

导读：文章聚焦海岸带临界点数学表达与类型划分，构建了融合海陆相互作用及多尺度过程的海岸带临界点统一数学描述模型，解析了六类海岸带临界点类型及特征，基于文献大数据揭示了全球海岸带临界点类型分布的非均质性。

海岸带临界点统一描述模型及类型划分

俞肇元^{1,2,4*}, 梁张勇³⁺, 王建⁴⁺, 刘振夏⁵⁺, 杜沛⁴⁺, 赵彬如^{1,2,4}, 袁林旺^{1,2,4*}

1. 南京师范大学 气候系统预测与变化应对全国重点实验室, 南京 210023
2. 南京师范大学 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023
3. 天津大学 应用数学中心, 天津, 300072
4. 南京师范大学 地理科学学院, 南京, 210023
5. 南京师范大学 环境学院, 南京, 210023

* 通讯作者, E-mail: yuzhaoyuan@nynu.edu.cn; yuanlinwang@nynu.edu.cn

+ 同等贡献作者

国家自然科学基金重点项目(42230406, 42130103)资助

摘要 海岸带地处海陆交互区域，是物理、生态与社会子系统高度耦合的复杂区域系统。在全球变化与人类活动双重驱动下，海岸带岸线变迁明显、生态退化加剧，可能趋近或跨越临界点。本文聚焦海岸带临界点的数学表达与类型划分，基于动力系统理论构建了融合海陆相互作用与多尺度过程的海岸带临界点统一数学描述模型，建立了分岔驱动、噪声驱动、冲击驱动、速率驱动、空间驱动与信息驱动六类临界点分类体系，解析了不同类型临界点的时空特征与触发机制。利用大语言模型构建了基于文献大数据的临界点分类模型，分析了全球 91 个海岸带典型案例，揭示了海岸带临界事件空间分布的非均质性。结果表明，海岸带临界点研究具有典型性与特殊性，未来需围绕“分类—识别—应对”等核心问题，系统推进数据融合、模型构建与适应性管理研究。

关键词 海岸带系统，临界点分类，多尺度耦合过程，状态突变

资助项目 国家自然科学基金重点项目(批准号: 42230406、42130103)

1 引言

海岸带作为陆海交互的关键区域，承载了湿地、河口、珊瑚礁等典型生态系统，是典型的区域地球系统(唐剑武等, 2018; Day et al., 2024; Campbell et al., 2022)。在气候变化与人类活动的双重胁迫下，海岸带正发生系统性转变，表现为海平面上升、岸线退缩、湿地萎缩与生态退化等(Wunderling et al., 2024; Saintilan et al., 2023)，部分区域可能逼近甚至越过临界点(Haines et al., 2025; Moll et al., 2024)。在地球系统中，临界点通常指系统在外部强迫或内部反馈作用下，从一个稳态跃迁至另一个稳态的临界阈值(Lu et al., 2025)。IPCC 评估报告将其定义为：当系统属性变化超过某一阈值后，系统发生不可

逆重组的状态(Lenton et al., 2019, 2024; IPCC, 2021)。相较于由全球尺度和圈层相互作用主导的气候系统临界点, 海岸带临界点具有更强的区域性特征, 要求兼顾区域与全球的联动性、多子系统之间的耦合关系以及由非线性反馈驱动的系统突变特征(Ashwin et al., 2012; Tian et al., 2020; Barnard et al., 2021; Yi et al., 2025)。

海岸带系统物理、生态与社会系统间高度耦合, 具有一系列独特属性: 一是陆海双向耦合敏感性, 陆地过程(如径流、土地利用)与海洋过程(如潮汐、波浪)之间的相互反馈增强了系统响应的不确定性(Hesterberg et al., 2022; Dijkstra et al., 2024); 二是多重压力叠加下的系统脆弱性, 气候变率与人类开发压力耦合形成复合胁迫, 提升了系统对扰动的敏感度和临界跃迁的可能性(Blum and Roberts, 2009; Wang et al., 2022); 三是子系统耦合驱动的级联突变性, 物理、生态和社会等子系统之间的耦合可触发跨尺度的级联响应与突变(Scheffe et al., 2005; Moser et al., 2012; Cremin et al., 2024); 四是生态—社会过程存在节律不一致性, 自然过程的渐进性与社会决策的突发性之间存在节奏差异, 使得系统更容易在治理滞后中陷入突变(Vousdoukas et al., 2020)。这些特性显著增加了海岸带系统临界点识别的复杂度, 对统一建模与分类提出了更高要求(Bellamy, 2023; Rietkerk et al., 2025)。亟需构建融合多尺度时空动态与多要素界面过程的临界点数学表征体系, 形成区域尺度上临界点演化过程识别和耦合机制描述的方法框架。

科学识别海岸带临界点、解析其跃迁机制是区域地球系统研究的核心问题。临界点识别与分析方法主要包括统计、动力和人工智能方法等。统计方法通过检测系统状态变量的趋势增强、方差扩大、时序自相关上升等现象, 识别接近临界状态的早期信号(Scheffer et al., 2009; Hennekam et al., 2020), 近年来还发展了本征微观态分析和复杂网络方法, 揭示了复杂系统的临界转变过程(Liu et al., 2023; Fan et al., 2025)。动力系统方法主要通过构建非线性微分方程以揭示系统稳定性边界和分岔行为(Lade et al., 2012)。人工智能方法则利用深度学习等模型从高维观测数据中提取潜在临界结构与分类特征(Deb et al., 2022)。上述跨学科研究拓展了临界点研究的理论边界(Feudel et al., 2018; Conversi et al., 2015; Rocha et al., 2015)。然而, 不同领域对“临界点”定义不一, 存在术语混用与认知分歧, 制约了区域地球系统层面跨尺度、跨系统临界点识别标准的统一。海陆交互相互作用与多尺度过程叠加, 加剧了海岸带临界点表征的复杂性, 亟需在研究早期建立统一表达与系统分类框架。

面向海岸带系统在时间、空间、交互性的特殊性, 本文以系统动力学方法为基础, 通过引入时空扩散张量与交互通量, 将海陆相互作用与多尺度过程嵌入现有临界点数学框架, 从数学描述上构建海岸带临界点统一描述模型, 拓展了海岸带临界点的类型划分, 揭示了不同类型临界点的触发模式与时空响应特征。基于大语言模型构建临界点分类方法, 分析了典型海岸带临界案例及其时空分布, 揭示了海岸带临界现象的全球广泛分布与空间非均质性, 展望了海岸带临界点研究的重点方向。

2 海岸带临界点定义

综合数理、生态与地球系统科学相关定义(Di Santo, 2024; Dakos et al., 2024), 本文将海岸带临界点定义为: 在气候变化与人类活动等多重驱动下, 海岸带系统中关键变量变化, 导致系统结构、功能或服务发生稳态跃迁的阈值, 该稳态跃迁在特定时空尺度上通常不可逆。据此定义, 海岸带临界点基本构成包含三要素: ①临界发生的时空范围; ②驱动变量与控制变量的耦合演化; ③状态变量的非线性响应。上述要素可通过系统动力学微分方程数学表征, 揭示临界点的非线性、阈值效应、多稳态及滞后性等共性特征。

海岸带作为典型的区域地球系统, 除具有临界点的共性特征外, 还具有显著的特殊性(Fringer et al., 2019; Ward et al., 2020; Almar et al., 2021)。①空间动态性: 海岸带要素在有限海陆空间内高度集聚并持续演化, 导致空间连通性呈现显著时空动态和异质性。岸线变迁、海陆界面水沙与营养盐非对称交换, 以及潮汐周期性波动, 可放大微小扰动, 诱发空间非均匀的临界响应。②快慢耦合性: 系统演化兼具冲淡水扩散、珊瑚白化等快速过程与岸线迁移、海平面变化等缓慢过程, 形成快慢时空耦合的复杂系统。在生态-社会经济子系统中, 社会经济变化常超前于生态响应, 而政策调控则滞后于生态阈值, 也形成了时序上多尺度耦合结构。③耦合级联性: 在耦合机制上, 自然过程与人为活动的多重交互作用快速压缩系统稳定域、降低跃迁阈值, 易诱发临界现象, 同时, 子系统间的紧密耦合可能触发级联效应, 即一个要素的临界发生会导致关联系统也发生临界, 最终引发整个系统的突变。

