



海洋生态系统临界点的研究进展与展望

杨萧^{1,2}, 谢彰先^{3,4}, 信业宏¹, 王大志^{1,2*}

1. 厦门大学环境与生态学院, 海洋生物地球化学全国重点实验室, 厦门 361005

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

3. 泉州师范学院资源与环境科学学院, 泉州 362000

4. 农村环境整治与废弃物资源化福建省高等学校重点实验室(泉州师范学院), 泉州 362000

* 联系人, E-mail: dzwang@xmu.edu.cn

2026-01-08 收稿, 2026-03-01 修回, 2026-04-08 接受, 2026-04-13 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFC3105300, 2022YFC3105302)资助

摘要 在全球气候变化与人类活动的双重胁迫下, 全球多个海域的生态系统已突破临界阈值, 发生不可逆的结构重组与功能剧变, 严重威胁海洋碳汇、生物多样性及渔业资源等生态服务功能, 对全球生态安全及人类生存发展构成潜在威胁. 本文基于现有研究成果, 系统梳理了海洋生态系统临界点研究典型案例, 全面总结了该领域的核心理论和主流研究方法及其局限性, 明确提出长时序高精度数据缺失、跨尺度驱动机制解析、生态网络结构演化规律、多重胁迫协同作用机制是当前研究面临的核心问题与挑战. 在此基础上, 结合研究瓶颈与保护需求, 对该领域未来研究方向进行了展望, 为海洋生态系统保护、精准管理与可持续利用提供理论参考与技术支撑.

关键词 海洋生态系统, 稳态转换, 临界点, 早期预警信号

海洋生态系统作为地球系统的核心组成部分之一, 在全球气候调节、生物多样性保育与生态服务供给(如碳汇、渔业资源等)等方面发挥着不可替代的作用, 同时也是各类环境胁迫的前沿暴露载体^[1]. 全球气候变化和人类活动叠加引发的海洋暖化、酸化、脱氧和富营养化等环境胁迫呈持续加剧趋势, 其渐进累积的阈值效应正推动海洋生态系统逼近“临界点(tipping points)”, 并触发突发性、非连续性和不可逆性的性质转变, 导致海洋生态系统结构(如群落组成、营养级结构)和功能(物质循环、能量流动)发生根本性重构^[2~4], 典型表现为珊瑚礁白化、海草床与红树林退化等现象.

自20世纪90年代以来, 全球关于海洋生态系统临界点的研究报道呈指数增长趋势, 且其增长速率显著高于陆地及淡水生态系统领域的相关研究^[5]. 2008年, Lenton等人^[6]首次提出地球气候系统可能存在15个潜

在的临界要素, 为后续临界点研究奠定了基础. 2013年, 美国启动由13家机构联合参与的海洋临界点项目(Ocean Tipping Points), 其核心目标在于推动临界点科学向海洋管理实践转化, 实现理论与实践的深度融合. 2019年, Lenton等人进一步指出, 地球气候系统中的九大临界要素已经接近或者处于临界点, 其中包括北极海冰、大西洋经向翻转流、澳大利亚大堡礁等海洋相关临界要素^[7]. 2020年, 欧盟联合32家研究机构在“地平线2020(Horizon 2020)”框架下启动海洋临界点研究计划(COMFORT), 重点聚焦地球复杂系统中, 海洋升温、脱氧、酸化等关键临界要素在气候变化与人类活动耦合作用下的潜在驱动机制. 此外, 联合国“海洋十年”(2021~2030)计划亦将海洋系统临界点和环境阈值列为核心目标之一. 当前, 学界与管理界的研究多集中于此类突发性、灾难性稳态转换在生态—社会耦合系

引用格式: 杨萧, 谢彰先, 信业宏, 等. 海洋生态系统临界点的研究进展与展望. 科学通报

Yang X, Xie Z, Xin Y, et al. Progress and perspective in marine ecosystem tipping point research (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2026-0044](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0044)

统中的表现形式、传导路径与潜在影响。综上,海洋生态系统临界点已成为当前全球气候变化与海洋生态安全领域的国际前沿研究方向。

然而,尽管海洋生态系统临界点研究的重要性日益凸显,该领域仍面临诸多基础性与实践性问题与挑战。当前,海洋生态系统临界点的科学界定与精准表征仍是核心难题,科学问题集中于如何精准判别海洋生态系统是否正处于稳态转换过程并量化临界阈值。海洋生态系统本身具有高度开放性、非线性与复杂性特征,其结构—功能耦合关系的动态波动性,进一步增加了判定系统是否逼近临界阈值的难度。与此同时,临界点定义的模糊性、表征方法的缺失性,以及关键过程观测数据的稀缺性与碎片化,共同加剧了研究的难度。此外,预警指标的科学性与可操作性是当前该领域研究的核心瓶颈之一,构建实用、灵敏且可靠的预警指标体系,实现对系统稳态转换临近的精准指示,是制定海洋生态系统保护策略与适应性管理方案的关键前提^[8]。基于此,本文围绕“临界点如何形成、如何精准识别、如何有效预警”这一核心科学问题,系统梳理了海洋生态系统临界转变研究的前沿进展、现存问题挑战以及未来研究方向。

1 海洋生态系统临界点的理论基础

1.1 非线性动力学与多稳态

临界点是指生态系统由一种稳定状态转向另一种稳定状态的关键阈值,跨越该阈值的转换通常具有突发性、非连续性与不可逆性特征^[9]。Scheffer等人^[10]提

出的折叠分岔(fold bifurcation)模型,为阐释生态系统临界点的形成机制提供了经典理论框架。当驱动因子强度逼近临界阈值时,驱动因子的微小波动即可引发系统在高低分支间发生跨越式跃迁,其响应曲线呈现突发性向后“折叠”的特征;当系统跨过临界点(图1(a), F₂)时,将由原有稳态突变为另一种替代稳态,这一非线性变化过程即为稳态转换(regime shift, 图1)。真实的海洋生态系统始终处于持续的环境扰动中,负反馈调节机制赋予系统对外部扰动的缓冲与吸收能力,该能力即构成系统稳定性的核心支撑。这种稳定性可从两个互补维度进行界定:其一为生态韧性(ecological resilience)^[11],指系统在不发生稳态转换的前提下所能承受的最大扰动强度(即韧性阈值,图1(b));其二为工程韧性(engineering resilience)^[12],指系统受扰动后恢复至原有稳态的速率(恢复力)。随着环境胁迫强度的增强,系统动力学特性发生显著改变,生态韧性与工程韧性呈同步衰减趋势,系统逐步逼近临界状态。

