可持续性是否需要不一致性?

Olivier Hamant[1], *

[1] 米歇尔·塞尔研究所与植物繁殖和发育实验室，里昂大学、里昂高等师范学院、里昂第一大学、法国国家农业食品与环境研究院、法国国家科学研究中心，意大利大道46号，69007，法国里昂

*通讯作者 通讯邮箱:
olivier.hamant@ens-lyon.fr

A摘要
社会生态系统中不可遏制的反馈循环和临界点是可持续性的主要威胁。这些行为模式

关键词： 不一致回路、 系统原型、 系统思维、 稳健性、 可持续性、 效率—韧性权衡

导言：借助原型进行系统思考

人类行为往往是不受控制的放大回路所导致的结果。这有点类似于人群骚动：每个人都促成了人群的聚集，同时每个人又都想逃离其中。遗憾的是，一旦超过某个临界阈值，人群骚动便会形成自身的运行逻辑，变得自主，并且悖论般地因每个人逃离人群的意愿而进一步加剧。从全球变化的角度来看，可以说人类目前正处于一场全球性的人群骚动之中：我们的社会经济体系正通过众多放大回路引导着未来的发展轨迹。遗憾的是，许多已提出的解决方案并未从根本上改变这一发展路径。例如，与提高能源效率或采用节俭型智能技术相关的策略，往往忽视了反弹效应，结果反而悖论般地导致全球资源消耗增加，最终造成更严重的全球污染（1）。这种现象不仅存在于能源领域，也适用于我们的大多数产品和活动，从导致过量使用的浓缩洗涤剂，到在各个领域催生新需求的所谓智能技术（2）。我们该如何区分这些不同的选择，并识别真正可持续的策略？在此，我提出一个观点：不一致性悖论般地正是可持续性的动力源泉。

为了阐述这一论点，我们必须深入探究系统动力学。正如增长的极限中所提到的：“只要不对系统结构进行调整，以更大的力度或更快的速度运行同一个系统，就不会改变其运行模式”（3）。这意味着，我们需要解构社会生态危机背后的相互作用网络，并识别其中的放大回路，以便能够对其加以遏制。这种系统性工作看起来可能很困难，但其实存在一种指南，而且系统分析领域的研究者对此非常熟悉：它就是“原型”（图1）。

原型是系统中一个不断重复的小型模块或序列。如果说句子由词语组成，那么系统则由各种原型构成。更准确地说，句子通过连接词语的语法结构获得意义，而系统则在各个原型相互关联、彼此衔接后变得可预测。这种方法被广泛应用于各个领域，从次日天气预报到政府间气候变化专门委员会（IPCC）对本世纪末可能情景的多种预测。

文献中已知的原型大约只有十种（4）（5），它们描述的都是放大回路。例如，“升级”原型最能描述人群移动，也适用于许多其他类似情形（图 1）。以下是集约农业的例子：耕作、化肥和农药会破坏土壤结构与土壤生物；随着农作物产量下降，为了在短期内弥补减产，人们会增加耕作、化肥和农药的使用，长此以往，土壤便在无休止的升级过程中加速衰竭。

虽然不应将系统的复杂性简化为其原型，但原型可以视为系统的核心骨架。这意味着，改变原型是改变特定系统发展轨迹最有效的方式。比如，一旦识别出交通拥堵形成背后的原型（公地悲剧），就能找到有效的预防方法，例如在某些高速公路路段限制车速，以促使交通行为更加一致。识别系统中的原型，是改变其结构的第一步。

然而，在开始这项工作之前，必须确保已知原型的列表是完整的。在这里，我认为我们还缺少一种原型，而且可以说，这种原型对于支持可持续发展最为重要：所有经典原型都不是稳定化原型，而在生物网络中，越来越多的证据表明，不一致性环路承担着这样的作用。在系统科学中，是否应该将不一致性视为一种新的原型，并将其应用范围扩展到生物学之外？它能否成为推动可持续发展的一个重要杠杆？

