

当生态系统陷入“多重命运”：结构复杂系统如何揭示互利共生网络的临界转折？

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40188.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

当生态系统陷入“多重命运”：结构复杂系统如何揭示互利共生网络的临界转折？。华中科技大学张海涛教授团队联合西安交通大学、清华大学及伦斯勒理工学院等研究人员在中国工程院院刊Engineering发表题为Extinction Chains Reveal Intermediate Phases Between the Safety and Collapse in Mutualistic Ecosystems的研究性文章。本研究针对当前地球生态系统因人类过度开发而加速失衡的全球性挑战，系统提出了面向网络结构的分析工具，探索复杂互利共生网络（如植物-传粉者、海葵-鱼等）在外部压力作用下的多重状态转变路径，揭示了生态系统自安全稳态到整体崩溃之间存在多种中间阶段。这一理论工具帮助生态学者识别生态系统的关键临界点，并为生物多样性保护、生态恢复和可持续管理提供参考依据。

生态系统的困境：人类活动下的安全运行空间边界何在？

随着过度捕捞、森林砍伐等不可持续的人类活动加剧，全球生态系统正经历前所未有的持续性恶化。一个核心的科学与管理难题在于：我们如何量化并预测这些活动对生态系统稳定性的影响？传统的安全操作空间理论虽然有力，但通常基于高度简化的宏观模型，难以刻画现实生态网络中成千上万物种之间复杂的非线性相互作用。

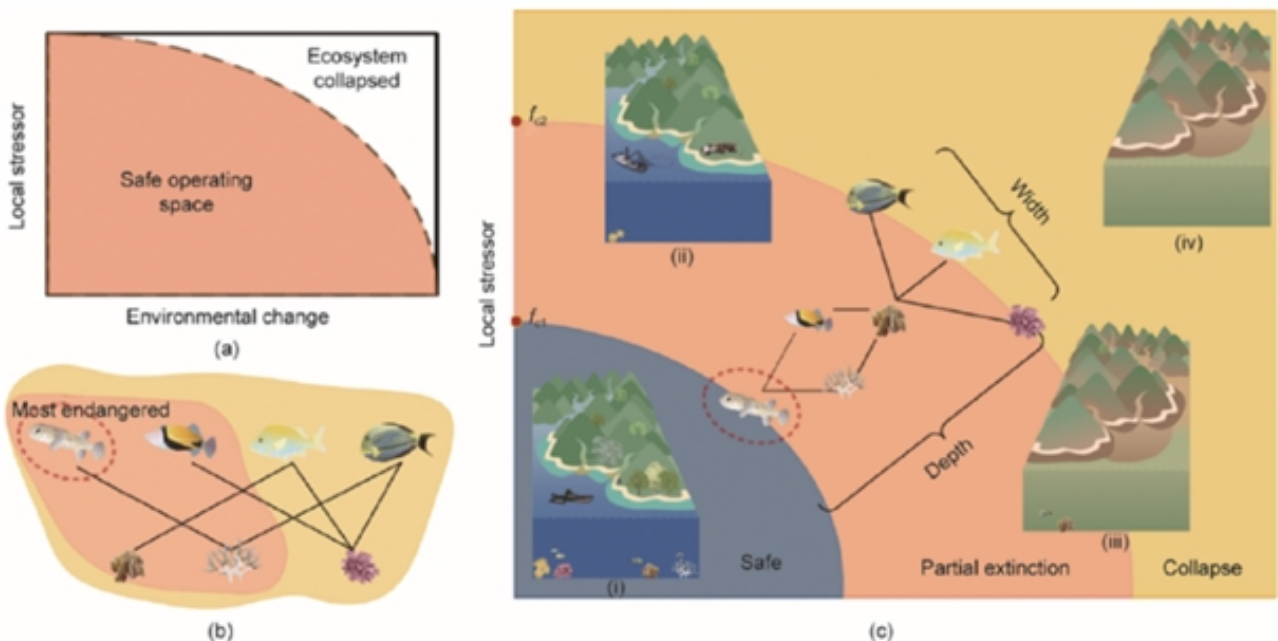


图1. 人类开发下的系统韧性

在真实的互利共生网络（如植物-传粉者网络）中，物种间的相互依存关系构成了一个精密的动态平衡。局部的过度开发可能不会立即导致系统崩溃，但会像推倒第一张多米诺骨牌一样，引发一系列连锁的物种灭绝，即衰亡链。然而，现有的理论工具在预测大规模非线性网络系统中的这种级联灭绝过程，尤其是在部分物种被定向开发的情景下，仍存在显著不足。理解并预测衰亡链，是预警系统崩溃、实施精准保护的关键。