非线性动力学框架下,系统逼近临界点时通常伴随“临界慢化(critical slowing down)”现象,即系统从扰动中恢复平衡的速率逐渐降低^[4]。其在时间序列中表现为一系列可量化的统计特征变化(自相关系数,方差,偏度,峰度),且各自特征具有明确的生态意义^[8,13]。这些特征的协同变化构成了生态系统临界点的典型早期预警信号(early-warning signals, EWSs),已被广泛应用于气候突变^[14]、浮游食物网结构重组^[15]以及物种入侵^[16]等复杂系统的临界转变研究。研究表明,白令海冷异常期间,底栖生物群落重组且韧性下降,呈现时间和空间自相关性增强等EWSs特征^[17]。但EWSs有局限性,

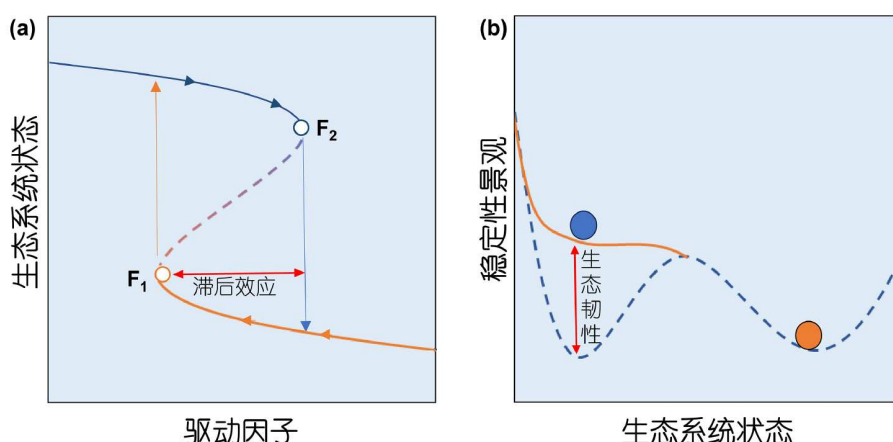


图1 海洋生态系统稳态转换的理论示意图。(a) 折叠分岔模型示意图; (b) 球杯模型示意图

Figure 1 Theoretical illustration of regime shifts in marine ecosystems. (a) Schematic representation of a fold bifurcation model. (b) Ball-cup model illustrating changes in the stability landscape

仅适用于折叠分岔驱动的临界点，在强噪声、多驱动因子协同情景下，其适用性与可靠性尚存争议^[18]。

1.2 反馈机制与滞后效应

滞后效应(hysteresis)是生态系统稳态转换的另一个核心特征：当驱动因子强度回落至临界点的阈值水平(图1(a), F_2)，系统仍难以恢复至原有状态^[10]。这一特性直接决定了稳态转换的高度不可逆性，也使其成为生态系统管理与风险防控中的关键。牙买加珊瑚礁生态系统是阐释生态系统稳态转换及滞后效应的经典案例^[19]。基于20世纪70年代的长期原位监测数据，该系统最初被表征为结构稳定、以造礁珊瑚为优势类群的高生物量、高生物多样性稳态(图2(a))。数十年的过度捕捞作为慢性扰动压力源^[20]，导致植食性鱼类(尤其是鹦嘴鱼)种群数量锐减，直接破坏了对大型海藻的生物控

制作用——关键的负反馈调节机制；该过程持续削弱了珊瑚礁系统的生态韧性^[15,21]，进而将已处于高脆弱性状态的珊瑚礁系统推向临界点。此后，飓风冲击、疾病暴发等突发扰动事件，进一步推动已处于脆弱状态的珊瑚礁系统跨越临界点，触发从珊瑚优势态向大型海藻优势态的快速转换^[22,23](图2(b))。值得注意的是，这种替代稳态并非短暂现象，其长期稳定性源于内在正反馈回路的持续强化：茂密的藻类冠层不仅会阻碍新生珊瑚幼虫附着与定居，还会与残余的珊瑚竞争光和空间等关键资源，形成正向强化的锁定效应，最终使系统长期维系于退化状态^[24]。

