DOI: 10.20103/j.stxb.202504281033
张典,奉龄洋,方秦华,陈彬,马志远,程兰,赵子睿,阚志毅,俞炜炜 ,葛飞扬.气候变化对海洋生态系统的风险评估.生态学报,2026,46(2):663-676.
Zhang D,Feng L Y,Fang Q H,Chen B,Ma Z Y,Cheng L,Zhao Z R,Kan Z Y,Yu W W,Ge F Y.Climate change risk assessment for marine ecosystems: progress, challenges, and future perspectives.Acta Ecologica Sinica,2026,46(2):663-676.

气候变化对海洋生态系统的风险评估

张　典[1,2],奉龄洋[1],方秦华[2],陈　彬[1],马志远[1],程　兰[1],赵子睿[1,3],阚志毅[1,2],俞炜炜[1,*],葛飞扬[4]

1 自然资源部第三海洋研究所,厦门　361005
2 厦门大学环境与生态学院,厦门　361005
3 汕头大学,汕头　515063
4 自然资源部南海生态中心,广州　510200

摘要:气候变化正以前所未有的速度重塑海洋生态系统,成为全球海洋生物多样性与生态安全面临的重要威胁。作为气候风险评估的主导范式,IPCC 框架在海洋领域的应用仍面临理论与实践脱节、关键指标内涵模糊及方法适用性不足。立足于 IPCC 气候框架,依循“初期探索-框架发展-系统整合”三个阶段,追溯了气候脆弱性到气候风险理论的演化脉络,并结合国际气候治理背景,系统回顾了该理论在海洋领域中的应用进程。通过对 1998—2024 年间 101 篇涉海文献进行文献计量分析,本研究从理论框架和实践评估两方面划分当前的研究主题。并围绕“致灾因子-暴露-脆弱性”三大核心维度,按照维度-一级指标层-二级指标的层级结构梳理了海洋生态系统的气候风险评估指标,揭示了各层级指标的研究偏好。同时,总结了现有三种主流的气候脆弱性与风险评估方法的特征。研究发现,IPCC 气候风险框架在海洋生态系统的应用存在明显滞后。综合性风险评估多集中于渔业,其他关键生态系统的评估存在明显缺口,且对生态适应能力的量化研究仍显薄弱。未来研究应聚焦于构建以“致灾因子-暴露-脆弱性”为核心的协同评估框架,强化对海洋适应能力的动态评估,并深入解析气候变化多重气候风险因子间的非线性交互作用、海洋生物的级联效应与跨系统反馈,特别是加强我国在海洋综合观测和智能评估技术方面的适应性实践。本研究不仅丰富了气候变化对海洋生态风险的理论体系,也为构建科学、精准的风险评估框架提供了理论依据与实践参考。

关键词:气候变化;适应能力;海洋生态系统;暴露;IPCC 框架;气候脆弱性;气候风险

Climate change risk assessment for marine ecosystems: progress, challenges, and future perspectives

ZHANG Dian[1,2], FENG Lingyang[1], FANG Qinhua[2], CHEN Bin[1], MA Zhiyuan[1], CHENG Lan[1], ZHAO Zirui[1,3], KAN Zhiyi[1,2], YU Weiwei[1,*], GE Feiyang[4]

1 *Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen* 361005, *China*
2 *College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen* 361005, *China*
3 *Shantou University, Shantou* 515063, *China*
4 *South China Sea Ecological Center, Ministry of Natural Resources, Guangzhou* 510200, *China*

Abstract: Climate change was altering marine ecosystems at an unprecedented rate, posing significant threats to global marine biodiversity and ecological security. As the dominant paradigm for global climate risk assessment, the IPCC climate framework faced significant challenges in marine ecosystems applications. These challenges included a disconnect between

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0802203)
收稿日期:2025-04-28;　　**网络出版日期**:2025-10-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yuweiwei@ tio.org.cn

theory and practice, which often hindered the operationalization of its core concepts in specific marine contexts; ambiguities in conceptual indicators; and limited methodological applicability. Adopting the IPCC framework, this study traced the theoretical evolution from climate vulnerability to climate risk through three stages: early exploration, framework development, and systematic integration.It systematically reviewed the application of these theories in marine science within the context of international climate governance to provide a comprehensive overview of the field's progression. Through a bibliometric analysis of 101 marine-related studies published between 1998 and 2024, this study categorized current research themes into theoretical frameworks and practical assessments. Centered on the three core dimensions of hazard, exposure, and vulnerability, we established a hierarchical structure including dimension, primary indicator and secondary indicator for climate risk assessment indicators in marine ecosystems, providing an organized inventory for future research. We revealed the different levels of indicator preferences within the three core dimensions based on the frequency of indicator occurrences, thereby highlighting areas of intense research focus alongside those potentially neglected. Concurrently, this study summarized the characteristics of three mainstream methods for assessing climate vulnerability and risk. This study revealed that the application of the IPCC climate risk framework to marine ecosystems exhibits a significant lag, especially when compared to its uptake in terrestrial systems. Comprehensive risk assessments were predominantly concentrated on fisheries, leaving a notable gap in the evaluation of other critical ecosystems or regions such as coral reefs, mangroves, and polar regions. Furthermore, quantitative research on ecological adaptive capacity remains underdeveloped, a limitation that severely hinders proactive management and conservation efforts. This study proposed that future research should prioritize developing a collaborative hazard-exposure-vulnerability assessment framework, emphasizing dynamic quantification of marine adaptive capacity, and thoroughly analyzing nonlinear interactions among climate risk factors, cascading effects in marine organisms, and cross-system feedbacks, as these dynamics can lead to unexpected and amplified ecological responses. Special attention was warranted for strengthening adaptive practices in China's marine integrated observation and intelligent assessment technologies. These findings enriched the theoretical foundation of marine climate risk. It provided a theoretical basis and practical reference for building robust and precise risk assessment frameworks.

Key Words: climate change; adaptive capacity; marine ecosystem; exposure; IPCC framework; climate vulnerability; climate risk

气候变化作为全球生物多样性丧失的重要诱因,已成为当前环境科学领域亟待解决的关键问题[1—2]。海洋生物多样性丰富、服务功能价值巨大,在全球生态平衡中发挥着不可替代的关键作用[3]。然而,气候变化(海洋变暖、酸化等)正在重塑海洋的理化特性,进而影响海洋生物及其生态系统结构与功能[4]。多种气候压力因子还可能以协同、累积或非线性方式作用于海洋生态系统,使其响应过程呈现出高度复杂性和显著的地域差异[5]。

在全球应对气候变化的进程中,气候风险评估已成为一项核心工具。联合国气候变化框架公约(UNFCCC)明确指出,开展气候脆弱性评估是应对气候变化、确保现有及未来海洋生物资源和生态系统可持续发展、管理气候风险的基础[6]。《巴黎协定》也将适应气候变化作为国家自主贡献的重要组成部分[7]。联合国可持续发展目标(SDGs)中,SDG13(应对气候变化)和 SDG14(水下生物)密切相关,提升海洋生态系统的气候韧性是实现这两个目标的重要举措,更是推动可持续发展与气候治理协同推进的关键路径[8—9]。昆蒙框架提出的“30×30”目标进一步凸显了气候风险评估在全球海洋保护中的必要性。

尽管政府间气候变化专门委员会(IPCC)陆续提出了气候脆弱性和气候风险的评估框架,并在第五次(AR5)和第六次报告(AR6)对两个评估框架进行了明确区分和整合,为气候变化的生态风险评估提供了清晰的理论基础[4],但当前气候变化的海洋生态风险评估仍面临诸多挑战。首先,海洋环境的高度动态性与多尺度特征增加了生态风险量化的不确定性和复杂性。其次,评估框架中各维度之间存在尺度不匹配与逻辑断裂

的问题,难以形成系统性的评价体系。此外,绝大多数评估实践未能严格区分“脆弱性”与“风险”的内涵差异,导致评估框架误用[10]。这种理论构建、方法框架与实践落地之间的脱节一定程度上制约了气候变化海洋生态风险评估工作的深度和广度。在此背景下,本研究以 IPCC 概念框架为基础,系统梳理气候变化风险理论与框架的演进脉络及其在海洋生态风险领域的应用发展,从研究主题、指标维度、评估方法体系深入分析当前的研究热点与局限,并基于多学科交叉视角展望未来发展。本研究成果将有助于推动气候风险理论及框架在海洋领域的适应性实践,同时提升其在海洋保护与应对气候变化政策中的科学支撑能力。

