿时。监测、报告和验证 (Monitoring, reporting and verification, MRV) 是一个复杂过程，用于测量和模拟通过碳去除技术所实现的碳（以及其他温室气体，greenhouse gases, GHGs）去除量。然而，不同技术在实现这一目标时均面临各自的挑战。总体来看，所有的 mCDR 方法都存在需要改进的方面，具体包括：

- 1) 缺乏统一、标准化的 MRV 规程；
- 2) 对碳循环过程理解尚不完整；
- 3) 对 mCDR 可能影响其他气候相关过程的作用机制认识有限；
- 4) 在自然变率影响下建立可靠基准存在困难；
- 5) 在测量和建模多重变量时存在显著技术障碍。

为有效应对当前面临的诸多挑战，我们有必要制定并实施精心规划的观测计划，着力提升现有生物地球化学和生态模型的性能，并制定标准化的监测、报告和核查 (MRV) 规程。此外，政策制定者与科学界亟需就储存碳持久性所需的适当时间尺度达成共识，需注意的是，该时间尺度或会因所采用技术的不同而有所差异。

（2）生态效益和影响评估

任何旨在加速 mCDR 的人工干预措施，无论是生物性还是非生物性，都将以正面或负面的方式改变生态系统。某种 mCDR 方法能否获得社会认可，取决于公众对其必要性的认知与由此带来的环境

变化之间的平衡，因此，量化这些变化至关重要。这一过程常被称为生态型监测、报告与验证（ecological Monitoring, Reporting and Verification, eMRV）。与传统的 MRV 相比，开发能够全面量化和解释生态系统变化的观测和建模工具更为复杂，而相关研究大多仍处于起步阶段，部分领域甚至尚未开展。要实现从概念到实践的跨越，需依次依托严格的实验室与台架研究、中尺度实验以及具备足够检测能力的实地试验。

鉴于人类在生态过程干预方面的成功案例本就有限，高效的 eMRV 需要针对敏感的监测哨兵（包括生物性与非生物性的要素）设定阈值，以便在超出既定阈值时，能够及时调整甚至中止 mCDR 措施的实施，从而有效减轻潜在的负面影响。然而，科学合理地确定这些阈值绝非易事，目前，针对阈值设定的相关研究依然十分匮乏，研究深度和广度均有待进一步提升。尽管面临诸多困难，但在部分关键环节上，我们已经探索出合理的解决策略，并且这些策略正在有条不紊地稳步推进与实施当中。

（3）社会文化效益和影响评估

对于负责推动 mCDR 方法实施的决策者而言，需要在全面权衡 mCDR 减碳成效、生态影响以及相关地方和区域利益相关者与社区关切的基础上，审慎地作出判断。后续研究还需聚焦于识别 mCDR 应用所面临的社会与文化层面的障碍。特别针对某些更具争议性的途径——如大规模、高强度且潜在风险更高的干预——则需在国家乃至国际层面展开更广泛的考量。无论 mCDR 的应用规模如何，相关决策过程都应以开放的科学交流和对潜在结果所引发的关切与担忧的尊重性对话为前提。在这一过程中，应尽早与地方和区域领导人建立紧密合作关系。这种合作不仅限于信息沟通层面，更应积极邀请他们共同参与 MRV 与 eMRV 协议的设计（例如，共同确定具社会意义的监测物种或参数）。在早期测试和后续实施过程中，建立对评估机制的信任将至关重要。然而，目前在这一方面的探索仍处于初步阶段。若希望受 mCDR 项目影响的社区真正参与并给予支持，就必须将这些社会参与和沟通的努力与 mCDR 方法的科学评估紧密结合。

（4）可行性评估³

要确定大规模碳去除技术的可行性，需要综合评估多重因素，包括实施的后勤可行性、碳去除目标规模（即实施规模）、所需财务投入，以及碳去除的全生命周期分析（净碳排放/去除量）。这些评估通常涉及复杂的系统分析，旨在气候尺度上精准估算其潜在影响，并且必须纳入对世纪尺度经济环境变化的深度考量，如技术经济性、成本效益以及生命周期评估等。同时，评估还需结合技术的有效性、资金需求、监测、MRV 体系及其强化机制等多方面要素。

评估的第一步是确定技术和方案的可行性，即“我们能做什么？”。此阶段应重点分析环境与技术限制——例如，是否具备相应的基础设施与技术条件？环境承载力是否允许此类操作？还需同时考虑政治与法律可行性，即“该方案在政治层面是否可行？在法律层面是否被允许？”

在确定可行性之后，应进一步评估其可取性，即“我们想要什么？”。这一阶段的评估应聚焦于以下方面：

- **有效性：**该方案在减缓气候变化方面能取得多大成效？
- **经济效率：**其成本与收益之间的比例关系如何？是否能够实现经济上的合理平衡？
- **公正性：**治理机制是否健全？利益与负担在人群之间的分配是否公平？
- **环境伦理：**该方案对自然环境的影响是积极的还是负面的？

这些因素应被纳入多目标气候减缓与适应（mCDR）方法的设计与验证过程中，作为实现各类方法潜在成本效益最大化的关键依据。此外，评估还需充分考虑 mCDR 方法在长期尺度及气候相关尺度上与人造和自然环境的交互作用。

³ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/adc93f>

对于任何特定 mCDR 方法，其可取性在很大程度上取决于社会与文化层面的因素能否被充分纳入^[19]。尽管达成普遍共识几乎不可能，但推动进展需要在采取行动的必要性及对潜在或意外结果的担忧之间取得平衡。这凸显了尽早开展社会和文化层面的研究与参与活动的必要性。只有在社区、利益相关者和相关方普遍支持的前提下，“多社区发展计划”式的行动才能获得持续推动。

3. 政策缺口

从国务院发布的《2024-2025 年能源节约与碳减排行动计划》可以看出，中国当前应对气候变化的重点仍集中在二氧化碳减排。然而，要在 2060 年实现碳中和目标，仍需通过大规模碳汇措施来抵消难以减排行业的残余排放^[20]。在陆地碳汇方面，中国已建立政策激励和监管框架，例如将林业纳入国家自主贡献（NDC）^[21]，并推动其参与自愿碳交易体系^[22,23]。部分近岸自然碳汇方式（如红树林和海草床恢复）也在一定程度上纳入了类似机制。但相比之下，技术型碳汇方法仍处于试验阶段，尚未形成被纳入 NDC 的制度性安排。总体而言，中国在国家层面尚缺乏覆盖自然型与技术型碳汇的综合政策框架，这制约了大规模修复工作的推进，并限制了跨部门协调、公众参与及私营部门在技术型 mCDR 研发中的投入。要实现规模化和长期化发展，明确的政策指引、激励措施及制度支持至关重要。

当前，政策框架的不完整致使针对生物型与非生物型 mCDR 方法的监管能力被削弱。由于研究机制、部署流程、监测体系以及风险管理机制的缺失，不禁引发了对环境影响及无序化实地试验和部署的担忧。同时，有关知识产权保护、技术转让与国际合作的政策亟需加强，以支持创新活动，并确保 mCDR 技术实现负责任且公平的发展。

此外，建立健全的 MRV 和 eMRV 体系对 CDR 路径尤为关键。若缺乏标准化规程，将难以评估 mCDR 项目的真实气候效益，无法切实保障环境完整性，进而削弱吸引投资和促进国际合作所需的信心。与此同时，国家海洋战略、气候政策与蓝色经济规划之间也需更高水平的统筹协调，才能将多路径的 mCDR 有效嵌入更广泛的可持续发展目标框架。在中国，若要推进安全、可扩展且具成本效益的 mCDR 方法，需要在国家与国际两个层面采取协调一致的行动。这些行动包括：强化科学研究、开展试点项目、加大资金支持、提升能力建设、促进多方利益相关者参与，并建立健全支撑性的治理架构和市场机制。

4. 政策建议⁴

将海洋二氧化碳去除技术及海洋产业的更广泛绿色转型纳入国家碳中和战略。

为了充分释放海洋在实现气候目标中的潜力，必须将海洋脱碳方法以及航运、港口、海上能源和沿海产业等领域的去碳化措施纳入国家碳中和路线图。这一过程应包括：

- **设定明确、可衡量的海洋减排目标**，并与陆地碳减排策略有效衔接；
- **确保跨部门协调**，涵盖环境、能源、交通及海洋事务等相关机构；
- **建立统一的框架**，统筹研究布局、基础设施投资及监管监督；
- **推动海洋脱碳方法与新兴海洋产业的协同发展**，最大化气候、生态和社会经济的综合效益。

为推动 mCDR 的有效与可持续实施，从以下三个方面提出以下政策建议：

（1）研发方面：

为确保海洋二氧化碳移除（mCDR）路径研究具有系统性与全面性，需科学评估其有效性、环境与社会安全性、可行性及可取性，并严格遵循最佳实践与安全准则。具体涵盖多个方面：

- **研发与示范计划**：制定针对 mCDR 路径的系统性研究、开发与示范（RD&D）战略，涵盖技术开发、优化与规模化应用，并对新兴方法进行前瞻性评估，同时纳入风险管理与协同效益考量。

⁴ 海洋 SPS 目前仍在持续审议这一主题报告，相关政策建议尚属初步阶段。

- **方法和工具开发** 通过长期资金支持与政策引导，持续完善方法学，包括模型与直接观测技术，提升 CDR 结果的 MRV 能力，强化对生态系统影响及全生命周期评估的研究，考虑未来气候情景适应性，支持 mCDR 项目最优选址与运营规划方法研究，保障科学决策与可持续部署。

(2) 监管与政策框架

建立并完善稳健的国家与国际治理体系及融资机制，以支持 mCDR 的研发、监管与部署。主要措施包括：

- **由政府主导制定指导研究与部署的标准和规范。**
- **财政激励：**制定优惠贷款、税收抵免、补助金和补贴等政策措施，支持 mCDR 项目的开发和投资。
- **治理与融资框架：**建立健全的国内与国际治理架构及多元化融资机制，以保障 mCDR 技术的研发、监管和应用。
- **国际合作：**鉴于海洋碳汇技术跨国界特性，应加强全球范围内的知识、资源与最佳实践共享。各国政府应积极参与相关国际协议和合作项目，加快技术研发与应用进程。
- **社会保障与包容性：**开展性别敏感的社会影响评估，制定按性别分类的指标，并在监测、报告和评估中体现性别因素；采用包容性协商程序，确保公正公平的结果。

(3) 市场发展

推动建立科学严谨的碳移除市场标准体系，为自愿性及合规性碳市场提供制度支撑，并促进 mCDR 成果的市场化纳入与价值实现。

- **市场开发：**探索并培育 mCDR 副产品市场，推动其与碳市场的衔接，特别是支持那些碳效益存在不确定性或在高质量碳信用体系中尚未充分体现的自然解决方案。

五、海洋产业设计

（一）海洋产业低碳转型⁵

1. 研究背景

海洋产业是指涉及海洋资源开发与利用的各类经济活动。近年来，随着全球脱碳进程的加速，低碳转型已延伸至海洋领域，使其成为战略重点。海洋产业的低碳转型主要体现在两个方面：

- **传统海洋产业的脱碳：**通过技术升级、能源结构调整与流程优化等方式，推动传统海洋产业（如海运业）的减排。例如，研究表明，通过优化国际贸易模式，可减少约 38% 的海上二氧化碳排放总量。

- **新兴海洋可再生能源的拓展：**加快发展海洋可再生能源产业，为全球气候减缓提供化石能源替代方案，同时借助海上碳捕集与封存技术（CCS）增强碳汇能力。

减少海洋活动的碳足迹对于实现全球碳中和目标至关重要。然而，海洋产业的“蓝色转型”目前面临显著的知识与政策缺口。实现突破需要：

- 完整详实的排放数据与生态系统基线资料；
- 综合性的研究，将技术创新与生态影响评估相结合；
- 协调一致的政策框架，使激励机制、资金支持和治理安排与国家与国际气候目标保持一致。