1.3 多重驱动与级联效应

海洋生态系统普遍受到多种外部驱动因子的复合扰动影响，包括气候变暖、海洋酸化、营养盐输入异

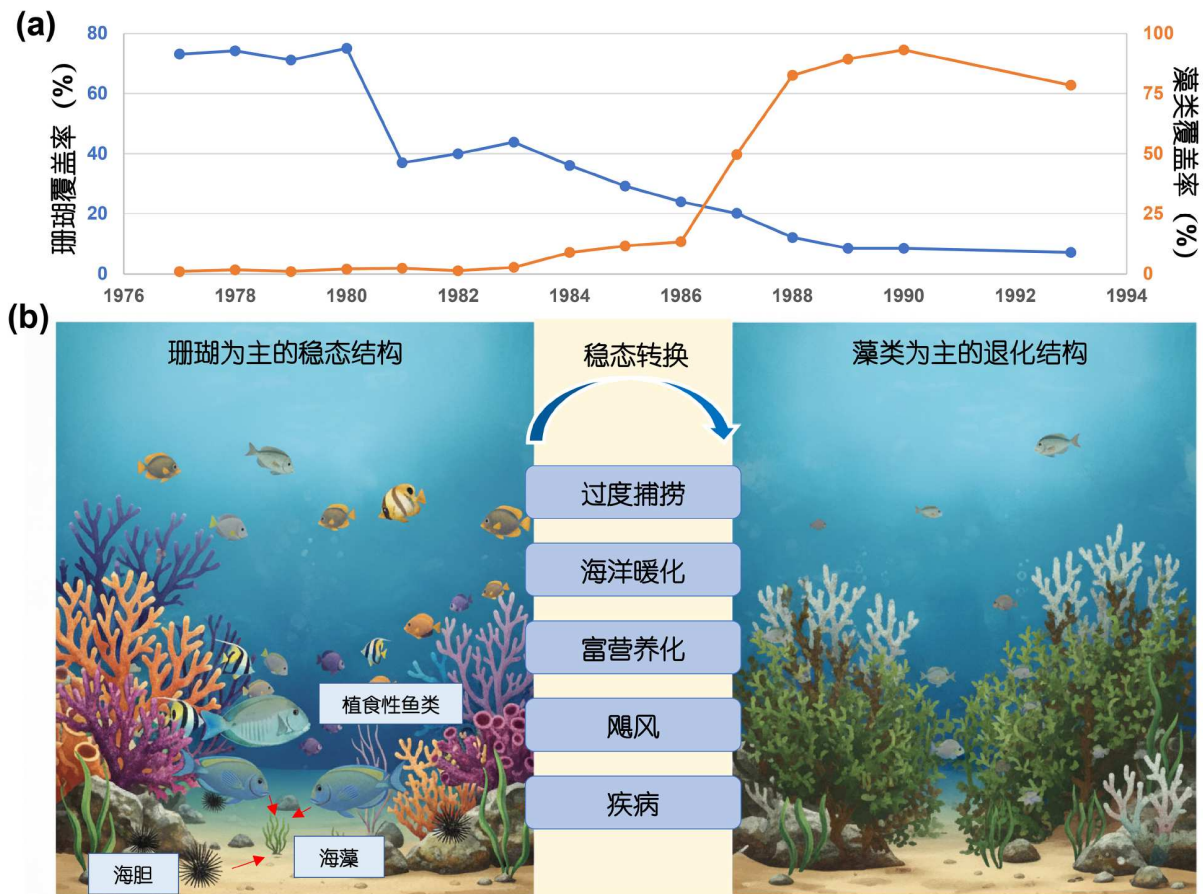


图2 牙买加珊瑚礁稳态转换案例。(a) 牙买加珊瑚礁造礁珊瑚及大型藻类覆盖率的长期动态变化；(b) 驱动牙买加珊瑚礁稳态转换的生态过程示意图

Figure 2 Regime shift in Jamaican coral reefs. (a) Long-term changes in the cover of reef-building corals and macroalgae in Jamaican coral reefs. (b) Schematic illustration of the ecological processes driving the regime shift in Jamaican coral reefs

常及生物扰动等^[3], 这些驱动因子可划分为非生物驱动和生物驱动两大类型^[25]. 其中, 非生物驱动因子主要涵盖气候变化及人类活动引发的各类环境要素改变(如海面温度升高、海洋酸化、营养富集、过度捕捞), 此类因子的检测、监测难度相对较低; 而源于群落内部及群落间复杂相互作用的生物驱动因子, 其识别与解析难度通常更高, 但对生态系统稳态转换的触发同样起到关键作用. 例如, 北大西洋海表温度升高通过改变浮游生物群落结构, 引发食物链能量流动模式重构, 该影响逐步传导至更高营养级, 最终导致大西洋鲑鱼种群衰退及相关渔业崩溃^[26]. 值得注意的是, 多种压力源的协同叠加效应及跨尺度的物理-生物耦合作用, 显著增加了稳态转换驱动因子的单一归因难度, 同时增加了临界阈值量化的不确定性^[9].

除非生物与生物驱动因子的直接作用外, 生态系统稳态转换还受进化过程和空间连通性的调控, 二者共同构成影响稳态转换的重要间接纬度. 这类调控因素可通过缓冲环境扰动的负面影响, 提升系统自身稳定性, 进一步增加临界阈值评估的复杂性. 例如, 持续的环境胁迫可驱动物种耐受阈值的适应性进化, 提升物种对胁迫环境的适应能力, 进而改变生态系统的韧性水平^[27,28]. 依据经典的空间保险假说(spatial insurance hypothesis), 局部生态系统的恢复力显著依赖于其与区域多样化物种库的连通性^[29]. 高空间连通性使来自健康未受干扰区域的物种个体可向受扰区域重新定殖, 进而加速受损生态系统的恢复进程, 提升系统整体韧性^[30].

2 海洋生态系统临界点表征与量化方法

海洋生态系统临界点的表征与量化是破解其科学界定模糊、阈值难以精确捕捉这一核心难题的关键.

表 1 海洋生态系统临界点表征方法对比

Table 1 Comparison of methodological frameworks for detecting tipping points in marine ecosystems

方法类型	适用场景	优势	局限	数据需求
统计学分析	长期连续观测数据丰富	快速识别历史临界点	无法预测潜在问题; 对短期扰动敏感性低	系统状态参数的长时间序列数据
机制模型	机制理解充分的系统	可预测未来场景; 解释因果关系	参数依赖强; 需充分理解系统过程	现场观测或实验数据+机制约束参数
数据驱动模型	高不确定性/非自治系统	挖掘非线性模式; 处理大规模数据	缺乏明确机制解释	现场观测或模拟数据
融合模型	复杂多驱动系统	结合机制解释与数据预测; 可用于早期预警	技术复杂; 兼顾数据与模型	现场观测或模拟数据+机制约束参数
实验模拟	探索因果关系与多驱动效应	可量化临界点和环境阈值; 可验证机制	规模受限; 难覆盖大尺度	-

当前主要通过统计学分析、模型预测和实验模拟三条协同互补的路径开展, 三条路径各有其明确的适用场景、独特优势, 同时也存在相应的局限性(表1).

2.1 统计学分析路径

统计学分析路径是表征与量化系统临界点的基础路径, 核心是利用状态变量的时间序列/空间分布数据, 通过识别稳态转换前后的非线性变化特征, 推演临界点及阈值范围. 用于识别和可视化时间序列中状态变量临界点的统计学方法较多, 如序贯 T 检验(sequential T -test, STARS)、Pettitt检验(Pettitt test)、Mann-Kendall检验(Mann-Kendall test)、分段回归分析方法等^[31]. 此类方法适用于长期原位监测数据充足、环境扰动单一的近岸海域或典型海洋生态系统(如珊瑚礁、海藻床、浮游生物群落). 其优势是无需复杂假设, 难度适中, 能快速识别稳态转换信号并量化突变时间点; 局限是对数据质量要求极高, 无法预测未观测稳态、刻画临界点前稳定性丧失过程, 难以识别短期极端扰动驱动的突变, 无法揭示内在因果机制, 仅能“识别现象”而不能“解析机制”.

