



中国环境与发展国际合作委员会  
专题政策研究报告

# 碳中和愿景下基于 生态系统的海洋综合治理

2022

2022年6月

中国环境与发展国际合作委员会



# 碳中和愿景下基于生态系统的海洋综合管理 海洋治理专题政策研究报告

2022 年 6 月

## 海洋专题政策研究项目组成员名单\*

姓名	单位
----	----

组长	
----	--

戴民汉	厦门大学
-----	------

Jan-Gunnar Winther	挪威极地研究所
--------------------	---------

### 核心成员

Kristian Teleki	海洋之友，世界经济论坛，世界资源研究所
-----------------	---------------------

曹玲	上海交通大学
----	--------

李姜辉	厦门大学
-----	------

### 顾问

苏纪兰	自然资源部第二海洋研究所
-----	--------------

### 协调员

刘慧	中国水产科学研究院黄海水产研究所
----	------------------

Birgit Njåstad	挪威极地研究所
----------------	---------

感谢杨松颖、梁希、王月、Salvatore Aricò、Douglas N. Rader 等外审专家对项目报告提出了宝贵意见。感谢孟菲菲、李妍婷博士在本报告撰写过程中的协助。项目组感谢国合会秘书处陈新颖对本项目的协助。

\* 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。

## 执行摘要和建议

海洋吸收了地球系统中的大部分超额热量和大量人为排放的 CO<sub>2</sub>，在减缓气候变化方面发挥着无可替代的核心作用；海洋还具有通过多种途径进一步减缓气候变化的巨大潜力，在实现碳中和目标及其战略路径的选择方面发挥重要作用。尽管如此，国际社会在《联合国气候变化框架公约》及《巴黎协定》框架下对海洋碳汇的关注仍然非常不充分，包括中国在内的大部分国家尚未将海洋碳汇纳入国家自主贡献（NDC）范畴，亦未将其纳入温室气体长期低排放发展战略规划中。

在发掘海洋应对气候变化的潜力上，各个国家和国际组织在予以高度重视的同时，应充分认识到：健康的海洋生态系统，是良性高效地利用海洋实现碳中和目标的首要前提。一个健康而富有韧性的海洋，具备可持续产出食物、增加收入、支持交通运输以及提供多种可持续发展要素的能力，并同时为包括妇女和少数族裔在内的全人类提供更广泛充足的就业机会，以促进全球的健康发展和繁荣稳定。

2020 年，中国政府向全世界宣布了其到 2060 年前实现碳中和的宏伟目标愿景，这一承诺进一步坚定了中国选择走可持续、高质量发展道路的决心，彰显了在全球共同应对日益加剧的气候变化危机的背景下，中国所具有的大国雄心和国际担当。在统筹推进实现碳中和目标与贯彻可持续高质量发展新理念方面，海洋是国家与全球双重战略目标的交汇点，既涉及政策理论与科学研究，也关乎人类命运和生存的实践。在借助海洋实现碳中和目标的进程中，必须始终坚持落实可持续发展的基本原则和标准，其重点在于对海洋生态系统的综合管理。通过保持海洋生态系统的健康完整和与生俱来的恢复力，解决和改善沿海群众的生计问题和就业状况，平衡发展与保护来建设可持续的蓝色海洋经济。

以实现 2060 年碳中和为目标，在可持续高质量发展理念和基于生态系统的海洋综合管理（EB-IOM）框架的共同指导下，中国有望在开发和利用海洋实现国家乃至全球碳中和目标的进程中处于领先地位并扮演领导角色。为此，本报告在充分考虑时代背景和现实选择的基础上，研究并确立了若干海洋可持续发展战略和战术建议，具体如下：

### 一、利用自然捕获和储存二氧化碳

建议从中央到地方各级行政部门立即采取行动，避免进一步破坏储碳潜力显著的近海海洋栖息地和滨海湿地，并尽可能减少损失：第一，到 2030 年，积极修复退化或被破坏的滨海湿地，保护关键的海洋栖息地；第二，到 2030 年，投资建成一个具有恢复力的海洋保护区网络（包括国家公园、自然保护区和海洋生态红线区），通过基于自然的解决方案，保护对碳储存和海洋生物多样性具有重大意义的大型海洋栖息地；第三，按照《联合国气候变化框架公约》及《巴黎协定》，参考 IPCC 国家温室气体清单指南，将蓝碳等海洋生态系统纳入中国的国家自主贡献范畴和温室气体长期低排放发展战略规划中。探索与“一带一路”沿线国家相关合作发展框架，推广已验证的成熟举措。

## 二、在国际气候报告中体现海洋碳汇

建议成立国际专项工作组：第一，探讨推动将海洋碳汇纳入国家自主贡献范畴的行动路径；第二，推动将海洋碳汇纳入国家自主贡献范畴在国际社会的标准化与主流化。

## 三、提升科学认知

建议国家制定系统性的战略框架，以提升对基于海洋气候解决方案的科学认知，减少滨海湿地，海洋系统碳储量、碳收支估算的不确定性，开发利用安全且高效的碳封存方法：第一，支持开展综合性研究与国际合作，全面整合基础研究、技术创新、成果转化、政策导向和管理变革；第二，通过多方协作整合各方有效资源互补与连贯利用，以保证在系统性完整战略框架内顺利开展相关工作。

## 四、加速二氧化碳的去除（CDR）研究

建议国家完善相关法律政策、建立综合管理运营框架和出台财政支持方案：第一，支持基于海洋的二氧化碳去除方法的科学原理与技术研究、海洋环境保护监测策略及技术的研发开发；第二，促进沿海发达省市在近海沉积盆地开展实施离岸碳捕集、利用与封存（CCUS）理论框架与安全技术研究 and 示范实践。

## 五、发展绿色海洋产业

建议在国际海事组织（IMO）等国际组织框架下制定更具前瞻性的目标：第一，加快海洋产业的低碳转型和升级；第二，促进清洁燃料的科技研发，包括在港口之间建立“绿色走廊”，为远洋船队使用可再生燃料提供便利。

## 六、建设智慧绿色港口

建议基于自然环境条件扩大海上风电生产规模，同时促进制氢和制氨等能源产业的发展，以实现沿海发达城市在运输和航运业的进一步脱碳。

# 目 录

<b>1. 研究背景</b>	1
1.1 海洋和气候变化	1
1.2 海洋健康与社会发展	1
<b>2. 基于海洋的四种碳中和方法</b>	4
2.1 海洋碳移除与基于自然的解决方案	4
2.1.1 海洋如何吸收二氧化碳	4
2.1.2. 在可持续框架下实施海洋碳增汇措施	5
2.1.3. 认知与政策的差距	8
2.1.4. 优先行动建议	8
2.2 离岸碳捕集、利用与封存(CCUS)	9
2.2.1 海洋在捕集、利用和封存 CO <sub>2</sub> 中的作用	9
2.2.2 离岸 CCUS 现状	10
2.2.3 认知缺陷和政策缺口	11
2.2.4 政策建议	12
2.3 降低涉海活动碳足迹	14
2.3.1 涉海活动碳排放概况	14
2.3.2 适应和应对策略	16
2.3.3 认知缺失和政策缺口	19
2.3.4 优先行动建议	20
2.4 海洋可再生能源	21
2.4.1 依托海洋开发可再生能源	21
2.4.2 ORE 开发与利用现状	22
2.4.3 认知缺失和政策缺口	22
2.4.4 优先行动建议	23
<b>3. 实现碳中和目标的海洋可持续管理</b>	25
3.1 从整体上考虑海洋生态系统的必要性	25
3.2 面向碳中和的可持续海洋管理方案	26
3.3 优先行动建议	27
<b>参考文献</b>	29
<b>缩略语中英文对照表</b>	34

# 1. 研究背景

## 1.1 海洋和气候变化

自上世纪以来，在人类活动影响下，全球气候发生了剧烈变化，由此引发了多重负面效应，包括自然灾害风险增加、栖息地改变、生物多样性锐减等，进而导致生产力波动并危及到粮食安全。气候变化和生物多样性锐减共同威胁着自然生态系统和人类的生存、生计和福祉。基于海洋的解决方案能够且应当在应对气候和生物多样性危机方面发挥基础性、实质性的作用，以实现和促进各个层面的社会公平。

海洋在吸收大气中 CO<sub>2</sub>、减缓气候变化方面发挥着关键作用，它吸收了大约 25% 的人为排放的 CO<sub>2</sub>，海洋也因此成为地球上最大的“碳汇”之一。基于海洋的 GHG 移除/捕获和储存方案有着巨大的潜力，可有效助力减缓全球变暖。据可持续海洋经济高级别小组估计，到 2050 年，基于海洋的气候减缓和碳封存方案对于将全球升温限制在 1.5°C 所需的减排量的贡献率可达 21% (Hoegh-Guldberg et al., 2019)。必须指出的是，海洋持续吸收大气中的 CO<sub>2</sub>，导致海洋酸化，进而驱动海洋生物、生物地球化学和生态系统发生显著变化。在近岸海域，富营养化也会加剧海洋酸化。此外，鉴于海洋周转率较高，海洋碳封存的时间尺度是需要重点考虑的问题。从减缓气候变化的角度而言，年代际尺度上的碳封存才是有效的。

基于海洋的解决方案可望在助力实现碳中和目标的同时，维护海洋生物多样性，并降低海洋酸化等生态风险。然而，这些基于海洋的气候解决方案至今很少出现在《联合国气候变化框架公约》及《巴黎协定》框架下的国家自主贡献 (NDCs) 的考虑范围内，也尚未纳入温室气体长期低排放发展战略的范畴 (Nathrop et al., 2020)。可供选择的基于海洋的解决方案相当丰富，值得优先考虑的包括：培育、修复并长期管理高效碳汇生态系统（“蓝色森林”<sup>1</sup>）；开发利用海洋固有的能量并最大限度地减少航运等海洋产业的碳足迹；开发离岸碳储存能力，增强海洋生产力以促进海洋碳吸收；以及引导渔业生产和水产品消费向低碳足迹方向发展 (Hoegh-Guldberg et al., 2019)。此外，我们也需要高度关注一些新型的潜在气候缓解方案，并作进一步的审慎评估。这些可能的方案包括重新设定鱼类和其他大型生物的捕捞管理目标，通过增加长期生物量来充分保护海洋生态系统中的固碳和储碳功能；保护海洋中层鱼类种群，这些鱼类的垂直迁移可将碳快速有效地转移到深海；在谨慎避免影响气候和生物多样性的前提下，大规模投资开展大型海藻养殖、特别是近海水域的海藻养殖，因为部分大型海藻可能有助于碳的长期封存。

中国政府已经认识到海洋对实现中国 2060 年碳中和目标的重要性。例如，生态环境部近年来一直在敦促地方政府加快海洋生态修复，并组织开展了海洋碳汇监测和评估。

## 1.2 海洋健康与社会发展

---

<sup>1</sup> “蓝色森林”是指沿海和海洋生态系统，包括红树林、海草床和盐沼，它们具有储碳能力，并为沿海社区提供一系列重要的生态服务。

健康、富饶、富有韧性的海洋生态系统是海洋经济可持续发展的物质基础，也是实现基于海洋的碳中和目标的基础。然而，在过去的五十年里，诸如大规模围填海、水产养殖、捕捞渔业等人类大规模的社会经济活动以及陆源污染，给海洋造成了巨大的压力。人类活动叠加气候变化，造成海洋暖化、酸化、缺氧，海洋中的高度动态变化过程将进一步扩大这些海洋环境变化带来的影响。中国也不例外。自 1950 年以来，中国 57% 的滨海湿地、73% 的红树林和 80% 的珊瑚礁消失，沿海大部分海草床消失，三分之二的海岸线遭受侵蚀，近 4.4 万平方公里近海海域受到严重污染，渔业资源严重枯竭。

海洋是孕育地球生物多样性的主要宝库之一，构成了地球上 90% 以上的栖息地，庇护着大约 250,000 种已知物种和更大数量的未知生物。海洋生物多样性在维系地球健康和人类福祉方面发挥着重要作用。海洋还是人类社会赖以生存的保障。与海洋休戚相关的氧气和淡水是人类生命的基础；渔业和水产养殖业则是数亿人的收入来源，直接或间接解决了他们的粮食需求和生存问题，对于低收入家庭而言尤其如此；占全球总人口三分之一的近 24 亿人生活在距离海岸线 100 公里的范围内；海洋的年经济价值约为 2.5 万亿美元，相当于世界第七大经济体；海洋还提供了营养、药物、矿物和可再生能源；同时还为渔业、水产品加工、旅游业和科学研究领域的提供就业机会。维护健康、富饶、富有韧性的海洋生态系统，对于改善全球健康稳定、促进全球经济繁荣，以及为包括妇女和少数族裔在内的所有人提供更多的生存机会而言，都至关重要。因此，呵护海洋并将其作为人类可持续发展战略要地已成为全球共识。谨慎地管理海洋，是实现第 14 项（SDG14）联合国可持续发展目标“水下生物”的关键。保护海洋生态系统，还需融通海洋科学与社会需求，促进科学研究范式变革和技术创新，这对于实现联合国“海洋科学促进可持续发展国际十年（2021-2030）”提出的“科学至实，海洋可期”的愿景至关重要，亟需构建以促进可持续发展为目的的变革性海洋科学解决方案。

基于生态系统的海洋综合管理（简称“EB-IOM”）是一种基于生态系统的自然资源管理方式。它以海洋生态系统的健康、多样性及韧性为核心，在综合考虑整个海洋生态系统内外相互作用（包括生态系统内部及其与人之间的交互）的基础上，推动跨部门的统一规划和统筹实施综合管理方案。在对现有科学知识和对生态系统认知的基础上，在开发与保护之间，在环境、经济与社会之间，在短期经济利益与海洋的长期健康繁荣之间，寻求平衡，被认为是可持续地利用和保护海岸带及海洋的恰当方式。EB-IOM 为保护全球海洋免受多种涉海活动叠加引起的、不利于海洋可持续发展的因素影响，提供了基础；也为化解和平衡各方利益相关者之间的竞争与冲突，提供了基础。这将使海洋生态系统和蕴藏其中的栖息地、物种，以及依赖它们的人类从中获益。

本研究根据可持续发展和 EB-IOM 的原则及标准设计研究框架，协同考虑基于海洋的碳中和与 EB-IOM 解决方案，并针对碳中和目标提出了海洋领域的行动方案，进而建议中国特别关注以下四个方面的问题，并积极采取行动，以应对气候变化：



- 基于自然的解决方案和其他安全、高效的基于海洋的碳移除（CDR）方案
- 基于工程的解决方案如离岸碳捕集、利用与封存（CCUS）
- 减少涉海活动的碳足迹
- 海洋可再生能源

在临近第六届国合会收官之际，本政策研究仅初步揭示了海洋在国家和社会应对全球气候变化、生物多样性危机以及实现碳中和目标进程中的作用，展现了阶段性成果，我们希望在下一届的国合会工作中进一步拓展深化本研究结果，并根据社会发展现状和科学技术进步提出更具实操性的政策建议。