值得注意的是，现有大多数工具与方法主要针对陆地系统设计，往往难以反映海洋生态系统的复杂动态。这凸显出亟需为特定海洋产业制定更具针对性的方法和标准，以确保低碳转型的科学性和可行性。

2. 认知缺口

阻碍减少海洋活动碳足迹的努力，主要源于以下知识空白：方法与指标体系的不完善、长期观测与研究的不足、实践经验的不确定性，以及社会影响层面的欠缺。

（1）海洋产业碳移除的有效性与持久性评估

1) **方法论与衡量标准：**显著的知识空白正阻碍海洋产业的绿色转型。首先，尽管在海洋运输和海上能源等特定领域已有碳足迹核算实践（通常借鉴陆地行业的方法），但对于其他海洋产业及整个海洋经济而言，尚缺乏系统化的方法论。其次，缺少针对海洋过程的本地化碳生命周期清单数据（涵盖碳储存/移除与碳排放的对比），限制了对气候效益的准确评估。最后，不同研究中系统边界设定不一致，导致碳足迹结果难以比较，并掩盖了海洋活动对气候的真实影响。

2) **长期数据与技术缺陷：**尽管海洋产业在减碳方面持续努力，但要实现可靠的低碳转型，仍需解决三大关键短板：

a. **排放监测不透明且数据不完整：**现有多种碳排放核算框架，但在航运、渔业、海上可再生能源和旅游等领域的应用仍零散且缺乏一致性。例如，航运领域缺乏基于船型的长期排放因子；渔业方面，不同捕捞工具的作业记录及水产养殖的统计数据往往零碎甚至缺失，导致难以准确核算碳足迹^[24]。

⁵ 本章同样总结自任务小组 5（基于海洋的碳中和解决方案）工作的重要成果。

b. 替代燃料与推进系统的工程挑战：液化天然气、甲醇、氢气和氨等替代燃料虽具备减排潜力，但也带来新的技术难题。发动机改造与燃烧系统需适配截然不同的燃烧特性，而液化天然气的不完全燃烧（甲烷泄漏）和氨燃料的未燃烧排放仍是亟待解决的风险。此外，相关储存与加注基础设施严重不足。更重要的是，目前尚缺乏可靠的仪器手段来精准监测甲烷或氨的逸散排放，使模型预测存在较大不确定性。

c. 研发与商业化之间的断层：许多在实验室或小规模试点中表现出色的低碳解决方案尚未大规模落地。例如，海上浮式风电虽利用了丰富的深海资源，但仍依赖于在陆地组装、拖运并固定锚链的复杂而缓慢的工序，制约了其商业化速度^[25]。

3) **实证研究缺口**：对成本结构、政策激励和需求响应的定量分析，是评估海洋产业低碳转型可行性的关键工具。然而，现有研究在以下三个关键领域仍明显不足：

a. 全面成本核算缺失：尽管替代燃料与碳捕集封存（CCS）在实验室和理论模型层面已得到广泛研究，但缺乏覆盖碳生命周期的系统化经济数据。尤其是在不同船型（如集装箱船、油轮、散货船、渔船）、航线类型（深海、沿海、支线）及船型组合条件下的海上实证案例仍极为有限。这使得政策制定者和投资者难以准确评估价值链各环节的真实成本，从而限制了基础设施投资与补贴政策的针对性和有效性。

b. 政策激励与投资回报量化不足：目前鲜有研究基于企业实际财务报表或项目层面会计数据，来单独衡量政府补贴、碳定价、税收抵免或碳边境调节机制（CBAM）对内部收益率（IRR）和净现值（NPV）的边际效应。例如，欧盟排放交易体系（EU ETS）、《欧盟海运燃油法规》以及 CBAM 对航运企业投资回报的实际财务影响尚未得到充分的实证分析。缺乏此类研究，导致政策工具难以被有效优化和协调，从而削弱对低碳投资的激励作用。

c. 成本传导与需求响应研究不足：当前大多数研究依赖边际减排成本曲线（MACC）模拟替代燃料在不同温室气体政策框架下的成本效益^[26]。然而，对于不同市场主体（如托运商、乘客、矿产资源开采权持有者）实际愿意为“绿色溢价”支付的金额，以及运输价格上涨如何通过需求弹性传导至运费、票价或资源租赁费，几乎没有可供参考的实证数据。缺乏这些数据，导致对市场接受度的预测和需求侧政策设计仍停留在推测阶段。

4) **社会影响**：目前对海洋产业向基于海洋的碳中和解决方案转型所带来的社会影响了解甚少。这不仅涉及就业模式、社区结构和沿海居民整体福祉的潜在变化，还包括传统依赖海洋生计的社区可能面临的冲击，以及新兴就业机会和经济增长机遇的出现。深入理解这些转型对地方生计、社会凝聚力和公众健康的影响，是确保转型过程公平、包容的关键。同时，还亟需系统评估相关方案的环境与社会影响，特别是其对海洋生态系统和沿海社区的潜在作用。因此，研究应使用按性别分列的劳动力数据，并追踪不同性别和处于弱势状况群体的成本和收益分配情况。

（2）海洋产业低碳转型的生态效益和影响评估

在评估海洋产业向低碳替代方案转型所带来的生态效益和潜在影响时，制定标准化的方法尤为必要。海洋环境涵盖多样化的生态系统，而不同生态系统对环境变化的敏感度与恢复力差异显著。因此，亟需开发能够准确量化生物多样性提升、栖息地修复以及生态系统服务改善的指标体系。这一过程虽具挑战性，却是实现科学评估与有效决策的前提。

（3）海洋产业低碳转型的社会与文化效益和影响评估

深入了解海洋产业低碳转型所带来的社会与文化效益及挑战，对于赢得公众支持和确保转型的可持续性至关重要。潜在益处包括社区福祉提升、因空气和水质改善带来的健康效益，以及新型低碳技术推动的就业与经济机会。与此同时，转型也可能对传统产业造成冲击，引发社区结构变化，并带来劳动力再培训的需求。只有全面评估利益与成本在不同群体间的分配格局，及其对生计、社会凝聚力和公共健康的影响，才能确保转型路径的公平与包容。通过识别利弊，政策制定者可制定更有针对性的措施，既缓解负面影响，也放大积极成果。

目前，该领域的主要知识缺口在于对转型如何具体影响沿海社区、社会结构与文化实践的理解仍不足。尽管低碳转型的必要性已获得广泛共识，但其社会与文化层面的研究仍十分有限。例如：

- 低碳技术是否能够在沿海社区创造新的经济与就业机会仍缺乏系统证据；
- 对传统产业的影响及劳动力再培训的实际需求尚未得到深入探讨。

这种认知上的不足限制了政策与策略的有效性，难以充分回应受影响社区的多元需求与关切。因此，迫切需要更多基于实证的研究来填补这些空白，并为政策制定提供坚实依据。

（4）可行性评估

一个亟需关注的关键领域是缺乏关于多种海洋解决方案可行性及其潜在影响的系统数据。例如，大规模海洋可再生能源项目（如海上风电场和波浪能转换装置）的技术与经济可行性仍需深入评估。同时，也有必要全面研究这些解决方案对环境和社会的影响，包括对海洋生态系统的潜在扰动以及对沿海社区的社会经济效应。此外，将海洋碳封存技术（如海洋碱度增强和加速风化作用）融入现有产业实践，亦面临一系列独特挑战，亟待开展更为细致的实证研究。

3. 政策缺口

在现行国际海洋法律框架下，《联合国海洋法公约（UNCLOS）》仅在第 192 至 195 条中规定了海洋环境保护的一般性义务，并依据第 206 条要求对可能对海洋环境造成重大损害的活动进行环境影响评估（EIA）。然而，该公约并未为 mCDR 技术提供具体的法律定义、执行程序或监管标准。

（1）缺乏明确的进展时间表和里程碑：目前尚无一份全面的路线图来界定海洋产业采用低碳解决方案的各阶段及截止时间，也缺乏具体的里程碑来衡量进展并确保过渡按所需速度推进。这种不明确性可能阻碍有效规划与实施，从而延缓该行业在实现碳中和方面的贡献。

（2）缺乏针对社会和环境影响的专门政策：目前，海洋产业在转型过程中缺乏关于如何应对社会与环境影响的明确指导和规定。这一缺口可能引发意外后果，例如负面的社会或环境外部效应，从而削弱碳中和努力的整体成效。此外，政策不明确也增加了利益相关者的不确定性，使其难以顺利推进转型，并确保其行动与更广泛的碳中和目标保持一致。

（3）缺乏全面且标准化的评估框架：目前，不同利益相关者对海洋解决方案可行性的理解和评估存在显著差异。这种缺乏标准化的情况导致努力分散、优先事项可能不一致，从而阻碍碳中和目标的整体推进。此外，缺乏统一的框架也限制了对不同海洋解决方案进行有效比较，使得难以识别最有前景的研究和投资方向。不一致的方法和标准还使得各地区和国家间的进展对比与衡量变得困难。

（4）现有政策往往仅聚焦海洋产业转型的个别方面：主要强调技术发展或经济激励，而未能涵盖推动系统性变革所需的更广泛议题。这种碎片化的做法限制了政策在实现有意义且可持续转型方面的有效性。

（5）沿海国家的监管存在重叠：在专属经济区（EEZ）内运营的产业和项目需同时遵循沿海国家、国际海事组织（IMO）、伦敦议定书以及欧盟等区域组织的规定。而位于公海的项目，其治理几乎完全依赖船旗国以及 IMO/相关议定书的框架。这种分散且缺乏协调的监管体系缺少纵向整合、明确的责任划分和风险分配机制，导致合规路径不明确、执行周期延长、投资成本增加。此外，由于缺乏针对长期监测和信息披露的标准化协议，多重责任问题频发，阻碍了在不同机构框架下对环境风险和经济损失的有效量化。

（6）公开的报告机制：目前，海洋行业缺乏标准化的报告框架，用于披露其在向基于海洋的碳中和解决方案转型过程中的进展与影响。这种透明度不足使利益相关者难以评估相关举措的有效性，也削弱了行业对其承诺的问责能力。此外，缺乏明确的报告准则增加了“漂绿”（Greenwashing）的风险，即企业可能声称采取了行动，却无法提供有力证据予以支持。现有报告机制也缺乏对按性别分类数据和性别敏感指标的要求，导致难以对公平结果的实现进行有效问责。

4. 政策建议

为应对海洋产业转型及其碳足迹问题，特提出以下政策建议：

- **推广低碳技术与实践：**通过补贴、税收减免或其他经济激励措施，降低低碳技术的成本，提高其经济可行性。
- **严格控制船舶与作业排放：**制定明确的排放标准，并对违规行为实施处罚。同时，政府应支持新型创新技术的研发，以进一步减少海洋产业的碳足迹。

（二）可再生能源⁶

1. 研究背景

海洋能源是一个极其广泛的概念，其范畴不仅囊括了存在于海洋之中或者由海洋衍生出的各类能源形式，还涉及运用这些能源的具体方法。从狭义的视角出发，海洋能源专门指代直接蕴藏于海洋内部的庞大自然能源，包括波浪能、潮汐能、海流能、海洋热能转换（OTEC）以及盐度梯度能。所有这些能源均具备用于发电的潜力，并且是稳定、可持续且具有成本竞争力的能源来源。然而，从更广义的角度看，海洋能源不应仅仅局限于这些可再生能源。例如，储存在海底地质构造中的石油和天然气、海底固态形式的天然气水合物，俗称“可燃冰”，甚至通过海水电解提取的氢能，也应被定义为海洋能源。因此在广义的定义框架下，海洋能源及其产业框架构成了一个更为复杂和多元化的系统。