值得注意的是, 多数生态系统稳态转换虽可通过统计学分析路径识别, 但时间并非驱动稳态转换的主导因子. 因此, 需要进一步量化与稳态转换对应的环境胁迫阈值, 使用冗余分析(redundancy analysis, RDA)、广义加性模型(generalized additive models, GAMs)等多种统计技术, 实现复杂的环境数据降维与关键驱动因子精准识别^[32].

2.2 模型预测分析路径

为探究生态系统中的潜在未观测稳定状态, 研究人员常借助生态模型的构建与解析^[33]. 机制模型通过

生态学方程整合生物、物质与能量耦合关系,适用于临界点因果机制及潜在稳态景观研究,优势是可量化驱动因子与临界点间的内在关联,模拟扰动下系统响应,突破实测数据时空限制,预判临界点风险并用于未来场景预测和管理干预模拟;局限在于依赖对系统过程的充分理解和参数精度^[34]。例如,Baird等人^[35]构建的珊瑚白化机制模型,结合细胞层面生物学过程(活性氧积累)与陆架尺度水动力、生物地球化学条件,明确珊瑚白化核心驱动机制。该模型成功捕捉到2016年大堡礁珊瑚白化灾害的大尺度特征,凸显其在稳态转换预测和管理干预评估中的应用潜力。

此外,机器学习、深度学习等数据驱动模型,可直接从观测或模拟数据中挖掘统计关联,无需明确机制假设即可区分系统失稳信号与随机噪声^[36,37],实现临界点识别预警,显著拓展了对生态系统多稳态特征的认知^[38,39]。这一优势在传统临界慢化理论受限场景中尤为突出:近年来,海洋生态系统正频繁受海洋热浪^[40]、陆源洪水^[41]、脉冲式营养输入^[42]等高强度短时极端事件的影响,触发噪声或速率诱导的临界点^[39],呈现显著非自治特征^[43]。需要强调的是,数据驱动方法并非替代机制模型,而是在非自治、多驱动等高不确定性场景下,对传统稳态转换框架的重要拓展。

机制模型与数据驱动模型的深度融合是未来研究核心,“混合建模”范式旨在结合机制模型的可解释性与数据驱动模型处理复杂模式的优势^[44]。典型路径包括:将物理机制作为约束嵌入数据驱动模型;利用机制模型生成多情景模拟数据,强化数据驱动模型训练。例如,物理信息神经网络(physics-informed neural networks)结合生物地球化学模型与神经网络,将先验知识嵌入到人工智能框架,在数据稀缺时提升预测精度和可解释性,为混合建模提供核心范式^[45]。

2.3 基于实验模拟的分析路径

尽管统计学分析与模型研究为理解大尺度生态系统动力学提供了关键支撑,但在驱动—响应因果机制尚不明确、长期观测数据稀缺或关键过程难以通过野外观测解析时,操纵实验成为临界点研究的重要互补途径。通过在受控条件下调控单一或多个环境驱动因子,检验生物在生理、种群、群落及生态系统层面对环境变化的响应规律,定量识别生态系统临界阈值^[46,47]。其优势是能分离并量化多重胁迫间的复杂交互效应(如协同、拮抗或加和效应),构建驱动因子与稳

态转换的因果链,为预警指标筛选、验证及生态学解释提供基础;局限则是尺度效应明显,室内或原位围隔实验难以复刻自然海洋生态系统的复杂性,结果外推难度大。但实验获取的机制性认识,可为机制模型构建、参数校准与验证提供基础数据,也为海洋生态环境管控与资源可持续利用提供科学支撑^[48]。

综上,统计学分析、模型预测与实验模拟三条路径并非独立,而是互补协同的。实际研究中需结合研究目标、数据条件、实验能力及研究尺度,整合三者优势,规避局限,通过“实测数据支撑统计识别—模型预测预判趋势—实验模拟验证机制”的多元融合,实现海洋生态系统临界点的精准表征与量化,为临界点早期预警、风险防控及适应性管理提供科学支撑。

3 海洋生态系统临界点的研究现状与格局

为明晰全球海洋生态系统临界点研究脉络,揭示分布规律,本文基于Web of Science核心数据库,经过规范检索、去重筛选与质量校验,汇集相关文献,总结典型案例(表2),从生态系统类型维度解析研究现状。计量结果表明,该领域研究在不同生态系统类型间分布极不均衡(图3)。渔业生态系统是研究焦点(文献占比29.3%),主要关注过度捕捞、气候变化与生态反馈作用叠加驱动下的鱼类种群崩溃、食物网重组及渔业资源退化。北大西洋纽芬兰渔场鳕鱼(*Gadus morhua*)资源崩溃是经典案例:20世纪90年代初,长期高强度工业化捕捞叠加气候变暖导致鳕鱼种群断崖式衰退,且在捕捞压力显著减弱后因滞后效应未恢复至历史水平^[49-51]。中国东海和南海海域的渔业资源衰退也受到关注,沿海栖息地退化和丧失导致渔获量下降,鱼群呈现“小型化、低营养级化”,系统稳定性显著下降,呈现典型的稳态转换特征^[52,53]。海洋-气候系统关注度次之(文献占比16.7%),聚焦大尺度物理过程的非线性变化及失稳风险,包括厄尔尼诺—南方涛动的非线性变化、大西洋经向翻转环流的潜在失稳以及极地冰盖崩塌对海洋物理环境的重塑^[6]。该系统一旦跨越关键阈值,可能引发全球级联式反馈,产生系统性风险。浮游生态系统研究也占有一定的比例(文献占比13.6%)。其稳态转换将影响初级生产力与海洋碳汇功能及对全球气候变化的反馈。北冰洋海冰消融增强区域初级生产力与生物泵强度^[54],但持续升温驱动群落结构重组推动系统发生不可逆的稳态转换,削弱碳汇功能^[55]。长江口与珠江口富营养化叠加气候变暖重塑了浮游生物群落结构,