本政策研究已充分认识到性别平等对于有效保护海洋、可持续管理海洋及其资源以及实现可持续发展目标的重要作用。因此，我们认为，需要把性别平等和具性别包容力的海洋管理作为可持续发展战略的组成部分。

本政策研究探讨的若干主题和行动，与国合会目前正在开展的气候变化、生物多样性和基于自然的解决方案等专题政策研究密切相关，建议充分关注和发掘这些议题之间的联系。

## 2. 基于海洋的四种碳中和方法

为应对当今和未来世界所面临的挑战和危机，人类在处理海洋问题及其空间治理上必须采取系统、综合和一体化的方法；在探索基于海洋的气候解决方案以助力碳中和目标实现的过程中，也当如此。本章探讨了四种基于海洋的碳中和路径，并在接下来的第3章阐述了秉持基于生态系统的、综合的和一体化的原则是采取这些行动的必要条件。在采取这四种方案探索和落实碳中和行动的同时，可以考虑借助这个机会来促进性别平等和多样性，包括让更多女性参与其中。

### 2.1 海洋碳移除与基于自然的解决方案

#### 2.1.1 海洋如何吸收二氧化碳

海洋占地球表面积的71%，是地表系统最大的碳储库，储量占比更是高达90%。最新研究表明，作为活跃碳库，在1960-2019年间，海洋每年可吸收消纳22-26%由化石燃料燃烧和土地利用方式改变排放的人为二氧化碳（CO<sub>2</sub>），对缓解气候变化起到了至关重要的作用(Friedlingstein et al., 2020)。工业革命前，海洋总体上向大气释放CO<sub>2</sub>，也就是碳源 (Sarmiento and Gruber, 2002)。自工业革命以来，随着大气CO<sub>2</sub>浓度的升高，海洋逐步由碳源转化为碳汇，现在每年可从大气吸收19亿吨碳(Friedlingstein et al., 2020)。如果将土地利用方式改变所释放的CO<sub>2</sub>抵消陆地的自然碳汇，在过去的200年内，海洋是最主要的持续吸收大气CO<sub>2</sub>的碳库（图1）(Aricò et al., 2021)。



图1. 自工业革命以来的CO<sub>2</sub>总体收支情况

海洋是如何吸收大气CO<sub>2</sub>的呢？第一阶驱动力来自于大气与海表的CO<sub>2</sub>分压差。人类活动排放的CO<sub>2</sub>导致大气CO<sub>2</sub>浓度急剧上升，在海-气CO<sub>2</sub>分压差的驱动下，大气CO<sub>2</sub>通过海-气交换进入海洋。不同于其他气体，当CO<sub>2</sub>溶解于海水后会与水发生反应，形成海洋中最主要的缓冲系统—二氧化碳-碳酸盐系统(Zeebe and Wolf-Gladrow, 2001)。碳酸盐系统是海洋中最主要的活性碳库，主要以溶解无机碳 (Dissolved Inorganic

Carbon, DIC) 的形式存在, 包括游离二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) / 未电离的碳酸 ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ )、碳酸氢根 ( $\text{HCO}_3^-$ ) 和碳酸根 ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) 三种形态, 这三种形态处于动态化学平衡。此外, 海洋碳储库还包括溶解有机碳库, 储量约为7000亿吨碳, 其大部分组分在海水中的周转时间长达数千年(Hansell et al., 2009)。海洋生物, 主要是浮游植物和微生物, 构成了碳储量最小的颗粒有机碳库 (30亿吨碳), 它们在水体中的周转时间很短, 只有数天到数周。

进入海洋的 $\text{CO}_2$ 通过各种过程输送至深层海洋, 从而实现更长时间的碳储存。海洋碳泵, 包括溶解度泵、生物泵和碳酸盐泵等, 承担了输运、转化与储碳的任务。生物泵始于海洋真光层, 浮游植物吸收、利用海水中的游离 $\text{CO}_2$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 进行光合作用, 将无机碳转化为有机碳, 其中部分以颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 的形式通过沉降等过程输送至深海, 而另一部分则以溶解有机碳 (Dissolved Organic Carbon, DOC) 的形式向下扩散至深海, 进而实现碳封存; 需要指出的是, 在输送过程中部分有机碳会被再矿化成DIC释放到周围水体中。溶解度泵通常指高纬海区在冷空气和强风的作用下, 表层海水快速降温,  $\text{CO}_2$ 在海水中的溶解度增大, 海洋通过海-气交换从大气吸收大量 $\text{CO}_2$ ; 同时随着深层水的形成, 高密海水携带吸收的 $\text{CO}_2$ 下沉进入大洋热液环流, 脱离海-气交换层, 从而实现了对大气 $\text{CO}_2$ 的封存 (Ito & Follows, 2003; Toggweiler et al., 2003)。碳酸盐泵是控制海洋碳循环的另一重要过程。海水碳酸盐系统具有一定的缓冲作用: 一方面,  $\text{CO}_2$ 进入海水使 $\text{HCO}_3^-$  和 $\text{CO}_3^{2-}$ 之间的比例发生变化而减缓pH的降低; 另一方面, 海水中碳酸盐沉淀的形成会放出 $\text{CO}_2$ , 而碳酸盐溶解会从大气吸收 $\text{CO}_2$ , 这就是碳酸盐泵。在海底沉积物中存在大量的碳酸盐, 因此, 深海碳酸盐的沉积与溶解在长时间尺度上可调节大气 $\text{CO}_2$ 浓度。

此外, 滨海“蓝碳”生态系统, 包括红树林、盐沼和海草床, 也通过高效的光合作用和快速的沉积物碳埋藏从大气中持续吸收 $\text{CO}_2$ 并进行固定(Duarte et al., 2013)。研究表明红树林和滨海湿地单位面积的固碳速率是热带森林速率的10倍, 单位面积储碳量也是它的3到5倍。另外, 与森林的碳固持不同, 滨海“蓝碳”主要固定在土壤沉积物中, 而深层沉积物中的低氧环境抑制了碳的周转, 因此碳库比较稳定(Breithaupt et al., 2012)。在中国沿海的这三类“蓝碳”生态系统也具备快速积累碳的能力。其中, 红树林主要分布在南部沿海, 总覆盖面积约为 $2.56 \times 10^4$ 公顷, 沉积物碳埋藏速率为每年28万吨碳; 潮间带盐沼广泛分布于亚热带和温带沿海区域, 总覆盖面积为10.2~3434平方公里, 碳埋藏量为每年21-91万吨碳。海草床则主要分布在北部环渤海、黄海沿岸区域和热带沿岸, 统计总覆盖面积为 $1.68 \times 10^4$ 公顷, 其碳埋藏量还不清晰。值得一提的是, 目前这些滨海蓝碳生态系统正面临着人为扰动, 包括围填海争地、海域污染、城镇化以及外来物种如互花米草入侵的威胁。

对近海生态系统来说, 一个重大而又具有挑战性的问题是: 滨海“蓝碳”系统在未来全球气候变化的大背景下将如何演变?

### 2.1.2. 在可持续框架下实施海洋碳增汇措施

目前 $\text{CO}_2$ 的排放水平已大大超出自然过程所能清除的量, 单靠减排可能不足以应对气候变化。美国国家科学院2021年发布的《海洋二氧化碳移除与封存策略》(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021)报告分析, 基于以下原因, 海洋具有增汇、移除和封存 $\text{CO}_2$ 的巨大潜力: 1) 海洋是巨大的碳储库, 其溶解无机碳的储量超过工业革命前大气 $\text{CO}_2$ 储量的50倍; 2) 自工业革命以来, 海洋已从大气移除大量人为排放的 $\text{CO}_2$ ; 3) 已知海洋中存在大量物理、地球化学和生物过程, 会影响海-气 $\text{CO}_2$ 交换和

碳储存。据高级别可持续海洋经济研究组估计，基于海洋的缓解气候变化措施到2030年每年减少CO<sub>2</sub>排放约四百万吨，而到2050年则可增加到每年一千一百万吨，相当于填补了1.5°C排放路径21%，2°C排放路径25%的负排放缺口(Hoegh-Guldberg et al., 2019)。基于海洋的CO<sub>2</sub>移除措施可分为生物和化学两类途径（图2）：

#### 1) 生物途径包括：

- **营养加富：**通过向表层海洋添加铁等痕量营养元素，在某些海域可促进浮游植物的光合作用，从而通过增强生物泵进而强化海洋对大气CO<sub>2</sub>的吸收，并将其转化为有机碳向深海转移，以封存一个世纪或更长时间。营养加富基本上是利用太阳的能量、在局部增强生物泵效率，对铁的需求量相对较小。需要指出的是，虽然我们对人工营养加富的总体生态风险是了解的，但对大规模应用该类技术的实际风险还不得而知。
- **人工上升流和下降流：**通过上升流将低温、高营养盐、高CO<sub>2</sub>浓度的深层水输送至海洋表层，刺激浮游植物生长并吸收大气中的CO<sub>2</sub>。下降流则将携带碳的上层海水转移到深海，实现碳封存。另外，这些过程通过加快水体交换，在一定程度上还可能缓解近岸富营养化和缺氧状态。
- **海藻养殖：**通过大规模的大型海藻养殖将碳转移到深海或沉积物中，或将大型海藻制作成长寿命产品，转化为生物能，以实现碳封存或利用。必须指出的是，我们对大规模深海植被沉积可能带来的非预期的生态效应及其连锁反应并不知晓。
- **生态系统修复：**通过保护和修复沿海生态系统以及恢复海藻场、鱼类、鲸和其他海洋动物来实现碳封存。重建全球鱼类和大型动物种群，使其超过目前管理所支持的丰度，可能有助于碳移除与碳封存，但这一举措所产生的效应仍未得到充分的评估。在对大范围实施生态系统修复有更深入的了解并将其纳入制定目标前，可先行对高纬度海域和新兴渔业捕捞进行预防性管理。

#### 2) 化学途径包括：

- **增加海水碱度：**通过化学方法增加海水碱度促进表层海水对大气中CO<sub>2</sub>的吸收。但需要在系统水平评估相关生态风险。
- **电化学方法：**利用CO<sub>2</sub>溶解度对pH的依赖性，通过电化学方法改变反应环境的pH值去除CO<sub>2</sub>或增强碳汇。
-

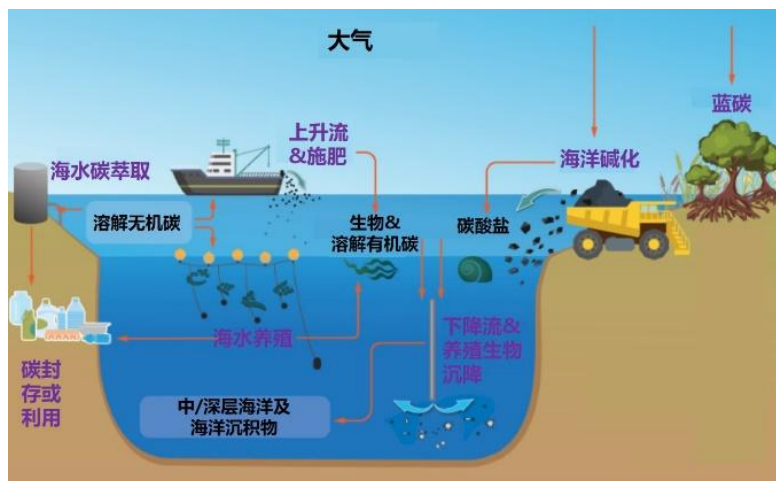


图2. 基于海洋的碳增汇途径 (Energy Future Initiative, 2020)

所有的海洋CO<sub>2</sub>移除途径，包括基于自然和基于地球工程的方案，都有局限性和利弊。世界自然保护联盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 将基于自然的解决方案定义为“保护、可持续管理和修复自然或人工生态系统，从而有效和适应性地应对社会挑战、并为人类福祉和生物多样性带来益处的行动”。将其作为应对气候变化策略的优势在于它可以带来多方面益处，包括保护和修复森林、农田、牧场、湿地和其他沿海生态系统，维持或提高其生态服务功能，从而更好地为人类健康和福祉，生态系统多样性保护和可持续生计发展提供支持 (Anderson et al., 2019)。基于地球工程的CO<sub>2</sub>移除途径多采用人工干预技术，虽争议较大，却已成为实现《巴黎协定》设定目标不可或缺的手段 (Lawrence et al., 2018)。

必须强调的是，采取基于生态系统的方案来应对气候变化至关重要，但必须全面评估其效应，包括对其自身生态系统的影响，与其他陆地和海洋系统的协同作用以及对海洋自然碳汇的影响。例如，自1997年以来，在台湾岛西北部香山湿地种植的红树林，对当地生态系统造成了一定的负面影响，包括底栖生物和鸟类栖息地的丧失、沉积物堆积和洪水，以及蚊虫泛滥。随后在2015年启动了红树林清除项目 (Chen et al., 2018)。由此可知，在实施基于自然解决方案过程中，基于生态系统的综合管理尤为重要。下面以泉州碳汇项目为例，展示基于生态系统的方案在蓝碳与其他生态系统和社会服务之间的共同效益。

#### 案例1：泉州碳汇项目

该项目在福建泉州湾湿地保护区的洛阳江红树林实施。该保护区成立于2003年9月，以亚热带潮间带湿地、红树林、水鸟、中华白海豚，以及其他濒危动植物为保护对象。保护区总面积7065公顷。早在1982年，外来物种互花米草 (*Spartina alterniflora*) 被引种到洛阳江口，并在2000年入侵该地区。2002年以来，当地政府和保护区管理局陆续清除入侵种互花米草，持续开展红树林修复。目前，洛阳江口的红树林总面积已经从原来的17公顷增加到467公顷，成为我国最大的人工红树林。洛阳江口以洛阳桥而著称。洛阳桥是宋代 (公元1059年) 建造的一座大型跨海石桥，也是我国四大古桥之一。1000多年来，它成为当地陆海交通的重要通道。围绕着这座古桥，这里已形成具有悠久海洋文化历史的当地社区。目前洛阳桥已作为泉州世界文化遗产之一，列入到联合国教科文组织《世界遗产名录》 (泉州: 宋元中国的世界海洋商贸中心)。现在的洛阳桥和红树林交相辉映，展现了人与自然的和谐共生。在洛阳江碳汇