1　气候风险理论及其框架发展演进

1.1　基础概念

IPCC 将气候风险明确定义为气候变化对自然系统和人类社会造成不利影响的可能性,其大小取决于致灾因子、暴露度和脆弱性三要素的相互作用[4]。在这一概念体系中,脆弱性作为系统的内在属性(包括敏感性与适应能力)构成风险要素的子集,而风险评估的核心特征则体现在对致灾事件发生概率及其不确定性的量化分析。

脆弱性源于拉丁语“vulnerare”,意为可能受伤或受损害的潜在可能性[11]。在气候变化语境,脆弱性强调系统暴露于环境和社会变化相关的压力时,因适应能力缺失而易损状态的系统属性,用于描述系统的易损性、低弹性以及边缘化程度[12]。早期,气候脆弱性常被等同于气候变化的影响,主要强调外部气候胁迫的物理效应[13]。IPCC 第一次评估报告(FAR)也沿用了这一理解[14]。然而,随着理论的不断演进,脆弱性的内涵逐步整合了敏感性、恢复力等维度,并被细分为物理、社会、经济和环境脆弱性等不同类型[15]。

与此同时,经典风险理论通常将风险量化为“不利事件发生的可能性与其后果严重程度的函数”[16]。初期研究将气候风险视为脆弱性在气候胁胁迫下的线性表征[14]。但随着灾害学的发展,气候风险被解构为致灾因子、暴露度与脆弱性的函数[17],这一转变推动了 IPCC 风险评估框架的独立。

1.2　气候风险框架演进及其在海洋领域的应用历程

IPCC 框架凭借其系统性和政策导向性,已成为气候风险评估的主导框架和基准范式[10]。其演进与国际气候治理进程呈现出显著的协同演化趋势,并在海洋领域展现出独特的应用历程。

气候脆弱性的概念化进程可追溯至第一次评估报告(FAR)[18]。FAR 的补充报告首次尝试评估海平面上升的脆弱性,但尚未明确脆弱性的内在维度[19]。1995 年,IPCC 第二次评估报告(SAR)首次系统性地将“脆弱性”纳入气候变化评估中,将其定义为“气候变化可能破坏或危害一个系统的程度”[20]。SAR 强调了气候变化的幅度和速率对于系统敏感性、适应性及整体脆弱性的重要性,标志着理论聚焦点从“物理影响描述”向“系统响应过程”的初步转变。在 IPCC 理论框架的初期探索阶段,海洋实践多聚焦于直接的物理效应和可观测的生态现象[21]。例如,20 世纪 80 年代强厄尔尼诺事件引发的全球性珊瑚白化现象[22],作为早期信号引发了科学界对气候变化下海洋生物多样性和生态安全的初步关注。海平面上升、海表温度异常等单一物理过程因子是该阶段主要的气候变化热点,这些研究初步认识了海洋生态系统对外部气候压力的被动响应。

在 IPCC 第三次评估报告(TAR)[23]和第四次评估报告(AR4)[24]中,“暴露”被正式纳入脆弱性概念,确立了由暴露、敏感性、适应能力三维度构成的概念框架(图 1)。该框架将气候脆弱性定义为“自然或社会系统易受或没有能力对付气候变化(包括气候变率和极端气候事件)不利影响的程度”。在此阶段,气候脆弱性框架成为主导型分析工具,而风险评估尚未发展出独立的方法体系,其概念仍依附于脆弱性分析,主要聚焦于灾害后果分析。“暴露-敏感性-适应能力”三要素框架为海洋气候脆弱性研究奠定了方法论基础[25]。同时,《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》的签署与实施强化了海洋领域对脆弱性评估的需求。其中,AR4 增设“海洋与海岸系统”独立章节[24],标志着海洋生态系统正式纳入气候变化评估的核心议题。在该阶段,渐进式风险因子对海洋生态系统的暴露风险评估成为主流,升温、酸化、富营养化等渐进式风险源的叠加作用开始受到重视。研究者们逐步采用加权评估模型等方法来量化多重胁迫因子的耦合效应[26]。同时,海洋领域气

候脆弱性呈现出显著的学科视角差异,如生态学家主要关注海洋物种的生理耐受阈值[27],而社会科学研究者则主张强调沿海社区生计对海洋资源的依赖度与制度韧性[12],关注社会层面的适应性。这种多元化促进了对海洋自然社会与生态系统交互影响的理解,但也对综合性脆弱性指标体系的构建提出了新的挑战。

IPCC 的《关于管理极端事件和灾害风险以促进气候变化适应》特别报告(SREX)[28]、第五次评估报告(AR5)[29]和第六次评估报告(AR6)[30]实现了理论框架的范式转变。这些报告将“暴露”从脆弱性范畴中解耦,使其成为与致灾因子、脆弱性并列的独立风险要素。该框架突破性地将脆弱性重新定义为系统的敏感性与适应能力的内在属性组合,暴露的内涵由系统面对的气候致灾因子压力演变为系统与致灾因子相互作用的体现(图 1)。基于此,气候风险被视为气候变化的致灾因子、暴露与脆弱性三者动态协同作用的产物。2015 年《巴黎协定》的实施与 IPCC 理论框架的范式转变,协同推动了社会-生态耦合评估方法的探索,海洋和沿海生态系统的适应性研究日益增多。在此背景下催生的如分层脆弱性分析框架[31]将生物物理暴露、渔业资源依赖度与地方治理能力纳入统一分析体系,实现自然与社会系统的有机整合。在此阶段,对突发式极端事件的认识也显著增强。2019 年,IPCC 的《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》(SROCC)着重关注了海洋热浪等极端事件对海草床等敏感生态系统的不定期损失,凸显了耦合渐进性和突发式风险源的需求[32]。

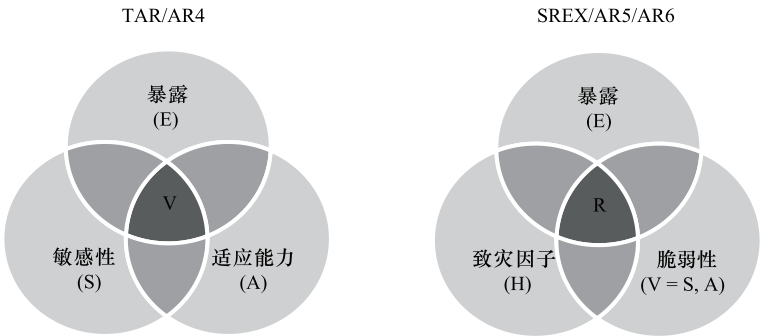

图 1 IPCC 对于气候脆弱性和风险框架的定义与演变,修改自[10]

Fig.1 Definitions and evolution of the IPCC frameworks for climate vulnerability and risk

IPCC:政府间气候变化专门委员会;TAR:IPCC 第三次评估报告;AR4:IPCC 第四次评估报告;SREX:IPCC《关于管理极端事件和灾害风险以促进气候变化适应》特别报告;AR5:第二次评估报告;左图中:V:脆弱性,指系统易受或没有能力对付气候变化包括气候变率和极端气候事件不利影响的程度,是某一系统气候的变率特征、幅度和变化速率及其敏感性和适应能力的函数;E: 暴露,指系统暴露于显著气候变化的性质和程度;S: 敏感性,指系统受与气候有关的刺激因素影响的程度,包括不利和有利影响;A: 适应能力,指某系统适应(包括气候变率和极端气候事件)、减轻潜在损失、利用机遇或应对气候变化的能力

右图中:R: 风险,指造成有价值的事物处于险境且结果不确定的可能性。风险来自脆弱性、暴露以及危害的相互作用;E: 暴露,指人员、生计、物种或生态系统、环境功能、服务和资源、基础设施或经济、社会或文化资产有可能受到不利影响的位置和环境;H: 致灾因子,指可能发生的自然或人为物理事件或趋势,或物理影响,它可造成生命损失、伤害或其它健康影响,以及财产、基础设施、生计、服务提供、生态系统以及环境资源的损害和损失;V: 脆弱性,指易受不利影响的倾向或习性。脆弱性包括对致灾因子的敏感性或易感性(S)以及应对和适应能力(A)的缺乏