表 2 全球范围内典型海洋生态系统临界点研究案例

Table 2 Global case studies of tipping points in major marine ecosystems

生态系统类型	所在区域	临界要素	关键驱动因子	参考文献
渔业生态系统	北大西洋; 中国南海	渔业资源(鲑鱼等)枯竭	过度捕捞; 海洋暖化	[29,49,52,53]
海洋-气候系统	南极	西南极冰盖崩塌	气候变暖	[7]
浮游生态系统	波罗的海; 中国东海	缺氧, 藻华频发	富营养化; 海洋暖化	[52,58]
珊瑚礁生态系统	澳大利亚大堡礁; 加勒比海	珊瑚礁退化	过度捕捞; 海洋暖化; 热浪; 疾病	[19,35]
海藻林生态系统	阿留申群岛	海藻林退化	过度捕捞; 海胆旺发	[60]
红树林生态系统	澳大利亚西海岸	红树林退化	海平面变化	[61]
海草床生态系统	佛罗里达湾	海草床退化	富营养化; 过度捕捞; 疾病	[62]

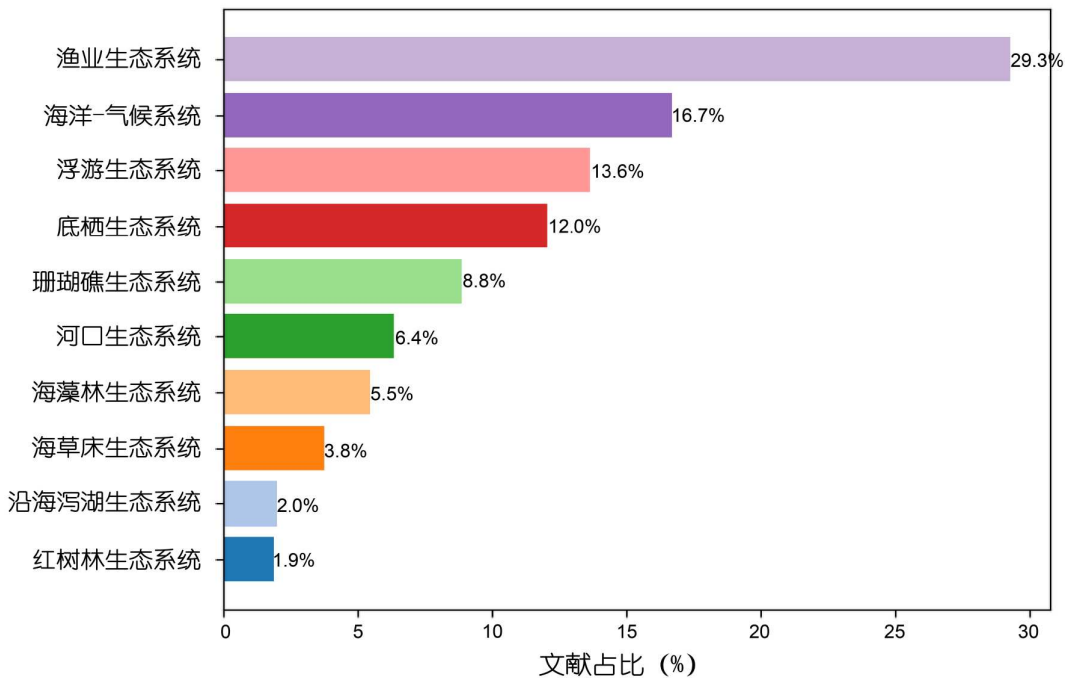


图 3 典型海洋生态系统临界点文献占比

Figure 3 Proportion of publications on tipping points in major marine ecosystems

导致其“小型化、有害化”，群落多样性下降、有害藻华暴发频率与空间尺度持续扩大，以及食物网结构与能量传递路径的重组^[52]。此外，藻华增加了有机质沉降量，加剧了底层水体耗氧，推动低氧甚至缺氧区持续扩展，形成“富营养化—藻华暴发—底层缺氧”的强化正反馈回路^[56]。上述过程改变了区域初级生产力的时空格局^[57]，削弱了生态系统韧性，影响渔业资源与生态系统服务功能，影响近岸生态系统稳定性与可持续发展^[52]。

底栖生态系统(12.0%)、珊瑚礁(8.8%)、河口系统(6.4%)、海藻林(5.5%)、海草床(3.8%)和红树林(1.9%)等典型近岸与蓝碳生态系统占比偏低。但此类

生态系统多分布于陆海交互带或半封闭海域，对营养盐输入、气候变暖及水动力变化高度敏感，表现出显著的非线性响应与稳态转换特征，是海洋生态系统临界点研究中不可忽视的重要组成部分。以波罗的海为例，长期高强度外源营养盐输入推动区域初级生产力持续升高，导致大量有机质沉降并在底层分解，消耗水体中溶解氧，形成大范围持久性缺氧甚至无氧区^[58]。在此过程中，底栖生物群落大规模消亡，沉积物中磷的内源释放加剧富营养化，形成“富营养化-底层缺氧-内源磷释放”的强化型正反馈回路，将系统锁定于退化状态^[59]。

上述案例表明，海洋生态系统稳态转换并非偶然、孤立的事件，而是深层生态学规律和复杂系统动力学

机制共同驱动的必然结果。当前研究多局限于单一案例的经验性描述, 缺乏对核心理论基础的系统解构与普适性提炼。因此, 亟需构建更具普适性的海洋生态系统临界点风险预警与适应性管理体系, 对其核心理论基础进行深度解构与系统阐释, 支撑全球海洋生态系统安全防控。

4 海洋生态系统临界点研究的挑战与发展方向

4.1 观测与数据支撑不足

观测数据是海洋生态系统临界点研究的基础, 但当前全球海洋观测网络存在明显短板: 一是观测覆盖范围有限, 深海、大洋的观测数据严重缺乏; 二是观测时间序列较短, 多数观测始于近几十年, 难以支撑长时间尺度的临界点动态分析; 三是数据整合能力不足, 不同观测平台、不同研究机构的数据标准不统一, 难以实现高效融合与共享。此外, 卫星遥感数据在临界点研究中的应用仍存在局限性, 对深海生态系统、小型生物群落的监测精度不足, 难以捕捉关键生态过程的变化。

为破解观测瓶颈, 需构建多尺度、多维度综合观测网络, 可从三方面推进: 一是整合全球海洋观测网络, 拓展覆盖范围, 填补深海、大洋等的观测空白; 二是研发并应用高分辨率、高精度观测技术, 如新一代水下机器人、高光谱卫星遥感传感器等, 提升精准监测能力; 三是建立统一数据标准与共享服务平台, 整合现场观测、卫星遥感、数值模拟、数字孪生等多源数据, 构建韧性评估与临界点早期预警框架, 为海洋生态系统临界点研究提供全方位、高精度的数据支撑。