项目中，项目区域内29公顷红树林是保护区在2010年清除入侵种互花米草之后种植的，主要有秋茄(*Kandelia obovata*)和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)两种本土红树植物。通过十年来的管理，修复区内的红树林已形成群落结构致密、郁闭度高的森林。2021年，厦门大学蓝碳团队根据自主研发编制的《红树林碳汇造林方法》对项目区内的红树林碳汇进行核算，确定了红树林碳汇的额外性和持久性。同年9月，项目中的2000吨CO<sub>2</sub>减排量在厦门市碳排放权交易中心的平台上完成交易。厦门兴业银行购买了该减排量，并与厦门航空联合推出“碳中和机票”。旅客自愿购买“碳中和机票”，可抵消与飞行有关的碳排放，并参与到红树林的保护和修复中。项目区域内的入侵种互花米草清除和红树林湿地修复，为濒危的珍稀动物，如黄嘴白鹭(*Egretta eulophotes*, IUCN红色名录易危种)、中华白海豚(*Sousa chinensis*, IUCN红色名录易危种)等提供栖息地，极大地提升了洛阳江河口湿地的生物多样性(Zhang et al., 2021)。由此，该项目也体现了固碳增汇和生物多样性保护协同提升的生态效益。此外，红树林湿地提升了洛阳桥的景观效果，不仅改善当地社区的生活环境，更为社区居民带来生态旅游的收益。因此，该项目同时体现了气候、社区和生物多样性协同效应。

### 2.1.3. 认知与政策的差距

对于决策者来说，与海洋碳汇相关的新出现的知识缺口包括：

- 在综合考虑气候-碳耦合系统和零排放战略和行动的影响的前提下，如何判断海洋这一碳储库是否可以持续吸收大气中的人为CO<sub>2</sub>及评估其减缓气候变化的能力；滨海蓝碳将如何演变？
- 在CO<sub>2</sub>浓度持续升高的情况下，如何对海洋生态系统的脆弱性进行评估？
- 如何作出决策和提出需求以适应不断变化的海洋？

与海洋碳移除相关的研究和政策需求包括：

- 开展海洋CO<sub>2</sub>移除与增汇途径研究，包括已知和未知的生物与非生物过程实现碳移除、封存的科学原理和增汇功效，分析技术瓶颈、评估生态和社会风险。
- 融合生态修复行动方案，协同增汇与生态保护，强化生态系统的综合管理。
- 建立全面的海洋增汇技术可行性评估体系，更好地监测、核查和报告已实现的碳封存储量、储存时限，评估潜在的负面影响，并进行动态调整和优化。
- 为海洋碳转化路径的副产品创造市场，并将其纳入碳交易市场。
- 加强宣传，培育公众参与和支持热情，同时建立有效的国家和国际管理框架，包括法律、政策等。

### 2.1.4. 优先行动建议

- 基于生态系统的应对和适应气候变化措施可以协同进行，对海洋增汇可产生正向的促进作用。应对气候变化行动包括减少温室气体排放以减轻对生态系统的破坏；利用基于生态系统的CO<sub>2</sub>移除途径助力气候行动并使生态系统受益，减少污染以提高生态系统的固碳能力。诸如灾害风险管理、可持续和气候智能型管理以及海洋空间规划和保护区等适应性措施的实施，将会降低临界点发生的风险。但这些措施的顺利开展很大程度上依赖于数据的获取、模式的建立、政策的制定和气候行动的推进。其成功的关键在于通过推动技术创新、建立伙伴关系和共同设计解决方案，提高生态系统的气候适应能力，在减缓和适应措施的实施过程中都应秉持基于生态系统的原则。

- 中国在近海和海岸带实施了若干不同规模的生态系统修复项目，有成功也有失败。碳中和战略的提出是一个很好的契机，我们可以通过审视过去的经验和教训，探索新的政策和最优方案。
- 为保护海洋免受气候变化的进一步影响，快速且大幅度的减排至关重要。同时，海洋也是实施缓解气候变化措施的战略要地。值得注意的是，在代表性浓度路径RCP 2.6情景下，人为CO<sub>2</sub>排放达到峰值后，大气CO<sub>2</sub>浓度将缓慢下降，据地球系统模式预测，陆地与海洋碳汇也会减弱(Dai et al., 2022)。因此，想要维持大气CO<sub>2</sub>浓度和温度在较低水平，除了持续移除大气中的CO<sub>2</sub>以外，还需清除储存在陆地和海洋系统中的CO<sub>2</sub>，未来在设计碳中和路径及其实施时应予以关注。基于海洋的解决方案为减缓和适应气候变化提供了更多选择和机会，应考虑将海洋碳汇纳入国家自主贡献范畴、并作为《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）的审议内容。这需要全方位的国际合作，同时也能提升中国在推动实施基于海洋的碳解决方案方面的话语权。

#### **主要建议：将海洋碳汇纳入国家自主贡献范畴和核算框架**

在过去200年，海洋是最主要的持续吸收大气CO<sub>2</sub>的碳库，对缓解气候变化起到了至关重要的作用。但值得关注的是，未来在低排放情景下，如果不与大气协同减碳，海洋碳汇能力可能会减弱，这在设计碳中和路径及其实施时应予以关注。**我们呼吁建立国际工作组共同推动将海洋碳汇纳入国家自主贡献范畴，并作为UNFCCC的审议内容。**

## 2.2 离岸碳捕集、利用与封存(CCUS)

### 2.2.1 海洋在捕集、利用和封存 CO<sub>2</sub> 中的作用

为减少大气温室气体浓度，全球已规划多种碳减排增汇方案，如节能提效、清洁能源替代、核电开发、植树造林、碳捕集、利用与封存（CCUS）等。其中，CCUS 方案的主要目标是实现人类活动产生的温室气体与大气隔离，主要方法是从大型碳排放源捕集 CO<sub>2</sub> 进而压缩，通过陆运、海运或管道输送至陆上或离岸封存平台，并注入地下或海底的地质储层(Zou & Zhang, 2017; Webb & Gerrard, 2019)（图3）。与通过自然吸收降低大气中 CO<sub>2</sub> 的方式（见第 2.1 节）相比，通过 CCUS 方式增加碳汇的效率可能更高，并且能够使 CO<sub>2</sub> 与大气的隔离更加彻底。

据统计，中国 2020 年 CO<sub>2</sub> 总排放量约为 106.7 亿吨，其中的 70 %、15 %和 6 %分别来自煤炭、石油和天然气的使用；仅燃煤电厂就贡献了化石燃料燃烧产生 CO<sub>2</sub> 的 50 %。为减少对煤炭的依赖，中国政府正努力推广可再生能源和天然气的使用，并将改善空气质量作为国家重大战略之一。此外，对工业生产过程中产生的 CO<sub>2</sub> 进行分离和捕集也在同步推进，包括制氢、合成氨、石灰石焙烧和氧化乙烯的生产等。为减少工厂的 CO<sub>2</sub> 排放，中国大力研发低碳煤炭燃烧技术和 CCUS 改进方案。然而，尽管中国已放慢了新建燃煤电厂的速度，其在中国电力结构中占比依然很大；加之一些大型电厂投产时长不到 15 年，仍处于服役初期，且有可能一直服役到 2060 年，这对国家实现“净零排放”目标是一大挑战。

中国有 34 个省级行政区，其中 13 个位于沿海地区，虽只占中国国土面积不到 14 %，却居住着全国 39 %的人口，消耗的能源占全国的 43 %，以及贡献了 64 %的国民生产总值，这在过去 40 年间是驱动中国经济发展的中坚力量(Michener, 2011)。然而，这些地区在发展经济的同时，也构成了中国东部和东南



部的 CO<sub>2</sub> 排放带，年排放量约 42 亿吨，占全国 CO<sub>2</sub> 总排放量的 41 % (Li, et al., 2021; Shan, et al., 2020)。在广东和福建等沿海省份，诸如发电厂、炼油厂和水泥厂等主要分布在离海岸线距离较近的县市，其能源的供给主要来源于化石燃料的燃烧 (Li, et al., 2021)，是主要的 CO<sub>2</sub> 排放源 (Michener, 2011)。而中国近海，分布着 11 个沉积盆地，约 170 万平方公里，其中海底地质层 CO<sub>2</sub> 的存储空间预估约 5730 亿吨 (Asian Development Bank (ADB), 2015)。这一储量相当于中国沿海省份超过 100 年的 CO<sub>2</sub> 排放量，有望解决沿海较发达地区的长期温室气体排放问题。

然而，实现 CO<sub>2</sub> 在深部地质层中的安全封存，需谨慎选择海上封存场所。在中国近海沉积盆地中，广泛分布着深部盐水层和渗透性岩层，包括中新世三角洲、滨海平原和浅海碎屑岩。这些盆地的区域性盖层中的第三纪地层含有较厚的盐水层，主要为浅海相和三角洲相，具有横向连续性。这其中玄武岩矿床能迅速与注入的 CO<sub>2</sub> 结合形成碳酸盐矿物，转化为不可自由移位的岩石，从而降低其向海水渗漏的风险。此外，通过对玄武岩矿床的探测还可进一步获取可与 CO<sub>2</sub> 反应的镁硅酸盐和反应性钙的分布信息。

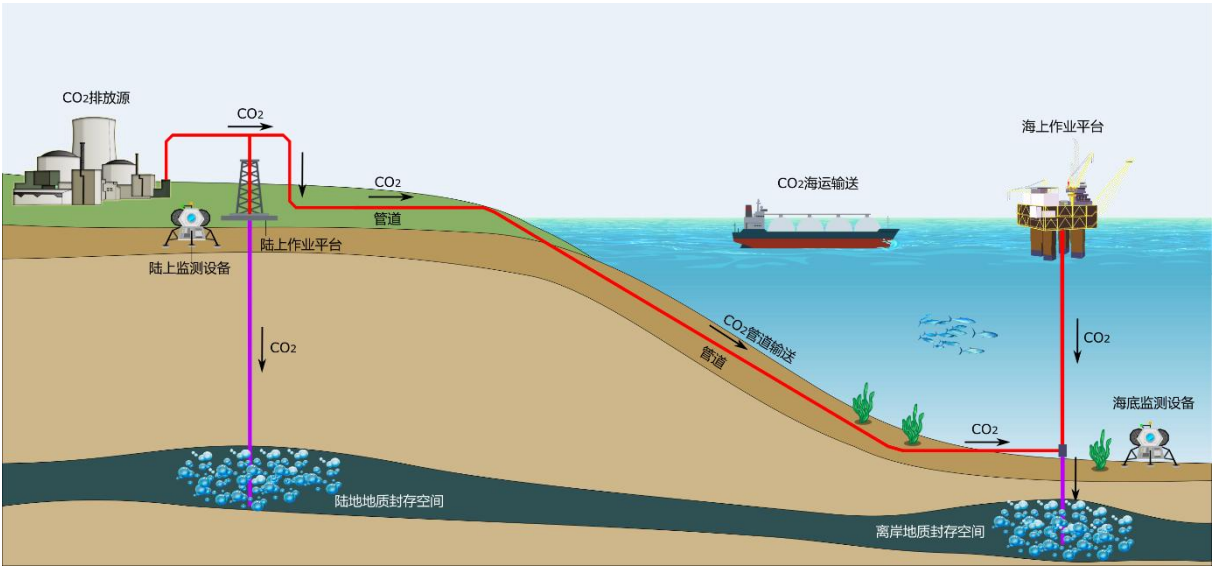


图 3：离岸 CCUS 工作流程图。离岸 CCUS 从工业碳排放源捕集 CO<sub>2</sub>，通过船舶或管道运输至封存平台，并将其注入海底地质储层，从而实现将 CO<sub>2</sub> 与大气永久隔离。

在过去十年中，中国、澳大利亚、巴西、加拿大、沙特阿拉伯和阿拉伯联合酋长国等国已相继投资建设了若干 CCUS 相关设施 (IEA, 2020)。中国已对其陆上和离岸碳封存潜力分别进行了评估 (Li, et al., 2021; Zou & Zhang, 2017; Zhou, et al., 2011; Zhou, et al., 2013; Zhou, et al., 2018; Li, et al., 2019)。评估结果显示，中国的陆上地质碳储存地大多位于西、北部地区以及远离工业发达和人口稠密城市的沿海地区，这额外增加了运输成本和潜在安全风险。然而，相比陆上碳封存，离岸碳封存远离人类聚集区，将不会存在诸如土地所有权、工农业活动影响、饮用水污染等潜在问题 (Schrage, 2009)。因此，离岸 CCUS 涉及的社会和法律问题更加简单。此外，CO<sub>2</sub> 注入海床以下时其地层压力变化不大，从而更易管控，将有助于降低离岸碳封存成本。

2.2.2 离岸 CCUS 现状



近年来,随着更多国家和地区声明其“净零排放”的目标,极大地促进了 CCUS 的发展。当前分布在全球的 21 个较成熟的 CCUS 产业链每年可捕集约 4 千万吨 CO<sub>2</sub>(IEA, 2020)。这其中若干项目运营时间最早可追溯到 20 世纪 70 年代,如美国德克萨斯州的天然气处理厂捕集 CO<sub>2</sub>并将其供应给当地石油生产商以提高石油的采收率(EOR)。自此,更多的国家和地区加入到 CCUS 项目的开发行列。挪威于 1996 年开发了第一个大型碳捕集与封存项目并在 Sleipner 海上气田投产,该气田目前已在深层盐水中封存了超过 2 千万吨 CO<sub>2</sub>。由于技术和商业的原因,在封存前需要将 CO<sub>2</sub>从工厂废气中分离出来,这增加了 CCUS 成本;为了降低成本,挪威政府于 1991 年开始对海上油气活动征收碳排放税,从而促进了 CCUS 的商业开发(IEA, 2016a)。此外,挪威政府还资助了石油和天然气公司联合开发的一个 CCUS 产业链项目,即 Longship 项目;通过该项目从水泥厂和废物发电厂捕集 CO<sub>2</sub>,并将其封存在北海的一个大型地质空间,即 Northern Lights。随后,越来越多的国家开始制定离岸 CCUS 实施纲要,如荷兰政府正支持对一系列清洁能源技术的开发,包括 CCUS 和低碳氢能;英国政府为新的离岸 CCUS 项目提供了公共资金支持等(IEA, 2020)。

迄今为止,全球已启动了 4 个大型离岸 CCUS 项目(Sleipner、Snøhvit、Quest、IBDP),这些项目预计每年可将 400 万吨 CO<sub>2</sub>注入海底地质储层(Ringrose & Mechel, 2019),而中国在离岸 CCUS 方面尚处于试点阶段。2021 年中国在南海北部珠江口盆地启动了第一个离岸 CCUS 示范性工程,探索将 CO<sub>2</sub>储存到海底地质空间的技术可行性。该项目计划在 2026 年前在海底封存 146 万吨 CO<sub>2</sub>,这将实现海上石油生产的近零排放(Pekic, 2021),同时也为中国离岸 CCUS 的开发提供成本、运营和市场等重要参考信息。此外,该项目也测试了海上封存 CO<sub>2</sub>的安全性,验证了离岸 CCUS 作为一项长期且可快速实现碳减排策略的可行性,尤其是对于计划提前实现“碳中和”目标的工业化程度较高的沿海省份有着重要的意义(Ringrose & Mechel, 2019; Brus, 2009)。