2020 年后,IPBES-IPCC 联合报告(2021)[33]和 AR6 将风险框架推向实践新高度。“风险级联效应”概念与 AR6 强调的“气候-生态-社会系统”的非线性交互作用[30],共同推动了气候风险评估从单一灾害分析向复杂系统耦合评估的转型,标志着气候风险分析框架趋于成熟。在联合国“海洋科学促进可持续发展十年”的启动下,海洋领域的研究前沿开始关注风险级联效应与临界点预警,强调海洋生态风险通过生物地球化学与社会经济系统的非线性传导路径[34]。

上述发展历程表明,气候变化在海洋领域的风险评估实现了从现象观测到理论构建、从单一维度分析到多维度系统整合的深刻变革。该领域的发展始终与国际科学共识演进和全球气候治理进程紧密交织,形成了

科学认识深化与政策需求反馈相互驱动的动态发展格局(图 2)。

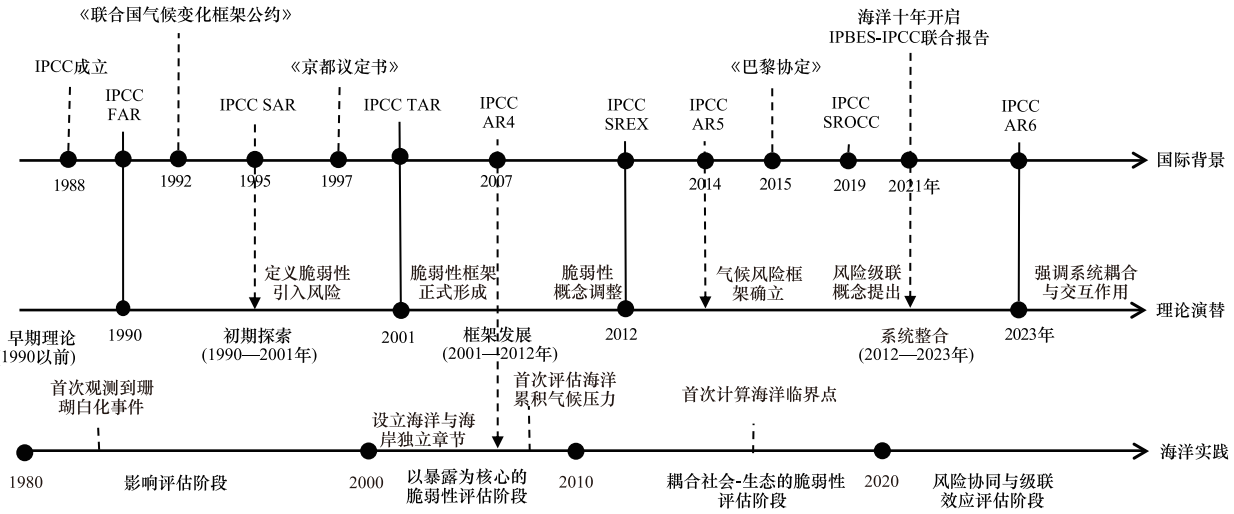

图 2　气候脆弱性与风险在海洋领域的发展历程(1980 年至今)

Fig.2　Development trajectory of climate vulnerability and risk in marine (1980 to present)

IPCC:政府间气候变化专门委员会;IPBES:生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台;FAR:IPCC 第一次评估报告;SAR:IPCC 第二次评估报告;TAR:IPCC 第三次评估报告;AR4:IPCC 第四次评估报告;SREX:IPCC《关于管理极端事件和灾害风险以促进气候变化适应》特别报告;AR5:第二次评估报告;SROCC:IPCC《气候变化中的海洋和冰冻圈》特别报告;AR6:第六次评估报告

2　气候变化对海洋生态系统的风险评估实践

本研究基于 Web of Science 核心合集科学引文索引扩展(SCI-E)数据库,采用系统文献计量方法对气候脆弱性和气候风险在海洋生态领域的评估研究进展进行分析。2025 年进行检索工作,其检索主题词为 TS=(“Climate vulnerability and risk” OR “Ecological risk under climate change” OR “Risk assessment under climate vulnerability” OR “Integrated ecological risk and vulnerability assessment” OR “Climate change vulnerability risk model” OR “Risk-based vulnerability framework” OR “climate vulnerability index” OR “climate vulnerability” OR “climate ecological risk”),同时排除会议论文,时间跨度为 1998—2024 年,经过去重,初步获得有效文献 864 篇。再经人工筛选(删除非海洋气候脆弱性和风险评估主题的文献),最终获得有效文献 101 篇,其文献的时间跨度主要集中在 2007—2024 年(占有效文献 11.69%),提取文献的全文内容,形成核心分析数据集。

2.1　研究主题

本研究采用三级分类对海洋气候脆弱性与风险评估的研究主题及其特征(图 3)。从研究类型来看,实证研究(71 篇,83.53%)显著多于综述或观点类论文(14 篇,16.47%)。从风险的维度来看,39.44%的研究聚焦于单一维度(以敏感性为主),而 60.56%采用多维度的综合框架,但其中大部分研究仍沿用是 IPCC TAR/AR4 的定义及“暴露-敏感性-适应能力”的三要素框架[35—38],甚至部分将适应能力归入敏感性维度[39—42]。值得注意的是,只有 5 篇文献基于 IPCC 调整后的框架开展评估,其中最早的一篇研究为 2016 年对地中海低洼国家的区域气候综合风险评估[43]。在评估对象方面,63.38%的文献涉及了多种气候因子,但普遍缺乏风险源交互作用研究[35,37,38,41,44—46];自然生态系统仍是评估对象的主体,自然-生态耦合系统则仅占 7.04%(图 3)。

2.2　核心指标

本研究基于 IPCC 的风险评估框架,对实证类文献进行指标解析,并根据致灾因子、暴露与脆弱性三大维度归纳风险评估的指标。在此基础上,针对各个维度,进一步按类型、一级指标层、二级指标进行逐层细化,类型表征各维度下的指标属性特征,一级指标反映不同类型下的指标综合属性,二级指标对应具体可量化参数。

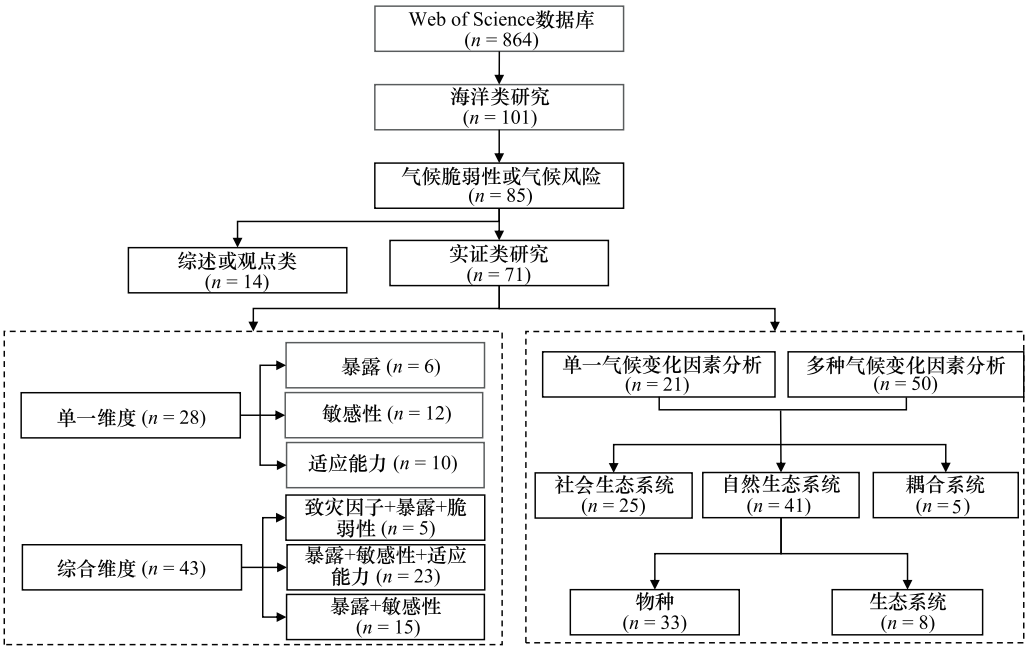

图 3 气候风险在海洋领域的研究类型

Fig.3 Research types of climate vulnerability and risk in marine

在致灾因子维度,根据涉及因子的数量分为单因素和多因素两种类型,其中单因素再根据风险源作用的路径进一步区分渐进式(如气候变暖、海平面上升等)与突变式(风暴潮、厄尔尼诺事件等),多因素类型细分为突变式主导、渐进式主导以及混合型三种交互模式。在暴露维度,从时间尺度和空间尺度两个类型分析暴露方式,其中时间尺度包含历史演变趋势和未来情景模拟两种,空间尺度包含地理跨度与空间异质性。在脆弱性维度,采用敏感性和适应能力二元分析,其中敏感性涵盖系统自身属性以及对于气候变化因素的响应程度,适应能力则划分为生态属性和社会属性两类。在此基础上,通过统计二级指标在文献中的出现频次,揭示指标应用偏好(表 1)。