基于上述特性, 本文尝试扩展临界点数学表达框架, 定义关键参数如表 1 所示。

表 1 海岸带临界点表达的关键参数

参数	标准化描述	物理意义	动态特性	量纲
$x(s, t)$	系统状态向量: $x \in \square^n$	海岸带多维度状态变量(如地形高程、生物量、社会经济指标)	时空演化	依变量而定 ($m, m^3 \dots$)
$\lambda(s, t)$	外部控制参数: $\lambda \in \square$	系统外部驱动变量(如海平面高度、温度、人类活动强度)	外部扰动	驱动量单位 ($m, ^\circ C \dots$)
$\psi(s, t)$	空间结构参数: $\psi \in \square$	系统空间构型属性(如栖息地连通性、地貌复杂度)	空间连通性主导	无量纲 相对尺度
$\theta(s, t)$	外源性扰动项: $\theta \in \square$	随机噪声或极端事件冲击	随机扰动	驱动量单位 ($kg/m^2 \cdot s \dots$)
$D(s, t)$	扩散张量: $D \in \square^{n \times n}$	状态变量的空间扩散强度(如沉积物输运、物种迁移)	空间异质性显著	距离/时间 ($m/s^2 \dots$)
$\Gamma_{ij}(x_i, x_j)$	子系统耦合项: $\Gamma_{ij}: \square^n \times \square^n \rightarrow \square^n$	子系统间交互通量(如陆海淡水交换、营养盐循环)	受界面过程调控	通量单位 ($kg/m^2 \dots$)

基于动力系统理论, 临界点在数学上抽象为系统在外部控制参数变化下经历稳定性丧失与状态跃迁的动力学过程。设 x 为动力系统在空间区域 Ω 的位置 s 与演化区间 T 的时间 t 下的状态变量, 系统动力学演化满足:

$$\frac{dx(s,t)}{dt} = f(x(s,t), \lambda(s,t); \psi(s,t)) + \theta(s,t), \quad s \in \Omega, t \in [0, T], \quad (1)$$

公式(1)中 f 为通用的非线性函数,表达了系统状态向量在控制参数驱动和外源性扰动下的动态演化。面向海岸带临界点在时间、空间和相互作用上的特殊性,拓展公式(1)形成海岸带临界点的偏微分表达:

$$\frac{\partial x_i(s,t)}{\partial t} = \nabla \cdot (D_i(s,t) \nabla x_i) + f_i(x_i, \lambda_i; \psi_i) + \sum_{j \neq i} \Gamma_{ij}(x_i, x_j) + \theta_i(s,t), \quad s \in \Omega_i, t \in [0, T], \quad (2)$$

其中, $i = L, M, O$ 分别表示陆地、海陆交错带与海洋子系统中的一个或多个的组合,体现海岸带系统空间异质性与多圈层耦合特征。 $\nabla \cdot$ 表示散度算子,用于衡量状态变量空间扩散强度; ∇ 表示梯度算子,用于计算状态变量在空间各方向上的变化率。子系统交互项 $\Gamma_{ij}(x_i, x_j)$ 边界随状态变量变化而动态调整,满足如下自由边界条件:

$$V_i = F_i(x_i, \nabla x_i, \lambda_i, \psi_i), \text{ on } \partial\Omega_i, \quad (3)$$

其中, F_i 为海洋子系统满足的隐式边界函数,表示控制系统与 $x_i, \nabla x_i, \lambda_i, \psi_i$ 直接的约束关系。 V_i 为量化该函数的边界通量,表示系统状态在边界上的变化速率。

在系统逼近临界跃迁时刻 t_c 附近,系统状态变量 x_i 的演化速率通常呈现非线性加速特征:

$$\left\| \frac{\partial x_i}{\partial t} \right\|_{t > t_c} \gg \left\| \frac{\partial x_i}{\partial t} \right\|_{t < t_c}, \quad \forall i = L, M, O. \quad (4)$$

将公式(4)所示的速率突变行为视为系统状态跃迁的临界边界,引入准稳态轨道偏离(Ashwin et al., 2012)来表征系统状态变量 x_i 与临界时刻 t_c 之间的数学关系。设系统准稳态轨道为 $x_i^*(s, t)$, 满足:

$$f_i(x_i^*(s, t), \lambda_i(s, t); \psi_i(s, t)) = 0, \quad (5)$$

即为当前控制条件下系统的稳态解。随着外部驱动力的速率不断增加,若系统状态与其稳态解的偏离满足如下不等式:

$$\|x_i(s, t) - x_i^*(s, t)\| \geq \varepsilon. \quad (6)$$

其中, ε 为系统状态改变的稳定容差,则定义该时刻 $t = t_c$ 时,系统越过临界点,出现了跃迁。

公式(2)与(3)体现了海岸带系统临界点的特殊性:空间结构参数 ψ_i 描述了系统空间构型属性,如栖息地连通性、地貌复杂度,能够描述海岸带系统对空间连通性变化的响应。扩散张量 D_i 与交互项 $\Gamma_{ij}(x_i, x_j)$ 决定扰动在空间及子系统间的传播速率,当局部状态跨越阈值,扰动可沿耦合网络发生级联,可以同步描述海岸带系统中快慢过程的级联关系;系统的状态向量及其空间变化 x_i, ψ_i 的固有响应尺度和控制变量 λ_i 拥有不同的时间坐标,从而可以描述不同子系统之间的非同步性。交互通量 $\Gamma_{ij}(x_i, x_j)$ 和边界通量 V_i 描述了跨界面非对称性的多路径交换;控制参数 λ_i 以非线性形式嵌入反应项 $f_i(x_i, \lambda_i; \psi_i)$,可以描述多因子的叠加作用。

3 海岸带临界点分类

在数学和统计物理中,临界点通过构造状态变量和序参量的相空间轨迹分析,基于机制不同分为

分岔诱导、速率诱导和噪声诱导等类型(Dakos et al., 2024), 揭示系统逼近参数阈值时稳定结构因非线性动力学发生质变。本文在继承上述临界点分类基础上, 进一步考虑海岸带在时间、空间和要素相互作用方面的特性, 将海岸带临界点划分为六种类型: 分岔驱动(Bifurcation-driven, B-tipping)、噪声驱动(Noise-driven, N-tipping)、速率驱动(Rate-driven, R-tipping)、冲击驱动(Shock-driven, S-tipping)、空间驱动(Space-driven, Sp-tipping)、信息驱动(Information-driven, I-tipping)。前四类可由统一动力系统框架公式(1)刻画, 后两类则需引入空间异质性与子系统耦合, 将公式(1)扩展成偏微分建模框架公式(2), 从而更为精准的表达空间传播与系统交互机制。

为了更直观地表达不同类型临界点的演化特征, 构建系统状态变量在势能相空间中的演化轨迹(图1)。其中, 黑色实线表示系统初始时刻的势能曲线, 凹陷区域代表系统的稳定吸引盆。小球表示系统当前的状态变量 λ_i , 在驱动作用下沿曲线滑动并表现出不同的响应机制。黑色虚线表示外部驱动改变后势能结构的形变过程, 吸引盆可能发生迁移或变形。蓝色箭头表示系统状态 x_i 在失稳、扰动或响应滞后下的跃迁路径, 而红色箭头则表示由于控制参数 λ_i 的缓慢变化, 吸引盆发生的结构性快速变形或消失。红色曲线表示在控制参数 λ_i 快速变化条件下, 吸引盆位置的连续平移轨迹。针对海岸带时间、空间和相互作用的特异性表达, 利用方块图样表示系统的局部空间状态, 其在 $D_i(s, t)$ 控制下空间分布逐渐扩散, 并在临界点前后通过自组织过程从均匀态转变为非均质的空间模式结构。利用网络结构描述 Γ_{ij} 以表征多子系统间直接或者间接的相互作用, 此类作用不仅可以是物质和能量的传输与交换, 也可以表征信息交换或传递网络, 揭示信息传递对各子系统稳定性与演化的耦合作用。