海洋能源产业呈现出多样化的产业模式，这些模式因具体能源类型的差异以及所处发展阶段的不同而存在显著区别。首先，海上石油和天然气作为传统的海洋能源开发形式，其工业模式与陆上石油天然气开发业具有高度相似性。不过，海上石油和天然气开发有着独特之处，它依赖于海洋工程领域的一系列先进技术和设备，像海上结构设计、深水钻井以及运营支持系统等。值得注意的是，这些技术和设备所在的领域，恰恰是海洋工程研发与工业化的初始核心部分，为后续海洋能源开发奠定了坚实基础。随着能源转型的推进，分布式海上可再生能源的利用日益受到重视，涵盖海上风电、海上光伏（PV）以及其他海洋可再生能源。这类能源的开发催生一种新型工业模式——海上可再生能源开发。尽管该模式在一定程度上沿袭了陆上可再生能源项目的工业框架，但由于海洋环境的复杂性和特殊性，对海洋专用技术和创新设备提出了更高要求。此外，海水电解制氢作为一种极具潜力的海洋能源利用方式，目前尚未实现大规模商业应用。虽然其核心技术已经取得了关键进展，但在构建技术成熟且经济上具有竞争力的工业系统方面，仍面临较大挑战。要达成低成本、高效益的海水制氢目标，还需要在技术研发、成本控制等方面取得进一步突破。另外，海洋碳捕获（包括基于海洋的碳去除项目）也是海洋能源领域的一个重要方向。然而，就目前而言，该领域难以实现净经济效益，其价值更多地体现在通过社会环境贡献来应对气候变化。由于其经济效益不显著，其工业模式仍处于探索阶段，需要不断摸索适合的发展路径和商业模式。

在当前这样宏大的发展格局之下，推动海洋能源领域工业设计的优化升级以及产业的深度转型，正面临着高度协同且错综复杂的挑战。这一进程需要全方位、系统性地整合传统能源系统与新型能源系统，甚至需要通过海洋空间规划（MSP）实现协调发展。唯有采用这种整体性、全局性的方法策略，

⁶ 本章总结自任务小组 2-1（海洋可再生能源）工作的重要成果。任务小组 2-1 的主要成员有：Lars Johanning（英国普利茅斯大学）、Chong Ng（英国海洋可再生能源创新中心）、Deborah Greaves（英国 Supergen 海洋可再生能源中心）、Matthew Finn（英国欧洲海上能源中心）、Carlos Guedes Soares（葡萄牙海洋技术与海洋工程中心）、Karl Henning Halse（挪威科技大学）、崔琳（长三角船舶与海工装备技术创新中心）、高震（上海交通大学）、孙晓明（北京化工大学）、鲍春莉（中国海油集团能源经济研究院）、赵英汝（厦门大学）、李庆安（中科院物理所）、张涛（中国地质调查局）、贺佳（中国国际工程咨询有限公司）、郑思明（浙江大学）、姚焯（天津大学）、谢茜（世界经济论坛）。

才能够切实有效地协调好海洋能源工业的增长节奏与步伐。特别是在我国明确提出 2060 年实现碳中和这一宏伟目标的指引下，绿色发展与低碳转型已然成为海洋能源产业未来发展的核心主旨与关键方向。

2. 认知缺口

在当今的能源行业格局中，电气化能源系统相较于化石燃料能源系统，展现出了更高的能源利用效率。与此同时，全球范围内对于清洁、可持续能源供应的需求正呈现出持续攀升的态势。基于这样的现实背景，向电力转型的趋势预计将成为未来能源转型进程中的关键目标。这一转型将促使能源需求摆脱对化石燃料供应的依赖，实现二者之间的“脱钩”，而这一改变对于达成碳中和目标而言，无疑具有至关重要的推动作用。海洋能源产业涵盖了海上石油和天然气、海上风能、海洋可再生能源以及绿色氢气生产等多个领域。即便是深海能源开采这一细分领域，也彰显出新型能源产业的鲜明特征，并且与当下能源转型的大趋势高度契合。然而，作为高技术、高风险的战略性新兴产业，海洋能源产业的发展面临双重挑战：一方面，复杂的海洋环境带来了诸多难以预测和应对的自然风险；另一方面，产业转型过程中又衍生出一系列系统性困难。目前，仍存在一些亟待解决的关键短板：

（1）对海洋环境与海洋能源产业相互作用的基本认知和监测数据长期被忽视，导致对海洋能源产业长期环境影响，以及对其潜在的各类风险或威胁缺乏清晰的认知，不利于产业与海洋环境的协调发展。

（2）缺乏对环境相互作用的系统性评估，亟需建立涵盖经济可行性、社会效益和生态可持续性的多维度综合价值评估体系。通过建立体系，以科学、全面的方式论证海洋能源产业发展的必要性，为产业决策提供坚实依据。

（3）系统性评估存在不足，包括对风能、太阳能、波浪能和潮汐能开发过程中环境影响的研究还不够深入充分。特别是针对风电场对海洋流场和风场的扰动效应、化学动力场场的变化情况，以及风电场长期运营所产生的累积生态影响等方面，亟需开展更为全面、细致的综合评估工作，以准确把握其对海洋环境的影响程度。

（4）亟需建立一个科学、完善的系统评估框架。这一框架不仅要聚焦于海洋能源行业自身内在的发展状况，还要充分考虑其与海洋环境之间的耦合效应，将工程实体的性能表现与生态环境的相互作用纳入全面评估范畴，从而为产业的可持续发展提供全方位的指导。

（5）截至目前，在评估海洋能源产业（尤其是海洋可再生能源）对碳中和目标实现以及可持续蓝色经济发展的贡献方面，尚缺乏有效且准确的方法论。而一套科学的方法论能够帮助我们清晰、准确地理解海洋能源产业的贡献，进而为制定更多积极政策提供有力支撑，加速推动海洋能源产业的蓬勃发展。

3. 政策缺口

当前，海洋能源产业在发展过程中正遭遇一系列系统性治理难题。具体表现为政策框架呈现碎片化特征，在政策实施过程中，多层次协调机制失效，决策过程缺乏基于科学评估的明确指引。鉴于此，迫切需要构建一套以科学评估为驱动力的协调政策框架，以推动海洋能源产业健康、有序发展。

（1）对于尚处于初级发展阶段的海洋可再生能源行业来说，成本效益问题成为制约其发展的最为突出的障碍。然而，与其他业已成熟的可再生能源行业一样，该行业所享受的补贴政策已被取消。而这可能进一步加剧其发展困境。

（2）由于在先进海洋研究方面存在不足，当前海洋空间规划、监管以及审批工作的水平和程序，难以充分满足支持海洋能源行业进一步发展的需求。这可能阻碍海洋能源行业未来发展成为当前能源结构中的主导能源来源。

（3）在海洋能源行业，特别是海洋可再生能源领域，针对研发、创新以及示范项目的投资力度，尚未达到能够充分支撑行业快速发展的水平。

4. 政策建议

随着海洋能源产业大规模部署进程的推进，其对海洋生态系统产生的生物—环境影响将显著加剧，由此引发的一系列问题及潜在威胁亟待妥善解决。在海上石油和天然气开发活动中，水下钻探与开采作业会对海底造成破坏，而石油泄漏更是对海洋环境构成严重危害。对于装机容量超过 10GW 的大规模海上风电场而言，施工和运营过程中产生的噪音成为主要的环境扰动因素。海上光伏项目则会产生遮挡效应、阻碍水流、引发海底侵蚀及淤泥堆积等问题，进而引发复杂的生态后果。此外，潮汐流发电装置会扰乱流场、声场和电磁场，产生多物理场耦合效应。这些累积影响充分凸显了在海洋能源扩张过程中制定可持续减缓策略的紧迫性与必要性。

目前，针对大规模海洋能源开发部署的海洋（生态）环境承载力研究与评估工作极为有限，且缺乏有效的互动机制和评估模型作为支撑。基于最新的研究成果与综合分析总结，现提出以下政策建议，旨在为推动 SBE 向碳中和目标迈进提供研究成果与指导支持：

- **深化相互作用机制研究：**加强对海洋能源开发与海洋生物环境相互作用机制的研究，明确海洋能源系统对海洋环境的影响机制，科学评估海洋能源开发规模与生态系统功能之间的效益平衡点，为产业可持续发展提供理论依据。
- **构建监测评估体系：**着力构建未来大规模海洋能源开发背景下的海洋生态环境监测与评估体系，研发适用于大规模海洋能源开发的多因素海洋生态环境监测技术与设备，形成一套评估海洋环境承载力对海洋能源系统影响的协同发展理论及验证策略，确保产业开发与环境保护协调共进。
- **建立承载力评估体系：**建立海洋能源系统中海洋生态环境承载力评估体系，并基于新研发的理论与评估框架，推动形成涵盖规划、建设、运营全链条的生态友好型海洋能源开发产业模式，实现产业发展与生态保护的良性互动。
- **强化顶层设计：**加强海洋能源产业的顶层设计工作，包括制定国家战略规划、开展综合资源普查、出台产业促进行动计划以及完善金融支持政策等，为海洋能源产业的设计与转型构建坚实的基础，保障产业有序发展。
- **推动多场景利用示范：**积极推动海洋能源的多场景利用或示范项目建设，尤其要重点关注海上光伏、波浪/潮汐能和海上绿色氢能等新兴且具有广阔前景的产业，使海洋能源产业对 SBE 的贡献能够清晰量化，为产业发展提供明确方向。
- **强化研究创新与管理作用：**在推动海洋能源成为国内及全球碳中和目标未来主要贡献者的进程中，要充分发挥科研、创新及海洋综合治理的先导作用，为产业发展提供技术支撑与管理保障。
- **拓展国际合作：**扩大与国际学术或产业伙伴的合作范围，整合全球知识与研究成果，借鉴国际先进经验，提升我国海洋能源产业的国际竞争力，共同推动全球海洋能源产业的可持续发展。

（三）绿色航运⁷

1. 全球航运排放的新兴趋势

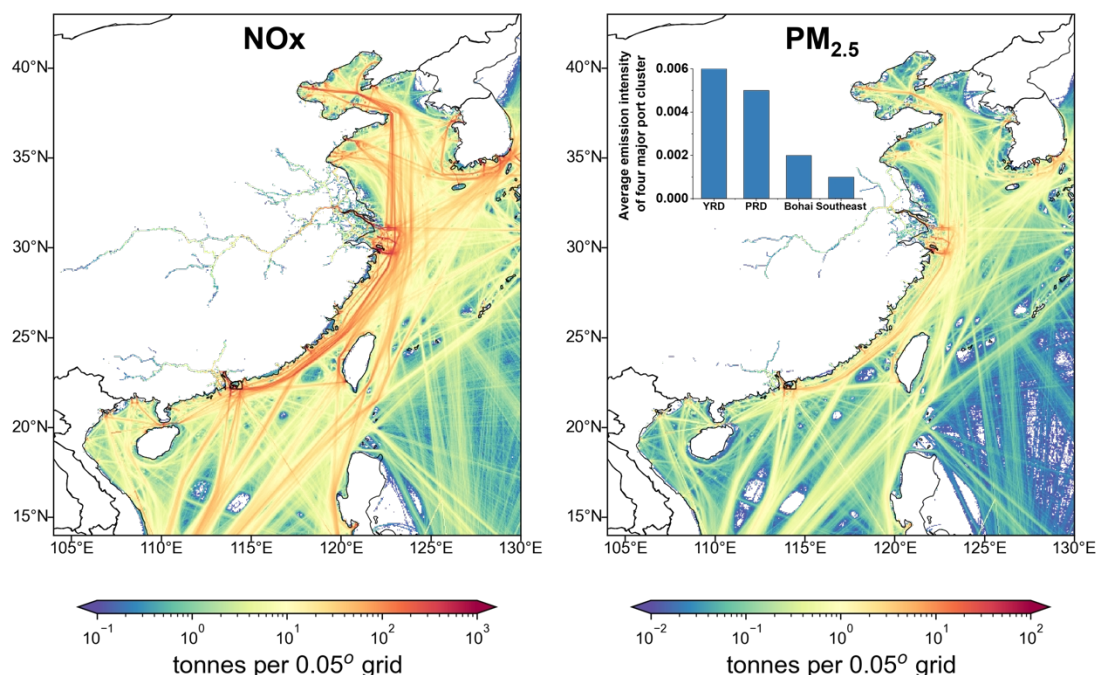
近30年间，国际海运货物量增长超2倍，至2023年约为123亿吨^[27]。2021年，全球国际海运CO₂排放量为8.05亿吨，相较于1970年增长了1.7倍，占全球人为CO₂排放源的2.21%。航运排放量在2017年达到峰值，为8.87亿吨，是1983年低谷时期（3.66亿吨）的2.4倍。最新研究表明，全球航运温室气体排放新冠疫情后再次呈上升趋势，并预计将随着全球海运贸易量的持续增长而进一步增加^[28]。其中，集装箱船由于其高能耗和快速扩张，成为驱动航运业排放增长的关键因素。因此，未来减排战略需要聚焦于高碳密度的船型，特别是集装箱船，通过技术升级控制其碳排放总量。从排放空间分布来看，1970-2021年全球航运CO₂排放普遍增长，亚欧航线（尤其是东亚水域）和好望角航线增幅显著。