对于致灾因子,渐进性风险源特别是气候变暖是目前海洋生态领域中的研究热点(占单因素分析的 76.19%),而 58%的多因素研究同时考虑了渐进性与突变性风险源。对于暴露维度而言,85.92%的研究聚焦于局域或区域尺度,沿海到浅海区域是现有海洋生态系统气候脆弱性研究的高地[47—49];在时间尺度上,以 10—30 年的历史中长期回溯和未来中期高排放情景研究为主[49—51]。在脆弱性维度,敏感性指标主要关注海洋物种或种群的内在属性,生理耐受特性、物种现状特征、生境依存特性等生理生态特征指标被广泛采用,其中,温度敏感性应用频次最多[46,50,52],其次是生境特异性[40,46,53]、捕食专一性[39,40,45]、种群丰度[39,53—54]和受威胁程度[39,42,45]等指标;适应能力主要聚焦于评估沿海社会应对气候变化的能力以及自然生态系统从气候变化影响中恢复的能力,在社会和自然属性方面呈现明显的学科差异,如社会属性方面以制度支持水平[38,55—56]、基础设施建设水平[55,57—58]、社会组织与协助能力[59—61]为目前评估的主要指标,而生态属性则以物种数量/密度[37,62]、繁殖能力[35,46,63]和迁移扩散能力[35,46]等为主要指标。

2.3 评估方法

在系统梳理实证文献研究的基础上,按照模型构建逻辑与评估维度的侧重点,本研究将气候脆弱性评估方法归纳为三类主流类型:统计生态位模型、基于特征的专家打分(TVA)以及机制过程模型。这三类方法分别依赖不同的数据基础与理论假设(表 2),但均能与气候风险评估逻辑相契合,进而分别支撑空间概率耦合、

风险评级/矩阵打分以及动态风险模拟三类风险评估路径。

表 1　海洋领域中气候脆弱性与气候风险的相关评估指标

Table 1　Assessment indicators of climate vulnerability and risk in marine

维度 Dimensions		类型 Types	指标层级 Indicator Levels	
			一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator
致灾因子 Hazard		单因素	突变式	风暴潮(1);厄尔尼诺事件(1)
			渐进式	气候变暖(16);海平面上升(2);缺氧环境(1)
		多因素	突变式主导	两种因素(1)
			渐进式主导	两种因素(5);三种及以上因素(15)
			混合型	两种因素(5);三种及以上因素(24)
暴露 Exposure		时间尺度	历史演变趋势	5—10 年(2);10—20 年(9);20—30 年(5);30—50 年(5);50 年及以上(5)
			未来情景模拟	21 世纪中叶:RCP 2.6(1);RCP 4.5(3);RCP 8.5(13);SSP 1—1.9(1);SSP 4—6.0(1);SSP1—2.6(1);SSP2—4.5(1);SSP5—8.5(4);
				21 世纪末期:RCP 2.6(1);RCP 4.5(4);RCP 8.5(4);SSP 1—1.9(1);SSP 4—6.0(1);SSP1—2.6(1);SSP2—4.5(1);SSP5—8.5(3)
		空间尺度	地理跨度	全球(5);区域(49);局域(12)
			空间类型	沿海城市群(28);潮间带(15);近岸浅海(31);开放大洋(13)
脆弱性 Vulnerability	敏感性	内在属性	繁殖特征	繁殖策略的复杂性 (10);产卵周期 (9);繁殖潜力 (4);世代周期 (2);基因可塑性 (2)
			生理耐受特性	温度敏感性 (19);酸化敏感性 (11);盐度敏感性 (4);环境抗性 (2)
			物种扩散能力	迁徙或移动能力 (12);早期生命阶段的扩散能力 (10)
			物种现状特征	种群丰度(13);种群增长率(12);受威胁程度(13);最大体长(2)
			生境依存特性	生境特异性 (15);捕食专一性(13);生命早期阶段的环境需求(9);纬度或深度范围(3)
		响应程度	未来变化情况	分布(2);资源量(3);覆盖率(3)
			过去健康状态	硬珊瑚白化率(2)
	适应能力	社会属性	社会教育水平	气候变化认知(6);受教育程度(5);知识技能支持(2);性别教育差距(2)
			社会经济基础	人口密度(2);人均 GDP(2);财政收入(2);家庭资产分配(2);贫困率(2);生计多样性(5)
			灾害应对能力	制度支持水平(9);社会组织与协作能力(6);基础设施建设水平(6);资源可利用性与获取便利性(4);
		生态属性	结构特征	物种数量/密度(3);物种年龄结构(2);生物多样性水平(2)
			功能恢复	繁殖能力(3);迁移扩散能力(3);资源补充(2);生态弹性(2)

( )内为指标在实证类研究中出现的频次;括号内为指标在实证类研究中出现的频次;RCP:代表性浓度路径 Representative Concentration Pathways;SSP:共享社会经济路径 Shared Socioeconomic Pathways;SSP1/RCP 2.6:低排放/可持续情景;SSP2/RCP 4.5:中等排放情景;SSP5/RCP 8.5:高排放情景

统计生态位模型假设物种与气候处于平衡状态,通过物种分布或资源量与环境因子之间的相关性构建生态位模型,进而预测未来分布范围或丰度的变化[40,64—65]。该方法广泛应用于暴露维度的评估工具,常用于空间概率叠加以形成气候暴露图[44,66]。然而,对于栖息地分布受地理障碍或物种间作用影响较强的物种,其适用性较差,且难以反映种群对气候变化的生理响应能力。

基于特征的脆弱性评估法(TVA)通过参数化物种生物学特征,构建“暴露-敏感性-适应能力”或“暴露-敏感性”评价体系[42,67],分析个体、群体、生态系统特征与气候变化脆弱性的关系及其程度。在分布数据缺失时,部分研究采用简化模型省略暴露度评估[35,56,68],直接通过特征加权将物种归类至不同的脆弱等级。该方法在分布数据缺乏时具有较高的实用价值,但面临专家判断的主观性以及跨类群指标不一致的问题[40,53,69]。部分研究通过采用 Bootstrap 分析降低主观性[45,65]。TVA 是最早提出的方法之一,但近年来才逐渐受到重视[64]。

机制过程模型通过整合生理耐受参数与气候预测数据,结合多情景气候模拟结果,动态模拟气候压力的

传导机制[41,62,70]。与静态模型相比,其优势在于能够整合多尺度气候压力[71—72],适应多种气候变化影响机制。然而,该方法需大量基础实验与物种数据支撑,适用范围相对受限。

在与风险评估衔接时,脆弱性评估在海洋领域主要衍生出三种应用方式:空间概率耦合、风险评级/矩阵打分和动态风险模拟(表 2)。其中,空间概率耦合方法通过叠加物种分布概率与气候因子的时空变化,构建风险暴露的空间分布图,用于识别高风险区域[63]。风险评级或矩阵打分方法延续传统相对风险评估的思路,将暴露、敏感性和适应能力等指标进行分级或赋权组合,输出离散化的风险等级类型,具有操作简便、政策适配性强的特点[67]。动态风险模拟方法则突破了脆弱性评估与风险量化之间的静态割裂,动态解析气候压力沿“压力-响应-适应”路径的非线性风险传导过程[66,73]。

表 2 海洋领域中气候脆弱性与气候风险的主要应用方法比较

Table 2 Comparison of major application methods for climate vulnerability and risk in marine