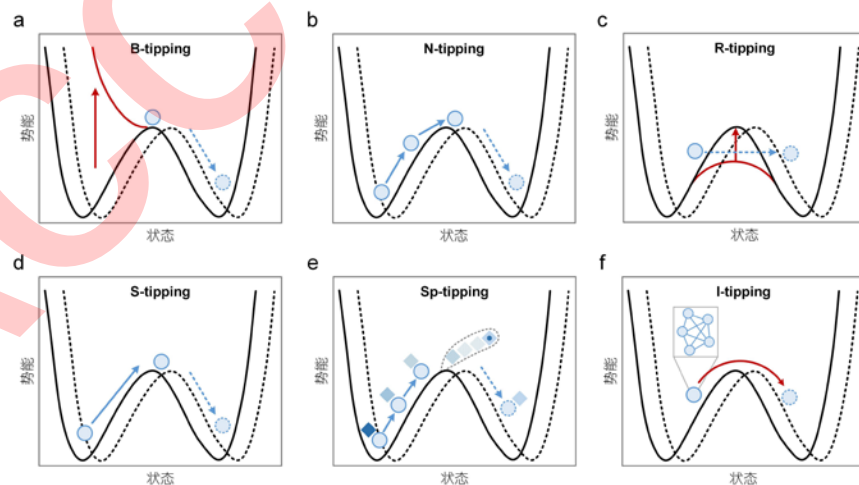


图1 海岸带不同类型临界点的分类。(a-d) 改绘自 Brunetti et al., 2023 和 Huang et al., 2024

图1中六类临界点的产生机制与特性总结如下: ① B-tipping 显示系统因控制参数 λ_i 缓慢变化穿越分岔点, 原有稳定态消失, 状态被迫跃迁至另一吸引态。② N-tipping 显示在无参数变化的条件下, 系统因随机扰动 $\theta_i(s, t)$ 跨越吸引盆边界, 跃迁至新的稳定状态。③ R-tipping 显示虽然控制参数 λ_i 未越

过分岔点, 但变化速率 $\partial x_i / \partial t$ 过快, 系统无法及时响应而脱离吸引盆, 发生跃迁。④ S-tipping 显示系统在控制参数 λ_i 不变时受到一次强烈脉冲冲击 $\theta_i(s, t)$, 快速越过吸引盆边界, 引发突变。⑤ Sp-tipping 显示系统在分岔点前通过 $\nabla \cdot (D_i(s, t) \nabla x_i)$ 扩散形成空间结构, 通过空间自组织演化形成稳态跃迁。⑥ I-tipping 显示在 $\sum_{j \neq i} \Gamma_{ij}(x_i, x_j)$ 下实现多个系统之间进行信息交互达到感知阈值, 使得某一个子系统在控制参数 λ_i 不变的情况下直接跨越吸引盆边界, 跃迁至新稳态。

3.1 分岔驱动型临界点(B-tipping)

分岔驱动型临界点是关键系统参数缓慢、持续地变化并穿越一个分岔点, 导致系统稳定性丧失并被迫跃迁到新稳态(Chekroun et al., 2024)。忽略公式(1)中的外源性扰动项 $\theta(s, t)$, 可直接推导得到分岔驱动型海岸带临界:

$$\frac{\partial x(s, t)}{\partial t} = f(x(s, t), \lambda(s, t); \psi(s, t)), \quad s \in \Omega, t \in [0, T]. \quad (7)$$

系统平衡点 x^* 满足 $f(x^*, \lambda; \psi) = 0$, 随着 λ 的缓慢变化, 平衡点的数量或稳定性也随之变化。当 λ 越过临界参数 λ_B 时, 原有的稳定平衡点消失或失稳, 系统被迫迅速转移到新平衡点, 导致不可逆的跃迁。分岔驱动型临界点的本质特征表现为系统参数缓慢变化越过阈值, 该机制通常伴随非线性正反馈与显著的滞后效应。

在海岸带系统中, 生态与物理过程常具有显著的阈值响应特征, 即系统在缓慢变化驱动下发生非线性跃迁。因此, 分岔驱动型临界点广泛存在于各类自然过程中。典型生态过程如沿海潮汐淡水森林, 由于海平面上升引发海水入侵, 向寡盐沼泽转变, 最终导致群落替代与生态结构突变(Wang et al., 2023)。在物理过程方面, 典型情形如湿地系统的盐度跃迁, 水体盐度受降水、蒸发、地下水补给与海水入侵等多因素共同影响, 若淡水输入减少或盐分逐步累积至某一临界阈值, 系统可能从低盐湿地跃迁至高盐生态类型, 导致生态功能显著退化(Dijkstra et al., 2024)。

3.2 噪声驱动型临界点(N-tipping)

噪声驱动型临界点指系统在接近临界状态但尚未越过分岔点时, 系统因随机扰动跨越吸引盆边界, 跃迁至新的稳定状态的一种突变机制 (Li et al., 2021)。即使系统的平均状态或控制参数保持相对稳定, 足够强的噪声也可能触发状态转变。

将公式(1)中的外源性扰动具体化为噪声扰动, 可得到噪声驱动型临界点演化的随机微分方程:

$$\frac{\partial x(s, t)}{\partial t} = f(x(s, t), \lambda(s, t); \psi(s, t)) + \sigma \frac{\partial W(s, t)}{\partial t}, \quad s \in \Omega(t). \quad (8)$$

其中, σ 为噪声强度, $W(s, t)$ 为代表连续时间随机扰动的 Wiener 过程。随机扰动通过噪声项叠加到系统演化中, 可能导致系统状态发生剧烈变化。随着 λ 的变化, 海岸带系统的整体稳定性逐渐降低。噪声驱动型临界点在海岸带系统中具有一定的隐蔽性, 其本质不在于控制参数本身的临界变化, 而在于系统脆弱性与外部扰动之间的非线性交互, 表现为随机扰动推动系统越过稳定边界。

在海岸带系统中, 由于物理过程频繁波动, 气候变率显著, 噪声驱动型临界点具有广泛的现实基

础。典型案例包括风暴潮频次波动造成的盐沼崩溃：若数次强风暴潮叠加至系统承载阈值，可能触发湿地向泥滩或开阔水域的跃迁(Pierik, 2021)。另一典型情形见于副热带干旱区海岸带，干湿振荡与间歇性风暴驱动盐度和营养动态，引发浮游植物群落由干早期硅藻主导向湿润期蓝藻优势种转变(Douglas et al., 2023)。这类临界点常发生在看似“稳定”但内在脆弱的系统中，持续性的扰动过程(如风场波动、海温异常或 ENSO 变率)可逐步削弱系统稳定性，最终诱发临界。

3.3 速率驱动型临界点(R-tipping)

速率驱动型临界点指系统因外部驱动力变化速率过快，超出其自身响应或适应能力，导致状态跃迁的一种突变机制(Huang et al., 2024)。基于公式(1)，忽略外源性扰动的影响，考虑外部控制变量随时间的动态变化，将速率驱动型临界点数学化表达为“慢-快”非自治系统：

$$\begin{cases} \frac{\partial x(s,t)}{\partial t} = f(x(s,t), \lambda(s,t); \psi(s,t)), \\ \frac{\partial \lambda(s,t)}{\partial t} = v, \end{cases} \quad s \in \Omega, t \in [0, T]. \quad (9)$$