### 2.2.3 认知缺陷和政策缺口

CCUS 的运营成本变化很大,如通过管道输送 CO<sub>2</sub>的成本取决于管道长度、直径和布放的地形以及路线等,每 250 公里价格从 2 美元/吨到 15.3 美元/吨不等;在枯竭的油气田中存储 CO<sub>2</sub>比在深部盐水层存储更便宜,封存成本从 8 美元每吨到 25 美元每吨不等(Schmelz et al., 2020)。许多早期的 CCUS 项目都关注 CO<sub>2</sub>捕集和利用的工业化应用。例如,在天然气加工的过程中,为了满足市场需求或液化天然气(LNG)生产需要,通常要分离出其中的 CO<sub>2</sub>,以避免 CO<sub>2</sub>腐蚀生产设施或影响生产流程。在其他应用中,如生产生物乙醇或蒸汽甲烷重整制氢,其产出 CO<sub>2</sub>的纯度相对较高,这降低了技术成本和捕集过程所需的能量。全球大型工业设施在 2000 年时所捕集的 CO<sub>2</sub>几乎全部来自天然气加工厂,但目前其他来源的 CO<sub>2</sub>已占总数的三分之一(International Energy Agency (IEA), 2020)。

在过去十年,世界各国在 CCUS 上的投资虽增加了三倍,但还远低于预期。国际能源署在 2009 年制定了 CCUS 战略路线图,计划在 2010 至 2020 年间开发 100 个大型 CCUS 项目,每年封存约 3 亿吨 CO<sub>2</sub>,以实现全球气候目标(IEA, 2009)。然而,实际建立的 CCUS 项目仅封存了约 4 千万吨 CO<sub>2</sub>,为当初设定目标的 13%。2020 年,全球对 CCUS 的投资占清洁能源和效率技术投资的不到 0.5%,远不如在其他清洁能源技术上的投资(IEA, 2020)。CCUS 没有按照既定目标快速发展,究其原因,首先是运行成本高和缺乏相关政策的支持。在缺乏碳交易“奖惩机制”的情况下,CCUS 对绝大部分企业可能没有任何商业意义。

此外, CCUS 设施的建设成本高昂、CO<sub>2</sub> 供应链整合困难、CCUS 设施维护技术不成熟、商业风险分摊难, 融资难等因素, 也都严重阻碍了 CCUS 的发展。

以上问题在离岸 CCUS 的发展上体现得尤为明显, 尽管其比陆上 CCUS 安全性更高(Dooley, et al., 2009; Singleton, et al., 2009), 但因对其投资成本 and 技术的掌控存在更多的不确定性因素, 众多决策和投资机构对其可行性和有效性仍持怀疑和观望态度(Ringrose & Mechel, 2019), 归根结底, 是因为缺乏大规模综合商业运营的先例作为投资参考(IEA, 2016a)。此外, CCUS 需要大量能源供给, 这潜在降低了企业运营效率; 虽然在技术的快速更迭、发展的时代背景下, 先期参与 CCUS 的机构所面临的风险溢价相对较低(IEA, 2016b), 但其严重依赖于一个国家或地区在这方面出台的相关政策。

当前, 中国对发展离岸 CCUS 尚缺乏清晰的方案, 包括制定相应的管理标准、作业程序和相关法律法规框架, 用以指导和约束私人机构或社会的参与(IEA, 2016b)。这种不确定性严重阻碍了未来离岸 CCUS 项目的开发, 可能会出现 CCUS 项目开发商隐瞒信息, 甚至忽视公众意见等不端行为。为避免类似“无规则开发”现象的出现, 国家、省和地方各级行政部门需要制定相应的法律法规, 作为离岸 CCUS 项目大规模开展的基础条件和根本依据(Chen, et al., 2015)。

CCUS 项目还具有跨行业、跨地域和跨部门等特点, 中国的主要 CO<sub>2</sub> 排放源分散在沿海的一些产业集群; 海洋地质调查和勘探任务主要由一些大型国有石油企业承担; 离岸 CCUS 技术的研发则主要依托一些研究型大学和研究所进行(Zhang, et al., 2013); 而财务支持和债务担保主要由一些国有银行提供。尽管参与机构众多, 但参与方的整合效率往往不高: 如研究机构在开发离岸 CCUS 相关的技术、金融和政策框架方面发挥了重要作用, 但却很少有机会参与到商业化运行的离岸项目中测试其研究成果的可行性, 并对相关潜在风险进行预判(Schmelz, et al., 2020)。

#### 2.2.4 政策建议

在未来几十年, 为实现碳减排目标, 中国政府和企业在离岸 CCUS 方面需要制定一些必要的解决方案, 如持续科技创新、降低运营成本、促进 CO<sub>2</sub> 封存发展以及对环境和商业风险的管理(IEA, 2016b)。为降低离岸 CCUS 运营的成本和风险, 中国政府应该支持与其相关的投资环境政策并对其进行商业模式运作(Schmelz, et al., 2020)。

中国应正式宣布优先考虑离岸 CCUS 项目, 为政府机构、企业、金融机构、公众和其他利益攸关方提供参与动力, 共同创造和构建一个以 CCUS 为聚焦点的强有力的金融支持环境。具体建议如下:

- **构筑有序监管下的自由市场环境以建立可行的商业模式**

在中国, 由于缺乏持续性的离岸 CCUS 开发投入, 且尚未制定“标准化”的财政支持模式, 还无法有效评估其商业风险(IEA, 2016a)。大型离岸 CCUS 项目复杂且成本高昂, 这其中可能存在巨大的债务风险, 而对其前期资金补助将有助于填补投资缺口(IEA, 2016a)。当前中国的 CCUS 项目主要由一些国有企业开发, 然而这些企业经常面临与私营机构不同的融资渠道和框架, 特别是在市场环境下受严格监管运营的一些企业, 如神华集团和华能集团(IEA, 2016a), 而私营机构可以在自由竞争环境下开展项目活动(Costa, et al., 2019)。在自由市场竞争环境下, 将产生趋于最佳的碳排放源和碳封存空间的匹配方式, 从

而实现离岸 CCUS 低成本高效率的商业运营(IEA, 2016b)。同时,为降低企业的参与成本鼓励其积极投资,中国政府还需要制定相应的碳排放税收政策。在这方面可参考挪威和美国等国推出的碳税收政策;例如,美国的 45Q 税收抵免法案(Lockwood, 2018; Herzog, 2016) 规定,每利用一吨 CO<sub>2</sub> 将获得超过 35 美元的补助,而每封存一吨 CO<sub>2</sub> 将获得超过 50 美元的补助(Jones and Lawson, 2021)。如果中国制定相应的碳排放税收政策,将为企业协调发展供应链提供更加可行的离岸 CCUS 解决方案(IEA, 2016b)。在这其中,大部分离岸 CCUS 工程成本需要被考虑进去,包括建造和维护离岸管道和封存平台的成本(d'Amore, et al., 2021)。

- **开展多方参与高效协作的离岸 CCUS 全产业链示范性项目**

离岸 CCUS 的成功实施需要社会各界多方的共同参与和高效协作。在设计离岸 CCUS 项目时,需要全方位检查和评估各阶段各程序的风险,包括合作研究海底碳储层的可行性、碳源和碳汇数据库的匹配、科学技术认知缺口、前端工程与设计、海底碳渗漏监测以及外部质量保障等。此外,还需要解决具体的非技术类不确定性问题,包括完整供应链、监管框架、负债、金融驱动因素、社会可接受性,以及在监管框架下保障女性在离岸 CCUS 项目中拥有平等的机会等。对所有这些基本因素的考量都需要基于一个完整明确的监管框架。因此,为加快离岸项目的发展,并将其不确定性和综合风险降至最低,尤其有必要持续开展全链条 CCUS 技术的研究和推动离岸 CCUS 试点示范项目的开发(Gerrard, 2020)。这其中,突破科学、技术、金融、管理和社会各方面的交互障碍是当前高效实施离岸 CCUS 项目的重大挑战之一。

到目前为止,在中国离岸 CCUS 项目没有实现工业利用且取得经济效益的情况下,其总成本每吨超过 350 元人民币(Xu, et al., 2021)。为提高经济效益,一些企业采用向地质储油层注入 CO<sub>2</sub> 来增加原油采收率(CO<sub>2</sub>-EOR)(Li, et al., 2019)。因为地质层中的原油可由注入的超临界 CO<sub>2</sub> 替代(Tzimas, et al., 2005),通过 CO<sub>2</sub>-EOR,大部分注入地层的 CO<sub>2</sub> 将在合适条件下永久封存于地质层中,同时提高原油的采收率(Tzimas, et al., 2005),使其成为一种具有经济效益的碳减排方式。这种方式可有效增加原油产出从而间接降低碳封存成本。与传统的原油生产方式相比,CO<sub>2</sub>-EOR 可额外生产 5-17% 的储层原油,预计每年可为中国提供超过 1 亿吨的 CO<sub>2</sub> 储存空间,但其经济可行性取决于每吨 CO<sub>2</sub> 的输送成本和国际原油价格(Wei, et al., 2015; Zhang, et al., 2015)。即便如此,与中国沿海沉积盆地海底盐水层相比,海上油气田的储层容量极其有限(IEA, 2016b)。因此,预计 CO<sub>2</sub>-EOR 可在短期内发挥优势,而中长期可能还是要依靠海底盐水层来大规模封存 CO<sub>2</sub>。

在中国沿海的沉积盆地中,2.5% 为油气田,现有的离岸基础设施可重新投入使用,用于 CO<sub>2</sub> 的运输和注入,这将有效缓解 CCUS 的资金和政策压力,也将有利于完善相关的碳市场机制(Birol, 2020)。对于一些枯竭的油气田,尤其是在短期投资不足的情况下,这些离岸基础设施可被重新用于短期大规模碳封存从而减少建造新设施的投入(Alcalde, et al., 2019)。然而,一些现有的离岸设施面临老化的问题,需科学评估其再利用周期。因此,需要制定多阶段的技术和时间评估程序,来对这些现有平台的适用性进行量化分类。

为保证离岸 CCUS 项目相关参与方的投入产出比,应设计一个将 CCUS 各环节程序(包括运输、封存、捕集、利用)分离的运营模式(IEA, 2016a),使参与机构各司其职,发挥优势和专长以实现效率最大

化(Lockwood, 2018)。然而，该模式需要一个完整且无缝衔接的监测、报告和核查系统，以记录 CO<sub>2</sub> 的捕集、运输和封存的整个过程。同时，应该为碳排放源提供灵活的管理服务，例如对碳储存空间的预定制，保证时间和空间的碳源和碳汇在数据库中的最佳匹配。为了有效地进行碳源-碳汇数据匹配，需要为每个碳排放源选择最经济适用的地质储层(Schmelz, et al., 2020)，例如将中国东部和东南部的发电厂排放的 CO<sub>2</sub> 与各个离岸沉积盆地碳封存空间分块分时进行匹配。

- 详尽的地质勘探和保证海洋环境安全

离岸 CCUS 项目最初的开发是一个成本高昂且耗时的过程，需要经过详细的地质测绘，废弃离岸油井选址，对可能的储存空间进行科学评估。然而，当面临巨额投资而无法评估收益时，大多数投资机构或企业都会对离岸 CCUS 技术开发望而却步。在中国，大型国有企业可以投资支持离岸 CCUS 项目的早期工作，如资助离岸地质调查和共享数据库建立等。这将有助于推动离岸 CCUS 的发展和进步，保证一定的投资回报比，且有助于通过采购政策加快中国国内碳交易市场的完善和与国际接轨的速度(IEA, 2020; Lockwood, 2018)。

此外，离岸 CCUS 的安全性是政府和社会关注的一个关键点。海底 CO<sub>2</sub> 渗漏可能对海洋生态系统造成负面影响，而确保其安全无碳渗漏是当前的一项重大技术难题和工程挑战(Blackford, et al., 2014)。因此，需要依据详尽的海底勘探数据选择合适的碳封存空间，并对相关海底环境进行长时间安全监控(Robinson, et al., 2021; Flohr, et al., 2021)。同时，离岸 CCUS 作业需要消耗大量的能源，而海上的风能、太阳能、潮汐能等可再生能源可为其提供低碳能源(Gerrard, 2020)（见第 2.4 节）。为长期可持续的离岸 CCUS 发展提供低碳能源保障，不仅可用于封存当前沿海工业区捕集的 CO<sub>2</sub>，未来还有望从空气或海洋直接捕集封存 CO<sub>2</sub>。

**对 CCUS 的主要建议**

鉴于在可预见的将来，人类依然无法完全摆脱对化石燃料的依赖，为减少其产生的 CO<sub>2</sub> 向大气的排放，加快推进海洋 CDR 和离岸 CCUS 的科技创新及其法律管理框架的制定变得日益紧迫。**建议以积极的管理政策和开放的金融手段支持海洋 CDR 和离岸 CCUS 的发展及其技术研发。**

## 2.3 降低涉海活动碳足迹

### 2.3.1 涉海活动碳排放概况

人类活动不仅在陆地上产生大量的 CO<sub>2</sub>，广泛的涉海、用海活动也对 CO<sub>2</sub> 等温室气体排放有着重要的贡献。与此同时，依靠高产的生态系统，海洋本身具有强大的固碳功能，吸收了约 1/3 的人为排放 CO<sub>2</sub>（IPCC, 2019）。人类在海洋及海岸带中的活动不仅直接增加了 CO<sub>2</sub> 总排放量，还导致重要海洋生态系统衰退乃至丧失，从而降低海洋吸收 CO<sub>2</sub> 的能力。减少涉海活动中产生的 CO<sub>2</sub> 及修复海洋生态系统的固碳功能对于人类社会适应和缓解气候变化危机至关重要。

## (1) 航运业

航运业是涉海活动中最大的碳排放源，主要来自于船舶行驶过程中的化石燃料燃烧。研究表明船用燃料燃烧每年产生的 CO<sub>2</sub> 当量为 10 亿吨，是人类活动总排放量的近 3%，且在当前发展趋势下，这个数字将于 2050 年达到 20 亿吨（Hoegh-Guldberg et al., 2019）。

目前，大多数船舶发动机使用的重油燃料（HFO）会造成以二氧化硫为代表的严重空气污染。因此，一些船东企业以减少污染为导向，正在着手建造动力系统更环保的新船，或改装现有船舶以使用液化天然气（LNG）等替代燃料。相较于重油燃料，液化天然气可降低近 20% 的 CO<sub>2</sub> 排放，但其未充分燃烧产物甲烷是一种具有更强温室效应的温室气体，应对气候变化的成效相当有限。以清洁能源完全替代化石燃料是最佳解决方案，但在当前科技水平下尚不能实现。

## (2) 渔业捕捞

与航运业类似，海洋捕捞渔业的碳排放主要亦来自于船只的燃料消耗。其次是部分渔具作业时破坏海底（尤其是在大陆架区域）进而间接引起的碳排放，但目前对这方面问题的认识仍较为不足。2016 年，全球渔船动力燃料燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 排放当量约为 2.07 亿吨，其中工业化捕捞占 77%，小型渔业占 23%（Greer et al., 2019）。考虑到非法、未报告及不受管制捕捞（IUU fishing）的碳排放难以纳入统计数据，实际的排放量可能会更高（FAO, 2014）。针对不同捕捞对象的渔业所产生的碳排放也不尽相同，捕捞底栖鱼类（demersal fish）、甲壳类（crustaceans）和体长大于 30 厘米的浮游鱼类（pelagic fish）分别占总排放量的 42%、24% 和 23%（Parker et al., 2018）。