方法 Methods	基本原理 Theories	侧重点 Focus	优势 Advantages	不足 Limitations	具体模型 Specific models	适配风险方法 Adapted climate risk method
统计生态位模型 Statistical niche model	以当前分布数据推断环境生态位,通过统计方法构建空间响应模型	暴露	适用于预测未来空间分布;制作风险空间分布图	忽略生理机制;对狭布种适用性差	单物种生态位模型:最大熵模型/广义线性模型/随机森林等;多物种生态位模型:堆叠种群分布模型;联合物种分布模型等	空间概率耦合
基于特征的专家打分 Trait-based expert scoring	参数化物种特征,构建敏感性与适应能力指标体系,依赖专家判断赋值	敏感性/适应能力	快速适用于多物种;适配缺乏监测数据的区域	未能考虑实际响应机制;主观性较强;类群间可比性不足	基础特征赋权:Hare 逻辑评分模型/基于专家经验设定阈值 指数型综合评价:CIVI 指数法/加权平均法; 结构化专家系统打分:层级式专家评估法/德尔菲法	风险评级/矩阵打分
机制过程模型 Mechanistic process model	耦合生理耐受性与气候因子,构建系统性、过程驱动的动态响应路径	临界阈值与非线性响应	能够适应多种气候变化影响机制;可以明确风险阈值	数据需求高;适用物种有限	例如:动态能量收支模型;热阈模型	动态风险模拟

在实际应用中,前两类方法将气候风险视作脆弱性指标的线性输出,具有良好的通用性和适用性,因而在海洋评估中被广泛采用。然而,它们普遍忽视了生态系统的多稳态行为与反馈机制,可能导致风险识别的系统性偏差。相比之下,动态模拟方法虽能揭示非线性交互和潜在的阈值效应,但对数据、建模技术和跨学科能力的要求较高,限制了其在大范围应用中的可行性。因此,未来提升海洋气候风险评估的科学性与可信度,需在保持通用评估路径操作性的基础上,推动机制模型的引入与多方法融合,增强对复杂生态过程与系统响应机制的评估能力。

3 挑战与展望

3.1 加强 IPCC 气候框架在海洋生态风险评估中的适应性实践

本研究发现,当前海洋气候风险评估存在明显的研究偏向和理论实践脱节现象。在研究对象上,渔业资源及沿海经济的相关研究占比高达 52.11%,而暖水珊瑚、红树林、大型海藻和极地生态系统等气候敏感生态系统却很少。在理论应用层面,尽管暖水珊瑚、红树林等典型生态系统已积累丰富的气候变化响应机制研究成果,但多数研究仍停留在暴露分析或响应表征,尚未依据风险框架进行系统整合。这种研究局限不仅限制了对海洋生物多样性和生态系统服务功能所面临风险的系统性认知,也未能充分揭示海洋生态系统自身应对

气候变化的复杂适应机制。

在理论框架上,IPCC AR5/AR6 提出的“致灾因子-暴露-脆弱性”(HEV)框架在海洋领域的应用显著滞后。高达 93%的研究未采纳 IPCC AR5(2014)后的更新框架,其中约 32%仍沿用 TAR/AR4 的定义,而超过 30%仅针对脆弱性中的某一维度进行评估。更为突出的是,部分研究未明确阐述所采用的理论框架及其指标体系,致使理论基础不够清晰。

在我国气候变化对海洋生态风险评估的本土化实践中,应重点聚焦我国特色海洋生态系统类型(如红树林、海草床、造礁石珊瑚、滨海盐沼、牡蛎礁等)和典型突出的复合风险(如海平面上升与风暴潮叠加、海洋酸化与缺氧),以构建更具针对性的评估方法体系。虽然我国在海洋气候变化响应方面已开展了一系列本底调查和观测,为气候风险评估提供了初步的数据支撑,但数据可用性与精度仍是当前面临的重要瓶颈[74]。生物物理数据与社会经济数据在时空尺度上高度异质化,气候模型预测尺度(通常为百公里)与管理尺度(如海洋保护区)之间的尺度不匹配问题亦普遍存在[75]。近年来,跨尺度的气候-生态降维建模方法,尤其是迁移学习与地理情境自适应加权系统的结合,为将 CMIP6 等百公里级预测结果有效下推至管理单元提供了技术支撑[76]。同时,随着 AI 驱动的多源数据互验技术不断演进,机制模型与统计模型的融合趋势愈发明显[77],TVA 法、贝叶斯模型与过程模型之间的互补将逐步推动多源数据的机理-实证闭环,有效降低评估不确定性。未来,我国应进一步加强国家海洋综合观测网络建设,提升海洋环境、生物及社会经济本底数据的分辨率与覆盖率,并充分利用大数据和人工智能技术,实现多源异构海洋数据的深度整合与协同建模,为我国开展气候变化的海洋生态风险评估提供坚实的数据和方法支撑。

3.2　深化海洋生态系统对气候变化的适应能力评估

在气候变化的海洋生态风险评估实践中,敏感性与适应能力的指标界定存在明显的混淆,这一问题的特殊性在海洋环境中尤为突出(表 2)。例如,“繁殖能力”这一指标,高繁殖产出与种群连通性可增强物种的区域扩散与存续潜力,因此被视为适应能力的体现[46,78—79];然而,也有研究认为高繁殖力意味着对环境变化具有较低的敏感性,从而将其纳入敏感性维度[80]。尽管已有研究通过专家打分方式来判定指标归属[35],但该方法主观性强、可复制性差的问题仍难以克服。

相较于陆地生态系统,海洋生态系统表现出更强的连通性和复杂性,许多海洋生物也具备较高的主动适应能力,例如通过迁徙或生理调节以应对气候变化[81]。然而,现有研究常因过度依赖静态指标而低估了海洋生物的潜在生态位和主动适应能力,从而可能高估了海洋生态系统所面临的气候风险[82]。同时,根据文献计量的分析,相较于社会经济适应性,基于生态层面的适应能力指标在研究深度与量化评估方面仍显不足。例如,游泳动物的迁移性、海洋植物的基因可塑性等关键生态适应性特征仍值得深入研究[83]。

本研究建议在未来评估中明确区分敏感性与适应能力,将敏感性视为海洋生物或系统的内在属性与当前状态,而将适应能力界定为海洋生态系统或物种在面对气候变化影响时,通过内在调节机制(如迁移能力、基因适应性)和外部管理干预(如栖息地修复、人工增殖)来减轻损害、维持功能或恢复原状的潜力。适应能力不仅刻画了系统应对气候变化的动态适应策略,更重要的是为应对气候变化的适应性管理提供了可量化的政策作用点。因此,对于具有双重解释特征的指标(如繁殖能力),建议优先归类至适应能力维度。

3.3　关注气候变化下海洋生态风险的非线性传导与级联效应

IPCC AR5 标志着从单一暴露维度评估向“致灾因子-暴露-脆弱性”多维耦合范式的转变。然而,在多维度的耦合方法层面,当前研究仍普遍采用维度间的简单算术运算(加/乘法),未能体现其内在复杂关系,即使在最新陆域研究中亦是如此[84]。这种简化处理难以刻画生态系统在气候驱动下的非线性演化与反馈机制。未来复合气候风险评估亟需深入解析致灾因子、暴露与脆弱性之间更深层次的内在关联和动态响应机制。

当前,海洋生态系统面临的气候风险呈现出典型的复合放大特征。在风险源方面,主要表现为渐进式变化(如温升、海平面上升、酸化)与突发事件(如海洋热浪、极端降水、强风暴)的时空耦合,并通过正反馈循环产生放大效应。例如,海洋中海冰融化导致的反照率下降,会进一步加剧海洋吸热,从而形成正反馈,加速全

球变暖[85]。本研究在文献计量过程中发现,当前研究对不同类型风险源之间的非线性交互,特别是对敏感海洋物种或生态系统的风险源组合缺乏系统解析。此外,不同风险源组合对功能群可能产生差异化的协同或拮抗作用[86]。针对这一复杂性,亟需建立多重风险源对多个海洋风险受体的因果链。传统的自上而下评估方法可能难以充分捕捉复合事件的复杂性,未来研究应更转向基于生态响应的自下而上评估范式[85]。从气候变化对特定受体或系统产生的具体影响或后果出发,反推复合气候风险因子的选择和评估,解析特定海洋生物或生态系统面临的多重气候风险源之间的交互模式。