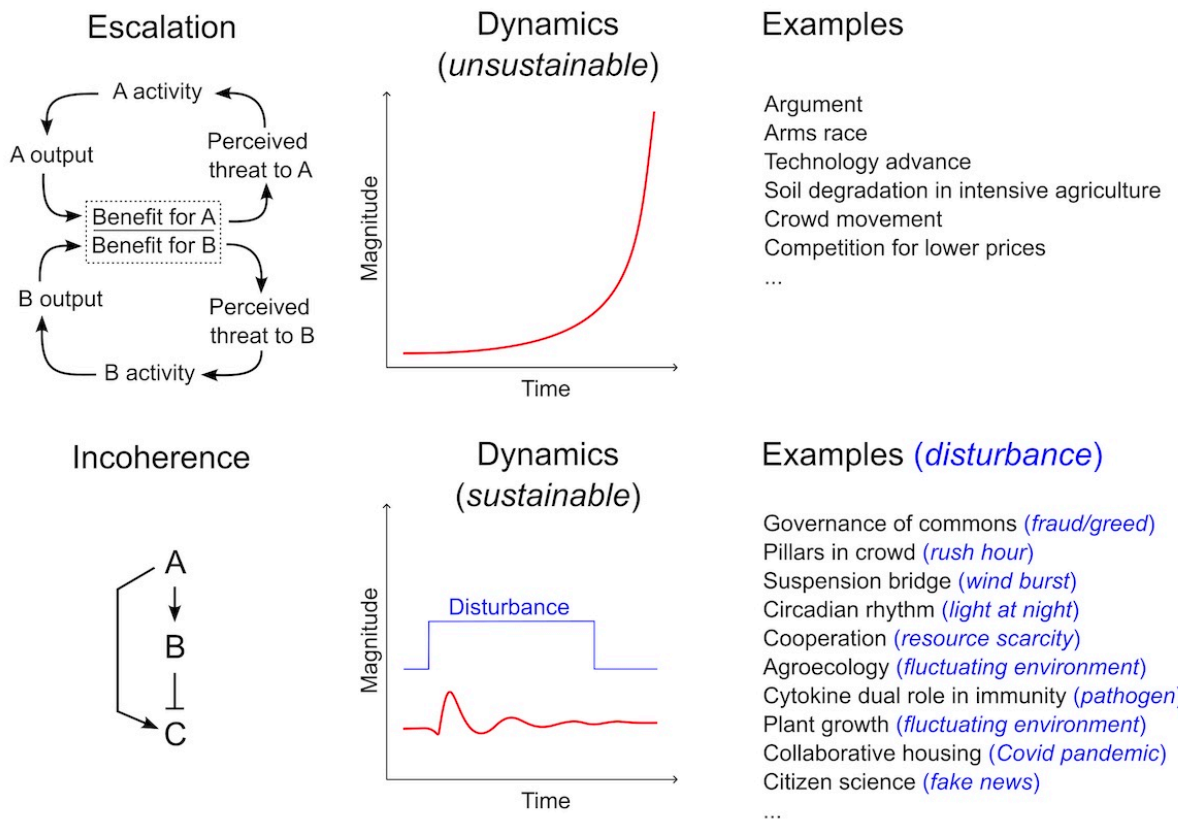

图 1。 不一致性作为一种可持续性系统原型上图：升级是一种广为人知的系统原型，其中 A 的输出被 B 视为威胁，而 B 随之做出过度反应，进而使 A 感受到来自 B 的威胁，形成一个反馈循环 (4)(5)。除非 A 或 B 停止对抗，否则由此产生的动态过程将难以持续。右侧列出了一些示例。下图：以不一致性前馈回路为例（这一机制在生物学领域已得到广泛认可）。这种不一致性能够产生某种形式的稳健性，使系统更能抵御内部或外部扰动。生物学领域存在许多此类实例（例如昼夜节律 (8)(9)、免疫系统 (20) 或植物生长 (21)）。不一致性也是公共资源治理中的一个重要总体因素 (16)，有助于解决公地悲剧所暴露的不足。农业生态学、公民科学和合作住房都具有不一致性特征（在需要迅速行动时表现出缓慢，在资源匮乏时表现出冗余，在需要合理化时表现出异质性），而这些特征在更加优化和集中的模式中（集约化农业、学术科学/应用科学、房地产住房）则较为少见。然而，与这些模式相比，它们能够更稳健地应对各种扰动，包括环境或经济波动（农业生态学通过增强农民的技术自主权和促进生物多样性来应对）、虚假新闻（公民科学通过跨学科协作进行事实核查来应对），以及新冠疫情强制隔离所带来的心理影响（合作住房通过增加互动来应对）。不一致性表面上的弱点，实际上构成了应对不可持续的放大回路的系统性补救机制。