衰亡链预测工具：从复杂网络到可计算的相图

为精准解析共生生态系统的复杂动力学，研究团队发展了一套维度约简分析工具。在面对多达26种标杆性的互惠网络（不同类型、规模、地理分布），团队不仅利用结构维度缩减、k-core等网络理论对复杂性进行建模，还考虑了实际生态网络中的异质性(如不同物种恢复率、生长率等的差别)。

这些方法不仅使传统的动力学方程（通常为高阶微分方程组）分析变得更加高效，而且可将复杂的全系统状态映射到易观测、易判识的低维空间，为监测临界点的提早到来、识别关键状态转变及其前奏现象（如临界减速）提供理论和算法基础。

其核心思想有3个：一是灭绝链，即生态系统在持续压力下不会马上完全崩溃，而是部分物种依次灭绝，形成链式灭绝现象。二是多稳态机制，即系统可能长期处于两种或更多稳定区域间跳跃，包括部分灭绝、双稳态、甚至三稳态等中间区间。这些状态各自对应着不同的生态网络结构和多样性水平。三是过渡及早期预警，即以高斯核密度估计、降维等手段描绘和识别多种转变路径，使得预测和干预生态脆弱性的操作更具时效性和科学性。

从安全到崩溃：生态系统相变的五个阶段

利用这一工具对26个真实世界的互利共生网络进行分析后，研究揭示了此前未被充分认识的丰富相变行为。生态系统在持续增加的外部开发压力下，并非直接从安全跳变至崩溃，而是会经历一系列复杂的中间阶段：

1. 安全阶段：开发压力较小时，移除压力后，所有物种丰度均可恢复。
2. 部分灭绝阶段：压力超过第一个临界点，最脆弱的物种开始灭绝，形成衰亡链，但系统其余部分仍保持稳定。
3. 双稳态阶段：压力进一步增加，系统可能稳定在两种不同的状态（如部分灭绝或大规模灭绝/崩溃），具体取决于历史路径或微小扰动。
4. 三稳态阶段：在更高压力下，系统甚至可能出现三个可能的稳定状态。
5. 崩溃阶段：压力超过最终临界点，系统发生不可逆的全面崩溃，即使解除开发压力也无法恢复。