对于 $\lambda(s,t)$ ，假设存在稳定平衡分支 $x^*(\lambda)$ 且系统无局部分岔。当速率 v 较小时，海岸带系统轨道能够准静态跟踪，维持对环境扰动的稳定响应；然而，当 v 超过某一临界速率 v_R 时，系统因响应滞后导致轨道偏离稳定分支，失去对渐变环境的追踪能力，最终脱离吸引盆并跃迁至新的状态区间，表现为速率驱动型跃迁。速率驱动型临界点的本质特征表现为驱动力变化速率超过系统响应速率。

速率驱动型临界点并非由变量达到静态阈值触发，而是由于环境变化速率超过系统适应能力，引发系统的滞后性跃迁。此类临界点常因系统响应延迟导致预警信号不明显，需动态监测外部变化速率与系统响应速率的耦合关系(Thorne et al., 2024)。如滨海湿地对海平面上升的适应主要依赖垂直淤积，当上升速率超过其积累速率时，即使绝对水位未超阈值，湿地也可能因淹没压力加剧而退化(Osland et al., 2022)。速率驱动型机制揭示了系统“赶不上变化”的风险，其突变常发生在表面缓变但速率失衡的过程中，具有滞后显著、误判风险高、需超前干预等特征。

3.4 冲击驱动型临界点(S-tipping)

冲击驱动型临界点是由突发的、强度极大的外部冲击事件直接将系统越过稳定阈值，进入新的状态的一种突变机制(Brunetti et al., 2023)。不同于 N-tipping 由持续噪声累积引发，S-tipping 通常源于单次剧烈事件，强调扰动幅度而非长期压力变化，与 B-tipping 的驱动力缓慢漂移相比，则更强调驱动力的脉冲状态。基于公式(1)，冲击驱动型临界点的数学表达为：

$$\frac{\partial x(s,t)}{\partial t} = f(x(s,t), \lambda(s,t); \psi(s,t)) + \delta(t), \quad s \in \Omega, t \in [0, T], \quad (10)$$

其中， $\delta(t)$ 表示在特定时间施加的瞬时冲击(通常建模为脉冲函数或短时高幅扰动)。设 $x^*(\lambda)$ 为海岸带系统的原始稳定状态， $B(x^*(\lambda))$ 为对应的吸引盆区域，反映系统在自然扰动下的稳定响应范围。系统状态从该稳定态跃迁至其他稳定结构所需的最小脉冲扰动强度定义为临界冲击幅度：

$$I^*(\lambda) = \text{dist}(x^*(\lambda), \partial B(x^*(\lambda))). \quad (11)$$

定义临界参数 λ_S ，若 $\lambda > \lambda_S$ ，则 $\|I\| < I^*(\lambda)$ ，系统具备足够的恢复能力，能够维持在原有吸引盆内；若 $\lambda \leq \lambda_S$ ，则 $\|I\| \geq I^*(\lambda)$ ，系统状态越过稳定边界，跃迁进入新的吸引结构区，表现为突发性、不可逆的状态转变。冲击驱动型临界点的本质特征表现为脉冲式突发扰动破坏系统稳定性。

冲击驱动型临界点由突发性、高强度的外部事件引发，常缺乏可观测的预警信号，且系统恢复依赖外部干预或长时间尺度。因此，该类临界点强调对极端事件的预防与快速响应能力。在海岸带系统中，常见冲击包括人为扰动与自然灾害。典型人为扰动如油轮泄漏可在短时间释放大量有毒物质，导致近海生态系统突变退化(Engel and Gupta, 2014)；自然灾害如超强飓风可摧毁滨海湿地生态功能结构，即使飓风结束，因缺乏基础生态功能，系统仍可能转向礁石海滩的退化态(Van der Lugt et al., 2019)。该类型临界点不依赖于缓慢演化的背景变量或随机扰动的积累，而是由单次冲击直接将系统推过阈值，引发快速且不可逆的跃迁。

3.5 空间驱动型临界点(Sp-tipping)

空间驱动型临界点指由于空间结构、连通性或异质性变化，导致系统物质、能量或信息流动模式突变，触发整体或局部状态翻转的稳态跃迁。空间驱动型临界点强调空间过程与结构变化作为直接触发因素，关键机制通常涉及空间格局破碎、关键斑块退失、连通路径中断或局部扩散不稳定等现象(Ritchie et al., 2021; Rietkerk et al., 2021)。在公式(2)中重点关注空间扩散项，忽略外源性扰动项与子系统交互项，可获得如下形式的反应-扩散方程：

$$\frac{\partial x(s,t)}{\partial t} = \nabla \cdot (D(s,t) \nabla x) + f(x(s,t), \lambda(s,t); \psi(s,t)), \quad s \in \Omega, t \in [0, T]. \quad (12)$$

其中，临界参数 λ_{Sp} 为系统首次出现空间模式不稳定时对应的控制参数取值，即在 $\lambda = \lambda_{Sp}$ 时，存在某个非零波数 $k > 0$ 使得 $\lambda(k) > 0$ 且 $\lambda(0) < 0$ 。在参数缓慢变化过程中，当 λ 达到 λ_{Sp} 时，系统可能从均匀态突变为具有空间结构的状态，引发局部或整体格局重构。随着控制参数 λ 的变化，海岸带系统中的空间模式可能经历非线性放大或破坏，进一步诱发空间驱动型临界点，导致系统整体跃迁至新的稳定态。

空间驱动型临界点强调系统稳态跃迁由空间结构变化所引发，具有强烈的结构性和非局地性特征。典型案例如潮汐出口淤积和关闭，导致湖水盐度变化，引发鱼类迁徙路径中断导致生态系统崩溃(Cooper et al., 2020)。另一典型情形如芦苇与互花米草的竞争演替，受土壤盐度逐步变化，互花米草逐渐占优，并形成反馈作用，实现空间上的分割作用，最终导致群落替代与生态结构突变(Wang et al., 2022)。空间驱动型临界点的预警信号常表现为空间格局变化，如生态斑块破碎化、空间异质性下降、自相关结构紊乱等。该机制揭示了系统对空间结构和连通性的高度敏感，凸显空间因素在海岸带临界事件中的重要作用。

3.6 信息驱动型临界点(I-tipping)

信息驱动型临界点指系统中信息传递速率、效率或连通性变化至某一临界值时，引发系统集体行为、协调机制或稳定结构的一种突变机制(Hein and Martin, 2020)。信息驱动型临界点关注信息流动变

化对系统稳定性的影响(Brose et al., 2025)。信息既可以是化学信号、声音信号、视觉信号，也包括社会网络中的知识或规范。在人类社会系统中，突变往往也由社会交流、情绪传播或制度调整等信息过程驱动，实质上归属信息临界类型。在公式(2)中重点考虑子系统交互项，忽略外源性扰动项与空间扩散项，可获得如下耦合系统：

$$\frac{\partial x_i(s,t)}{\partial t} = f_i(x_i, \lambda_i; \psi_i) + \sum_{j \neq i} \Gamma_{ij}(x_i, x_j), \quad s \in \Omega, t \in [0, T], \tag{13}$$

当临界参数 λ_i 取到临界值 λ_l 时，系统首次在局部或整体上跨越感知阈值 ϕ ，触发状态突变的控制参数取值。即存在 t_l 使得：

$$I(x(s_l, t_l), \lambda_l) = \phi. \tag{14}$$

在 λ 调控下，系统内部信息强度 $I(x, \lambda)$ 跨越感知阈值 ϕ ，在 $\lambda = \lambda_l$ 处引发状态突变，进而触发信息驱动型临界点。信息驱动型临界点的本质特征表现为信息流动效率下降引发系统失稳。

信息驱动型临界点广泛存在于海岸带系统的微观生物过程与宏观社会系统中，体现出信息流中的阈值效应与系统对“非物质扰动”的高度敏感性。在微观层面，信号分子通过生物地球化学过程介导群体感知行为，如当海洋细菌密度或信号浓度超过阈值，集体基因表达骤变，诱发生物膜形成等群体响应(Tytgat et al., 2019)。在宏观生态层面，海鸟或海洋哺乳动物等依赖信息交流维持种群功能，若密度下降致信息传递不足，可能导致种群崩溃(Hein and Martin, 2020)。在社会系统中，沿海城市的快速城市化与政策调整亦可能通过信息失衡触发不可逆的社会经济变迁(Shortridge et al., 2024)。