另外，国际海事组织硫氧化物排放控制区（SECA）政策^[29]效应显著，2006-2012年，形成“波罗的海-北美-全球”二氧化硫（SO₂）和CO₂排放逐步脱钩演化趋势。2022年中国船舶污染物排放强度呈现显著区域差异。长三角区域拥有国际重要的港口贸易群，其船舶污染物排放强度位居全国首位，氮氧化物（NO_x）、SO₂、CO、细颗粒物（PM_{2.5}）和挥发性有机物（VOCs）平均排放强度分别为0.183吨/（年·km²）、0.080吨/（年·km²）、0.020吨/（年·km²）、0.006吨/（年·km²）、0.010吨/（年·km²）和0.009吨/（年·km²），各项指标均显著高于其他港口群。横向对比显示，珠三角区域船舶排放强度位列第二，其PM_{2.5}排放强度（0.005吨/（年·km²））约为长三角的83.3%；东南沿海港口群与环渤海区域船舶PM_{2.5}排放强度分别为0.001吨/（年·km²）和0.002吨/（年·km²），仅相当于长三角的16.7%和33.3%（图1）。这种梯度差异与各区域航运密度呈现高度正相关^[30]。

船舶污染物排放对中国港口城市的大气环境和居民健康构成显著威胁。2016-2020年，随着中国的船舶排放控制区政策逐步升级，中国港口城市船舶一次排放PM_{2.5}污染物平均浓度由3.58μg/m³下降至2.73μg/m³，占当地人为源PM_{2.5}总排放量由10.3%下降至8.83%，但船舶依然是中国沿海城市的大气污染物主要来源。2018年后，随着船舶硫排放控制区等政策实施，航运业SO₂和PM_{2.5}排放显著减少，但NO_x和VOCs排放仍然上升，中国船舶总VOCs排放增加90%^[31]。2016-2020年间，中国内陆水域船舶PM_{2.5}贡献率由17%上升至41%，远洋船舶PM_{2.5}贡献率由43%下降至32%，与沿海船舶排放逐步形成三足鼎立格局。因此，治理内河航运（包括河流与沿海航运）及远洋航运所产生的空气污染，对于改善港口城市空气质量、推动生态文明建设以及实现“美丽中国”目标同样至关重要。

⁷ 本章总结自任务组2-2（绿色航运）工作的重要成果。任务小组2-2的主要成员有：伏晴艳（上海市环境科学研究院）、黄丹丹（上海市环境科学研究院）、王欣（上海市环境科学研究院）、Jason Anderson（气候工作基金会）、冯淑慧（气候工作基金会）、王秋霞（气候工作基金会）、徐薇（气候工作基金会）、马骏（北京绿色金融与可持续发展研究院）、崔琳（长三角船舶与海工装备技术创新中心）、刘欢（清华大学）、张艳（复旦大学）、李悦（交通运输部规划研究院）、丁嵩冰（上海国际港务集团股份有限公司）、吴国栋（中船704研究所）、成慧慧（亚洲清洁空气中心）、尹航（中国环境科学研究院）、辛焰（能源基金会）、张爽（大连海事大学）、张春昌（上海海事大学）、凌贵阳（上海组合港）、徐志勇（上海市港航事业发展中心）、吴光豪（上海金司南金融研究院）、陆恭蕙（香港科技大学）、Pernille Dahlgaard（马士基麦金尼·莫勒零碳航运中心）、Christian Føhrby（马士基麦金尼·莫勒零碳航运中心）、Faig Abbasov（欧洲运输环境联合会）、Hyoun Sook LEE（欧洲运输环境联合会）、Felix Khann（欧洲运输环境联合会）、Elena Talalasova（全球海事论坛）、Xiaoli Mao（国际清洁交通委员会）、Zhihang Meng（国际清洁交通委员会）、Ping DENG（太平洋环境组织）、Ted Zhang（太平洋环境组织）。

图 1. 中国航运业氮氧化物和 PM_{2.5} 排放强度^[30]



数据来源：Zhang X, Cheng S, Wu F, et al. (2025) Characterization of pollutant discharges from ships within 100 nautical miles of China's coastline and certain inland river ports, 2022. Marine Pollution Bulletin, 215: 117876.

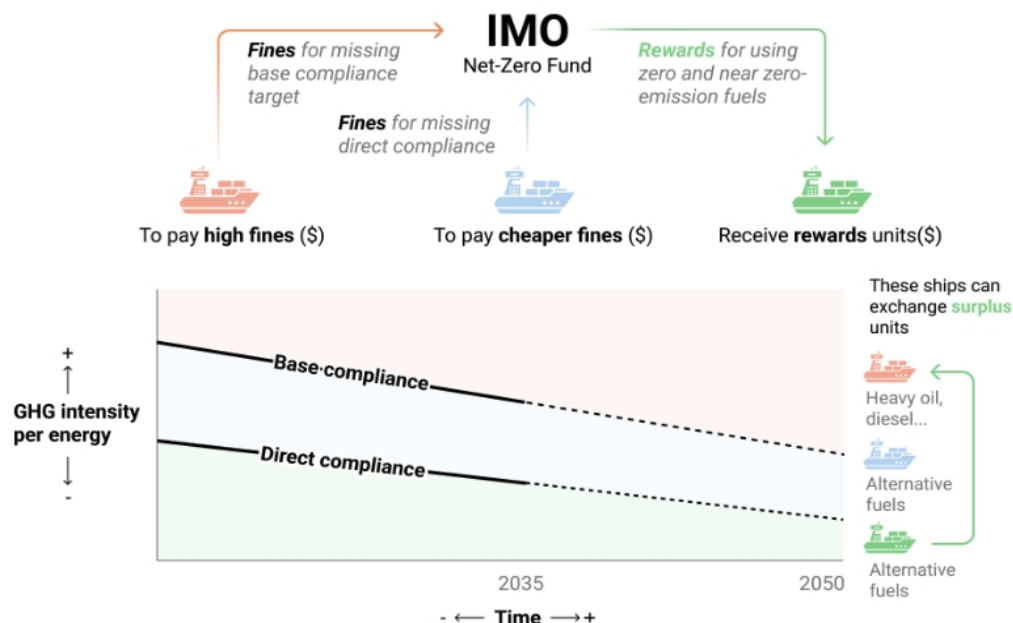
2. 由港口主导并率先采取的政策和行动

(1) 国际海事组织（IMO）应对气候变化行动

IMO 自 2013 年起推出针对新建船舶的能效设计指数（EEDI），之后逐步建立了包括现役船能效指数（EEXI）和营运碳强度指标（CII）在内的监管框架，旨在提升船舶能效、降低 GHG 和大气污染物排放。这些能效规则推动船舶普遍降速以减少燃料消耗和营业成本。然而，由于航运总运输量持续上升，从实际减排效果来看，船舶能效规例和其他因商业引导的减排措施对总体 GHG 削减的贡献有限^[32]。例如，根据 ICCT 测算，EEXI 到 2030 年预计仅能减少 1.3% 的 CO₂ 排放^[33]。为加速船舶 GHG 减排，IMO 于 2023 年通过 2023 年船舶 GHG 减排战略：到 2050 年前后国际航运 GHG 实现净零排放；2030 年和 2040 年分别削减至少 20% 和 70%（力争削减 30% 和 80%）的国际航运总 GHG 排放量；2030 年船舶使用的零和近零排放（ZNZ）技术、燃料和能源（包括风能）在全球国际航运业能源消耗占比达 5%（力争 10%）^[34]。这些目标均基于全生命周期计算以避免将排放责任往上游部门转移，同时 GHG 评核考虑 CO₂、一氧化二氮（N₂O）和甲烷。

为实现这些目标，在 2025 年 IMO 初步通过具有法律约束力的净零排放框架（NZF），提出分阶段逐步强化的分层燃料温室气体强度（GFI）标准和与 GFI 挂钩的碳定价机制。不能满足 GFI 标准的船只可交付费用；所得收入将用于奖励船东使用 ZNZ 燃料和支持促进公正和公平转型的工作（图 2）。2035 年前，NZF 定义为 GHG 强度不得高于 19.0 g CO₂ eq/MJ 的燃料，2035 年 GHG 强度阈值将降低至 14.0 g CO₂ eq/MJ^[35]。CII 的相关规定目前也在进行更新。

图 2. 国际海事组织净零排放框架的运作情况^[36]



来源: T&E (2025c). IMO Net-Zero Framework Assessing the impact of the IMO's draft Net-Zero Framework, Briefing – April 2025.

然而，NZF 的执行仍面临诸多挑战。一方面，预计到 2030 年，NZF 所能实现的绝对减排仅为 5%-10%，难以与 1.5°C 气候目标对齐，且远低于 IMO 20-30% 的 2030 年减排目标^[36,37]。另一方面，NZF 是否能达到预计的减排效果取决于 ZNZ 燃料的奖励制度是否能加快推动可扩展生产的 ZNZ 燃料（如基于氢能的电制绿氨、绿甲醇）的供应和应用。虽然分析认为电制绿氨长远来说将是最具成本竞争力的合规燃料选择^[38]，但目前 IMO 对 ZNZ 燃料的奖励制度，包括奖励金额、获得奖励的资格（如可持续性标准、间接土地使用变化(ILUC)）等因素未有定论，在未来一、两年相关技术细则（guidelines）制定后才能确定。这些不确定因素将增加短期内投资 ZNZ 燃料动力船舶和电制船用燃料回报的不确定性和风险。

同时预计，NZF 的 GFI 罚款和碳定价机制并未能大幅削减电制绿氨、绿甲醇等可扩展 ZNZ 燃料与化石甲烷和生物燃料的价格差距，有可能导致航运企业对起未来脱碳技术路径保持观望态度，在近期选择在现役船舶使用生物燃料、化石甲烷或支付罚款满足 NZF 要求，推迟订购可扩展 ZNZ 燃料动力船舶。这将有可能导致全球 ZNZ 燃料产业链发展滞后^[39]。

（2）欧盟 Fit for 55 低碳发展的一揽子政策

欧盟于 2024 年开始将航运纳入碳排放交易体系（ETS），并自 2025 年开始实施 FuelEU Maritime 法案限制停靠欧盟港口的船舶所用能源温室气体强度，对高 GHG 排放船舶施加经济约束，并通过设定电制燃料奖励系数和目标，鼓励船舶使用低/零 GHG 排放的电制燃料。同时，欧盟替代燃料基础建设条例和可再生能源指令自 2030 年开始强制要求岸电的供应和使用。部分 ETS 的收入已用作补贴基于氢能电制船用燃料的生产和建设岸电设备。