不一致性是生物稳健性的关键要素

首先，让我们从系统生物学中汲取一些见解。该领域在过去二十年中取得了显著进展（6），并得出了几个重要结论：(i) 放大回路在生物网络中所占比例过高（包括基因网络、神经网络、生态系统网络等，其中基因网络得到了最为全面的研究）；(ii) 这些回路几乎总是以这样的方式构建：其中一个分支产生的效应与另一个分支相反，即它们具有不一致性（图 1）。有趣的是，这些不一致回路具有三种主要效应：(i) 它们使系统在受到扰动后能够恢复到原始稳定状态；(ii)

它们更倾向于发挥抑制作用，以避免无休止的指数级放大；(iii) 它们显著改善了抑制动力学，从而增强了所诱导的稳定性（7）。

简而言之，非相干环路通过自主振荡行为产生稳定的结果，同时还能抑制外部扰动。例如，生物体的昼夜节律就是如此：（i）分子网络中的一个放大环路产生两种可能的输出（白天代谢活跃，夜间代谢缓慢）；（ii）一个抑制环路产生振荡；（iii）两者结合后，产生振荡式双稳态（昼夜代谢交替进行）。由于系统具有非相干环路结构，这种行为在长期内具有很强的鲁棒性，即几乎不受外部因素的干扰。目前，这种行为已在哺乳动物、昆虫、真菌和植物中得到正式证实（8）（9）。

在生物系统中，还可以找到许多其他例子。例如，植物的生长由其内部的静水压力驱动。当停止给植物浇水时，这一点就显而易见了：植物会枯萎，也就是说，它们会失去膨胀状态。当植物处于膨胀状态时，它们就会生长。然而，在这种情况下，植物利用光合作用在细胞周围构建坚硬的细胞壁，以抵抗自身的膨压。换句话说，植物是在踩着刹车的同时推动自身生长的（10）。这种不一致性是植物稳健性的关键：许多研究表明，这种持续的平衡使植物能够不断适应环境，并更好地利用外部和内部波动来塑造自身器官（11）。

这种生物学洞见为我们重新审视系统动力学中的稳定性定义提供了契机：稳定性并非一条平直的直线，而是一种动态振荡，即行动与反应交替进行。换言之，系统的自主振荡能够抵御不可预见的随机波动。例如，肠道细胞会定期更新（每隔几天一次），这使其能够抵御大量外部侵袭。相反，牙齿无法更新，这限制了其应对变化的可能性范围。这也呼应了阿什比的必要多样性定律：系统的稳健性并非源于进一步强化自身（即提高一致性），而是源于自身的可变性（即增强不一致性）（12）。一致性会助长放大回路并引发不稳定，而由不一致性驱动的振荡则是在波动环境中抵御湍流的有效屏障。

不一致性也能增强技术系统的稳健性

由于我们讨论的是系统，因此涉及的仅仅是逻辑联系，这一结论也适用于其他情境。例如，工程领域对这类不相干环路表现出浓厚的兴趣，尤其是为了避免不可控的指数级行为。除了电子学或机器人学中的复杂实例之外，还可以考虑一个更简单的例子：悬索桥。它呈现出一种根本性的矛盾：桥墩承受压缩力，而桥面缆索则承受拉力。桥梁中的两种破坏性力量，这样做究竟有何益处？正是由于彼此对抗，这两种力量——压力和张力——形成了机械平衡。这使桥梁能够拥有自身的机械自主性，从而抵御外部波动：当受到风力作用时，桥梁会发生振荡，但不会断裂，至少在达到某一变形阈值之前如此。不言而喻，这种力的平衡也存在于（具有鲁棒性的）生物系统中，尤其典型地存在于细胞中，其细胞膜处于张力状态，而内部内容物则处于压缩状态（13）。

不一致性作为一种稳定化原型，能否帮助我们设计可持续策略，以抵消人类世中的放大回路？让我们来看看低技术的兴起。面对日益紧迫的问题，这或许会被视为一种不一致的理念：通过与公民开展缓慢的参与式研究，降低经济增长（例如，全可修复产品），来创造次优解决方案，而不是偏向最优化的解决方案。考虑到追求优化也让我们的社会经济系统和生态系统日益脆弱，这种矛盾便迎刃而解。在波动环境中，稳健性源于次优过程，并胜过效率（14）。优化只适用于稳定环境。

不一致性是否能在技术解决方案之外为可持续发展提供助力？在一个日益变动不居的世界里，关键的共同价值不再是效能或效率，而是适应性（14）。不一致性可以作为一种工具，帮助稳定我们动荡的世界吗？