3.7 海岸带临界点特征及复合临界

海岸带临界点在数学描述、触发机制和时空尺度上存在显著差异，基于数学描述尚难以直接构建可操作的临界点识别与分类方法。为此，从数学描述和地学特征两个视角，融合触发机制、时空尺度、判定特征及数学框架等维度总结不同类型临界点的特征如表 2 所示。

表 2 六种海岸带临界点的特征比较

临界点类型	分岔驱动 (B-tipping)	噪声驱动 (N-tipping)	速率驱动 (R-tipping)	冲击驱动 (S-tipping)	空间驱动 (Sp-tipping)	信息驱动 (I-tipping)
数学框架	鞍结分岔理论分析 (Chekroun et al., 2024)	随机微分方程、势阱理论(Li et al., 2021)	非自治系统动力学、适应速率模型 (Huang et al., 2024)	状态转换模型、恢复力框架(Brunetti et al., 2023)	反应-扩散、网络理论、逾渗理论 (Ritchie et al., 2021; Rietkerk 2021)	群体感应模型、网络信息流、博弈论(Hein and Martin, 2020)
触发机制	系统参数缓慢变化越过阈值(Wang et al., 2023; Dijkstra et al., 2024)	随机扰动推动系统越过稳定边界 (Pierik, 2021; Douglas et al., 2023)	驱动力变化速率超过系统响应速率 (Osland et al., 2022; Thorne et al., 2024)	脉冲式突发扰动破坏系统稳定性 (Engel and Gupta, 2014; Brown et al.,	空间结构或连通性重组 (Cooper et al., 2020; Wang et al., 2022)	信息流动效率下降引发系统失稳 (Tytgat et al., 2019; Shortridge et

				2016; Van der Lugt et al., 2019)	al., 2024)	
时间尺度	通常较长, 取决于参数变化速率	可变, 取决于噪声特性和系统状态	可变, 取决于驱动速率和系统响应速率	短暂, 事件驱动	可变, 取决于空间过程速率	可变, 取决于信息传递和处理速率
临界点特征	滞后显著、预警模糊、干预代价高	触发阈值低、预警信号弱、恢复路径不确定	过程滞后、误判风险大、超前干预必要性高	突变性强、响应迅速、不可逆性高	具有结构性、非局域性与网络敏感性	认知滞后、网络依赖与行为放大
判断特征	关键参数的数值经长期演变而跨越了系统的内在阈值	多个弱扰动的累积效应共同触发了系统的状态相变	单一、剧烈的外部冲击作为独立事件直接导致系统跃迁	驱动因素的变化速率本身超越了系统的适应或响应能力	系统的物理空间格局或连通性发生了根本性改变	非物质性的信息流改变了系统内部的集体行为模式

数学描述上, 所提出的临界点表达模型为不同类型临界点界定了状态偏离度量、控制参数阈值、变化速率边界及稳定性条件。其中, 分岔临界点由控制参数缓变跨越分岔阈值驱动; 噪声临界点源于随机扰动迫使状态超越吸引盆边界; 速率临界点取决于外部驱动变化速率突破系统适应上限; 冲击临界点因短时高强度脉冲引发快速越过阈值; 空间临界点产生自扩散与连通性重组导致的模式失稳; 信息临界点则由信息传递与决策耦合导致超越阈值。由于不同类型的临界点均由公式(1)和(2)统一定义, 可以有效整合参数渐变、随机扰动、速率超限、突发事件、空间结构变异及信息失序等多重驱动机制导致的海岸带临界点。从临界点分析的数学框架上看, 不同类型的临界点所使用的数学工具存在显著的差异, 对海岸带临界点的综合分析需要融合微分方程、随机动力学、复杂网络等跨学科方法进行综合集成研究。

地学特征上, 不同类型临界点触发机制和时空尺度存在差异。触发机制上, 分岔临界点反映缓变积压下的动态演化, 噪声临界点强调随机扰动在稳态边界的触发作用, 速率临界点突出系统响应与变化速率的不匹配, 冲击临界点则表现为短时高烈度冲击引发的临界突变, 而空间与信息临界点分别指向空间结构异质性与信息传递机制失衡所致的稳态跃迁。时空尺度上, 不同类型临界点涵盖了从冲击型的瞬时突变到分岔、噪声及速率驱动等不同时空尺度不同步性。

公式(1)和公式(2)显示, 海岸带系统的临界跃迁往往并非由单一阈值触发, 而是多重机制耦合的结果。本文提出的六类临界点分类亦非完全正交, 而是可相互组合形成复合临界, 如分岔-速率驱动类型临界点(B-R-tipping)发生于外部控制参数 $\lambda(s, t)$ 快速接近分岔阈值 λ_B 且变化率 $\partial\lambda/\partial t$ 超过系统响应时标 的情况下, 此时系统无法跟踪准稳态路径, 稳定结构失稳, 触发耦合跃迁(Ashwin et al., 2017); 噪声-速率驱动类型临界点(N-R-tipping)则表现为外部控制参数 $\lambda(s, t)$ 变化速率接近系统的临界速率阈值 v_R 的同时, 外源项扰动 $\theta(s, t)$ 引入随机高斯噪声 σ 累积增强, 当速率变化削弱系统鲁棒性时, 随机扰动可提前引发系统跃迁(Huang et al., 2024; Slyman et al., 2023); 空间-信息驱动类型临界点(Sp-I-tipping)属于多

系统耦合范式，其空间扩散项 $\nabla \cdot (D_i(s, t) \nabla x_i)$ 可诱导局部扰动放大并引发结构失稳，交互项 $\Gamma_{ij}(x_i, x_j)$ 加速子系统感知与响应速率，进而促发系统状态变量 $x_i(s, t)$ 的同步跃迁，常发生于结构连接断裂、异质性增强或反馈延迟降低的场景中。

4. 海岸带临界点分类的实证研究

海岸带临界点的识别涉及多领域术语融合、类型判断与空间定位等多重挑战，利用数学的定义来进行海岸带临界点分类识别尚存在困难。基于前述对不同类型临界点特征的总结，结合大语言模型和文献大数据，构建知识驱动的临界点分类有可能为海岸带临界点的研究提供新的视角。本文利用大语言模型(Qwen3-235B-A22B-Thinking-2507)与专家人工判别方法对海岸带临界点相关的文献进行实证分析。首先从 Web of Science 数据库中检索出 252316 篇海岸主题文献元数据，筛选出与“tipping point”和“regime shift”关键词相关的 547 篇核心文献。通过研究区提取，剔除无明显坐标或不位于海岸带区域的文献，最终确定 68 篇海岸带临界点文献，解译了 91 个具有精确空间坐标的海岸带临界点案例。四位专家在此基础上，依据本文提出的统一描述模型进行独立核验与共识裁决，确定了海岸带临界点事件的准确分类，并以此作为海岸带临界点分类实验的基线。

根据所提出的统一描述框架及表 2 总结的不同类型的临界点的特征，从临界点类型、触发机制、时间尺度、定义、临界点特征、文献关键词等视角构建大语言模型 Prompt 分类模版并进行分类。大语言模型与专家人工解译的结果对比如表 3 所示，基于统一描述模型知识抽取构建的大语言模型准确率，除信息驱动型 1 个样本点未被准确识别外，其他 5 类均能进行识别提取。其中速率驱动型、冲击驱动型、分岔驱动型和空间驱动型识别准确性相对较高，精确率均超过了 0.83。噪音驱动型分类精度较低，精确率为 0.36，表现为大量冲击驱动型被错误识别为噪音驱动型，其主要原因是大语言模型难以判断事件的时间尺度，难以区分多事件叠加形成的扰动和单一事件形成的冲击。从解译的数量上看，大语言模型对速率、冲击、空间和信息驱动型的识别主要问题是存在漏判，大多将其归为分岔型和噪声型，可能和大语言模型训练语料中分岔和噪声相关的文献记录较多，其余四类记录较少有关。另一方面，速率、冲击、空间和信息驱动型临界点判定都和时空尺度和驱动机制密切相关，而现有大语言模型在时空尺度精准识别和区分方面尚存局限。未来可通过构建临界点领域专业语料库，建立物理机理和时空尺度约束的模型训练方法对大模型进行预训练和微调，提升模型的准确率。