尽管海洋渔业所产生的碳排放量逐渐增加，但全球渔获量却呈下降趋势（Greer et al., 2019）。耙刺网、底拖网和桁杆拖网等燃料密集型捕捞方式不仅排放更高，而且极易对海床和珊瑚礁等水生动物栖息的重要生境造成破坏，使得渔业资源进一步枯竭，从而影响海洋生态系统的碳汇功能（McConnaughey et al., 2020）。这种不可持续的渔业资源开发模式将导致渔民继续增加捕捞努力量，进而增加单位渔获量的燃料消耗，形成 CO<sub>2</sub> 排放和海洋生态系统破坏的恶性循环。

## (3) 海水养殖业

相较于养殖活动本身，海水养殖业的碳足迹主要来源于其上下游的产业，如上游的水产饲料生产过程和下游的加工及运输。中国作为全球海水养殖第一大国，主要养殖品种包括贝类和藻类，2020 年占全国海水养殖产量的 81.6%（农业农村部渔业渔政管理局等，2021），这些低营养级品种的养殖几乎完全不依赖投饲，因此基本没有投饲污染及相应的饲料碳足迹问题。非投饲海水养殖大多依赖海上或滩涂水域的网箱或筏式养殖，外部投入和污染产出都较少（操建华，2018），但养殖活动对滨海湿地的大规模围垦、网箱养殖的不合理布局等情况也会导致严重的有机质、营养盐和重金属污染，影响养殖区水体和周边海域的水质（吕兑安等，2019）。上述人类活动施加的压力进一步导致红树林、海草床、盐沼等典型滨海生态系统及其服务功能显著退化，从而削弱了海洋对 CO<sub>2</sub> 的吸收和固定能力。

## (4) 海产品的加工和销售

海产品在收获后的贮藏、加工和运输等过程都存在巨大的能源消耗。根据生命周期评估（Life Cycle Assessment, LCA）原则，无论是捕捞或养殖的海产品，收获后的（船上和岸上）冷链贮藏、加工和销售都属于其生命周期中的一部分，且这些过程中的能源消耗也产生大量的 CO<sub>2</sub> 排放。预测表明，未来海产品产业链的能源需求会不断增加，除了捕捞渔船仍然需要依赖化石燃料，其他生产过程有更多选择，但替代性能源的价格会反映在最终产品上，有潜在可能从消费端影响粮食安全（FAO, 2015）。

通过新兴科技的应用及管理措施的落实，可以减少人类在涉海活动中产生的碳排放，并增强海洋的碳汇功能。已有研究预测了在充分满足各种条件的前提下各行业的减碳潜力：海洋航运业有望在 2030 年将减少温室气体排放 2.4-4.7 亿吨 CO<sub>2</sub> 当量，并在 2050 年减少高达 9-18 亿吨 CO<sub>2</sub> 当量；滨海生态系统修复则到 2030 年有望增加吸收温室气体 3.2-8.9 亿吨 CO<sub>2</sub> 当量，到 2050 年达 5-13.8 亿吨 CO<sub>2</sub> 当量；海洋捕捞业和海水养殖业有可能在 2030 年减少温室气体排放 3.4-9.4 亿吨 CO<sub>2</sub> 当量，到 2050 年减少高达 4.8-12.4 亿吨 CO<sub>2</sub> 当量（Hoegh-Guldberg et al., 2019）。

## 2.3.2 适应和应对策略

### （1）航运业

限制航运业脱碳减排的瓶颈是可大规模应用于远洋船舶的零碳动力系统开发。氢气和氨是可靠的替代性零碳燃料，其中氢燃料电池可提供零碳电能，氨可应用于内燃机或燃料电池中（Balcombe et al., 2019）。相较于易稳定储存的传统重油燃料，氢燃料对储存空间和条件提出更高要求，需要同步进行港口及船舶设施的配套更新。尽管氢气和氨长远来看具有成本和环境保护方面的优势，但目前低成本氢能的研究进展仍然不甚明朗。短期内，难以兼顾经济效益与环境效益是气候友好导向的能源转型的主要阻碍。核能也是一种零碳能源，但由于存在安全风险，仅用于极少数国家的军舰或特殊用途船舶上，并不具备在民用行业推广的条件。为了推动船用燃料的低碳转型，船东、造船业、学术界和政治界应共同致力于拓展清洁燃料行业的规模。

此外，碳排放责任的不明确导致难以将减排目标进行合理分配。在国际层面，基于船舶燃料的销售地点、船舶的注册地、船舶货物的来源或目的地的不同划分方式，都将导致各国的排放责任和相关成本的截然不同。IMO 正在协调其 174 个成员国之间的海运船舶排放问题，但“共同而有区别的责任”使得每个国家的利益难以用统一的标准衡量。在市场领域，利益的分化也导致了不同的应对策略。国际贸易行业驱动了全球 90% 以上的海运活动（Balcombe et al., 2019），应优先在航运业中实施碳税或碳补贴，以鼓励船东投资开发并应用替代性燃料技术。然而，船东和租船人在如何分担燃料成本和补贴上极易产生分歧，从而阻碍燃料转型升级的进程。此外，已经向液化天然气投资的船东也不赞成向氢气等清洁能源转型。

对于 IMO 这类国际组织而言，需要就如何明确分配排放责任制定国际标准，并呼吁拥有大型船队的国家积极响应，推动标准落地。然而 IMO 的决议需要数年时间才能制定，其成员国的批准时间可能更久，因而短期的突破性进步不应依靠国际组织来牵头实现。

目前，航运业短期内可行的脱碳措施包括：推进设计效率更高的船舶动力系统、替换更清洁的燃料、建设配套的港口保障设施和确立排放的责任方。长期的适应性和应对性措施应着重于研发零排放的清洁能源。

## （2）渔业捕捞

鉴于船用零碳动力技术尚未取得突破性进展，捕捞渔业面临着和航运业同样的困境。除船只动力的改进问题外，主要可通过转变渔具渔法来减少其碳足迹，如促进耙刺网、底拖网和桁杆拖网等需要大量化石燃料的作业方式转变为刺网、延绳钓等碳足迹更低的方式。这种转变也可以减少底拖网扰动海底沉积物而产生的碳足迹。渔业管理部门还应逐步取消对环境有害的渔船燃料补贴和燃料税豁免，同时为转变渔具渔法提供经济和其他形式的激励措施，如为燃料消耗较低的作业方式分配专属的捕捞配额或捕捞区域。

此外，管理部门及海产品经销行业也应注重培养消费者的脱碳减排意识，并优先向市场提供低碳足迹的海产品。消费者对相应产品需求的增加将促进捕捞业向能耗更低、环境影响较更的渔具渔法转变。

事实上，通过有效的种群管理手段可以修复海洋渔业资源，至少可以达到与最大可持续产量（Maximum Sustainable Yield, MSY）相当的水平。前沿研究表明，修复特定的渔业种群不仅可以增加生物中的碳储量（进而可能沉降至海底），还能够通过海洋生态系统的结构和功能来间接影响碳循环过程和碳封存。这应当成为渔业管理的目标导向。此外，在新兴的渔业中进行前瞻性管理可以帮助保护这种人们尚未充分了解的巨大固碳潜力，已成为渔业可持续发展的新内涵。前瞻性管理手段尤其应当关注鱼类生产力最有可能增加的高纬度地区（Brander, 2007），以及海洋中层这种对向下固碳过程至关重要的生态系统。

## （3）海水养殖

海洋和海岸带生态系统的可持续管理、养护和修复对持续提供人们赖以生存的固碳和其他生态系统服务至关重要（IUCN, 2017）。通过在养殖区种植特定植物进行人工湿地修复（如碱蓬、芦苇等），可处理养殖尾水中的污染物（吕兑安等, 2019）。或通过“退养还滩”政策收回养殖滩涂，恢复沿海生态系统，可以减轻水产养殖所导致的生态系统服务功能退化。防止这些生态系统栖息地转变为其他土地用途的政策，例如对沿海开发行为的严格管理和海岸带空间规划，也可以有效保护海岸带的重要生境（见 3.1.3）。此外，推广使用低碳足迹、不含野生鱼类成分的水产饲料也能够帮助减少养殖的 CO<sub>2</sub> 排放。

除了减少海水养殖带来的负面影响外，还可以通过养殖特定品种（如海藻和贝类）来主动减排增汇，以此来应对气候变化。海藻养殖是海洋领域中最具规模的基于自然的解决方案（NbS）之一（FAO, 2013），也是“碳汇渔业”的主要体现形式，全球海藻每年可吸收 6100 万-2.68 亿吨当量的 CO<sub>2</sub>（Krause-Jensen & Duarte, 2016）。海藻养殖本身既可以捕集 CO<sub>2</sub>，起到强大的碳汇作用，还有助于保护沿海土地免受洪水和侵蚀的影响；海藻的进一步加工也可以替代一系列排放密集型产品，如用于制备生物燃料以替代化石燃料，以及作为替代性饲料以减少养殖动物的甲烷排放（UNGC, 2021）。值得注意的是，通过大型海藻的固碳功能来应对气候变化，必须要将其部分转化为不产生呼吸作用的产品，才能实现长期储存。规模

化地利用养殖海藻来减少陆地农业的温室气体排放是未来的一大机遇，例如以海藻改良土壤或作为牲畜饲料。

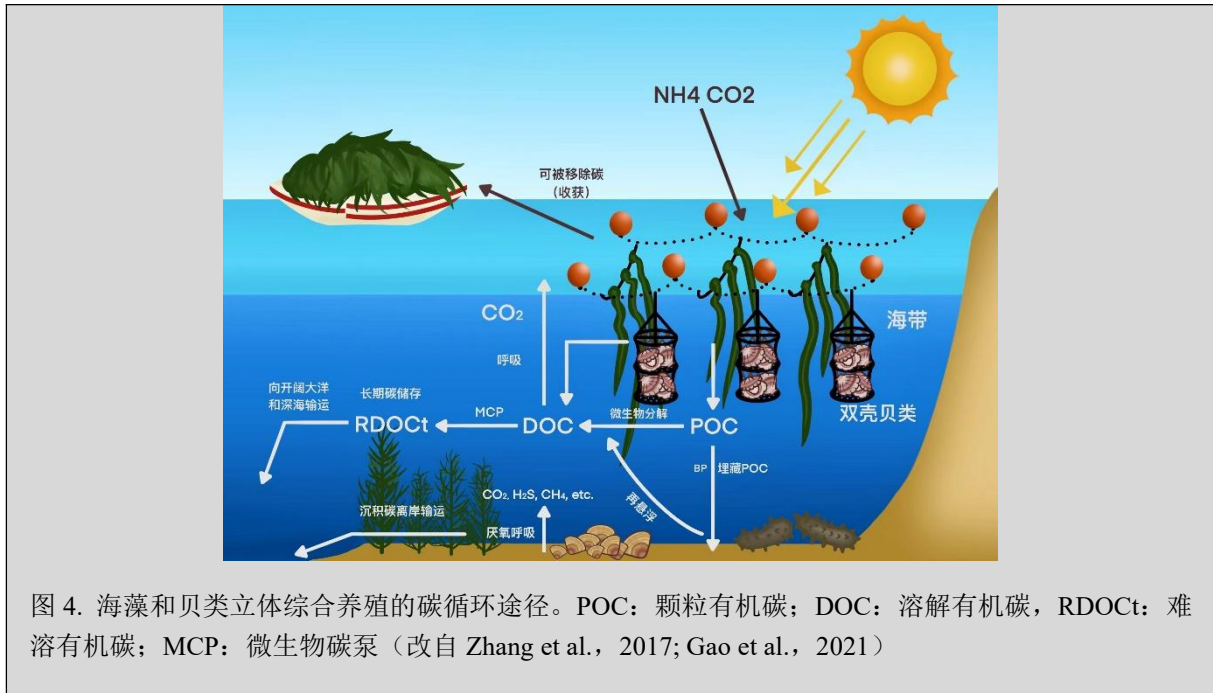
多营养层次综合水产养殖（Integrated Multi-trophic Aquaculture, IMTA）是将不同营养层级的生物以适当比例的混养，从而创建环境可持续性、经济稳定性和社会可接受性平衡的系统（Barrington, 2009; Zhang et al., 2017）。考虑到以海藻为主的多营养层次综合水产养殖可减轻养殖活动污染，增加海岸带社会的气候韧性，可以通过碳交易对海藻养殖者进行经济补偿（Duarte et al., 2017; Gao et al., 2022），因而IMTA 可以看作是缓解和应对气候变化的一种 NbS。中国山东桑沟湾实践的以海带和贝类为主要品种的IMTA 模式可以被看作一个典型的 NbS 案例（案例研究 2）。

案例研究 2：桑沟湾多营养层次综合养殖模式

山东荣成的桑沟湾是中国海水养殖业发展最为成熟的海域之一，早在上世纪 80 年代，就涌现了以海带和栉孔扇贝为主要品种的多营养层次综合养殖模式（方建光等，1996），并得到了世界范围的认可和推广（Fang et al., 2016）。该模式实质上是一种基于自然的解决方案：贝类滤食海水中的浮游植物和有机碎屑等，代谢出一定量的无机氮；海带则通过光合作用吸收无机氮来生长繁殖。贝、藻间养的模式实现了海域内无机氮的供需平衡，藻类还可释放溶解氧以防止海水缺氧，既减轻养殖活动的污染，亦可提升养殖产量及质量，还能提供一定的生态系统服务功能。经过数十年的发展，养殖者通过调整养殖深度充分利用不同水层的特性，现已在桑沟湾内形成了包含海带、裙带菜、扇贝、牡蛎、鲍鱼等多品种的立体混合养殖模式。

除食物供给和水质净化调节外，养殖品种的固碳能力使得桑沟湾养殖系统具备气候变化应对功能（图 4）。大型藻类通过光合作用消耗无机碳，贝类通过吸收海水中碳酸氢根形成贝壳，由此固定的碳元素均可通过收获而从海洋中移除。研究表明，海带吸收的碳元素占桑沟湾内养殖品种总吸收碳元素的 86%（张朝晖等，2007）。按照湾内的典型养殖密度折算，单位面积的海带固碳能力非常突出，是陆地上常见绿化树种固碳能力的 3 至 4 倍之多（毛玉泽等，2018）。中国作为世界贝、藻类养殖大国，有潜力通过这类模式实现食物安全保障和气候变化应对的双重目标。2022 年，中国已在福建完成了历史上首宗海水养殖碳汇交易，未来随着这类激励性制度的完善，基于生态系统的养殖模式也将具有更加广阔的可持续发展前景。