4.2 临界点识别和早期预警的不确定性

海洋生态系统复杂且时空变异大, 不同海域的生态系统结构、驱动因子及响应模式差异显著, 导致临界点的识别标准难以统一。如学界对珊瑚礁生态系统是否已突破临界点存在明显争议, 部分研究基于大范围珊瑚白化判定已突破临界点, 另有研究认为需考虑区域韧性差异^[63]。此外, 生态系统的稳态转换存在滞后效应, 短期异常波动难以区分是临界点逼近的信号还是自然变异, 加剧了识别的不确定性^[64]。当前EWSs多基于理论模型, 在复杂自然海洋环境中的适用性有限, 尚未形成统一、标准化的早期预警标准。此外, 现有早

期预警体系缺乏对临界点突破后生态系统恢复潜力的评估, 难以为后续生态修复与管理提供精准指导。

实现海洋生态系统临界点的精准识别和早期预警, 关键是整合和开发先进技术, 完善方法体系。可从三方面推进: 一是融合机器学习、人工智能等新技术, 开发适配不同海洋生态系统的临界点识别模型, 提升精准度与效率; 二是优化早期预警信号体系, 结合驱动因子的时空异质性与不同海域生态系统的韧性差异, 构建个性化的早期预警标准; 三是衔接早期预警与生态修复, 预测临界点突破后生态系统的恢复路径与潜力, 为修复方案制定提供科学依据。

4.3 多驱动因子的耦合作用机制不清

海洋生态系统临界点的形成通常是气候变暖、酸化、过度捕捞、营养污染等多重驱动因子协同作用的结果, 但当前对多因子耦合的定量分析不足, 难以明确各驱动因子的贡献度及交互作用机制。此外, 驱动因子的时空异质性增加了临界点形成机制解析难度, 量化不同尺度驱动因子的协同效应成为当前该领域研究的重要瓶颈。

操纵实验和反译式人工智能^[65]为解析系统对多重胁迫的响应机制提供了支撑。未来需要从三方面开展工作: 一是开展多因子控制实验与长期观测, 量化各驱动因子的单独及交互作用, 明确其对临界点形成的贡献度; 二是整合分子生态学、生物地球化学等技术, 解析多因子耦合下生态系统结构与功能与关键物种响应机制; 三是加强反译式人工智能开发应用, 通过分析和归纳表观信号, 逆向推导出驱动临界点变化的潜在机制, 为临界点识别与机制解析提供新技术。

4.4 科学研究与管理需求的脱节

海洋生态系统临界点研究已取得一些成果, 但多停留在理论层面, 难以转化为管理实践与政策举措。核心制约要素有两方面: 一是, 研究人员与管理者之间的沟通机制不畅, 研究成果表述与管理决策不匹配, 成果转化受阻; 二是临界点理论尚未充分融入海洋生态红线划定、自然保护区规划等管理实践, 导致管理措施缺乏科学依据。如波罗的海生态系统突破临界点后, 管理政策滞后于生态系统退化, 未及时形成有效干预与修复方案, 难以实现生态系统恢复。

推动二者深度融合, 首先要加强社会-生态系统耦合分析, 评估临界点突破对沿海社区、渔业经济、旅

游业等的影响,结合社会学和经济学提出兼顾生态保护与社会发展的应对策略,制定替代生计方案与生态补偿机制,提升人类社会对海洋生态系统变化的适应能力;其次,建立科学人员与管理主体的常态化沟通机制,将临界点研究成果转化为可操作的政策语言,精准匹配管理决策需求,推动临界点理论融入管理框架及相关规划.最后,加强跨区域与跨国别协同合作,共同应对全球尺度挑战,推动全球碳减排与海洋保护政策协同实施.

5 结论

海洋生态系统临界点研究是应对全球海洋生态危

机和维系人类社会可持续发展的核心科学议题.当前已在典型案例识别、多维度研究方法等方面取得显著进展,但仍面临临界点识别不确定、驱动机制不清、观测数据不足、研究与管理脱节等多重挑战.未来需构建多尺度综合观测网络、完善数据标准与共享平台、深化耦合机制研究、完善预警体系、推动产学研政融合等举措,提升海洋生态系统临界点研究的科学性与实用性.此外,全球协同合作与政策落地至关重要,只有将临界点科学充分融入海洋生态管理实践,构建“研究—预警—管控—修复”闭环,才能延缓或避免海洋生态系统突破临界点,保障海洋生态安全与人类社会可持续发展.

参考文献

- 1 Wood R A, Baker J A, Beaugrand G, et al. Opportunities for Earth observation to inform risk management for ocean tipping points. *Surv Geophys*, 2025, 46: 443–502
- 2 Folke C, Carpenter S, Walker B, et al. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2004, 35: 557–581
- 3 Rocha J C, Peterson G, Bodin Ö, et al. Cascading regime shifts within and across scales. *Science*, 2018, 362: 1379–1383
- 4 Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, et al. Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 2009, 461: 53–59
- 5 Carrier-Belleau C, Pascal L, Nozais C, et al. Tipping points and multiple drivers in changing aquatic ecosystems: a review of experimental studies. *Limnol Oceanogr*, 2022, 67: S312
- 6 Lenton T M, Held H, Kriegler E, et al. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 1786–1793
- 7 Lenton T M, Rockström J, Gaffney O, et al. Climate tipping points — too risky to bet against. *Nature*, 2019, 575: 592–595
- 8 Dakos V, Carpenter S R, Brock W A, et al. Methods for detecting early warnings of critical transitions in time series illustrated using simulated ecological data. *PLoS One*, 2012, 7: e41010
- 9 Ratajczak Z, D'Odorico P, Collins S L, et al. The interactive effects of press/pulse intensity and duration on regime shifts at multiple scales. *Ecol Monogr*, 2017, 87: 198–218
- 10 Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, 413: 591–596
- 11 Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annu Rev Ecol Syst*, 1973, 4: 1–23
- 12 Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 1984, 307: 321–326
- 13 van Nes E H, Scheffer M. Slow recovery from perturbations as a generic indicator of a nearby catastrophic shift. *Am Naturalist*, 2007, 169: 738–747
- 14 Dakos V, Scheffer M, van Nes E H, et al. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 14308–14312
- 15 Carpenter S R, Cole J J, Pace M L, et al. Early warnings of regime shifts: a whole-ecosystem experiment. *Science*, 2011, 332: 1079–1082
- 16 Takimoto G. Early warning signals of demographic regime shifts in invading populations. *Population Ecol*, 2009, 51: 419–426
- 17 Litzow M A. Indications of hysteresis and early warning signals of reduced community resilience during a Bering Sea cold anomaly. *Mar Ecol Prog Ser*, 2017, 571: 13–28
- 18 Hastings A, Wysham D B. Regime shifts in ecological systems can occur with no warning. *Ecol Lett*, 2010, 13: 464–472
- 19 Hughes T P. Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*, 1994, 265: 1547–1551
- 20 Sura S A, Lloyd-Smith J O, Fong P, et al. Herbivore community function shapes resilience and bistability of coral reefs. *PLoS Comput Biol*, 2025, 21: e1013221
- 21 Hoegh-Guldberg O, Mumby P J, Hooten A J, et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 2007, 318: 1737–1742
- 22 McClanahan T R, Graham N A J, MacNeil M A, et al. Critical thresholds and tangible targets for ecosystem-based management of coral reef fisheries. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 17230–17233
- 23 Karr K A, Fujita R, Halpern B S, et al. Thresholds in Caribbean coral reefs: implications for ecosystem-based fishery management. *J Appl Ecol*,