表 3 大语言模型海岸带临界点分类精度评价表

临界点类型	分岔 驱动型	噪声 驱动型	速率 驱动型	冲击 驱动型	空间 驱动型	信息 驱动型
专家解译数量	44	6	15	15	10	1
大语言模型解译数量	49	14	12	10	6	1
大语言模型解译正确数量	41	5	11	9	5	0
大语言模型解译精确率	0.84	0.36	0.92	0.90	0.83	0

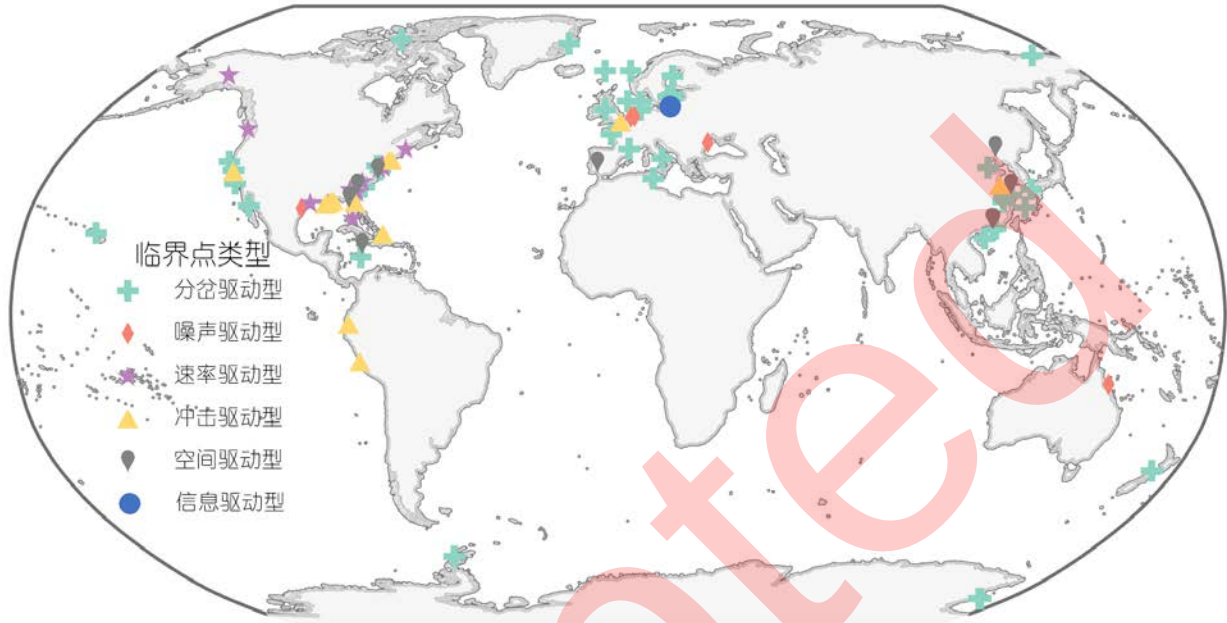


图 2 全球海岸带临界点分布图

不同类型临界点的全球分布如图 2 所示，海岸带六类临界点在空间分布显著不均，具有明确的区域性特征。其中，分岔驱动型空间分布最为广泛，在欧洲、北美东海岸、东亚沿海以及南极半岛附近都有出现。典型案例包括中国长江口海平面上升引起的生物群落替代(Xing et al., 2016)、西北大西洋渔业系统中过度捕捞导致的底栖鱼类衰退(Lynam et al., 2010)以及波罗的海生产力下降与富营养化级联效应引发的底栖-浮游生态主导权转换(Tomczak et al., 2022)。噪声驱动型主要出现在欧洲和美国东海岸，典型案例包括风暴潮引起敏感性区域泥炭地向开放潮汐盆地的转变(Pierik, 2021)。速率驱动型集中分布在北美的东、西海岸，特别是广泛分布的北美沿海湿地对海平面变化的速率高度敏感(Osland et al., 2022)。冲击驱动型在北美地区报道较多，在东亚、欧洲等地区也有分布。典型案例如北美加勒比海区域强飓风(Van der Lugt et al., 2019)或石油开采溢油(Engel and Gupta, 2014)导致的大规模生态系统崩溃。空间驱动型集中分布在在北美东海岸与东亚沿海三角洲地区，表现为冲淤和风暴潮引起河口三角洲变化改变区域连通性，进而引起海岸带生态系统发生转变(Wang et al., 2022)。信息驱动型在本文的文献范围中仅有波罗的海有明确的报道，表现为波罗的海渔业因管理响应迟滞与市场信号扭曲引发的资源崩塌(Psutty, 2022)。

值得注意的是，同一事件往往表现为多类型临界机制的复合响应，构成机制耦合型临界行为。例如，低纬珊瑚礁海域常呈现升温叠加极端热浪引发的分岔、噪声和空间驱动的复合类型。三角洲与滩涂地区则更易表现出速率与空间驱动并存特征，受控参数变化速率(如沉积物供给)与空间结构变化共同驱动。高度社会化的渔业密集区或城市化岸段，信息类型更为突出，体现了社会信息流中断与集体行为演化对生态临界点触发的潜在影响。因此，实际海岸带临界点研究应充分考虑区域主导机制类型的空间异质性，构建“机制识别-区域分类-策略匹配”的差异化研究路径，以提升对海岸带临界点的

综合响应能力。

5. 结论与展望

海岸带系统作为一个区域系统，其临界点特征体现了时间、空间与相互作用的独特性，具体表现为快慢差异过程、复杂空间结构和多过程耦合的相互作用模式。本文从系统动力学视角出发，在传统的分岔、速率、噪声、冲击驱动型之外，增补了空间与信息驱动型临界点，并据此构建了海岸带临界点数学表达模型。该模型将稳态偏离、参数阈值、变化速率及扩散-连通性等关键判据，统一为量化的参数表达。基于此，探讨了不同类型临界点的多维特征，并将其落实为可操作的判别指标与分类规则，并利用大语言模型构建了知识驱动的临界点分类模型。对全球 91 个典型案例的实证分析显示，本文提出的方法在速率、冲击、分岔和空间驱动四种类型上的识别精确率均超过 83%，而噪声与信息驱动型的分类精度有待提升，其原因可能是大语言模型在处理特定时空尺度上的局限性。分类结果的空间分布揭示了海岸带临界事件在全球分布广泛但不均衡：分岔驱动型占主导，其他类型呈现出显著的局地性。

本文研究只是初步建立了海岸带临界点统一表达的概念模型和系统分类的宏观框架。未来研究应关注如下工作：①数学理论深化与参数映射方法构建，完善海岸带临界点的统一数学表达，发展面向多圈层耦合系统的要素映射与参数化机制；②复合临界机制识别与级联效应建模，探索不同类型临界点的协同与叠加机制，构建能够表达多重临界点组合模式与级联跃迁路径的动态模型；③系统分类框架拓展与精细化演化，在现有六大类划分基础上，融合驱动因子、时空过程、系统组分与交互机制，推进海岸带临界点分类的体系化与层级化；④临界点识别算法构建和预警指标甄别，结合统计方法、动力建模与人工智能算法，构建面向“可诊断、可预测、可应对”的分析工具；⑤基于临界点分类的差异化的政策策略研究，依据不同类型临界点在时空尺度、冲击特征与响应机制上的差异性，制定类型化管理策略，强化分类的数据采集、跨圈层观测平台和智能预警系统的建设，服务海岸带的风险治理与韧性提升。