由于欧盟政策是全球最早实施有法律约束力的推动低/零排放船用燃料生产和应用的法规，欧盟的政策为定义、监管、支持绿色船用燃料（可持续生物燃料、绿甲醇、绿氨等）树立了榜样，现在全球绿色船用燃料的生产企业均依照欧盟可持续绿色燃料标准生产和认证其燃料，同时土耳其和英国正考虑接入欧盟 ETS 市场。

（3）港口和企业的先行者行动

各国主要港口也积极采取行动推动船舶低碳转型，如鹿特丹港、新加坡港、瑞典哥德堡港、印度甘加瓦拉姆港通过对零排放船舶实施港口费减免，激励船舶使用绿色燃料；比利时安特卫普港大力推广氢能项目；新加坡港凭借其全球燃料加注中心和最大转运港的优势，形成依托全球能源网络的绿色燃料供应模式。同时，与多个港口开展建立绿色电子航运走廊合作以协调 ZNZ 燃料价值链的发展，并实现 ZNZ 燃料船舶的部署。这些措施帮助确保其在航运业零排放转型过程中保持竞争优势。

同时，航运公司已开始订购 ZNZ 燃料船舶，并与燃料生产商合作以确保长期燃料供应（例如马士基与金风科技及隆基签署绿色甲醇长期采购协议）。德国成立的基金会 H2Global 也正率先建立一种市场机制将绿色氢能的承购商与生产商联系起来，为双方提供价格和投资确定性⁸。上游货主如亚马逊、宜家等也通过参与“零排放海运买方联盟”（ZEMBA），以支付溢价的方式支持基于氢能的绿氨和绿甲醇的应用。头部金融机构也在加紧评估其投资组合的气候适应性（见附录 1）。这些领先实践证明，港口政策和头部企业在绿色燃料推广中发挥了关键引导作用。

（4）中国在推动航运零排放转型的法规和举措

中国正积极推动航运业绿色低碳转型，重点推进新能源船舶应用、老旧船舶更新改造、船舶靠港使用岸电等工作，从顶层部署到专项要求协同构建完善的政策体系。《交通强国建设纲要》等纲领性文件明确要求推动多种绿色动力船舶应用，碳达峰碳中和“1+N”政策体系提出加快发展新能源船舶等要求，《交通运输大规模设备更新行动方案》等文件为航运绿色低碳转型提供政策资金支持，产业政策和绿色燃料政策也为相关产业发展提供助力。

上海、大连等地也出台了推进航运绿色燃料中心建设的相关地方政策。上海港作为中国最大港口，其绿色低碳转型成效显著。集装箱码头岸电设施全覆盖，作业车辆全面电动化，光伏、风能系统广泛部署，2024 年 LNG 加注量居全球前列，并率先完成绿色甲醇船舶加注。通过构建氢能、氨、甲醇等多元燃料供应链，上海港正努力成为亚太地区新能源船舶加注中心。上海在促进港口运营及船舶采用零排放和近零排放（ZNZ）燃料与技术方面所采取的政策与措施，充分体现了港口城市在推动航运业向 ZNZ 转型、实现本地清洁空气目标中的关键作用，并为中国其他港口提供了有益的示范。

3. 新能源船舶技术与燃料

全球航运业加速低碳转型，新能源船舶技术成为竞争焦点。从全球来看，作为造船大国的韩国在 LNG 动力船舶建造方面占主导地位（2022 年占据 LNG 运输船全球订单 75% 份额）^[40]，并积极提升其甲醇、氨和电池动力船舶的建造能力^[41-43]；欧洲布局 LNG 双燃料船与甲醇动力船；日本推出首艘商用氨燃料拖轮，德国、挪威领跑氨燃料电池技术；美国、日本氢燃料电池船进入商用，挪威纯电动渡轮、荷兰可更换电池组技术引领创新。中国虽然起步较晚，但近年来示范项目加速推进，如“三峡氢舟 1 号”氢燃料电池船、5500HP 氨动力作业船等纷纷落地；全球最大、国内首制 740TEU 纯电动敞口集装箱船，LNG 改造船“穗航 906”、甲醇船“江龙号”，多种新能源动力技术路径已经取得显著突破。

在推广应用上，电动船舶在短程运输中具备显著优势，是船舶低碳转型的主要技术路径之一，挪威和新加坡已出台零排放船舶法规推进电动船舶的商业化应用。中国湖北、福建推行免费过闸、“电化长江”等激励措施，长三角规划 2030 年运营 1800 艘电动船，凸显内河船舶电动化的巨大替代潜力。但是，目前电动船舶初期成本高昂、充换电设施建设不足，限制了其进一步的推广应用。

在 ZNZ 燃料发展方面，虽然对远洋船舶脱碳至关重要，也是 IMO 框架下的减排核心路径，目前尚处于初期阶段。自 2023 年起，已宣布的绿氨和甲醇生产项目显著增加，理论上，这些绿色燃料生产项目预计供应量足以满足 IMO 2030 年 5-10% 的 ZNZ 燃料目标。但大多数已宣布的项目尚未达成最终投资决定，只有一小部分开始建设^[44]。

⁸ 有关 H2Global 机制的更多信息，可参考 <https://www.h2-global.org/the-h2global-instrument>。

根据新船建造订单统计，替代燃料新造船舶占比 16%；预计在 2030 年全球将有大约 1360 艘 LNG 动力船舶，430 艘甲醇动力船舶，40 艘左右氨及 41 艘氢能动力船舶营运⁹。但由于这些船舶大多为双燃料船舶，即可使用传统或替代燃料，这些船舶对替代燃料的需求将取决于传统和替代燃料价格，而这又取决于 IMO 对 ZNZ 燃料的奖励以及使用传统燃料的惩罚。

4. 加速航运业脱碳和采用零排放燃料与技术面临的挑战

与零排放过渡燃料选择有限的航空业相比，航运业向零排放过渡将涉及多种绿色燃料：内河和短途沿海船舶转型路线将以电池动力为主，长途沿海或远洋航运则以基于氢能的电制燃料（绿甲醇、绿氨）、可持续生物燃料实现净零排放目标。由于技术路线不明确，同时 IMO NZF 技术细则仍在完善，愿意先行的船东、燃料运输企业和港口面临在转型初期需为多种燃料作准备，摊薄可投入资金和资源，增加搁浅资产风险。同时，新能源船舶的新建/改造成本高，新燃料加注、储运设施薄弱及缺乏完整的加注、储运与安全监管体系亦可能令大部分船东倾向推迟转型决定，影响绿色燃料生产项目获得融资达到最后投资决定（需长期燃料销售合同保障），导致供应链发展滞后。

燃料生产企业在推进 ZNZ 燃料的开发和扩大应用方面也面临多重挑战。首先，虽然用于生产电制燃料的碱性和质子交换膜 (PEM) 电解器技术已成熟，但成本仍然很高¹⁰，导致目前氢基 ZNZ 电燃料的价格远高于传统燃料 (3 - 4 倍)^[45, 46]。其次，绿色甲醇生产目前主要依赖生物质碳原料，由于供应有限和收集困难、生物原料成本高，随着航运需求的增加以及与其他行业的竞争，未来成本将进一步升高^[47]。第三，氢基电制燃料的生产和需求地点错位，需要跨区域协调来创建燃料供应链。第四，现在还缺乏统一的 ZNZ 燃料标准，国际规则分散，缺乏准确的燃料全生命排放核算方法和用于测量、跟踪和报告排放以确保燃料质量的认证计划，也阻碍对 ZNZ 燃料生产项目的投资^[48]。

5. 政策建议

尽管挑战艰巨，加速航运向零排放转型已成全球共识。全球航运脱碳转型能为造船、绿色燃料生产、港口和航运企业带来巨大机遇。中国具有全产业链优势，能支撑零排放航运发展：拥有领先造船业，产能雄厚（2023 年中国占全球一半的新造船舶订单），主要港口航线密集，可再生能源资源丰富，绿色能源生产与存储装备制造产业基础雄厚^[49, 50]。因为拥有丰富的可再生能源资源及低成本的可再生能源生产设备和电解槽产能，目前中国被认定为全球生产绿甲醇和绿氨燃料成本最优的国家^[51, 52]。这些因素使中国处于有利地位，可以通过以下多种方式为推动全球航运零排放转型作出贡献，并提升中国航运、港口和绿色能源产业竞争力：

- 持续鼓励研发零排放船舶及其关键部件（替代燃料发动机、燃料电池和蓄电池），推动零碳船市场扩张，抢占绿色造船业高地；
- 加快推进生产 ZNZ 船用燃料的技术创新和供应能力（如降低电解制氢成本、提升生物质气化技术），降低生产成本，并扩大绿色船用燃料生产；借助全球航运对电制燃料的需求助力消纳未并网的可再生能源产能，降低未来大规模能源转型部署的系统性风险；
- 建立能提供 ZNZ 燃料加注服务、岸电和电动船舶充电设备的港口基础设施，建议国家出台政策支持中国港口部署绿色氢燃料供应并降低相关风险，打造全球能源枢纽；
- 深化国际合作与区域协同，借助现有的产业联盟和绿色航运走廊等方式开展国际绿色燃料供应链供需对接，加速规模化应用 ZNZ 燃料，积极参与 IMO 燃料可持续性标准制定并建立碳足迹认证和追逐体系。

新能源船舶与绿色燃料应用亟需从国家层面完善相关法规与激励政策，从技术层面推动可持续燃料生产、船舶动力系统的标准化与适配性提升，构建“国家引导、区域先行、国际协作”的多维政策支持体系，并加强基础设施投资与船舶和岸基设备技术标准建设。此外，其他国家和地区（如挪威、

⁹ DNV (2025) Alternative Fuels Insight (accessed June 10, 2025).

¹⁰ IEA (2025) Electrolysers – Overview ([link](#), accessed June 26, 2025).

新加坡及欧盟）在刺激 ZNZ 燃料需求与促进相关技术发展方面所采取的政策与计划，可为中国绿色航运战略提供重要参考。应深入开展国际经验的案例研究，系统梳理中国可借鉴的多样化政策工具、实施模式与创新路径，以有效应对航运业零排放转型面临的关键挑战。

未来，建议以大规模设备更新为重要抓手，加快新能源清洁能源船舶推广应用，持续完善和实施老旧船舶的报废和更新补贴计划。此外，应积极探索绿色航运通道的建设。这类补贴政策与绿色航运通道计划应纳入更明确的资格标准、以创新为导向的燃料与技术采用目标，以及严格的环境标准；并根据符合条件的燃料和技术的温室气体减排效益，提供相应的政策支持与补贴额度，以最大化环境效益。同时，应建立健全的监测与评估机制，以增强政策实施的可信度与透明度，确保相关计划的长期可持续性。

将交通与能源的融合视为推动绿色航运转型的关键举措，加快内陆水道与沿海港口清洁燃料加注网络的建设，逐步形成规模化的绿色燃料供应体系。同时，应强化碳排放管控与管理机制建设，包括探索建立船舶全生命周期排放核算体系、为国内船舶设定强制性减排目标、制定清洁燃料供应目标，并配套完善综合性政策措施，以系统推动航运业低碳转型。

6. 未来展望

全球航运业已进入系统性脱碳关键阶段。当前，航运业减污降碳仍面临诸多挑战，包括新能源技术路线多样化、ZNZ 燃料和船舶成本高、支持保障政策不健全等。然而，IMO NZF 已为全球航运业零排放转型法规框架订立了明确的方向，同时各成员国将制定全球指导方针和标准，推动实现全球航运业零排放转型。在“双碳”目标和高质量发展背景下，中国航运业绿色转型蕴含了多重机遇：