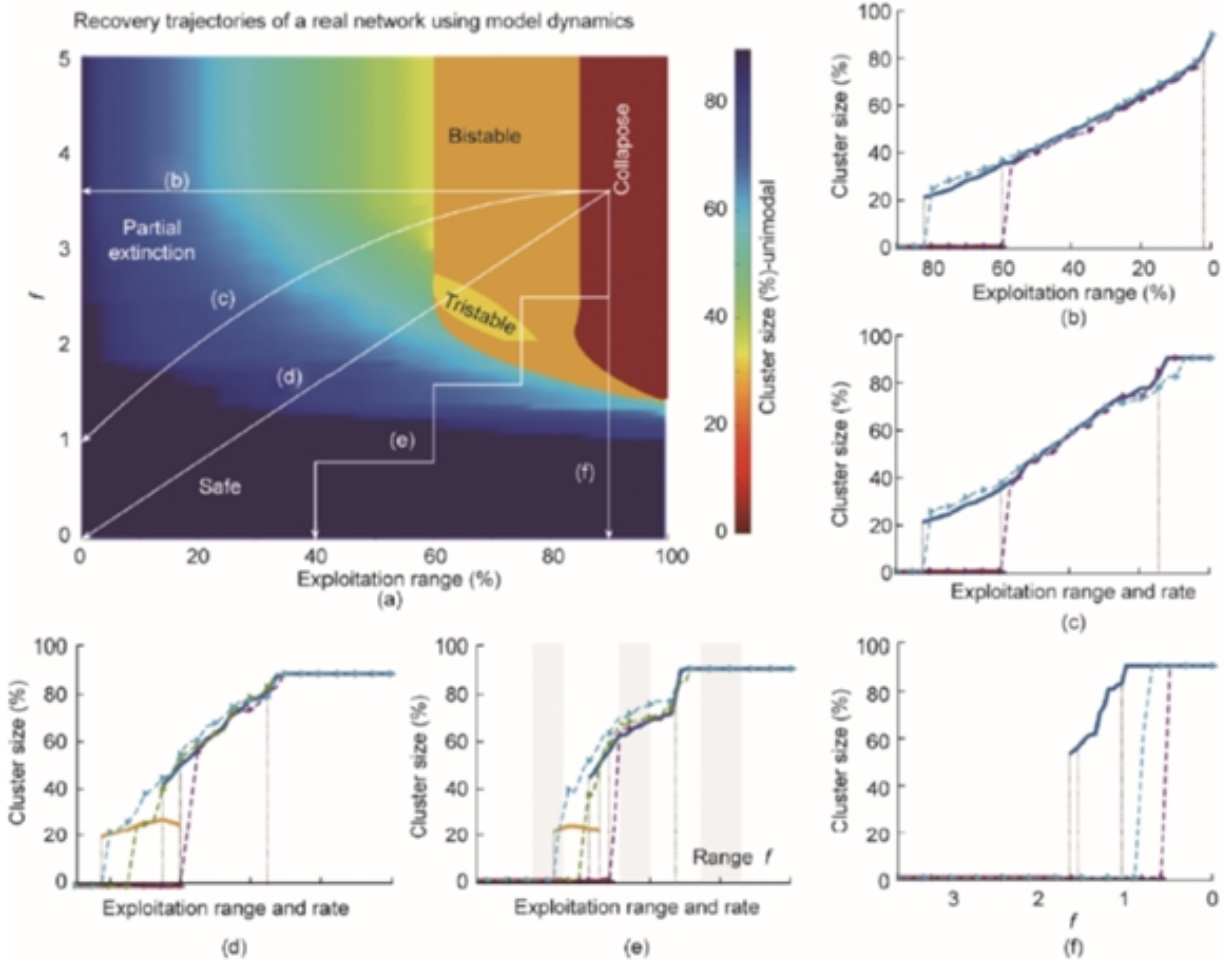


图2. 控制威胁时与物种重新引入下的相变

这种包含五个区域的相图，彻底细化和深化了传统的安全-崩溃状态的二分法，为理解生态系统的韧性提供了更精细的图谱。

反直觉的发现与主动恢复策略

研究还揭示了一个反直觉的现象：在特定条件下（例如种间竞争异常激烈时），扩大捕捞/采伐范围、对物种施加人为压力，反而可能提升生态系统的整体生物多样性。其机制在于，策略性对某些优势物种施加捕捞/采伐压力，可以缓解它们对其它物种的强竞争压制，从而为更多物种提供生存空间。这类似于在食物网中，适度调控顶级捕食者可以促进下级种群的多样性。

更重要的是，这项研究不仅限于诊断问题，更为生态恢复提供了行动地图。基于所绘制的五相区图，团队提出了主动的生态系统恢复策略。通过模拟和真实数据验证（美国大西洋中段沿岸潟湖历时20年的大叶藻恢复项目），他们证明，通过有针对性、分阶段地重新引入已灭绝物种并降低开采强度或捕捞物种的范围，可以将已退化或处于崩溃边缘的生态系统，沿着相图中的特定路径，逐步引导回安全状态。这为生态工程的精准干预提供了量化的科学依据。

结果与讨论

本文通过构建融合网络动力学与人类活动干扰的数学模型，并开发创新的降维预测工具，系统揭

示了互利共生生态系统在外部压力下经历的安全-部分灭绝-双稳态-三稳态-崩溃五阶段相变过程。该框架不仅能高精度预测衰亡链与临界点，为生态系统崩溃提供早期预警，还发现了适度开发提升多样性等反直觉现象背后的机制。

尤为重要的是，本研究利用所揭示的相图为退化生态系统的恢复提供了可操作的工程化方案。通过重新引入物种与调控开发压力的组合策略，能够主动将系统从危险区域驱动回安全区域。这一方法在长达20年的大叶藻-鱼类互利网络恢复数据中得到了有效验证，仿真结果与真实恢复轨迹高度吻合，展现了强大的应用潜力。该研究为在人类世背景下，实现生物多样性保护与可持续利用的平衡管理，提供了全新的量化视角与决策工具。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809924003722>

作者：张海涛等 来源：《工程》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发