致谢

感谢国家重大科技基础设施“地球系统数值模拟装置”(https://cstr.cn/31134.02.EL)提供技术支持。感谢海岸带复杂系统与临界过程重大研究计划、2025 未来地球：科学与应用大会、中国科学院学部“科学与技术前沿论坛”等研讨会为本文带来的启发。本研究详细数据及分析代码可从 <https://doi.org/10.5281/zenodo.17051137> 下载。

参考文献

- 唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 杨华蕾, 孙晓红, 王法明, 温泉, 陈少波. 2018. 海岸带蓝碳的科学概念, 研究方法以及在生态恢复中的应用. 中国科学: 地球科学, 48(6): 661-670.
- Almar R, Ranasinghe R, Bergsma E W, Diaz H, Melet A, Papa F, Vousdoukas M, Athanasiou P, Dada O, Almeida L P, Kestenare, E. 2021. A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping. Nature Communications, 12(1):

- Ashwin P, Wieczorek S, Vitolo R, Cox P. 2012. Tipping points in open systems: bifurcation, noise-induced and rate-dependent examples in the climate system. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1962): 1166-1184.
- Ashwin P, Perryman C, Wieczorek S. 2017. Parameter shifts for nonautonomous systems in low dimension: bifurcation-and rate-induced tipping. *Nonlinearity*, 30(6): 2185.
- Barnard P L, Dugan J E, Page H M, Wood N J, Hart J A F, Cayan D R, Erikson L H, Hubbard D M, Myers M R, Melack J M, Iacobellis S F. 2021. Multiple climate change-driven tipping points for coastal systems. *Scientific Reports*, 11(1): 15560.
- Bellamy R. 2023. Public perceptions of climate tipping points. *Public Understanding of Science*, 32(8): 1033-1047.
- Blum M D, Roberts H H. 2009. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise. *Nature Geoscience*, 2(7): 488-491.
- Brose U, Hirt M R, Ryser R, Rosenbaum B, Berti E, Gauzens B, Hein A M, Pawar S, Schmidt K, Wootton K, Kéfi S. 2025. Embedding information flows within ecological networks. *Nature Ecology & Evolution*, 9: 547-558.
- Brown J M, Prime T, Phelps J J C, Barkwith A, Hurst M D, Ellis M A, Masselink G, Plater A J. 2016. Spatio-temporal variability in the tipping points of a coastal defense. *Journal of Coastal Research*, (75): 1042-1046.
- Brunetti M, Ragon C. 2023. Attractors and bifurcation diagrams in complex climate models. *Physical Review E*, 107(5): 054214.
- Campbell A D, Fatoyinbo L, Goldberg L, Lagomasino D. 2022. Global hotspots of salt marsh change and carbon emissions. *Nature*, 612(7941): 701-706.
- Chekroun M D, Liu H. 2024. Effective reduced models from delay differential equations: Bifurcations, tipping solution paths, and ENSO variability. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 460: 134058.
- Conversi A, Dakos V, Gårdmark A, Ling S, Folke C, Mumby P J, Greene C, Edwards M, Blenckner T, Casini M, Pershing A, Möllmann C. 2015. A holistic view of marine regime shifts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1659): 20130279.
- Cooper G S, Willcock S, Dearing J A. 2020. Regime shifts occur disproportionately faster in larger ecosystems. *Nature Communications*, 11(1): 1175.
- Cremin E, Ladd C J, Balke T, Banerjee S, Bui L H, Ghosh T, Large A, Thi Van Le H, Nguyen K, Nguyen L, Nguyen T, Nguyen V, Pal I, Szabo S, Tran H, Sebesvari Z, Khan S A, Renaud F G. 2024. Causes and consequences of tipping points in river delta social-ecological systems. *Ambio*, 53(7): 1015-1036.
- Dakos V, Boulton C A, Buxton J E, Abrams J F, Arellano-Nava B, Armstrong McKay D I, Bathiany S, Blaschke L, Boers N, Dylewsky D, López-Martínez C, Parry I, Ritchie P, van der Bolt B, van der Laan L, Weinans E, Kéfi S. 2024. Tipping point detection and early warnings in climate, ecological, and human systems. *Earth System Dynamics*, 15(4): 1117-1135.
- Day J, Anthony E, Costanza R, Edmonds D, Gunn J, Hopkinson C, Mann M E, Morris J, Osland M, Quirk T, Rovai A, Rybczyk J, Spencer T, Stephens J, Syvitski J, Twilley R, Visser J, White J R. 2024. Coastal wetlands in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 49(1): 105-135.
- Deb S, Sidheekh S, Clements C F, Krishnan N C, Dutta P S. 2022. Machine learning methods trained on simple models can predict critical transitions in complex natural systems. *Royal Society Open Science*, 9(2): 211475.
- Dijkstra Y M, de Goede R J A. 2024. Regime shift to hyperturbid conditions in the Loire estuary: overview of observations and model analysis of physical mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129(9): e2023JC020273.
- Di Santo V. 2024. Sharks at risk from climate-driven coastal upwelling. *Nature Climate Change*, 14(5): 432-433.
- Douglas S, Xue J, Hardison A, Liu Z. 2023. Phytoplankton community response to a drought-to-wet climate transition in a subtropical estuary. *Limnology and Oceanography*, 68: S187-S201.
- Engel A S, Gupta A A. 2014. Regime shift in sandy beach microbial communities following Deepwater Horizon oil spill remediation efforts. *PLoS One*, 9(7): e102934.
- Fan J, Meng J, Chen X, Schellnhuber H J. 2025. Complexity science meets Earth system. *Science Bulletin*, 70(1): 19-24.
- Feudel U, Pisarchik A N, Showalter K. 2018. Multistability and tipping: From mathematics and physics to climate and brain-Minireview and preface to the focus issue. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 28(3): 033501.
- Fringer O B, Dawson C N, He R, Ralston D K, Zhang Y J. 2019. The future of coastal and estuarine modeling: Findings from a workshop. *Ocean Modelling*, 143: 101458.
- Haines H, Planque B, Buttay L. 2025. Poor performance of regime shift detection methods in marine ecosystems. *ICES Journal of Marine Science*, 82(1): fsae103.
- Hein A M, Martin B T. Information limitation and the dynamics of coupled ecological systems. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(1): 82-90.
- Hennekam R, van der Bolt B, van Nes E H, de Lange G J, Scheffer M, Reichert G J. 2020. Early-warning signals for marine anoxic events. *Geophysical Research Letters*, 47(20): e2020GL089183.
- Hesterberg S G, Jackson K, Bell S S. 2022. Climate drives coupled regime shifts across subtropical estuarine ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(33): e2121654119.
- Huang Y, Bathiany S, Ashwin P, Boers N. 2024. Deep learning for predicting rate-induced tipping. *Nature Machine Intelligence*, 6: 1556-1565.
- IPCC. 2021. AR6 Climate Change. 2021: The Physical Science Basis. WG I
- Lade S J, Gross T. 2012. Early warning signals for critical transitions: a generalized modeling approach. *PLoS Computational Biology*, 8(2): e1002360.
- Lenton T M, Rockström J, Gaffney O, Rahmstorf S, Richardson K, Steffen W, Schellnhuber H J. 2019 Climate tipping points-too risky to bet against. *Nature*, 575(7784): 592-595.
- Lenton T M, Abrams J F, Bartsch A, Bathiany S, Boulton C A, Buxton J E, Conversi A, Cunliffe A M, Hebden S, Lavergne T, Poulter B, Shepherd A, Smith T, Swingedouw D, Winkelmann R, Boers N. 2024. Remotely sensing potential climate change tipping points across scales. *Nature Communications*, 15: 343.