一是推动发展氢基绿能产业链以满足全球航运绿色转型的需求，参与 IMO 燃料可持续性标准制定并建立碳认证体系以确保本地生产绿色燃料得到全球认可；

二是建设船用新能源加注港，促进形成全球绿色能源枢纽；

三是推动零碳船市场扩张，抢占绿色造船产业高地。

面向未来，政策激励、技术创新、标准制定以及绿色金融支持将是推动航运业实现零排放转型的关键要素。中国应充分发挥政策优势，加快可再生能源电力供应和产业体系的扩展，依托绿色航运走廊计划，推动港口绿色化转型，提速新能源船舶建设，并建立一个兼顾长期燃料可行性的多元化 ZNZ 燃料“生产—供应—销售”体系。在地方层面，主要港口城市可率先出台支持性政策和促进性计划。以上海为例，其在推进电力化及零排放燃料（如绿色甲醇）供应与应用方面的系统举措，充分展示了港口城市在推动行业脱碳中的引领作用。一旦这些政策取得成功，便可在中国乃至全球其他港口城市推广。通过系统性政策设计与协同推进，中国有望引领航运业迈向零排放转型，不仅为实现国家碳达峰与碳中和目标作出重要贡献，也将在全球航运脱碳领域树立新标杆，推动绿色海洋能源与装备发展，为实现惠及人类与地球的全球气候目标贡献力量。

（四）深海采矿¹¹

1. 研究背景

与陆地矿产资源类似，深海海底同样蕴藏着丰富的矿产资源。由于其潜在的经济价值，这些资源的开发前景正日益受到关注。然而，与陆地矿产开采不同，深海矿产资源的商业化开采活动迄今尚未

¹¹ 本章总结自任务组 3（深海采矿）工作的重要成果。任务小组 3 的主要成员有：李家彪（自然资源部第二海洋研究所）、Pradeep Singh（蓝色海洋基金会）、Eva Ramirez-Llodra（REV 海洋基金会）、Rashid Sumaila（不列颠哥伦比亚大学）、Kaja Lonne Fjærtoft（世界自然基金会）、王嵘（自然资源部第二海洋研究所）、包锐（中国海洋大学）、王叶剑（自然资源部第二海洋研究所）、许学伟（国家深海基地管理中心）、卓晓军（长沙矿冶研究院有限责任公

真正展开。近年来，随着全球对钴、镍、铜和稀土元素等关键矿物需求的上升，深海矿产开采（DSM）引发了广泛关注。这些矿物是电动汽车、可再生能源存储及清洁技术的重要资源，具有潜在的经济价值。因此，一些行业参与者和政府提议将 DSM 作为减少对陆地矿产依赖和地缘政治瓶颈的解决方案。

然而，必须指出的是，DSM 涉及对地球最敏感且鲜为人知的生态系统之一进行开发，其背后潜藏的深远风险与不确定性不容小觑。DSM 仍然是一个新兴且未经验证的行业，目前尚未展现出可证明的商业可行性。尽管如此，目前已有多个经营主体（包括中国有色金属公司）正在开展测试项目，评估推动技术成熟度的途径。

尽管部分投资者和国家对 DSM 的经济回报有较高预期，但也有观点指出，这些前景存在夸大的成分。事实上，技术、环境、法律及声誉等成本最终可能超出潜在的经济回报。一些研究表明，现有模型显示 DSM 目前在收益上缺乏吸引力，而另一些研究则认为通过技术迭代和科学创新，深海矿产资源的商业开采可能具有经济可行性。

与此同时，DSM 在绿色转型中的必要性尚存争议。随着技术创新、材料替代、矿物回收以及不依赖海床矿物的电池化学品的转变等趋势的兴起，对深海矿产资源的需求预测已显著降低，可能存在其他的替代途径来实现清洁能源目标。中国目前在此类创新方面处于领先地位，并取得了巨大成功。

因此，深海采矿的政策路径应在这一背景下制定。本章着重强调了在进一步考虑深海采矿开发之前，必须解决的最紧迫的知识和政策差距。

2. 认知缺口

（1）环境基线不足

人类对深海生态系统的科学认知仍存在重大空白。以主要采矿目标区域之一的克拉里昂-克利珀顿区（CCZ）为例，该区域高达 92% 的物种尚未得到分类。同时，大多数拟议的采矿区域尚未开展全面的生态调查。这些关键数据的缺失，使得预测或减轻采矿活动可能带来的环境影响变得愈发困难，甚至在某些情况下成为不可能完成的任务。

（2）缺乏生态系统恢复和恢复力知识

深海生物生长和恢复极其缓慢。历史干扰实验表明，即便经过数十年时间，生态系统的恢复程度也微乎其微。由于缺乏关于生态系统恢复力的有效数据，任何旨在缓解或恢复生态系统的计划都只能停留在推测层面。

（3）对累积影响的理解不足

大多数环境评估主要聚焦单个项目层面的影响。然而，沉积物羽流、噪音和化学污染可能在施工进程和区域间相互叠加，其累积效应可能对生物多样性和食物网产生广泛的连锁后果——包括损害具有商业重要性的渔业。

（4）碳和气候效应数据的差距

深海沉积物在碳封存和营养循环中发挥作用。深海采矿可能破坏这些功能，导致储存的碳被释放，并削弱海洋在气候调节中的作用。然而，目前的碳循环模型没有充分纳入这些潜在风险。

（5）社会文化知识差距

当前，针对原住民和沿海社区受深海采矿影响的研究尚显不足。对于这些社区与海洋领土的文化联系、精神遗产以及生计依赖性等方面的了解仍不够深入，且在深海采矿治理过程中没有得到充分考虑。

司）、吴能友（崂山实验室）、曾轩（长沙矿冶研究院有限责任公司）、关大博（清华大学）、刘承军（长沙矿冶研究院有限责任公司）。

（6）对承包商生成数据的依赖

在国际海底管理局（ISA）勘探合同下收集的大部分数据是专有的或旨在促进资源开采。为确保数据的客观性并为预防性治理提供有力支撑，需要开展独立的科学研究。鉴于第三方数据收集的复杂和困难，ISA 应对数据准确性进行独立审查。

（7）缺乏设定环境阈值的知识

目前缺乏设定环境阈值、基线和缓解标准所需的科学数据，使得最终确定允许开始开发活动的法规为时过早。科学文献表明，获取这些知识需要数十年的专门研究。因此，ISA 应积极领导与国际深海研究机构的合作，以加速通过共享观察和实验积累数据的过程。

3. 政策缺口

（1）经济可行性假设仍未得到证实

虽然 DSM 被描绘为一个有利可图的前沿领域，但大多数私人机构提出的财务模型尚属推测。实际数据表明，矿物价格波动大，资本支出高（10 亿至 40 亿美元），且需求有限。考虑到环境责任、监管合规和保险费用后，许多情景表明 DSM 在经济上的可行性值得怀疑。当然，也有观点认为，通过技术迭代和科学创新，如深海采矿与海洋碳封存协同开发模式，深海矿产开采可能变得经济可行。

（2）深海采矿在绿色转型中的作用存在争议

多项研究结论表明，深海采矿在能源转型中的作用仍有争论。锂铁磷电池（Lithium-iron-phosphate, LFP）和钠离子电池等技术正快速占据市场份额，减少了对钴和镍等金属的需求。循环经济策略，包括矿物回收和城市采矿，预计到 2050 年将提供未来相当一部分的矿物需求。虽然关键金属的总需求预计仍将增加，且回收利用的金属量占总需求的比例仍较有限，但深海矿物在供应链韧性策略中的作用尚未明确。值得注意的是，深海矿物的开发绝不能以牺牲生态环境为代价，任何开发活动都必须建立在严格的生态保护基础之上，确保深海生态系统的健康与可持续性。

（3）缺乏预防原则的操作化

尽管在 ISA 的谈判进程中，预防原则已被多次提及，但目前仍缺乏明确的定义标准与切实可行的执行机制。在此情形下，预防原则仅仅停留于口头表述层面，难以转化为可操作的实践行动。为此，政策框架必须明确定义科学不确定性、不可接受的风险以及中止活动的保障措施。

（4）与全球承诺整合

DSM 对全球生物多样性框架（GBF）、可持续发展目标（SDGs）和《巴黎协定》的进展构成潜在威胁。具体而言，GBF 目标 A-D 及 23 个目标中的 18 个与 DSM 不兼容。同样，SDG 14（水下生命）的目标也将因海底栖息地的破坏而受到削弱。

（5）缺乏经济保障和责任机制

目前针对深海采矿可能造成的环境或经济损失，尚缺乏有效的保险机制或责任基金予以补偿。鉴于深海采矿可能带来的跨界影响以及生态系统崩溃的潜在风险，财务安全网的缺失无疑构成了治理层面的重大疏漏。根据 ISA 的职责使命，其应优先构建一个公平合理的利益共享机制，以确保全人类能够从中受益。

（6）公众参与和 FPIC 不足

在 ISA 的谈判过程中，原住民的自由、事前和知情同意（FPIC）机制未能得到有效落实。同时，公众咨询的参与度有限，尤其是妇女的参与机会更是稀缺且难以保障。这种情况不仅削弱了程序正义，还可能引发法律和声誉层面的双重挑战。

（7）忽视《联合国海洋法公约》的授权

《联合国海洋法公约》（UNCLOS）明确要求，在 DSM 的过程中，不仅要求公平分享 DSM 的收益，更要切实有效地保护海洋环境。深海被 UNCLOS 认定为“全人类共同遗产”，其资源的任何利用必须服务于当前和未来几代人。在未履行这一义务的情况下推进 DSM 将危及代际公平和海洋治理的基本法律原则。

4. 政策建议

推动科学领导，支持对深海海底开采采取结构化与预防性方法：

● 坚持科学与预防原则

依据中国对生态文明建设的承诺以及“预防为主”的原则，政府应支持对深海海底开采采取结构化且预防性的管理方式。该方式应持续实施，直至独立、系统且经同行评审的科学研究提供充分证据，证明此类活动能够在不损害海洋生态系统和生物多样性、并保持公认阈值范围内的情况下进行。在缺乏国际海底管理局（ISA）监管框架的情形下，任何国家或行为主体开展的单方面开采行动，都应受到成员国的共同抵制。与此同时，中国应发挥科学领导作用，积极推动深海科学研究，重点加强基线生态数据、累积影响评估、环境测绘、长期监测与生态修复可行性等领域的研究，以填补关键知识空白，为未来政策决策提供科学依据。具体而言，中国应加强与国际海底管理局（ISA）、联合国环境规划署（UNEP）、联合国教科文组织政府间海洋学委员会（IOC-UNESCO）等国际机构，以及其他国家和合作伙伴的协作，共同开展深海热点区域的生态测绘与数据共享工作。相关成果应纳入公开可获取的全球基准数据库和信息平台。中国可通过部署科研船只、提供技术支持、促进能力建设与共享（特别鼓励发展中国家参与）等方式，进一步推动国际合作。同时，应倡导制定标准化调查规程与数据共享机制，提升全球深海科学研究的规范性与透明度。

● 通过循环经济与技术创新提升战略资源安全

为降低对原生矿产资源的依赖，并与中国“双碳”目标及绿色发展战略相衔接，政府应加大对循环经济体系的投入，推动建立高效的回收体系、材料再利用机制及城市矿产开采（urban mining）。同时，应加快在新型电池化学体系和其他可减少或替代来自高风险环境（包括深海）的稀缺矿物需求的创新技术方面取得突破，从源头上减少对深海采矿的依赖。

● 建立与国际法一致的科学治理框架

最后，中国应倡导建立一个符合《联合国海洋法公约（UNCLOS）》、维护人类共同遗产原则的基于科学的治理框架。应确保未来有关深海采矿的决策与《全球生物多样性框架》、可持续发展目标（SDGs）、《巴黎协定》及其他全球可持续发展倡议的目标保持一致。通过支持基于共识与科学证据的方法，中国不仅可巩固其在全球海洋治理中的领导地位，也将为深海生态系统的长期保护、以及惠及子孙后代的人类共同利益作出重要贡献。