#### （4）海产品的加工和销售

减少海产品收获后产生的碳足迹主要依靠降低能耗和能源转型。宏观来看，通过发电方式的改变、输配电效率的提升、海产品运输过程的优化等手段，可在海产品的加工和运输阶段减少碳足迹。推动消费者选择本地生产的海产品可以减少不必要的运输。同时，减少海产品的浪费（如促进海产品加工废弃物在养殖业中的回收利用）也有一定的作用（Ruiz-Salmón et al., 2020）。考虑到当前针对海产品的 LCA 研究尚不全面，加强对全产业链的了解及数据收集将有助于开展减碳行动。

海产品在收获过程中（包括捕捞和养殖）往往以个体和小规模从业者为主，其收获后过程的企业化程度则更高。管理部门和行业协会应积极推动相关企业获得社会责任认证，在减少生产过程中碳足迹的同时，也减少其他的环境污染的负外部性、促进就业、加强劳动权益保障等，从而帮助企业树立正面形象、满足管理要求、推动可持续发展。特别地，考虑到海产品加工行业中女性从业者占到绝大多数（FAO, 2016），企业的社会责任认证也将成为促进女性权益和性别平等的一个有力抓手。

##### 2.3.3 认知缺失和政策缺口

海洋是连通全球各大洲和国家之间的纽带，人类的涉海活动亦具备着鲜明的跨国界属性，因而对减少海洋碳足迹的全球治理工作提出了严峻的挑战。这种挑战首先体现在航运业的脱碳努力当中。即使科学技术取得了革命性的突破，使得人们可以使用低碳乃至零碳的燃料为船舶提供动力，转型的责任和成本依然难以精确分配到特定的国家。作为统筹协调全球航运事务的中枢，IMO 应当为航运业减少碳排放建立一个指导性框架。但对于纷繁的运输航次而言，依据何种标准来界定其产生的碳排放责任，这牵涉到不同国家之间巨大的利益冲突。若各个海运大国的高层次政治力量无法就此达成共识，IMO 亦难以实施有效的协调措施。

相较于航运业而言，海洋捕捞业的跨国界属性较弱，管理边界更为明确。但捕捞业是庞大人群就业和基础生计的依托，尤其是在发展中国家，个体从业者构成的小型渔业市场占主导。渔民所采用的渔具渔法往往受制于地理环境、渔获物组成、乃至文化传统，而这些方面与地域特征联系紧密，不易快速转型。同时，在全球渔业资源开发趋于饱和的情况下，捕捞业的经济收益相对有限且不稳定，渔民也难以承担额外的转型成本。这些因素共同导致在捕捞渔民当中建立减碳的观念相当困难。除此之外，随着海产品运输流通日益便捷，减碳驱动的作业方式改变也可能带来广泛的食物安全问题，从而提出了更大的跨边界治理挑战。如果世界贸易组织(World Trade Organization, WTO)成功地就渔业补贴问题达成协议，它将成为一项可执行的全球规则，不仅有助于解决过度捕捞问题，还会对碳排放产生间接影响。诸如此类以生态和经济效益为导向的新兴渔业管理手段，在证明可行的基础上，有能力协助达成气候目标。渔民和渔业利益集团（尤其是小型渔业）需要就此进行长期的协商讨论。

从全球的海产品产量来看，海水养殖正在逐步替代海洋捕捞。尽管海水养殖的碳排放量估算尚不清晰，但同样需要在养殖业中加强建立减碳观念。随着经济水平提升，消费者日益青睐高价值的海产品，可能导致在这些高营养级物种的养殖中投入更多饲料；当前蓬勃发展的循环水养殖系统通常也需要高水平的能源投入。除此之外，海产品（包括捕捞和养殖）的保存、运输、销售等收获后过程也显著贡献了碳排放。为了制定相应的减碳政策，必须加强对海产品的 LCA 研究，并覆盖至完整的产业链。值得注意的是，海水养殖本身也可成为适应和应对气候变化的有力手段，即“碳汇渔业”。藻类和贝类是捕集温室气体良好载体，且养殖过程几乎不需要饲料投入，能够产生负碳足迹；但促进此类养殖方式的激励手段（如碳交易机制）目前仍处于初步试点阶段。

### 2.3.4 优先行动建议

减少人类在涉海活动中产生的碳足迹较难取得一蹴而就的成效，很大程度上依赖于科技水平的提升和突破。但我们应当在海洋产业中迅速且牢固地树立鲜明的减碳意识，并关注性别平等问题，由此制定循序渐进的计划，并从当下开始积极努力。

短期尺度上，各行业可以开展的行动包括：

- (1) 加快船舶设计优化和动力技术创新，提升航运船舶化石燃料的使用效率；
- (2) 执行更加严格的渔业管理手段，管控底拖网等高能耗的渔具渔法，逐步取消渔船燃料补贴；
- (3) 发展特定类型的海水养殖（如海藻和贝类），协同实现增加碳汇和保障食物安全的双重目标；
- (4) 探究渔业和养殖业中的性别关系及性别平等问题，揭示女性的贡献并促进其有效参与可持续、低碳海产品的生产决策；
- (5) 科学制定海岸带空间规划，建设范围更广、保护程度更完全的海洋保护区，强化滨海湿地的保护和修复，充分发挥海岸带生态系统的碳汇功能，并推动海洋保护区网络规划与大尺度的渔业和生物多样性管理体系更好地结合。

中长期尺度上，可以开展的行动包括：

- (1) 鼓励研发低碳排放/零碳排放的船用燃料和配套的船舶动力系统，实现突破性的技术革新；
- (2) 开展研究并评估“智慧绿色渔业管理”的未来机遇，包括适应性和应对性方法；

- (3) 促进金融工具和社会资本投入机制的创新（包括性别平等导向的措施），以增加对可持续蓝色经济的投资，如减碳降污的技术研发及蓝碳生态系统的保护和恢复；
- (4) 鼓励科研力量对海产品完整生命周期的碳排放进行评估，为政策调节干预提供依据；
- (5) 培养公众的低碳食物消费习惯，从需求端促进可持续、低碳海产品的生产。

与此同时，海洋产业的减碳愿景涉及政治界、科学界、产业界和社会公众，需要从全球到局部区域的各个规模的利益攸关方有力联合。国际层面上，例如 IMO 和 FAO 等在海洋产业中起到全球性协调作用的国际组织，应当加快建设减碳导向的行业标准框架，合理分配跨国界的排放责任。区域性的科研机构也可以为“智慧绿色渔业”的科学评估方面提供指导。国家层面上，各行业中具备显著影响力的国家应牵头推进全球合作、主动承担治理责任、促进关键技术的共享；同时，在国内治理进程中优化制度安排，采取积极的激励手段，推动相关产业的减碳转型。社会层面上，企业应积极响应治理需求，履行社会责任并构建认证制度，提供更加广泛而优质的气候友好型产品和服务。

#### 关于降低海洋涉海活动 CO<sub>2</sub> 足迹的主要建议：发展绿色海洋产业

在认识到海洋产业将持续产生人为碳排放的基础上，我们建议国际海事组织（IMO）等相关力量瞄准更加雄心勃勃的目标，加速海洋产业的低碳转型和升级，激励清洁能源的研发，包括在港口之间建立“绿色走廊”，以适应为远洋深海船队对使用可再生燃料的使用提供便利等。

## 2.4 海洋可再生能源

经济合作与发展组织 (OECD) 在 2016 年发布了一份重要报告，即《2030 年的海洋经济》(The Ocean Economy in 2030)，其中做出了这样的预测：到 2030 年，蓝色经济的总增加值 (GVA) 将超过 3 万亿美元（按 2010 年价格计算），占全球 GVA 总额的 2.5%。其中，海洋能源作为一个新兴领域，以其尖端科学技术在项目和技术交付中发挥的关键作用而备受瞩目。海洋能源开发与我们现有的海事基础设施和作业能力的发展之间也存在交互和重叠。例如，英国海洋经济总产值约为 145 亿英镑，直接支持了大约 18.6 万个工作岗位（国合会，2020）。

海洋可再生能源(Ocean renewable energy, ORE)作为新兴的海洋产业，有着巨大的发展潜力。作为全球最大的能源消费国，中国正加紧在整体能源结构中加大可再生能源的比例，并提出更高的绿色能源发展目标，其中包括对 ORE 的利用。与此同时，全世界都需要实现可再生能源转型，以缓解气候变化，刺激经济发展，改善人类福利并促进就业。

2020 年国合会《全球海洋治理与生态文明专项政策研究：构建中国可持续海洋经济》对海洋可再生能源进行了深入研究（国合会，2020）。下文所述和观点是在该报告基础上归纳和发展而来。

### 2.4.1 依托海洋开发可再生能源

各种 ORE 技术（包括风能、波浪能、海流、潮差、海洋热能）正处于不同的发展阶段，也面临各自独特的挑战和机遇。对于全球不同地区来说，未来的 ORE 开发方案可能有着不同的选项。ORE 目前正在

历着、并且很可能即将迎来快速增长，尤其是海上风电的装机容量将快速增加；而在规模化发展的档口，非常需要适时考虑其环境、社会经济和技术挑战。电力成本控制对海上风电行业来说是一个显而易见的难题，对其他 ORE 技术则更是如此。由于受到基础数据不足、社会经济和技术水平参差不齐等因素的限制，了解和评估 ORE 设施建造、运营和退役过程的环境影响难度很大。ORE 的全面开发不仅会影响众多利益相关者，同时也受到利益相关者的影响；了解利益相关者是谁、以及他们如何参与 ORE 的发展过程，对于负责任开发 ORE 技术是十分必要的。一般来说，主要利益相关者包括对某一特定 ORE 项目和特定海域有需求的渔民、社区居民、监管部门、开发商、学者和游客。与其他试图大力发展 ORE 国家的自然条件不同，中国东部海岸的底质具有松软、淤泥质的土壤特征，给 ORE 基础设施构建和安装造成了技术困难。此外，在其他一些台风多发地区，海上风电行业面临的技术挑战要大得多，那里的天气条件可能对涡轮机性能产生相当大的影响。中国目前尚缺乏针对 ORE 活动环境影响的法律制度，需要进一步制定相关的法规。

#### 2.4.2 ORE 开发与利用现状

中国目前正在积极开发海上风电技术，这必将成为未来全球重要的能源产业；同时，中国在波浪能和潮汐能技术方面也取得了一定的进展。中国政府承诺到 2030 年非化石能源占比达到 20%，而在 2019 年中国的 ORE（海上风电）运营装机总量已达到 3.7GW，在建项目有 13GW，还有 41GW 的项目已经通过审批。2018 年是中国 ORE——海上风电向零补贴发展的转折点；2019 年首次拍卖海上风电项目，实现电价 0.75 元/kWh，低于 0.8 元/kWh 的指导价。同时，中国也成为世界上少数掌握大规模潮流能开发利用技术的国家之一。

ORE 作为一种快速发展的海洋经济形态，正在帮助人类社会推进落实低碳和循环经济目标。海上风电技术直到最近才达到政策拐点，而其他 ORE 技术尚处于早期发展阶段。尽管如此，有迹象表明技术投资成本和发电价格将进一步下降，ORE 发电也有望实现商业化运营，——这一状况令人鼓舞。增进对 ORE 技术潜在影响的了解，对于制定未来发展计划和 ORE 项目审批至关重要。对于不断发展的 ORE 行业和新兴 ORE 技术来说，相关环境影响的持续监测非常重要，能为决策者、开发商和利益相关者提供最佳和最新的信息。此外，将新兴 ORE 技术与军事用途、偏远社区发电、海水淡化或水产养殖产业整合运营，可能会促进 ORE 的进一步发展。ORE 技术为中国发展本国的新兴产业、以及有效参与全球市场提供了新机遇。

#### 2.4.3 认知缺失和政策缺口

**知识的生产和管理**在许多行业中发挥着重要作用，可助力行业有效应对变化，提高生产力，为发展和创新铺平道路。关于**数据共享**，丹麦最大的能源公司（沃旭能源Ørsted A/S）就是一个很好的例子：为了改进风电场设计、激励年轻学子加入绿色能源行业，Ørsted A/S 向科技院校提供并分享了前几代海上风电场的数据；通过数据共享，改进了风场模拟和风力发电机监测。

海洋能是一个高风险行业，可行性评估对于行业的稳步发展十分重要。在产业发展成熟、且能满足产业化所需的可融资性和商业可行性条件之前，第一个海洋能源试点项目必须完成财务结算。ORE 项目因为具有高度的不确定性和风险性，所以不适用于商业债务或纯粹基于收益的融资，因此示范和试运行

阶段的风电场和发电厂需要特定的融资解决方案。有鉴于此，我们主张为海洋能源企业创建一个**投资支持基金**，通过该基金创建一个提供灵活资本的基金，以此为杠杆撬动更多的私人资本投资。同时，主张创建一个**保险和担保基金**，以承保各种项目风险，用于防范可获得性、运行表现、不可预知事件、运行故障等方面的风险。

在新技术出现、并通过示范和商业试运行阶段，已经达到了产业化水平时，政府管理部门要给予充分支持。必须明确区分对成熟技术的支持和对新兴技术的支持；海洋能等新兴技术需要特定投资或项目支持，而不是单纯的资金支持。

总体而言，中国 ORE 的发展将高度依赖于中央政府对法规 and 政策的制修订，例如《可再生能源法》和即将出台的《国民经济和社会发展第十五个五年规划》（“十五五”规划）。此外，省、区、市层面的政策——以及中央和省级政府之间的相互协调——发挥着至关重要的作用。在开发利用 ORE 以实现可持续发展方面，中国有望在国际上发挥示范带头作用。

#### 2.4.4 优先行动建议

以下行动突出强调应建立健全产业配套政策机制。此外，应扩大 ORE 的开发利用规模，并且国家政策应鼓励金融或风险投资、以及私人资本进入 ORE 产业。最后，在加速海上风电建设的同时，政府应评估其环境和社会经济影响；还应支持健全政策机制，加速其他 ORE 技术的产业化。

##### 政策

- 建立健全产业支持政策机制。
- 扩大 ORE 开发利用规模。
- 制定与海洋相关的 ORE 分类原则和标准。
- 通过科技研发与创新进一步降低 ORE 的成本，使其逐步接近其他能源技术的水平。
- 提高加速开发创新性和弹性技术的能力。
- 让渔民、社区居民、监管部门、开发商、学者和游客在内的广大利益相关者尽早介入 ORE 开发进程，以确保妇女、少数族裔和边缘化群体的意见都能够得以体现。
- 将新兴的 ORE 技术与其他行业广泛结合，例如军事用途、偏远地区的发电、海水淡化、制氢和水产养殖。

##### 市场

- 对设立投资支持基金、以及保险与担保基金进行可行性评估。
- 政府政策应鼓励金融或风险投资、以及私人资本投资。
- 开发并采纳海洋能蓝色债券标准。
- 开拓全球出口市场。
- 发展 ORE 产业并增加就业，凭技术实力进入国际市场。

##### 海上风电

- 在加速发展海上风电的同时，应评估其生态环境和社会经济影响；有必要在建立关键试点项目的同时了解其规模化发展需求。
- 增加海上风电部署，以应对碳减排、能源安全和新商机等多层面重要战略目标。