- 2015, 52: 402–412
- 24 Mumby P J, Hastings A, Edwards H J. Thresholds and the resilience of Caribbean coral reefs. *Nature*, 2007, 450: 98–101
 - 25 deYoung B, Barange M, Beaugrand G, et al. Regime shifts in marine ecosystems: detection, prediction and management. *Trends Ecol Evol*, 2008, 23: 402–409
 - 26 Beaugrand G, Brander K M, Alistair Lindley J, et al. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature*, 2003, 426: 661–664
 - 27 Hochfeld I, Hinners J. Phytoplankton adaptation to steady or changing environments affects marine ecosystem functioning. *Biogeosciences*, 2024, 21: 5591–5611
 - 28 Bolius S, Hinners J, Kaiser J, et al. Millennia-long evolution of temperature and salinity dependence of a Baltic sea diatom revealed by resurrection experiments. *Glob Change Biol*, 2025, 31: e70408
 - 29 Thompson P L, Rayfield B, Gonzalez A. Loss of habitat and connectivity erodes species diversity, ecosystem functioning, and stability in metacommunity networks. *Ecography*, 2017, 40: 98–108
 - 30 Bell G. Evolutionary rescue. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2017, 48: 605–627
 - 31 Filatova T, Polhill J G, van Ewijk S. Regime shifts in coupled socio-environmental systems: review of modelling challenges and approaches. *Environ Model Software*, 2016, 75: 333–347
 - 32 Edwards M, Beaugrand G, Helaouët P, et al. Marine ecosystem response to the Atlantic multidecadal oscillation. *PLoS One*, 2013, 8: e57212
 - 33 Cael B B, Begouen Demeaux C, Henson S, et al. Marine ecosystem changepoints spread under ocean warming in an Earth System Model. *J Geophys Res BioGeosci*, 2022, 127: e2021JG006571
 - 34 Follows M J, Dutkiewicz S, Grant S, et al. Emergent biogeography of microbial communities in a model ocean. *Science*, 2007, 315: 1843–1846
 - 35 Baird M E, Mongin M, Rizwi F, et al. A mechanistic model of coral bleaching due to temperature-mediated light-driven reactive oxygen build-up in zooxanthellae. *Ecol Model*, 2018, 386: 20–37
 - 36 Lindegren M, Dakos V, Gröger J P, et al. Early detection of ecosystem regime shifts: a multiple method evaluation for management application. *PLoS One*, 2012, 7: e38410
 - 37 Ma Z, Zeng C, Zhang Y C, et al. Predicting critical transitions with machine learning trained on surrogates of historical data. *Commun Phys*, 2025, 8: 258
 - 38 North J S, Wikle C K, Schliep E M. A review of data-driven discovery for dynamic systems. *Int Statistical Rev*, 2023, 91: 464–492
 - 39 Huang Y, Bathiany S, Ashwin P, et al. Deep learning for predicting rate-induced tipping. *Nat Mach Intell*, 2024, 6: 1556–1565
 - 40 Oliver E C J, Donat M G, Burrows M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nat Commun*, 2018, 9: 1324
 - 41 Cai W, Borlace S, Lengaigne M, et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nat Clim Change*, 2014, 4: 111–116
 - 42 Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 2002, 25: 704–726
 - 43 Clements C F, Ozgul A. Rate of forcing and the forecastability of critical transitions. *Ecol Evol*, 2016, 6: 7787–7793
 - 44 Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 2019, 566: 195–204
 - 45 Nyangon J. Physics informed neural networks for maritime energy systems and blue economy innovations. *Mach Learn-Earth*, 2025, 1: 011002
 - 46 Riebesell U, Gattuso J P. Lessons learned from ocean acidification research. *Nat Clim Change*, 2015, 5: 12–14
 - 47 Sarà G, Giommi G, Giacoletti A, et al. Multiple climate-driven cascading ecosystem effects after the loss of a foundation species. *Sci Total Environ*, 2021, 770: 144749
 - 48 Moreno H D, Köring M, Di Pane J, et al. An integrated multiple driver mesocosm experiment reveals the effect of global change on planktonic food web structure. *Commun Biol*, 2022, 5: 179
 - 49 Hamilton L C, Haedrich R L, Duncan C M. Above and below the water: social/ecological transformation in northwest Newfoundland. *Population Environ*, 2004, 25: 195–215
 - 50 Hutchings J A, Myers R A. What can be learned from the collapse of a renewable resource? Atlantic cod, *Gadus morhua*, of newfoundland and labrador. *Can J Fish Aquat Sci*, 1994, 51: 2126–2146
 - 51 Rose G A. Reconciling overfishing and climate change with stock dynamics of Atlantic cod (*Gadus morhua*) over 500 years. *Can J Fish Aquat Sci*, 2004, 61: 1553–1557
 - 52 Wang F, Li X, Tang X, et al. The seas around China in a warming climate. *Nat Rev Earth Environ*, 2023, 4: 535–551
 - 53 Kang B, Liu M, Huang X X, et al. Fisheries in Chinese seas: what can we learn from controversial official fisheries statistics? *Rev Fish Biol Fisheries*, 2018, 28: 503–519
 - 54 Wassmann P, Duarte C M, Agustí S, et al. Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem. *Glob Change Biol*, 2011, 17: 1235–1249
 - 55 Coello-Camba A, Agustí S, Vaqué D, et al. Experimental assessment of temperature thresholds for arctic phytoplankton communities. *Estuaries*