（五）深远海养殖¹²

1. 研究背景

近半个世纪来，海水养殖是全球食物生产当中增长最快的领域之一，在保障粮食安全、促进沿海经济繁荣、改善人民膳食结构等方面作用显著。然而，部分区域高强度的海水养殖已经造成了病害频

¹² 本章总结自任务组 4（深远海养殖）工作的重要成果。任务小组 4 的主要成员有：Rod Fujita（美国环保协会）、曹玲（厦门大学）、董双林（中国海洋大学）、刘慧（中国水产科学研究院黄海水产研究所）、孙芳（美国环保协会）。

发、营养盐超标排放、侵占自然栖息地、与其它海洋产业竞争空间等负面影响。将海水养殖从近岸向深远海空间拓展已成为迫切的需要。深远海养殖能够在不受土地和淡水资源制约、最小化海岸带生态环境影响（如营养盐排放和海虱传播）的前提下生产优质水产动物蛋白，长久以来都受到学者和决策者的青睐，而其核心技术要点在于保障养殖设施在开放海域的风浪条件下安全生产的能力。近年以来，海洋装备工程技术的进步为深远海养殖的兴起提供了有利条件。

中国是全球海水养殖第一大国，也是深远海养殖发展的领跑者。当前中国的深水网箱（以作业海域水深>20米为标准）养殖年产量约47万吨，考虑到其养殖对象绝大部分为鱼类，这一产量已占到海水养殖鱼类总产量的五分之一。深远海养殖的生产形式具有相当的多样性。当前有商业化案例的养殖设施分类包括：1）重力式网箱，具备结构简易和成本低的优势，抗风浪能力一般，通常布设在海流较缓、有一定遮蔽的海域；2）桁架类网箱或平台，具有金属打造的刚性桁架结构，抗风浪能力出色，并能根据需求拓展自动操控、清洁能源、休闲旅游等功能模块；3）封闭式养殖舱，建造和运行成本高昂，其中具有自主航行能力的称为养殖工船。采用各类设施生产所造成的生态、经济、社会影响都具有不同的特征。

深远海养殖产业总体上仍处于起步阶段。事实上，全球学术界和产业界对深远海养殖的定义都未形成坚实的共识，对其扩张潜力、技术趋势、主要风险等更是存在大量的认知模糊区域。因此还需收集更加充分的科学知识、组织更多利益相关方共同参与决策过程，从而为深远海养殖的未来发展勾画出更加清晰的战略路径。

2. 认知缺口

目前深远海养殖领域已经涌现了多种新兴实践，但未来规模化发展的道路远未明确。中国政府旗帜鲜明地支持深远海养殖，但在更详细、更具象的治理层面则尚未出台相对完善的产业政策体系。决策群体对深远海养殖的生态风险、经济风险、社会风险均有一定认知空缺，本节就此简述如下。

在生态风险方面，由于深远海养殖的对象以高营养级鱼类为主，其既需要大量外部饲料的投入，也易对周围生态环境产生干扰。就前者而言，深远海养殖的扩张可能加剧野生饵料鱼资源——海洋食物网的关键中层要素——的过度开发。就后者而言，尽管理论上深远海的水交换动力条件良好，但养殖带来的残存饲料和鱼类代谢产物如何改变水体和沉积物环境，还有待更充分的研究验证。此外，深远海养殖选址如何规避受胁野生动物和其它生态关键种的栖息地与洄游通道，也需进一步研究。

在经济风险方面，深远海养殖相比于传统养殖方式的初始投入更高、养殖对象更为昂贵、面临的灾害天气冲击更大，经济回报的不确定性突出。加之当前专门针对深远海养殖的保险制度发展迟缓，使得纯粹的市场机制无法充分激发企业投入意愿，需依靠适度的政府介入。此外，深远海养殖的产品需要高售价以覆盖高成本，但当前高值化加工流通渠道不足，并不清楚消费端是否有足够的高端市场空间，更不用说深远海养殖规模扩大后还会涌现更多的竞品。

在社会风险方面，深远海养殖最突出的问题是较难将沿海渔业社区中的小规模生产者广泛纳入就业岗位。由于养殖设施具备一定自动化水平、养殖对象的生长过程需要精心管理，需要从业者具备工程技术或水产养殖方面的专业知识，对初级劳动力的需求有所降低。这些特征均不利于生计渔民的参与，对于社区中本就处于边缘地位的女性更是不容乐观。此外在消费端，深远海养殖的扩张可能造成低收入群体能够负担的廉价水产品供给减少，从而对当地的粮食安全和营养安全造成负面影响。但上述风险因素鲜少获得决策群体的重视。

3. 政策缺口

第一方面的空缺是高层次战略当中对深远海养殖不同形式的内在差异关注不足。当前中国深远海养殖产量大部分由重力式网箱贡献，其在投入、建造、运维方面的需求均不高，因而得以快速推广。其相对于传统近岸网箱的创新跨度不大，更接近于过渡地位，但有时得到过于夸大的宣传报道。另一方面，装备式深远海养殖门槛高昂，品种选择、投饲、管理维护等环节与传统养殖也存在差异，国内外都鲜有经验可循，中小型企业试错成本面前普遍缺乏投入意愿。装备式养殖亦需要水产、海洋工

程、生态学、自动化等多学科复合型人才，具有鲜明的多学科融合特点，但高校培养与产业需求暂时脱节。整体来看，正是因为各级决策者经常将深远海养殖视为相对单一化的概念，对其内部的显著差异缺乏重视，导致产业政策不成体系。

第二方面的空缺是地方政府普遍尚未拟定深远海养殖的专项选址规划。时至今日，一部分决策者仍未意识到深远海养殖的目标并非单纯开辟新的水产品生产空间，而是要承担近岸养殖产能转型的重大责任，且亟需明确的路径引导。在中央明确大力支持深远海养殖的前提下，目前除山东长岛、福建连江等产业发展较为集聚的区域外，多数沿海地区都未为其开展专门的空间规划。事实上，现有的科学认知也不足以为此提供决策依据。国内外对深远海养殖所带来生态环境压力的实证评估仍相当稀少，专门适配于深远海环境的养殖容纳量估算框架更是有待构建。尤其是考虑到当前的装备式养殖技术储备已能使其延伸至先前养殖生产、乃至其他用海活动都难以涉足的海域环境，可能对生态系统造成前所未有的扰动，更需要审慎的验证。

第三方面的空缺是深远海养殖的上下游配套产业远未完善。在政府不过度干预市场资源配置的基本前提下，深远海养殖一边需要确保其产品的竞争优势以支撑高售价，另一边需要广泛挖掘与其他产业的协同机遇以分摊成本。当前深远海养殖工业化的生产模式与原本为了传统渔业建立的上下游产业不匹配现象相对突出。就提升商品附加值的举措而言，水产品可持续认证标识、与精品商超及餐饮对接渠道、面向高端预制菜的食品深加工等工作在深远海养殖领域的进展仍很缓慢。海上风渔融合是显著降低深远海养殖碳足迹、并节省设施建造与运维成本的可靠路径，但当前中国的试验案例仍依靠风电企业策动，政府的主动推进力度仍待加强。此外，各级决策者对如何在深远海养殖转型当中提升海洋渔业社区原住民、特别是其中女性的福祉的考虑也属欠缺。

4. 政策建议

(1) 国家部委应当在 2023 年 6 月《关于加快推进深远海养殖发展的意见》的基础上制定一份更为细化的产业支持战略文件。明确深远海养殖的范围定义及其下属分类，并根据重力式网箱、各个规模的桁架网箱及平台、封闭式养殖舱等不同生产模式的特征，针对不同规模经营主体的瓶颈难题，推动打造有梯度、有层次的政策体系，提升深远海养殖产业的多元性。

(2) 深远海养殖的上下游配套体系应当得到全产业链的完善。打造若干生产、加工、认证、销售一体化的示范性产业集群，并为渔业社区中的小规模从业者和女性等弱势群体提供优先参与。为深远海养殖产品参与水产品可持续认证提供通畅的途径，以提升产品的市场认可度与竞争力。加强推行面向深远海养殖的保险、信贷、债券等金融支持工具。

(3) 推动构建深远海养殖容纳量和生态风险评估框架，根据自然保护和生产效益并重的原则制定产业空间规划。加强深远海养殖目标物种的相关生物学机理研究，优化选育适宜养殖的品种，并加快开发相应的生态足迹更低的水产饲料原料。对致力于解决上述瓶颈问题的科研攻关项目，科技主管部门应优先给予的资助。

参考文献

- [1] Conservation and Sustainable Use of Living Marine Resources and Biodiversity [M]. Springer (Jointly published with China Ocean Press Ltd.), 2025.
- [2] The Ocean Economy to 2050 [R]. Paris, 2025.
- [3] WUWUNG L, CROFT F, BENZAKEN D, et al. Global blue economy governance – A methodological approach to investigating blue economy implementation [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9.
- [4] VIERROS M D F, CHARLOTTE. The potential of the blue economy : increasing long-term benefits of the sustainable use of marine resources for small island developing states and coastal least developed countries [R], 2017.
- [5] Gender Equality for Ocean Sustainability [EB/OL]: UNESCO, 2024[2025 May 10]. Available from: <https://www.unesco.org/en/articles/gender-equality-ocean-sustainability>
- [6] G20 Environment and Climate Ministers' Meeting Annex - Chennai High Level Principles for a Sustainable and Resilient Blue/Ocean-Based Economy [DS]. 2023, <https://g7g20-documents.org/database/document/2023-g20-india-sherpa-track-environment-ministers-ministers-annex-g20-environment-and-climate-ministers-meeting-annex>
- [7] BENNETT N J, BLYTHE J, WHITE C S, et al. Blue growth and blue justice: Ten risks and solutions for the ocean economy [J]. *Marine Policy*, 2021, 125.
- [8] BENNETT N J, CISNEROS-MONTEMAYOR A M, BLYTHE J, et al. Towards a sustainable and equitable blue economy [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(11): 991–3.
- [9] Gender and the environment: Building evidence and policies to achieve the SDGs. [R]: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2021.
- [10] The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022.
- [11] OECD. The ocean economy in 2030 [R]: OECD Publishing, 2016.
- [12] Standards and product innovation of blue finance [EB/OL]: Institute of Finance and Sustainability, 2024. Available from: <https://www.ifs.net.cn/news/1769>
- [13] PHILIP W. BOYD H C, LOUIS LEGENDRE, JEAN-PIERRE GATTUSO, PIERRE-YVES LE TRAON. Operational Monitoring of Open-Ocean Carbon Dioxide Removal Deployments: Detection, Attribution, and Determination of Side Effects [J]. *Oceanography*, 2023.
- [14] PHILIP W. BOYD H C, LOUIS LEGENDRE, JEAN-PIERRE GATTUSO, PIERRE-YVES LE TRAON. The need to explore the potential of marine CDR with a one-earth strategy: A guide for policy-makers [R]. New York: Sabin Center for ClimateChange Law, Columbia Law School, 2025.
- [15] IPCC. Global Warming of 1.5°C [M]. 2022.
- [16] A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration [R]. Washington, DC: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022.
- [1] Conservation and Sustainable Use of Living Marine Resources and Biodiversity [M]. Springer (Jointly published with China Ocean Press Ltd.), 2025.
- [2] The Ocean Economy to 2050 [R]. Paris, 2025.
- [3] WUWUNG L, CROFT F, BENZAKEN D, et al. Global blue economy governance – A methodological approach to investigating blue economy implementation [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9.
- [4] VIERROS M D F, CHARLOTTE. The potential of the blue economy : increasing long-term benefits of the sustainable use of marine resources for small island developing states and coastal least developed countries [R], 2017.
- [5] Gender Equality for Ocean Sustainability [EB/OL]: UNESCO, 2024[2025 May 10]. Available from: <https://www.unesco.org/en/articles/gender-equality-ocean-sustainability>