- Li S, Wahl T, Talke S A, Jay D A, Orton P M, Liang X, Wang G, Liu L. 2021. Evolving tides aggravate nuisance flooding along the US coastline. *Science Advances*, 7(10): eabe2412.
- Liu T, Chen D, Yang L, Meng J, Wang Z, Ludescher J, Fan J, Yang S, Chen D, Kurths J, Chen X, Havlin S, Schellnhuber H J. 2023. Teleconnections among tipping elements in the Earth system. *Nature Climate Change*, 13: 67-74.
- Lynam C P, Lilley M K S, Bastian T, Doyle T K, Beggs S E, Hays G C. 2010. Have jellyfish in the Irish Sea benefited from climate change and overfishing? *Global Change Biology*, 17(2): 767-782.
- 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, Meier H E M, Meyer S, Moritz T, Otto S A, Pinto G, Polte P, Riekhof M, Sarrazin V, Schwermer H, Scotti M, Voss R, Winkler Helmut, Möllmann C. 2024. A climate vulnerability assessment of the fish community in the Western Baltic Sea. *Scientific Reports*, 14: 16184.
- Moser S C, Jeffress Williams S, Boesch D F. 2012. Wicked challenges at land's end: Managing coastal vulnerability under climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1): 51-78.
- Osland M J, Chivoiu B, Enwright N M, Thorne K M, Guntenspergen G R, Grace J B, Dale L L, Brooks W, Herold N, Day J W, Sklar F H, Swarzenzki C M. 2022. Migration and transformation of coastal wetlands in response to rising seas. *Science advances*, 8(26): eabo5174.
- Pierik H J. 2021. Landscape changes and human-landscape interaction during the first millennium AD in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 100: e11.
- Psuty I. 2022. Are we ready to implement resist-accept-direct framework thinking? A case study of fish stocks and small-scale fisheries in the Puck Bay (Southern Baltic). *Fisheries Management and Ecology*, 29(4): 423-438.
- Ritchie P D L, Clarke J J, Cox P M, Huntingford C. 2021. Overshooting tipping point thresholds in a changing climate. *Nature*, 592(7855): 517-523.
- Rietkerk M, Bastiaansen R, Banerjee S, van de Koppel J, Baudena M, Doelman A. 2021. Evasion of tipping in complex systems through spatial pattern formation. *Science*, 374(6564): p.eabj0359.
- Rietkerk M, Skiba V, Weinans E, Hébert R, Laepple T. 2025. Ambiguity of early warning signals for climate tipping points. *Nature Climate Change*. 15: 479-488
- Rocha J, Yletyinen J, Biggs R, Blenckner T, Peterson G. 2015. Marine regime shifts: Drivers and impacts on ecosystems services. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1659): 20130273.
- Saintilan N, Horton B, Törnqvist T E, Ashe E L, Khan N S, Schuerch M, Perry C, Kopp R E, Garner G G, Murray N, Rogers K, Albert S, Kelleway J, Shaw T A, Woodroffe C D, Lovelock C E, Goddard M M, Hutley L B, Kovalenko K, Feher L, Guntenspergen G. 2023. Widespread retreat of coastal habitat is likely at warming levels above 1.5°C. *Nature*, 621: 112-119.
- Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, Brovkin V, Carpenter S R, Dakos V, Held H, Nes E H, Rietkerk M, Sugihara G. 2009. Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461: 53-59.
- Scheffer M, Carpenter S, de Young B. 2005. Cascading effects of overfishing marine systems. *Trends in ecology & evolution*, 20(11): 579-581.
- Shortridge J E, Bukvic A, Mitchell M, Goldstein J, Allen T. 2024. Characterizing climatic socio-environmental tipping points in coastal communities: A conceptual framework for research and practice. *Earth's Future*, 12(7): p.e2023EF004123.
- Slyman K, Jones C. 2023. Rate and noise-induced tipping working in concert. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 33 (1): 013119.
- Thorne K M, MacDonald G M, Chavez F P, Ambrose R F, Barnard P L. 2024. Significant challenges to the sustainability of the California coast considering climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(32): e2310077121.
- Tian H, Xu R, Canadell J G, Thompson R L, Winiwarter W, Suntharalingam P, Davidson E A, Ciais P, Jackson R B, Janssens-Maenhout G, Prather M J, Regnier P, Pan N, Pan S, Peters G P, Shi H, Tubiello F N, Zaehle S, Zhou F, Arneth A, Battaglia G, Berthet S, Bopp L, Bouwman A F, Buitenhuis E T, Chang J, Chipperfield M P, Dangal S R S, Dlugokencky E, Elkins J W, Eyre B D, Fu B, Hall B, Ito A, Joos F, Krummel P B, Landolfi A, Laruelle G G, Lauerwald R, Li W, Lienert S, Maavara T, MacLeod M, Millet D B, Olin S, Patra P K, Prinn R G, Raymond P A, Ruiz D J, van der Werf G R, Vuichard N, Wang J, Weiss R F, Wells K C, Wilson C, Yang J, Yao Y. 2020. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586(7828): 248-256.
- Tomczak M T, Müller-Karulis B, Blenckner T, Ehrnsten E, Eero M, Gustafsson B, Norkko A, Otto S A, Timmermann K, Humborg C. 2022. Reference state, structure, regime shifts, and regulatory drivers in a coastal sea over the last century: The Central Baltic Sea case. *Limnology and Oceanography*, 67: S266-S284.
- Tytgat H L, Nobrega F L, van der Oost J, de Vos W M. 2019. Bowel biofilms: tipping points between a healthy and compromised gut? *Trends in Microbiology*, 27(1): 17-25.
- Van der Lugt M A, Quataert E, van Dongeren A, van Ormondt M, Sherwood C R. 2019. Morphodynamic modeling of the response of two barrier islands to Atlantic hurricane forcing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 229: 106404.
- Vousdoukas M I, Ranasinghe R, Mentaschi L, Plomaritis T A, Athanasiou P, Luijendijk A, Feyen L. 2020. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10(3): 260-263.
- Wang B, Zhang K, Liu Q-X, He Q, van de Koppel J, Teng S N, Miao X, Liu M, Bertness M D, Xu C. 2022. Long-distance facilitation of coastal ecosystem structure and resilience. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(28): e2123274119.
- Wang H, Krauss K W, Noe G B, Dai Z, Trettin C C. 2023 Soil salinity and water level interact to generate tipping points in low salinity tidal wetlands responding to climate change. *Estuaries and Coasts*, 46(7): 1808-1828.
- Ward N D, Megonigal J P, Bond-Lamberty B, Bailey V L, Butman D, Canuel E A, Diefenderfer H, Ganju N K, Goñi M A, Graham E B, Hopkinson C S, Khangaonkar T, Langley J A, McDowell N G, Myers-Pigg A N, Neumann R B, Osburn C L, Price R M, Rowland J, Sengupta A, Simard M, Thornton P E, Tzortziou M, Vargas R, Weisenhorn P B, Windham-Myers L. 2020. Representing the function and sensitivity of coastal interfaces in Earth system models. *Nature Communications*, 11(1): 2458.
- Wunderling N, von der Heydt A S, Aksenov Y, Barker S, Bastiaansen R, Brovkin V, Brunetti M, Couplet V, Kleinen T, Lear C H,

- Lohmann J, Roman-Cuesta R M, Sinet S, Swingedouw D, Winkelmann R, Anand P, Barichivich J, Bathiany S, Baudena M, Bruun J T, Chiessi, C M, Coxall H K, Docquier D, Donges J F, Falkena S K J, Klose A K, Obura D, Rocha J, Rynders S, Steinert N J, Willeit M. 2024. Climate tipping point interactions and cascades: A review. *Earth System Dynamics*, 15(1): 41-74.
- Xing L, Zhao M, Zhang T, Yu M, Duan S, Zhang R, Huh C, Liao W, Feng, X. 2016. Ecosystem responses to anthropogenic and natural forcing over the last 100 years in the coastal areas of the East China Sea. *The Holocene*, 26(5): 669-677.
- Yi C, Rietkerk M, Anderies J M, Chen D, Dakos V, Ritchie P D L, Rocha J C, Milkoreit M, Quinn C. 2025. Principles for guiding future research on resilience and tipping points. *Environmental Research Letters*, 20(3): 031008.