- Coasts, 2015, 38: 873–885
- 56 Sheng H, Darby S E, Zhao N, et al. Anthropogenic eutrophication and stratification strength control hypoxia in the Yangtze Estuary. [Commun Earth Environ](#), 2024, 5: 235
- 57 Guo Y, Yu F, Yang Y, et al. Anthropogenic forcing drives centennial-scale phytoplankton productivity dynamics in the East China Sea revealed by biomarker records. [Water Res](#), 2026, 288: 124547
- 58 Conley D J, Björck S, Bonsdorff E, et al. Hypoxia-related processes in the Baltic Sea. [Environ Sci Technol](#), 2009, 43: 3412–3420
- 59 Dippner J W, Möller C, Hänninen J. Regime shifts in North Sea and Baltic Sea: a comparison. [J Mar Syst](#), 2012, 105-108: 115–122
- 60 Filbee-Dexter K, Scheibling R E. Sea urchin barrens as alternative stable states of collapsed kelp ecosystems. [Mar Ecol Prog Ser](#), 2014, 495: 1–25
- 61 Cavanaugh K C, Dangremond E M, Doughty C L, et al. Climate-driven regime shifts in a mangrove-salt marsh ecotone over the past 250 years. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2019, 116: 21602–21608
- 62 Waycott M, Duarte C M, Carruthers T J B, et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2009, 106: 12377–12381
- 63 Mumby P J, Wolff N H, Bozec Y, et al. Operationalizing the resilience of coral reefs in an era of climate change. [Conservation Lett](#), 2014, 7: 176–187
- 64 Burthe S J, Henrys P A, Mackay E B, et al. Do early warning indicators consistently predict nonlinear change in long-term ecological data? [J Appl Ecol](#), 2016, 53: 666–676
- 65 Ding J, Zheng Y, Xu F, et al. Understanding emergence in complex systems using abductive AI. [Nat Rev Phys](#), 2025, 7: 675–677

Summary for “海洋生态系统临界点的研究进展与展望”

Progress and perspective in marine ecosystem tipping point research

Xiao Yang^{1,2}, Zhangxian Xie^{3,4}, Yehong Xin¹ & Dazhi Wang^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of The Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China

² Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

³ School of Resources and Environmental Sciences, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China

⁴ Key Laboratory of Rural Environmental Remediation and Waste Recycling (Quanzhou Normal University), Quanzhou 362000, China

* Corresponding author, E-mail: dzwang@xmu.edu.cn

Under the dual pressures of global climate change and intensified human activities, marine ecosystems in many regions of the world are approaching or have already crossed tipping points, resulting in abrupt and potentially irreversible regime shifts. Such transitions are often accompanied by profound structural reorganization and functional transformation within ecosystems, fundamentally altering trophic interactions, species composition, and energy flow pathways. These changes can significantly undermine key ecosystem services, including marine carbon sequestration, biodiversity conservation, and the sustainable supply of fishery resources, thereby posing substantial risks to global ecological security and human well-being. Consequently, understanding the mechanisms, identification approaches, and ecological consequences of tipping points in marine ecosystems has become a major focus in marine ecology and global change research. Over the past decades, considerable progress has been made in exploring the theoretical foundations and empirical evidence of tipping points in marine ecosystems. Previous studies have documented critical transitions in a variety of marine systems, including coral reefs, coastal eutrophic environments, and high-latitude marine ecosystems. These studies indicate that ecosystem responses to environmental disturbances are often nonlinear and may involve multiple alternative stable states. Nevertheless, research on marine ecosystem tipping points remains fragmented across different methodological approaches, including theoretical modeling, long-term observational analyses, and controlled experimental investigations. This fragmentation has hindered the development of an integrated cross-scale and interdisciplinary framework, thereby limiting a comprehensive understanding of critical transitions and constraining the establishment of robust early-warning systems for marine ecosystem regime shifts.

In this review, we synthesize the core theoretical foundations underlying tipping points in marine ecosystems. In particular, we highlight the roles of alternative stable state theory, feedback regulation mechanisms, and nonlinear dynamical frameworks in explaining the emergence and evolution of critical transitions. These theoretical perspectives provide important insights into how external drivers—such as climate variability, ocean warming, nutrient enrichment, and anthropogenic disturbances—interact with internal ecological processes to influence ecosystem stability and resilience. In addition, we systematically summarize the major methodological approaches currently used to identify and analyze tipping points in marine ecosystems. These approaches can generally be grouped into three main categories: statistical detection methods, mechanism–data integrated modeling, and experimental validation. Statistical approaches primarily focus on early-warning indicators derived from ecological time-series data, including signals related to critical slowing down, increasing variance, and autocorrelation patterns, which may indicate declining ecosystem resilience prior to regime shifts. Mechanistic modeling approaches combine ecological theory with observational data to simulate ecosystem dynamics and explore potential thresholds and feedback processes. Meanwhile, controlled experiments—such as mesocosm experiments and field manipulations—provide valuable opportunities to directly test hypothesized mechanisms and evaluate ecosystem responses under multiple environmental stressors. Despite these advances, each methodological approach still faces limitations related to data availability, spatial and temporal scales, and the difficulty of capturing complex interactions among multiple drivers. Finally, considering current research bottlenecks and the growing demand for ecosystem-based management, this review outlines several key directions for future research on marine ecosystem tipping points. Priority should be given to expanding multi-scale and multi-dimensional ocean observation networks, improving the integration of heterogeneous data sources, and developing advanced analytical approaches based on artificial intelligence and machine learning. In addition, multi-factor experimental studies are needed to quantify the interactive effects of multiple environmental drivers. Strengthening interdisciplinary collaboration and promoting the translation of scientific knowledge into policy-relevant frameworks will also be essential for enhancing early-warning capabilities and supporting adaptive management of marine ecosystems under accelerating global change.

marine ecosystems, regime shifts, tipping points, early-warning signals

doi: [10.1360/CSB-2026-0044](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0044)