## 海洋能

- 政府应鼓励潮流能的研究和开发，预计这将是下一个有望产业化的 ORE。
- 政府应建立支持 ORE 技术快速产业化的机制，包括风能、波浪能、潮流能、潮汐能、海洋热能等。

### 关于 ORE 的主要建议：发展 ORE 和智慧绿色型港口

海洋可再生能源（ORE）是引人注目的新兴海洋产业。实现全球共同需要的可再生能源转型，不仅可以缓解气候变化，还可以刺激经济发展、改善人类福利、并促进就业。我们建议通过扩大海上风电生产规模、促进氢气和氨气生产来实现沿海大城市交通系统和航运业脱碳，并尽快开发其他具有较高潜在价值的海洋能源技术。

### 3. 实现碳中和目标的海洋可持续管理

#### 3.1 从整体上考虑海洋生态系统的必要性

如上所述，我们需要平衡海洋开发与保护以应对气候变化、生物多样性锐减和不平等带来的社会挑战。但海洋在应对这些全球性挑战中的关键性作用还远未达到其应有的地位。在当今和未来的一系列全球性挑战和危机面前，人类必须以系统性、综合性和整体性的方式对待海洋问题，并有效开展海洋空间规划。我们认为，基于生态系统的海洋综合管理（EB-IOM）是实现碳中和目标、保护生物多样性以及发展生态文明的基础。海洋综合管理综合考虑了海洋空间的各种使用途径和压力，并在社会和海洋生态系统可持续的目标下帮助协调竞争性用途。当今不同层面的海洋治理实践广泛认同：应以综合的方式管理海洋生态系统及其资源。为此，需要采取明确和有针对性的行动来限制并尽量减少对海洋的威胁和影响，使海洋继续作为人类和地球生命之源的能力得以夯实。

整体性的海洋综合管理可支撑海洋生态系统中更有效的碳储存、海洋产业的脱碳化以及涉海活动的低碳转型。在日益繁忙的海洋空间中，我们仍然有机会以不损害环境，而是让环境恢复或再生的方式实现经济增长的最大化，满足人类需求。这样做可能会获得与其他涉海产业的协同效益。例如，海洋能源产业可以满足能源密集型海水淡化产业日益增长的需求，或支持海水养殖业的运行，同时，保护关键的海洋生态系统和生物多样性。任何此类涉海活动都不应孤立地进行，而应进行跨部门地统一规划。通过将海岸带的管理规划与邻近的海洋管理规划相结合，实现陆海统筹，不仅可以避免资源闲置，还可以同时兼顾经济、社会与环境效益。

基于生态系统的海洋综合管理是智慧绿色的，它注重基于自然的解决方案，将管理良好的海洋保护区和其他有效的区域保护措施整合在一起，与可持续的基础设施一道，对于保护、支持沿海社区和海洋栖息地来说，极其重要。它可以增加海洋食物的产量、赋能药物创新、增强减缓和适应气候变化的能力、满足能源需求，还可以保护、再生和恢复生物多样性以及文化价值 ([www.oceanpanel.org](http://www.oceanpanel.org))。

这种智慧绿色的海洋综合管理，也在经济上被证明是智能且可行的。近期研究发现，未来 30 年内，在关键的海洋行动上每投资 1 美元即可产生至少 5 美元的全球收益，甚至更多。具体地，从 2020 年到 2050 年，全球在保护和恢复红树林栖息地、扩大海上风能生产、国际航运脱碳和增加可持续来源的海洋蛋白质生产这四个关键领域，投资 2 万亿美元至 3.7 万亿美元，即可带来 8.2 万亿美元至 22.8 万亿美元的净收益，投资回报率为 450% 至 615% (Konar and Ding, 2020)。

从全球来看，现有的海洋治理仍面临诸多挑战，如当地利益相关者的参与不足、对科学和知识的尊重与利用不足、气候变化的适应力薄弱、现有复杂的治理机制执行不力、知识和能力缺乏、法律体系有待完善、部门间、社会组织和研究机构之间缺乏合作、部门冲突管理机制缺失等问题 (Winther, Dai, et al. 2020)。还应认识到，基于生态系统的海洋管理和治理若要取得成功，就需要针对项目、政策和基层民众当中的性别平等进行规划、实施、监测和评估。中国拥有丰富的技术和经济储备，有能力采取多种适应性和减缓性的措施，这些措施将对国内和国际社会发展产生影响。融通跨界知识和实施基于生态系统的海洋综合管理，是实现生态文明和碳中和的关键。

## 3.2 面向碳中和的可持续海洋管理方案

到 2050 年，若维持现有的碳排放趋势和政策不变，则由可持续海管理海洋提供的基于海洋的气候变化减缓方案，可在全球升温 1.5°C 的情景下将“排放缺口”压缩 21%，在全球升温 2.0°C 的情景下将“排放缺口”压缩约 25% (Hoegh-Guldberg et al., 2019)。在可持续海洋规划的背景下，有五个主要领域将在减少温室气体排放从而实现碳中和方面取得重大进展，分别是：海洋可再生能源；零排放海运；管理沿海和海洋生态系统；基于海洋的食物系统（捕捞渔业、水产养殖和人类饮食来源向海洋转移；海底碳封存。海洋可再生能源是目前最有可能提供清洁能源和减少温室气体排放的产业，而发展浮动风能和太阳能设施则是重要的前沿领域。考虑到对环境和社会福祉的全方位影响，基于自然的干预措施——特别是红树林、海草床和盐沼（即蓝色森林）的保护和恢复，可最好地兼顾到碳减排，以及人类、经济和地球更广泛的共同利益。

蓝色森林具有捕获和储存 CO<sub>2</sub> 的巨大潜力。研究表明，海洋动植物群捕获 CO<sub>2</sub> 的效率高于陆地森林（尤其是红树林，其捕获 CO<sub>2</sub> 的效率是陆地森林的数倍）。防止自然栖息地的丧失，在其发生破坏时恢复自然条件，并确保未来的任何活动都有助于其再生，亦即，基于自然的解决方案 (NbS) 必须作为实现碳中和目标的关键战略。

这里，滨海湿地发挥着特殊的作用，它不仅可以有效地捕获 CO<sub>2</sub>，而且是许多海洋物种的主要栖息地和人类重要的食物与生计来源。由于城市化，特别是沿海城市的发展，保护自然栖息地的难度很大。为此，应评估**生态损害赔偿制度**等措施的可行性；而为了给生态补偿计划提供技术支持，可以进一步发展**自然资本核算体系**。Fenichel (2020) 讨论了具有多个指标的国民账户体系，以及如何将其应用于可持续海洋经济管理；全球海洋账户伙伴关系 (<https://www.oceanaccounts.org/>) 则着眼于为海洋经济核算建立共享技术框架。尽管生态环境部等中央政府部门负责监督此类工作，但当地的参与和投入也非常重要 (Winther, Dai, et.al., 2020)。此外，还应高度重视海洋保护措施，包括评估和建立海洋保护区，以及发展海藻养殖，后者正因其多方面的优点（尤其是与气候变化和粮食安全相关的优点），以及迅速扩大的全球市场和需求而日益受到关注。

第一，海洋保护区和其他的区域保护措施能提供一系列益处，包括创造就业机会、提高保护区附近的渔业产量、通过健康的海洋生态系统增加碳封存以及保护极其重要的生物多样性。海洋保护区不仅应被视为实现可持续发展目标的机制，也应被视为一个国家基础设施的一部分进行投资。可考虑在中国国内对保护区和其他基于区域的保护措施给予财政支持和投资，并鼓励发展可持续的海藻养殖业。也可考虑与“一带一路”沿线国家合作，推广此类措施。

第二，实现可持续的海洋经济（“蓝色经济”）要求在现有和新兴海洋产业中创新发展新的**智慧绿色技术**。对中国所有涉海产业来说，发展此类绿色技术都是必要的。以海事部门为例，可通过制定前瞻性的国家目标和战略以支持船舶脱碳，激励可持续低碳港口建设，通过可再生能源和零碳燃料供应链支持海运行业和船队（包括渔船）的低碳转型。又以水产养殖行业为例，可通过制定政策和管理框架来尽量减少水产养殖造成的环境影响，包括饲料供应链中的低效率，并促进符合当地环境、治理和经济优先事项的饲料和非饲料水产养殖生产。除了**财政和税收优惠政策**以外，针对绿色技术的**政府采购和投资**也



可以帮助行业克服财务障碍，这些障碍有时会阻碍环境技术的研发。在国际上，通过“一带一路”倡议，中国可以与沿线国家合作，在港口、渔船、海水养殖和旅游等领域积极开发利用海上风电和绿色解决方案，并将海洋综合管理理念作为管理原则进行推广（Hoegh-Guldberg et al., 2019）。

第三，知识是社会发展的基本价值。应通过提供获取共同知识库的机制和机会，鼓励和加强与可持续的、智慧绿色的海洋生态系统管理和经济有关的**科学知识的使用和监测**。这将有助于在制定发展海洋经济和实施基于生态系统的海洋综合管理的总体政策时协调和全面地利用知识。保持最新的科学技术基础知识和数据共享能力，需要在国家和区域数据、知识收集和技术开发系统项目，以及传播数据和知识的创新方法方面投资。投资和参与联合国政府间海洋委员会“海洋科学促进可持续发展国际十年（2021-2030）”，将是中国对国际社会的重要贡献。

第四，在拟定可持续海洋管理框架的**关键国际进程和论坛**中，中国应积极参与并牵头开展相关讨论，为实现全球碳中和目标做出贡献。主要包括：《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）及《巴黎协定》，《生物多样性公约》（CBD），以及目前正在进行的关于国家管辖范围以外海域海洋生物多样性公约（BBNJ）的谈判进程。同时，应重点关注国际海事组织和国际海底管理局等涉海国际组织的规则制定。通过这些努力，中国还将为及时、恰当地制定关于新兴海洋产业，如海洋可再生能源产业、海底采矿业和海洋生物技术产业的法律和环境框架做出贡献。中国应基于科学，十分审慎地参与上述活动，避免任何可能进一步损害海洋健康的做法。

### 3.3 优先行动建议

建议优先采取以下行动，以支持在中国所有海域和中国有影响力的区域实施并持续发展基于现有最佳科学知识和基于生态系统的海洋综合管理：

- 阻断沿海和海洋生态系统的净损失，增加其范围、改善其状况，尤其是红树林、海草床、盐沼、海藻场、沙丘、珊瑚礁和深海等关键生态系统。改善这些生态系统应对气候变化的管理。在规划和发展沿海基础设施时，采用基于自然的解决方案，尽可能减少灰色（相对于绿色）基础设施，鼓励将其用于固碳和储碳。增强海岸带韧性。
- 建立和有效管理基于现有最佳科学知识的海洋保护区和其他有效的区域保护措施网络，以保护生物多样性，同时提供气候、粮食、社会经济和文化效益。将这些明确地与渔业、生物多样性保护和其他自然设施的大规模管理计划联系起来。
- 通过相关的全球性和区域性组织，与包括当地民众和利益相关者在内的所有相关伙伴合作，以促进所有海洋和沿海生态系统的可持续管理。改善妇女在海洋经济各个方面的参与度和财务状况。
- 利用知识和空间分析工具来确定海洋保护区的碳封存潜力和最佳位置，以及发展可持续海洋规划下的其他基于区域的有效保护措施。

#### **主要建议：依靠自然本身来捕获和封存 CO<sub>2</sub>**

为应对气候变化、生物多样性锐减和不平等所带来的社会挑战，我们需要在开发和保护之间取得平衡，

而海洋在这方面发挥着关键作用。基于生态系统的海洋综合管理（EB-IOM）方案是兼顾碳中和目标和生态文明发展的基础。建议从中央到地方各级政府立即采取行动，避免进一步破坏海洋栖息地和沿海湿地，并尽可能减少其损失：第一，到 2030 年，积极修复退化或被破坏的滨海湿地，保护关键的海洋栖息地；第二，到 2030 年，投资建成一个具有恢复力的海洋保护区网络（包括国家公园、自然保护区和海洋生态红线区），通过基于自然的解决方案，保护对碳储存和海洋生物多样性具有重大意义的大型海洋栖息地；第三，按照《联合国气候变化框架公约》及其《巴黎协定》，参考 IPCC 国家温室气体清单指南，将蓝碳等生态系统纳入中国的国家自主贡献范畴和温室气体（GHG）长期低排放发展战略中。探索与“一带一路”沿线国家合作，推广类似的举措。

## 参考文献

- 操建华. 水产养殖业自身污染现状及其治理对策[J]. 社会科学家, 2018, 02-0046-05
- 方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 孙耀, 周诗赉, 宋云利, 崔毅, 赵俊, 杨琴芳, 李锋, 张爱君, 王兴章, 汤庭耀. 桑沟湾海水养殖现状评估及优化措施[J]. 海洋水产研究, 1996(02):95-102.
- 国合会, 2020. 全球海洋治理与生态文明专题政策研究——海洋可再生能源研究报告。  
<https://cciced.eco/wp-content/uploads/2020/09/2021-SPS-Ocean-TT5-Final-Report-English.pdf>
- 吕兑安, 程杰, 莫微, 谭勇华, 孙丽, 廖一波. 海水养殖污染与生态修复对策[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(11):43-48.
- 毛玉泽, 李加琦, 薛素燕, 蔺凡, 蒋增杰, 方建光, 唐启升. 海带养殖在桑沟湾多营养层次综合养殖系统中的生态功能[J]. 生态学报, 2018, 38(09):3230-3237.
- 农业农村部渔业渔政管理局等. 2021 中国渔业统计年鉴[M]. 中国农业出版社, 2021.
- 张朝晖, 吕吉斌, 叶属峰, 朱明远. 桑沟湾海洋生态系统的服务价值[J]. 应用生态学报, 2007(11):2540-2547.
- Alcalde, N. Heinemann, L. Mabon, R. Worden, H. de Coninck, H. Robertson, M. Maver, S. Ghanbari, F. Swennenhuis, I. Mann. 2019. Acorn: Developing full-chain industrial carbon capture and storage in a resource-and infrastructure-rich hydrocarbon province. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2019.06.087
- Anderson, C.M., R. S. DeFries, R. Litterman, et al. 2019. Natural climate solutions are not enough. *Science*, 363(6430), 933-934.
- Aricò, S., J. M. Arrieta, D. C. E. Bakker, P. W. Boyd, L. Cotrim da Cunha, et al. 2021. Integrated Ocean Carbon Research: A Summary of Ocean Carbon Research, and Vision of Coordinated Ocean Carbon Research and Observations for the Next Decade. Paris: UNESCO-IOC. doi:10.25607/h0gj-pq41
- Asian Development Bank. 2015. Roadmap for Carbon Capture and Storage Demonstration and Deployment in the People's Republic of China.  
<https://www.adb.org/sites/default/files/publication/175347/roadmap-ccs-prc.pdf>
- Birol. 2020. Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage. International Energy Agency.
- Blackford, H. Stahl, J. Bull, B. Berg'es, M. Cevatoglu, A. Lichtschlag, D. Connelly, R. James, J. Kita D. Long. 2014. Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage. *Nature Climate Change*. doi: 10.1038/nclimate2381.
- Brander, K.M. 2007. Global fish production and climate change. *PNAS*. doi: 10.1073/pnas.0702059104.
- Breithaupt, JL, Smoak JM, Smith TJ, et al. 2012. Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget. *Global Biogeochemical Cycles*. doi:10.1029/2012GB004375.
- Brus, M. M. T. A. 2009. Challenging complexities of CCS in public international law. In M. M. Roggenkamp & E. Woerdman (Eds.), *Legal Design of Carbon Capture and Storage; Developments in the Netherlands from an international and EU Perspective* (Energy & Law, nr. 10). Intersentia, International Law Series.
- Chen, Q. Li, L. Liu, X. Zhang, L. Kuang, L. Jia, G. Liu. 2015. A large national survey of public perceptions of CCS technology in China. *Applied energy*. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.046.