此外,从风险受体的角度,生态风险具有典型的多层级联特征,从生理水平(如鱼类代谢变化)逐步传导至群落结构(如珊瑚礁崩溃),进而诱发社会经济系统的连锁效应(如渔业生计受损)[87]。然而,当前多数研究仍未充分考虑多风险源作用下的海洋生态系统反馈回路,忽视了跨系统协同放大的潜在风险。特别是海洋生物反馈回路,涉及对种间相互作用(如捕食者-猎物、竞争、共生)的机制解析,存在大量未知但潜在的反馈回路[88]。例如,在某些珊瑚礁生态系统中,耐热性更强的共生藻类与珊瑚虫建立新的共生关系,能够提高珊瑚对海洋热浪的耐受性,从而在一定程度上减缓白化死亡[89]。引入经济学中关于风险扩散与反馈路径的建模方法,可有效拓展风险动态响应的理论与技术边界。

因此,为实现更高层次的系统耦合评估,本研究建议从以下三个方面展开工作。首先,从自然系统角度出发,关注海洋生态水平分层中的响应差异,如潮间带-浅海梯度的连通性,并加强海洋垂直分层评估[90]。其次,在生态网络层面,考虑引入食物网结构与迁徙性物种的连通性指标等[84],加强种间作用在综合评估中的量化。另外,从社会系统层面强化陆海统筹,同时推动极地与公海生态系统管理机制的协同构建。未来海洋风险评估应在机制识别基础上构建“致灾因子-暴露路径-响应阈值-反馈机制”闭环体系,形成具备垂直分层特征与陆海统筹能力的协同建模框架,为多系统协同治理提供科学支撑。

参考文献(References):

[1] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. Ecology Letters, 2012, 15(4): 365-377.

[2] Brown M B, Morrison J C, Schulz T T, Cross M S, Püschel-Hoeneisen N, Suresh V, Eguren A. Using the conservation standards framework to address the effects of climate change on biodiversity and ecosystem services. Climate, 2022, 10(2): 13.

[3] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.

[4] IPCC: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. 2023

[5] Doney S C, Ruckelshaus M, Duffy J E, Barry J P, Chan F, English C A, Galindo H M, Grebmeier J M, Hollowed A B, Knowlton N, Polovina J, Rabalais N N, Sydeman W J, Talley L D. Climate change impacts on marine ecosystems. Annual Review of Marine Science, 2012, 4: 11-37.

[6] UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). The National Adaptation Plan Process: A Brief Overview. United Nations Framework Convention on Climate Change.

[7] 樊星, 李路, 高翔, 陈志华. COP28 全球盘点成果解读及全球气候治理形势展望. 气候变化研究进展, 2024, 20(2): 253-260.

[8] 黄磊, 贾根锁, 房世波, 上官冬辉, 胡永红, 张兆明, 彭代亮. 地球大数据支撑联合国可持续发展目标:气候变化与应对. 中国科学院院刊, 2021, 36(8): 923-931.

[9] 王一婷, 陈利顶, 李纯, 李泞吕, 易盛媛. 面向可持续发展目标的社会-生态系统研究进展——基于文献计量分析. 生态学报, 2023, 43(22): 9564-9575.

[10] Estoque R C, Ishtiaque A, Parajuli J, Athukorala D, Rabby Y W, Ooba M. Has the IPCC's revised vulnerability concept been well adopted Ambio, 2023, 52(2): 376-389.

[11] 李莉, 王晓婷, 王辉. 脆弱性内涵、评价与研究趋势综述. 中国渔业经济, 2010, 28(3): 161-169.

[12] Adger W N. Vulnerability. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 268-281.

[13] Weichselgartner J. Disaster mitigation: the concept of vulnerability revisited. Disaster Prevention and Management, 2001, 10(2): 85-95.

[14] Füssel H M, Klein R J T. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. Climatic Change, 2006, 75(3): 301-329.

[15] Dow K. Exploring differences in our common future(s): the meaning of vulnerability to global environmental change. Geoforum, 1992, 23(3): 417-436.

[16] Kaplan S, Garrick B J. On the quantitative definition of risk. Risk Analysis, 1981, 1(1): 11-27.

[17] UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030.

[18] IPCC. Climate Change: The IPCC Impacts Assessment. Tegart W J M, Sheldon G W, Griffiths D C, eds. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1990.

[19] IPCC. The Supplementary Report to the IPCC Impacts Assessment. Tegart W J M, Sheldon G W, eds. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1992.

[20] Boorman L. Climate change 1995-Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses: Contribution of working group II to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Biological Conservation, 1997, 81(3): 301.

[21] Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. Marine and Freshwater Research, 1999: MF99078.

[22] Glynn, P. W., Wellington G. M. Corals and coral reefs of the Galapagos Islands. Limnology and Oceanography, 1986, 31(1): 235.

[23] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and vulnerability contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, ed. J.J. McCarthy, et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2001.

[24] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and vulnerability: contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, ed. M.L. Parry, et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2007.

[25] Turner B L 2nd, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14): 8074-8079.

[26] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, Kappel C V, Micheli F, D'Agrosa C, Bruno J F, Casey K S, Ebert C, Fox H E, Fujita R, Heinemann D, Lenihan H S, Madin E M P, Perry M T, Selig E R, Spalding M, Steneck R, Watson R. A global map of human impact on marine ecosystems. Science, 2008, 319(5865): 948-952.

[27] Hoegh-Guldberg O. Coral reefs and projections of future change//Coral Health and Disease. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 463-484.

[28] IPCC. Summary for Policymakers. In Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. C.B. Field, et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012.

[29] IPCC. Summary for Policymakers. In Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. C.B. Field, et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2014.

[30] IPCC. Summary for Policymakers. In Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. H.-O. Pörtner et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2022.

[31] Cinner J E, Adger W N, Allison E H, Barnes M L, Brown K, Cohen P J, Gelcich S, Hicks C C, Hughes T P, Lau J, Marshall N A, Morrison T H. Building adaptive capacity to climate change in tropical coastal communities. Nature Climate Change, 2018, 8(2): 117-123.

[32] IPCC. Summary for Policymakers. Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, ed. H.-O. Pörtner et al. In press. 2019.

[33] Pörtner H O, Scholes R J, Agard J, et al. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. Zenodo, 2021.

[34] Rocha J C, Peterson G D, Biggs R. Regime Shifts in the Anthropocene: Drivers, Risks, and Resilience. PLOS ONE, 2015, 10(8): e0134639. drivers, risks, and resilience. PLoS One, 2015, 10(8): e0134639.

[35] Nyboer E A, Lin H Y, Bennett J R, Gabriel J, Twardek W, Chhor A D, Daly L, Dolson S, Guitard E, Holder P, Mozzon C M, Trahan A, Zimmermann D, Kesner-Reyes K, Garilao C, Kaschner K, Cooke S J. Global assessment of marine and freshwater recreational fish reveals mismatch in climate change vulnerability and conservation effort. Global Change Biology, 2021, 27(19): 4799-4824.

[36] Fleming C S, Regan S D, Freitag A, Burkart H. Indicators and participatory processes: a framework for assessing integrated climate vulnerability and risk as applied in Los Angeles County, California. Natural Hazards, 2023, 115(3): 2069-2095.

[37] Sardar P, Samadder S R. Long-term ecological vulnerability assessment of Indian Sundarban region under present and future climatic conditions under CMIP6 model. Ecological Informatics, 2023, 76: 102140.

[38] Losciale R, Day J C, Rasheed M A, Heron S F. The vulnerability of World Heritage seagrass habitats to climate change. Global Change Biology, 2024, 30(1): e17113.

[39] Sousa A, Alves F, Arranz P, Dinis A, Fernandez M, González García L, Morales M, Lettrich M, Encarnação Coelho R, Costa H, Capela Lourenço T, Azevedo N M J, Frazão Santos C. Climate change vulnerability of cetaceans in macaronesia: insights from a trait-based assessment. Science of The Total Environment, 2021, 795: 148652.

[40] Moll D, Asmus H, Blöcker A, Böttcher U, Conradt J, Färber L, Funk N, Funk S, Gutte H, Hinrichsen H H, Kotterba P, Krumme U, Madiraca F, Markus Meier H E, Meyer S, Moritz T, Otto S A, Pinto G, Polte P, Riekhof M C, Sarrazin V, Schwermer H, Scotti M, Voss R, Winkler H, Möllmann C. A climate vulnerability assessment of the fish community in the Western Baltic Sea. Scientific Reports, 2024, 14: 16184.