- [6] G20 Environment and Climate Ministers' Meeting Annex - Chennai High Level Principles for a Sustainable and Resilient Blue/Ocean-Based Economy [DS]. 2023, <https://g20-documents.org/database/document/2023-g20-india-sherpa-track-environment-ministers-ministers-annex-g20-environment-and-climate-ministers-meeting-annex>
- [7] BENNETT N J, BLYTHE J, WHITE C S, et al. Blue growth and blue justice: Ten risks and solutions for the ocean economy [J]. *Marine Policy*, 2021, 125.
- [8] BENNETT N J, CISNEROS-MONTEMAYOR A M, BLYTHE J, et al. Towards a sustainable and equitable blue economy [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(11): 991–3.
- [9] Gender and the environment: Building evidence and policies to achieve the SDGs. [R]: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2021.
- [10] The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022.
- [11] OECD. The ocean economy in 2030 [R]: OECD Publishing, 2016.
- [12] Standards and product innovation of blue finance [EB/OL]: Institute of Finance and Sustainability, 2024. Available from: <https://www.ifs.net.cn/news/1769>
- [13] PHILIP W. BOYD H C, LOUIS LEGENDRE, JEAN-PIERRE GATTUSO, PIERRE-YVES LE TRAON. Operational Monitoring of Open-Ocean Carbon Dioxide Removal Deployments: Detection, Attribution, and Determination of Side Effects [J]. *Oceanography*, 2023.
- [14] PHILIP W. BOYD H C, LOUIS LEGENDRE, JEAN-PIERRE GATTUSO, PIERRE-YVES LE TRAON. The need to explore the potential of marine CDR with a one-earth strategy: A guide for policy-makers [R]. New York: Sabin Center for ClimateChange Law, Columbia Law School, 2025.
- [15] IPCC. Global Warming of 1.5°C [M]. 2022.
- [16] A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration [R]. Washington, DC: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022.
- [17] DONEY; S, LEBLING; K, ASHFORD; O S, et al. Principles for responsible and effective marine carbon dioxide removal development and governance [R], 2025.
- [18] KARO N, ITOV G, MAYRAZ O, et al. Carbon dioxide sequestration through mineralization from seawater: The interplay of alkalinity, pH, and dissolved inorganic carbon [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 500.
- [19] BAATZ C, TANK L, BEDNARZ L-K, et al. A holistic assessment framework for marine carbon dioxide removal options [J]. *Environmental Research Letters*, 2025, 20(5).
- [20] EDELENBOSCH O Y, HOF A F, VAN DEN BERG M, et al. Reducing sectoral hard-to-abate emissions to limit reliance on carbon dioxide removal [J]. *Nature Climate Change*, 2024, 14(7): 715–22.
- [21] UNFCCC. Nationally determined contributions under the Paris Agreement [R]. Glasgow, 2021.
- [22] SCHENUIT F, GEDEN O, PETERS G P. Five principles for robust carbon dioxide removal policy in the G7 [J]. *One Earth*, 2024, 7(9): 1487–91.
- [23] BURKE J, SCHENUIT F. Conditional fungibility: sequencing permanent removals into emissions trading systems [J]. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(11).
- [24] KROODSMA D A, MAYORGA J, HOCHBERG T, et al. Tracking the global footprint of fisheries [J]. *Science*, 2018, 359(6378): 904–8.
- [25] GUO X, FAN N, LIU Y, et al. Deep seabed mining: Frontiers in engineering geology and environment [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2023, 10(1).
- [26] ZOU J, SU P, ZHANG C. A Comparison of the Cost-Effectiveness of Alternative Fuels for Shipping in Two GHG Pricing Mechanisms: Case Study of a 24,000 DWT Bulk Carrier [J]. *Sustainability*, 2025, 17(13): 6001.
- [27] Review of maritime transport 2024: Navigating maritime chokepoints [R]: United Nations Conference on Trade And Development (UNCTAD), 2024.
- [28] XIAOLI MAO Z M, BRYAN COMER, AND TOM DECKER. Greenhouse gas emissions and air pollution from global shipping, 2016–2023 [R]. Washington, DC, 2025.
- [29] Sulphur Oxides (SOx) and Particulate Matter (PM)—Regulation 14 [Z]. International Maritime Organization (IMO). 2020. [https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/sulphur-oxides-\(sox\)-%E2%80%93regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/sulphur-oxides-(sox)-%E2%80%93regulation-14.aspx)

- [30] ZHANG X, CHENG S, WU F, et al. Characterization of pollutant discharges from ships within 100 nautical miles of China's coastline and certain inland river ports, 2022 [J]. Marine Pollution Bulletin, 2025, 215: 117876.
- [31] LUO Z, LV Z, ZHAO J, et al. Shipping-related pollution decreased but mortality increased in Chinese port cities [J]. Nature Cities, 2024, 1(4): 295–304.
- [32] CHO H J, ALVAREZ G, COMER B. Vision 2050: Fuel standards to align international shipping with the Paris Agreement [R], 2025.
- [33] RUTHERFORD D, MAO X, COMER B. Potential CO₂ Reductions under the Energy Efficiency Existing Ship Index [R], 2020.
- [34] IMO. 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. Resolution MEPC.377 (80). [S]. 2023: 17.
- [35] IMO. Draft revised MARPOL Annex VI. Circular Letter No. 5005. [S]. London: 2025: 121.
- [36] IMO Net-Zero Framework Assessing the impact of the IMO's draft Net-Zero Framework, Briefing [Z]. Transport & Environment. 2025. <https://www.transportenvironment.org/uploads/files/Impact-of-the-IMOs-draft-Net-Zero-Framework-April-2025.pdf#page=14.11>
- [37] SMITH T, FROSCH A, FRICAUDET M, et al. An overview of the discussions from IMO's 83rd Marine Environment Protection Committee [Z]. London, UK; UCL Energy Institute 2025. <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/sites/bartlett/files/2025-05/An%20overview%20of%20the%20discussions%20from%20IMO%E2%80%99s%2083rd%20Marine%20Environment%20Protection%20Committee.pdf>
- [38] AYMER D, SMITH T. IMO's new Net Zero Framework: Assessing the potential options and costs of compliance [Z]. UMAS and University College London. 2025. <https://www.u-mas.co.uk/wp-content/uploads/2025/05/UMAS-Assessing-the-IMOs-Net-Zero-Framework-1.pdf>
- [39] FEMKE SPIEGELENBERG, AYMER D. IMO policy measures: What's next for shipping's fuel transition? [EB/OL]: Global Maritime Forum, 2025[2025 27 May]. Available from: <https://globalmaritimeforum.org/insight/imo-policy-measures-whats-next-for-shippings-fuel-transition/>
- [40] KIM I-H. Korean shipbuilders yield No.1 spot to Chinese rivals [EB/OL], 2022. Available from: <https://www.kedglobal.com/shipping-shipbuilding/newsView/ked202209060008>
- [41] SONG J-A. South Korean shipbuilder bets on methanol-powered vessels in decarbonisation push [EB/OL]: Financial Times, 2022[2025 June 10]. Available from: <https://www.kedglobal.com/shipping-shipbuilding/newsView/ked202209060008>
- [42] LIST L S. South Korea to pump \$151m into green shipbuilding [EB/OL], 2025[2025]. Available from: <https://mykn.kuehne-nagel.com/news/article/south-korea-to-pump-151m-into-green-shipbuild-07-Feb-2025>
- [43] PREVLJAK N H. HD Hyundai Mipo: Construction begins on 'world's first' oceangoing ammonia-powered vessel [EB/OL], 2025. Available from: <https://www.offshore-energy.biz/hd-hyundai-mipo-construction-begins-on-worlds-first-oceangoing-ammonia-powered-vessel/>
- [44] BAREŠIĆ D, PRAKASH V, STEWART J, et al. Climate action in shipping: Progress towards shipping's 2030 breakthrough (2024 ed.), F, 2024 [C]. Global Maritime Forum.
- [45] CLERC V, HASHIMOTO T. Why closing the price gap for green fuels is key to decarbonizing the maritime sector [EB/OL]: World Economic Forum, 2023. Available from: <https://www.weforum.org/stories/2023/12/closing-price-gap-green-fuels-decarbonize-maritime-sector/>
- [46] Future Fuels and Technology Project – Prices of Alternative Fuels [EB/OL]: International Maritime Organization (IMO), 2025[2025 June 26]. Available from: <https://futurefuels.imo.org/home/latest-information/fuel-prices/>
- [47] SHEN C. Experts highlight challenges curbing China's green methanol progress [EB/OL]: Lloyd's List, 2024[2025 June 26]. Available from: <https://www.lloydslist.com/LL1151445/Experts-highlight-challenges-curbing-China%E2%80%99s-green-methanol-progress?vid=Maritime&processId=0a1abfb4-b1c5-4043-a13d-dba72555b0ab>
- [48] Fuelling the Future of Shipping: Key Barriers to Scaling Zero-Emission Fuel Supply [R]: World Economic Forum, 2023.

- [49] Global Cost of Renewables to Continue Falling in 2025 as China Extends Manufacturing Lead [EB/OL]: BloombergNEF, 2025[2025 June 10]. Available from: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-cost-of-renewables-to-continue-falling-in-2025-as-china-extends-manufacturing-lead-bloombergnef/>
- [50] UNCTAD Data Hub - Maritime profile: China [DS]. 2025, <https://unctadstat.unctad.org/CountryProfile/MaritimeProfile/en-GB/156/index.html>
- [51] Scaling Up Hydrogen: The Case for Low-Carbon Methanol [R]: BloombergNEF, 2024.
- [52] Scaling Up Hydrogen: The Case for Low-Carbon Ammonia [R]: BloombergNEF, 2024.

缩写词列表

AVPN: Asian Venture Philanthropy Network, 亚洲公益创投网络

BBNJ: Biodiversity Beyond National Jurisdiction, 国家管辖范围以外区域海洋生物多样性

BRI: Belt and Road Initiative, 一带一路倡议

CCS: carbon capture and storage, 碳捕集与存储

CDR: Carbon Dioxide Removal, 二氧化碳去除

mCDR: marine Carbon Dioxide Removal, 海洋二氧化碳去除

ETS: Emission Trading Standards, 排放权交易标准

GDP: Gross Domestic Product, 国内生产总值

GHG: Greenhouse Gases, 温室气体

IOC: Intergovernmental Oceanographic Commission, 政府间海洋委员会

ISA: International Seabed Authority, 国际海底管理局

MSP: marine spatial planning, 海洋空间规划

MEE: Ministry of Ecology and Environment, 生态环境部

MNR: Ministry of Natural Resources, 自然资源部

MRV: Monitoring, reporting and verification, 监测、报告和验证

eMRV: ecological MRV, 生态监测、报告和验证

NBSAP: National Biodiversity Strategy and Biodiversity Plan, 中国生物多样性保护战略与行动计划

NDC: National Determined Contributions, 国际自主贡献

NZF: Net Zero Framework, 净零排放框架

OAE: Ocean alkalinity enhancement, 海洋碱化

OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development, 经济合作与发展组织

SECA: Sulfur Emission Control Area, 硫排放控制区

SBE: Sustainable Blue Economy, 可持续蓝色经济

SDG: Sustainable Development Goals, 可持续发展目标

UNCTAD: United Nations Conference on Trade and Development, 联合国贸易与发展大会

UNDP: United Nations Development Program, 联合国开发计划署

UNEP: United Nations Environment Programme, 联合国环境署

UNGC: United Nations Global Compact, 联合国全球契约组织

WEF: World Economic Forum, 世界经济论坛

WWF: World Wildlife Fund, 世界自然基金会

YRD: Yangtze River Delta, 长江三角洲