- Chen, Y. C., T. J. Chu, J. D. Wei, C. H. Shih. 2018. Effects of mangrove removal on benthic organisms in the Siangshan Wetland in Hsinchu, Taiwan. *PeerJ* doi:10.7717/peerj.5670
- Costa, R. Musarra, I. Silva, R. de Carvalho Nunes, I. Cavalcante, S. Cupertino. 2019. Legal Aspects of Offshore CCS: Case Study–Salt Cavern. *Polytechnica*. doi:10.1007/s41050-019-00021-2.
- Dai, M. H., J. Z. Su, Y. Y. Zhao, et al. 2022. Carbon fluxes in the coastal ocean: Synthesis, boundary processes and future trends. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 50. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-032320-090746>.
- Dooley, J., R. Dahowski, C. Davidson. 2009. Comparing existing pipeline networks with the potential scale of future US CO<sub>2</sub> pipeline networks. *Energy Procedia*. doi:10.1016/j.egypro.2009.01.209.
- Duarte, C. M., I. J. Losada, I. E. Hendriks, et al. 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*. doi: 10.1038/nclimate1970.
- Duarte, C., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A. and Krause-Jensen, D. 2017. Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaptation? *Front. Mar. Sci.* <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>
- d'Amore F., M. Romano, F. Bezzo. 2021. Carbon capture and storage from energy and industrial emission sources: A Europe-wide supply chain optimisation. *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125202.
- FAO. 2013. Climate Smart Agriculture Sourcebook. <https://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/production-resources/module-b4-fisheries/b4-overview/en/?type=111>
- FAO. 2014. The State of World Fisheries and Aquaculture 2014: Opportunities and challenges. Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/I3720E/i3720e.pdf>.
- FAO. 2015. Fuel and energy use in the fisheries sector - approaches, inventories and strategic Implications. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1080. Rome, Italy. <https://www.fao.org/3/i5092e/i5092e.pdf>.
- FAO. 2016. The State of the World's Fisheries and Aquaculture 2016: Contributing to food security and nutrition for all. Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i5555e.pdf>
- Fenichel, E.P., Milligan B., Porras I. et al. 2020. National Accounting for the Ocean and Ocean Economy. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at <https://www.oceanpanel.org/blue-papers/national-accounting-ocean-ocean-economy>. <https://www.oceanpanel.org/blue-papers/national-accounting-ocean-ocean-economy>.
- Flohr A., A. Schaap, E. Achterberg, G. Alendal, M. Arundell, C. Berndt, J. Blackford, C. Böttner, S. Borisov, R. Brown. 2021. Towards improved monitoring of offshore carbon storage: A real-world field experiment detecting a controlled sub-seafloor CO<sub>2</sub> release. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103237.
- Friedlingstein, P., M. O'Sullivan, M. W. Jones, R. M. Andrew, J. Hauck, et al. 2020. Global carbon budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data* 12. doi:10.5194/essd-12-3269-2020.
- Gerrard, M. 2020. Accelerating Offshore Carbon Capture and Storage - Opportunities and Challenges for CO<sub>2</sub> Removal. Columbia World Projects, Columbia University.
- Greer, K., Zeller, D., Woroniak, J., Coulter, A., Winchester, M., Palomares, M.L.D., Pauly, D. 2019. Global trends in carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from fuel combustion in marine fisheries from 1950 to 2016. *Marine Policy*. doi:10.1016/j.marpol.2018.12.001.

- Herzog H.. 2016. Lessons learned from CCS demonstration and large pilot projects. An MIT Energy Initiative Working Paper. <https://sequestration.mit.edu/bibliography/CCS%20Demos.pdf>.
- Hansell, D. A., C. A. Carlson, D. J. Repeta, R. Schlitzer. 2009. Dissolved organic matter in the ocean: A controversy stimulates new insights. *Oceanography*. doi: 10.5670/oceanog.2009.109.
- Hoegh-Guldberg et al. 2019. The Ocean as a Solution to Climate Change: Five Opportunities for Action. World Resources Institute, Washington, DC. [www.oceanpanel.org/climate](http://www.oceanpanel.org/climate).
- IEA. 2016a. 20 years of carbon capture and storage: Accelerating future deployment. <https://www.iea.org/reports/20-years-of-carbon-capture-and-storage>
- IEA. 2016b. The Potential for Equipping China's Existing Coal Fleet with Carbon Capture and Storage.
- IEA. 2020. Special report on carbon capture utilisation and storage (CCUS) in clean energy transitions. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>
- IPCC. 2019. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- Ito T. and Follows, M. J. 2003. Upper ocean control on the solubility pump of CO<sub>2</sub>, *Journal of Marine Research*, 61(4). doi: 10.1357/002224003322384898.
- IUCN. 2017. Issues Brief: The Ocean and Climate Change. [https://www.iucn.org/sites/dev/files/the\\_ocean\\_and\\_climate\\_change\\_issues\\_brief-v2.pdf](https://www.iucn.org/sites/dev/files/the_ocean_and_climate_change_issues_brief-v2.pdf)
- Jones AC, Lawson AJ. 2021. Carbon capture and sequestration (CCS) in the United States. CRS Report prepared for members and committees of congress. Congressional Research Service.
- Konar, M and H. Ding. 2020. A Sustainable Ocean Economy for 2050 - Approximating Its Benefits and Costs. [https://oceanpanel.org/sites/default/files/2020-07/Ocean%20Panel\\_Economic%20Analysis\\_FINAL.pdf](https://oceanpanel.org/sites/default/files/2020-07/Ocean%20Panel_Economic%20Analysis_FINAL.pdf)
- Lawrence, M. G., S. Schäfer, H. Muri, et al. 2018. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nat Commun* 9, 3734.
- Li H., Lau H., Wei X. and S. Liu. 2021. CO<sub>2</sub> storage potential in major oil and gas reservoirs in the northern South China Sea. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. doi: 10.1016/j.ijggc.2021.103328.
- Li P, Yi L, Liu X., Hu G., Lu J., Zhou D., Hovorka S., Liang X. 2019. Screening and simulation of offshore CO<sub>2</sub>-EOR and storage: A case study for the HZ21-1 oilfield in the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. doi: 10.1016/j.ijggc.2019.04.015.
- Lockwood. 2018. Reducing China's Coal Power Emissions with CCUS Retrofits. International Energy Agency Clean Coal Centre. <https://www.iea-coal.org/download/14995/>
- McConnaughey, R. et al. 2020. Choosing best practices for managing impacts of trawl fishing on seabed habitats and biota. *Fish and Fisheries*. doi: 10.1111/faf.12431.
- Michener A. 2011. CCS challenges and opportunities for China. IEA Clean Coal Centre.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021. A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. doi:10.17226/26278

- Parker, R.W.R., Blanchard, J.L., Gardner, C., Green, B.S., Hartmann, K., Tyedmers, P.H., Watson, R.A. 2018. Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Climate Change*. doi: 10.1038/s41558-018-0117-x.
- Pekic S. 2021. China's first offshore carbon capture project launched. OFFSHORE ENERGY. <https://www.offshore-energy.biz/chinas-first-offshore-carbon-capture-project-launched/>.
- Ringrose, P., T. Mechel. 2019. Maturing global CO<sub>2</sub> storage resources on offshore continental margins to achieve 2DS emissions reductions. *Scientific Reports*. doi: 10.1038/s41598-019-54363-z.
- Robinson, B. Callow, C. Böttner, N. Yilo, G. Provenzano, I. Falcon-Suarez, H. Mar'in-Moreno, A. Lichtschlag, G. Bayrakci, R. Gehrman. 2021. Multiscale characterisation of chimneys/pipes: Fluid escape structures within sedimentary basins. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103245.
- Ruiz-Salmón, I., et al. 2021. Life cycle assessment of fish and seafood processed products - A review of methodologies and new challenges. *Science of The Total Environment*. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144094.
- Sarmiento, J.L., N. Gruber, 2002. Sinks for anthropogenic carbon. *Physics Today*. doi: 10.1063/1.1510279.
- Schmelz, G. Hochman K. Miller. 2020. Total cost of carbon capture and storage implemented at a regional scale: northeastern and midwestern United States. *Interface Focus*. doi: 10.1098/rsfs.2019.0065.
- Schrag, D.P. 2009. Storage of carbon dioxide in offshore sediments. *Science*. doi: 10.1126/science.1175750.
- Shan, Q. Huang, D. Guan, K. Hubacek. 2020. China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016–2017. *Scientific Data*. doi: 10.1038/s41597-020-0393-y.
- Singleton, H. Herzog, S. Ansolabehere. 2009. Public risk perspectives on the geologic storage of carbon dioxide. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. doi: 10.1016/J.IJGGC.2008.07.006.
- Toggweiler, J. R., R. Murnane, S. Carson, A. Gnanadesikan, and J. L. Sarmiento. 2003. Representation of the carbon cycle in box models and GCMs: 2. Organic pump. *Global Biogeochem. Cycles*. doi:10.1029/2001GB001841.
- Tzimas, A. Georgakaki, C. Cortes, S. Peteves. 2005. Enhanced oil recovery using carbon dioxide in the European energy system. EUR 21895 EN. 2005. JRC32102.
- Velte, P. 2017. Does ESG performance have an impact on financial performance? Evidence from Germany, *Journal of Global Responsibility*. <https://doi.org/10.1108/JGR-11-2016-0029>
- Webb R, Gerrard M. 2019. Overcoming Impediments to Offshore CO<sub>2</sub> Storage: Legal Issues in the United States and Canada. *Envtl. L. Rep. News & Analysis*.
- Wei, X. Li, R. Dahowski, C. Davidson, S. Liu, Y. Zha. 2015. Economic evaluation on CO<sub>2</sub>-EOR of onshore oil fields in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. doi: 10.1016/j.ijggc.2015.01.014.
- Winther, J.-G., M. Dai, T. Rist, A.H. Hoel, Y. Li, A. Trice, K. Morrissey, M.A. Juinio-Meñez, L. Fernandes, S. Unger, F.R. Scarano, P. Halpin, and S. Whitehouse, 2020. Integrated ocean management for a sustainable ocean economy. *Nature Ecology & Evolution*, doi: 10.1038/s41559-020-1259-6.
- Xu, J. Yang, L. He, W. Wei, Y. Yang, X. Yin, W. Yang, A. Lin. 2021. Carbon capture and storage as a strategic reserve against China's CO<sub>2</sub> emissions. *Environmental Development*. doi: 10.1016/j.envdev.2020.100608.

- Zeebe, R. E. and D. Wolf-Gladrow. 2001. CO<sub>2</sub> in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes, No. 65, Gulf Professional Publishing, Elsevier Oceanography Series, Oxford, United Kingdom, 1–341.
- Zhang Y, Huang Z, Li Y, Chen Z, Wang W. 2021. Integrated sea-land restoration in coastal area based on the habitat requirements of Ardeidae. *Wetland Science and Management*.
- Zhang, B. Ren, H. Huang, Y. Li, S. Ren, G. Chen, H. Zhang. 2015. CO<sub>2</sub>-EOR and storage in Jilin oilfield China: Monitoring program and preliminary results. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. doi: 10.1016/j.petrol.2014.11.005.
- Zhang, J. Fan, Y. Wei. 2013. Technology roadmap study on carbon capture, utilization and storage in China. *Energy Policy*. doi: 10.1016/j.enpol.2013.04.005.
- Zhou D., Zhao Z., Liao J., Sun Z. 2011. A preliminary assessment on CO<sub>2</sub> storage capacity in the Pearl River Mouth Basin offshore Guangdong, China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 10.1016/j.ijggc.2010.09.011.
- Zhou, D. Zhao, Q. Liu, X. Li, J. Li, J. Gibbons, X. Liang, 2013. The GDCCSR project promoting regional CCS-readiness in the Guangdong province, South China. *Energy Procedia*. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.708.
- Zhou, P. Li, X. Liang, M. Liu, L. Wang. 2018. A long-term strategic plan of offshore CO<sub>2</sub> transport and storage in northern South China Sea for a low-carbon development in Guangdong province, China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. doi: 10.1016/j.ijggc.2018.01.011.
- Zou L. Zhang. 2017. Legal challenges of carbon capture and storage in the South China Sea region. *Marine Policy*. doi: 10.1016/j.marpol.2017.07.020.

## 缩略语中英文对照表

**BRI:** Belt and Road Initiative 一带一路倡议

**CBD:** Convention on Biological Diversity 生物多样性公约

**CCICED:** The China Council for International Cooperation on Environment and Development 中国环境与发展国际合作委员会

**CCUS:** Carbon Capture, Utilisation and Storage 碳捕集、利用与封存

**CDR:** Carbon Dioxide Removal 二氧化碳移除

**POC:** Particulate Organic Carbon 颗粒有机碳

**DOC:** Dissolved Organic Carbon 溶解有机碳

**DIC:** Dissolved Inorganic Carbon 溶解无机碳

**EB-IOM:** Ecosystem-based Integrated Ocean Management 基于生态系统的海洋综合管理

**IUCN:** International Union for Conservation of Nature 世界自然保护联盟

**EOR:** Enhanced Oil Recovery 提高采油率

**GHG:** Greenhouse Gas

**IEA:** International Energy Agency 国际能源署

**ORE:** Ocean Renewable Energy 海洋可再生能源

**IMTA:** Integrated Multi-trophic Aquaculture 多营养层次的综合水产养殖

**IOC-R:** The Integrated Ocean Carbon Research programme 海洋综合碳研究计划

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

**MPA:** Marine Protected Area 海洋保护区

**NbS:** Nature-based Solutions 基于自然的解决方案

**NDCs:** Nationally Determined Contributions 国家自主贡献

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

**PgC:** petagrams of carbon or  $10^{15}$  grams of carbon 10 亿吨碳 **UN SDG:** United Nation Sustainable Development Goals 联合国可持续发展目标

**UNFCCC:** United Nations Framework Convention on Climate Change 联合国气候变化公约