[41] Kjesbu O S, Sundby S, Sandø A B, Alix M, Hjøllo S S, Tiedemann M, Skern-Mauritzen M, Junge C, Fossheim M, Thorsen Broms C, Søvik G, Zimmermann F, Nedreaas K, Eriksen E, Höffle H, Hjelset A M, Kvamme C, Reecht Y, Knutsen H, Aglen A, Albert O T, Berg E, Bogstad B, Durif C, Halvorsen K T, Høines Å, Hvingel C, Johannesen E, Johnsen E, Moland E, Skuggedal Myksvoll M, Nøttestad L, Olsen E, Skaret G, Skjæraasen J E, Slotte A, Staby A, Stenevik E K, Stiansen J E, Stiasny M, Sundet J H, Vikebø F, Huse G. Highly mixed impacts of near-future climate change on stock productivity proxies in the North East Atlantic. Fish and Fisheries, 2022, 23(3): 601-615.

[42] Spencer P D, Hollowed A B, Sigler M F, Hermann A J, Nelson M W. Trait-based climate vulnerability assessments in data-rich systems: an application to eastern Bering Sea fish and invertebrate stocks. Global Change Biology, 2019, 25(11): 3954-3971.

[43] Torresan S, Critto A, Rizzi J, Zabeo A, Furlan E, Marcomini A. DESYCO: a decision support system for the regional risk assessment of climate change impacts in coastal zones. Ocean & Coastal Management, 2016, 120: 49-63.

[44] Carroll G, Eurich J G, Sherman K D, Glazer R, Braynen M T, Callwood K A, Castañeda A, Dahlgren C, Karr K A, Kleisner K M, Burns-Perez V, Poon S E, Requena N, Sho V, Tate S N, Haukebo S. A participatory climate vulnerability assessment for recreational tidal flats fisheries in Belize and The Bahamas. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1177715.

[45] Ramos J E, Tam J, Aramayo V, Briceño F A, Bandin R, Buitron B, Cuba A, Fernandez E, Flores-Valiente J, Gomez E, Jara H J, Ñiquen M, Rujel J, Salazar C M, Sanjinez M, León R I, Nelson M, Gutiérrez D, Pecl G T. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System. Scientific Reports, 2022, 12: 4800.

[46] Li Y Z, Sun M, Yang X Y, Yang M L, Kleisner K M, Mills K E, Tang Y, Du F Y, Qiu Y S, Ren Y P, Chen Y. Social-ecological vulnerability and risk of China's marine capture fisheries to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(1): e2313773120.

[47] Fortnam M, Atkins M, Brown K, Chaigneau T, Frouws A, Gwaro K, Huxham M, Kairo J, Kimeli A, Kirui B, Sheen K. Multiple impact pathways of the 2015—2016 El Niño in coastal Kenya. Ambio, 2021, 50(1): 174-189.

[48] Kais S M, Islam M S. Impacts of and resilience to climate change at the bottom of the shrimp commodity chain in Bangladesh: a preliminary investigation. Aquaculture, 2018, 493: 406-415.

[49] Wilson S M, Moore J W, Ward E J, Kinsel C W, Anderson J H, Buehrens T W, Carr-Harris C N, Cochran P C, Davies T D, Downen M R, Godbout L, Lisi P J, Litz M N C, Patterson D A, Selbie D T, Sloat M R, Suring E J, Tattam I A, Wyatt G J. Phenological shifts and mismatch with marine productivity vary among Pacific salmon species and populations. Nature Ecology & Evolution, 2023, 7(6): 852-861.

[50] Pita I, Mouillot D, Moullec F, Shin Y J. Contrasted patterns in climate change risk for Mediterranean fisheries. Global Change Biology, 2021, 27(22): 5920-5933.

[51] Dahlke F T, Wohlrab S, Butzin M, Pörtner H O. Thermal bottlenecks in the life cycle define climate vulnerability of fish. Science, 2020, 369(6499): 65-70.

[52] Sasaki M, Barley J M, Gignoux-Wolfsohn S, Hays C G, Kelly M W, Putnam A B, Sheth S N, Villeneuve A R, Cheng B S. Greater evolutionary divergence of thermal limits within marine than terrestrial species. Nature Climate Change, 2022, 12(12): 1175-1180.

[53] McClure M M, Haltuch M A, Willis-Norton E, Huff D D, Hazen E L, Crozier L G, Jacox M G, Nelson M W, Andrews K S, Barnett L A K, Berger A M, Beyer S, Bizzarro J, Boughton D, Cope J M, Carr M, Dewar H, Dick E, Dorval E, Dunham J, Gertseva V, Greene C M, Gustafson R G, Hamel O S, Harvey C J, Henderson M J, Jordan C E, Kaplan I C, Lindley S T, Mantua N J, Matson S E, Monk M H, Moyle P, Nicol C, Pohl J, Rykaczewski R R, Samhouri J F, Sogard S, Tolimieri N, Wallace J, Wetzel C, Bograd S J. Vulnerability to climate change of managed stocks in the California Current large marine ecosystem. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1103767.

[54] Lettrich M D, Asaro M J, Borggaard D L, Dick D M, Griffis R B, Litz J A, Orphanides C D, Palka D L, Soldevilla M S, Balmer B, Chavez S, Cholewiak D, Claridge D, Ewing R Y, Fazioli K L, Fertl D, Fougeres E M, Gannon D, Garrison L, Gilbert J, Gorgone A, Hohn A, Horstman S, Josephson B, Kenney R D, Kiszka J J, Maze-Foley K, McFee W, Mullin K D, Murray K, Pendleton D E, Robbins J, Roberts J J, Rodriguez-Ferrer G, Ronje E I, Rosel P E, Speakman T, Stanistreet J E, Stevens T, Stolen M, Moore R T, Vollmer N L, Wells R, Whitehead H R, Whitt A. Vulnerability to climate change of United States marine mammal stocks in the western North Atlantic, Gulf of Mexico, and Caribbean. PLoS One, 2023, 18(9): e0290643.

[55] Bera A, Taloor A K, Meraj G, Kanga S, Singh S K, Đurin B, Anand S. Climate vulnerability and economic determinants: linkages and risk

reduction in sagar island, India; A geospatial approach. Quaternary Science Advances, 2021, 4: 100038.

[56] Pinto M, Albo-Puigserver M, Bueno-Pardo J, Monteiro J N, Teodósio M A, Leitão F. Eco-socio-economic vulnerability assessment of Portuguese fisheries to climate change. Ecological Economics, 2023, 212: 107928.

[57] Uddin M N, Saiful Islam A K M, Bala S K, Tarekul Islam G M, Adhikary S, Saha D, Haque S, Fahad M G R, Akter R. Mapping of climate vulnerability of the coastal region of Bangladesh using principal component analysis. Applied Geography, 2019, 102: 47-57.

[58] Pinnegar J K, Engelhard G H, Norris N J, Theophille D, Sebastien R D. Assessing vulnerability and adaptive capacity of the fisheries sector in Dominica: long-term climate change and catastrophic hurricanes. ICES Journal of Marine Science, 2019: fsz052.

[59] Aragão G M, López-López L, Punzón A, Guijarro E, Esteban A, García E, González-Irusta J M, Polo J, Vivas M, Hidalgo M. The importance of regional differences in vulnerability to climate change for demersal fisheries. ICES Journal of Marine Science, 2022, 79(2): 506-518.

[60] Jakariya M, Rahman A, Sayem S M, Saad S, Alam M S, Sarker S R, Ali M S, Akter D. Development of livelihood vulnerability index for the coastal fishermen communities of Bangladesh using spatial information technique. Groundwater for Sustainable Development, 2020, 11: 100475.

[61] Zebisch M, Schneiderbauer S, Fritzsche K, Bubeck P, Kienberger S, Kahlenborn W, Schwan S, Below T. The vulnerability sourcebook and climate impact chains-a standardised framework for a climate vulnerability and risk assessment. International Journal of Climate Change Strategies and Management, 2021, 13(1): 35-59.

[62] Smith A, Aguilar J D, Boch C, De Leo G, Hernández-Velasco A, Houck S, Martinez R, Monismith S, Torre J, Woodson C B, Micheli F. Rapid recovery of depleted abalone in Isla natividad, Baja California, Mexico. Ecosphere, 2022, 13(3): e4002.

[63] Cheung W W L, Wei C L, Levin L A. Vulnerability of exploited deep-sea demersal species to ocean warming, deoxygenation, and acidification. Environmental Biology of Fishes, 2022, 105(10): 1301-1315.

[64] Hare J A, Morrison W E, Nelson M W, Stachura M M, Teeters E J, Griffis R B, Alexander M A, Scott J D, Alade L, Bell R J, Chute A S, Curti K L, Curtis T H, Kircheis D, Kocik J F, Lucey S M, McCandless C T, Milke L M, Richardson D E, Robillard E, Walsh H J, McManus M C, Marancik K E, Griswold C A. A vulnerability assessment of fish and invertebrates to climate change on the northeast U.S. continental shelf. PLoS One, 2016, 11(2): e0146756.

[65] Giddens J, Kobayashi D R, Mukai G N M, Asher J, Birkeland C, Fitchett M, Hixon M A, Hutchinson M, Mundy B C, O'Malley J M, Sabater M, Scott M, Stahl J, Toonen R, Trianni M, Woodworth-Jefcoats P A, Wren J L K, Nelson M. Assessing the vulnerability of marine life to climate change in the Pacific Islands region. PLoS One, 2022, 17(7): e0270930.

[66] Burthe S J, Wanless S, Newell M A, Butler A, Daunt F. Assessing the vulnerability of the marine bird community in the western North Sea to climate change and other anthropogenic impacts. Marine Ecology Progress Series, 2014, 507: 277-295.

[67] Ziervogel G, Taylor A. A co-produced national climate change risk and vulnerability assessment framework for South Africa. Frontiers in Climate, 2023, 5: 1197167.

[68] Ogier E, Jennings S, Fowler A, Frusher S, Gardner C, Hamer P, Hobday A J, Linanne A, Mayfield S, Mundy C, Sullivan A, Tuck G, Ward T, Pecl G. Responding to climate change: participatory evaluation of adaptation options for key marine fisheries in Australia's south east. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 97.

[69] Rheuban J E, Kavanaugh M T, Doney S C. Implications of future northwest Atlantic bottom temperatures on the American lobster (*Homarus americanus*) fishery. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(12): 9387-9398.

[70] Majharul Islam S M, Zahangir M M, Ashaf-Ud-Doulah M, Khatun M M, Shahjahan M. Extreme warm acclimation temperature alters oxygen consumption, micronucleus formation in erythrocytes, and gill morphology of rohu (*Labeo rohita*) fingerlings. Fish Physiology and Biochemistry, 2020, 46(6): 2323-2330.

[71] McDaniels T, Wilmot S, Healey M, Hinch S. Vulnerability of Fraser River sockeye salmon to climate change: a life cycle perspective using expert judgments. Journal of Environmental Management, 2010, 91(12): 2771-2780.

[72] Payne N L, Morley S A, Halsey L G, Smith J A, Stuart-Smith R, Waldock C, Bates A E. Fish heating tolerance scales similarly across individual physiology and populations. Communications Biology, 2021, 4: 264.

[73] Stagg C L, Osland M J, Moon J A, Feher L C, Laurenzano C, Lane T C, Jones W R, Hartley S B. Extreme precipitation and flooding contribute to sudden vegetation dieback in a coastal salt marsh. Plants, 2021, 10(9): 1841.

[74] 王华, 邢建勇, 李琳, 张婷. 全球气候变化大背景下我国海洋预警监测工作进展综述. 海洋开发与管理, 2024, 41(11): 3-9.

[75] Kwiatkowski N, Zhang T H, Rahl P B, Abraham B J, Reddy J, Ficarro S B, Dastur A, Amzallag A, Ramaswamy S, Tesar B, Jenkins C E, Hannett N M, McMillin D, Sanda T, Sim T, Kim N D, Look T, Mitsiades C S, Weng A P, Brown J R, Benes C H, Marto J A, Young R A, Gray N S. Targeting transcription regulation in cancer with a covalent CDK7 inhibitor. Nature, 2014, 511(7511): 616-620.

[76] Adshead D, Paszkowski A, Gall S S, Peard A M, Adnan M S G, Verschuur J, Hall J W. Climate threats to coastal infrastructure and sustainable development outcomes. Nature Climate Change, 2024, 14(4): 344-352.

[77] Smith M A, Sullender B K, Koeppen W C, Kuletz K J, Renner H M, Poe A J. An assessment of climate change vulnerability for Important Bird Areas in the Bering Sea and Aleutian Arc. PLoS One, 2019, 14(4): e0214573.

[78] Li Y Z, Sun M, Kleisner K M, Mills K E, Chen Y. A global synthesis of climate vulnerability assessments on marine fisheries: Methods, scales, and knowledge co-production. Global Change Biology, 2023, 29(13): 3545-3561.

[79] Bueno-Pardo J, Nobre D, Monteiro J N, Sousa P M, Costa E F S, Baptista V, Ovelheiro A, Vieira V M N C S, Chícharo L, Gaspar M, Erzini K, Kay S, Queiroga H, Teodósio M A, Leitão F. Climate change vulnerability assessment of the main marine commercial fish and invertebrates of Portugal. Scientific Reports, 2021, 11(1): 2958.

[80] Dineshbabu A P, Zacharia P U, Sujitha T, Shoba J K, Rajesh K M, Vivekanandan E, Pillai S L, Sivadas M, Ghosh S, Ganga U, Nair R J, Najmudeen T M, Koya M, Chellappan A, Dash G, Divipala I, Akhilesh K V, Muktha M, Dash S S, Grindran R, Ninan R G. Assessment of stock vulnerability of Indian marine fishes to past changes in climate and options for adaptation. Climate Research, 2020, 79(3): 175-192.

[81] Campana S E, Smoliński S, Black B A, Morrongiello J R, Alexandroff S J, Andersson C, Bogstad B, Butler P G, Denechaud C, Frank D C, Geffen A J, Godiksen J A, Grønkjaer P, Hjörleifsson E, Jónsdóttir I G, Meekan M, Mette M, Tanner S E, van der Sleen P, von Leesen G. Growth portfolios buffer climate-linked environmental change in marine systems. Ecology, 2023, 104(3): e3918.

[82] Chevalier M, Broennimann O, Guisan A. Climate change may reveal currently unavailable parts of species' ecological niches. Nature Ecology & Evolution, 2024, 8(7): 1298-1310.

[83] Gruenburg L K, Nye J, Lwiza K, Thorne L. Vertical climate velocity adds a critical dimension to species shifts. Nature Climate Change, 2025, 15(6): 656-664.

[84] Saunders S P, DeLuca W V, Bateman B L, Deppe J L, Grand J, Knight E J, Meehan T D, Michel N L, Seavy N E, Smith M A, Taylor L, Witko C J, Wilsey C B. Multispecies migratory connectivity indicates hemispheric-scale risk to bird populations from global change. Nature Ecology & Evolution, 2025, 9(3): 491-504.

[85] Ripple W J, Wolf C, Lenton T M, Gregg J W, Natali S M, Duffy P B, Rockström J, Schellnhuber H J. Many risky feedback loops amplify the need for climate action. One Earth, 2023, 6(2): 86-91.

[86] Simpson N P, Mach K J, Constable A, Hess J, Hogarth R, Howden M, Lawrence J, Lempert R J, Muccione V, MacKey B, New M G, O'Neill B, Otto F, Pörtner H O, Reisinger A, Roberts D, Schmidt D N, Seneviratne S, Strongin S, van Aalst M, Totin E, Trisos C H. A framework for complex climate change risk assessment. One Earth, 2021, 4(4): 489-501.

[87] Adger W N, Brown I, Surminski S. Advances in risk assessment for climate change adaptation policy. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2018, 376(2121): 20180106.

[88] Chaffron S, Delage E, Budinich M, Vintache D, Henry N, Nef C, Ardyna M, Zayed A A, Junger P C, Galand P E, Lovejoy C, Murray A E, Sarmento H, Coordinators T O, Acinas S G, Babin M, Iudicone D, Jaillon O, Karsenti E, Wincker P, Karp-Boss L, Sullivan M B, Bowler C, de Vargas C, Eveillard D. Environmental vulnerability of the global ocean epipelagic plankton community interactome. Science Advances, 2021, 7(35): eabg1921.

[89] Logan C A, Dunne J P, Ryan J S, Baskett M L, Donner S D. Quantifying global potential for coral evolutionary response to climate change. Nature Climate Change, 2021, 11(6): 537-542.

[90] Lin Y X, Chen Y X, Liu X, Lin X, Laws E A, Zhou Y T, Xiang Z Y, Zhang X Y, Chen Z X, Li Y, Lu Y L. Climate-driven connectivity loss impedes species adaptation to warming in the deep ocean. Nature Climate Change, 2025, 15(3): 315-320.