不一致性也能增强组织的稳健性

不一致性作为一种促进可持续发展的有效杠杆，同样适用于组织。以“公地悲剧”这一典型模式为例：每个人都以自私的方式追求自己的目标，最终导致公地（例如，在牧区，共享含水层、共享牧场或共享灌溉系统（图 2）无法继续发挥其功能，从而损害所有人的利益（15）。经济学家埃莉诺·奥斯特罗姆及其团队通过对全球范围内长期保持稳健的公地进行分析，确定了防止公地悲剧发生的原则（16）（图 1）。其中大多数原则在本质上都具有不一致性：（i）公地的核心价值或许在于其开放性，但实际上却需要限制使用权限；（ii）为了维护脆弱的资源，规则或许应当十分严格，但对长期保持稳健的公地进行的分析却表明，这些规则必须能够通过参与式方式加以修改；（iii）为了限制自私行为和欺诈，人们或许希望采取非常严厉的制裁措施，但实际上，制裁必须较为宽松，才能保障群体成员之间的凝聚力和归属感；（iv）如果由一个自我组织且自主的结构进行管理，公地才能得以延续，但为了使这一结构长期维持，还必须获得外部实体的认可。因此，即使在组织中，不一致性似乎也是纠正放大回路所必需的一种要素，尽管有时这一要素可能有悖于直觉。



图 2。中国的一片稻田，是可持续系统的一个例子。此类系统需要对公地进行治理，也伴随着相关的不一致性。上下游农民之间的协调需要合作，即拥有共同目标，而这可能与短期的眼前利益相冲突。埃莉诺·奥斯特罗姆提出的公地治理原则包含若干不一致的要素，而这些要素最终确保了资源的可持续性。详情请见正文。照片来源：O. Hamant。

再举一个例子，荷兰的护士集体组织 Buurtzorg 通过一种反直觉的解决方案，找到了解决医疗行业职业倦怠和“大辞职潮”问题的途径：他们放弃了商业目标。起初，花更多时间陪伴患者导致支出增加，但最终，这使患者变得更加自主，从而获得了更好的照护，也使护士更加认同自身的工作价值观，投入程度更高。最终，这也为国家带来了积极的财务回报。如今，Buurtzorg 已汇聚约 30,000 名护士，也证明了这种反直觉模式能够实现规模化扩展（17）。这一战略呼应了关于松散耦合系统的研究，这类系统以其不一致性和稳健性而著称（18）。稳健性并非源于更紧密的相互作用，而是来自更多的噪声以及更顺畅的运转。

另一种不连贯的策略是通过缩减规模和分散布局来求得生存（而不是继续增长以变得更强大）。这与生物体中的“r策略”相呼应，尤其是在开花植物中表现得十分典型：产生大量种子并将其传播出去，以确保物种无论面临何种困境都能存续。在社会系统中，这种策略可以表现为去中心化，例如，以公平的价格、在与农民协商后销售当地生产的砖形包装牛奶，并绕过大型中央采购机构。与领土建立去中心化联系的效率较低，从精益管理的角度来看甚至可能显得浪费，但它更有可能尊重公民和生态系统，恰恰是因为这种联系在其结构中内含了自身的局限性。

结论：不一致性是合作所必需的

更广泛而言，不一致性的力量可以通过协作与合作之间的区别来说明。当人们进行协作时，他们各自推进自己的项目，希望这些贡献汇聚后能够产生协同效应。然而，成功的协作往往掩盖了对身份未明的第三方造成的破坏性影响。因此，协作可能掩盖着某种形式的竞争。相反，当人们进行合作时，集体项目的成功比个人项目的成功更为重要。因此，合作意味着接受不一致性，甚至不惜自摆乌龙。选择合作而非协作，意味着理解米歇尔·塞尔在《自然契约》（19）中所阐述的观点：为了群体的生存，人与人之间的任何交易都涉及多重社会与环境互动，包括那些不一致的互动，而这些互动所产生的影响超越了短期利益。

通过这些案例，我希望提高可持续发展科学与政策领域对这一问题的认识：不一致性将生物学网络分析的最新进展与系统科学中既有的框架联系起来，能够为摆脱不断强化的反馈循环提供一条出路。除了上述案例之外，我们还可以想到由社交网络和人工智能所产生的强化反馈循环，在这些循环中，相同的信息会根据用户具有一致性的特征画像进行传播。要打破这种规训，人们就需要摆脱群体内部的共同信念，从而拥有一定程度的不一致性。

最终，不一致性或许是最切合可持续发展需求的自然启发式创新。回到开篇的例子，为防止人群移动，可以提前在步行通道上设置固定柱子，在交通高峰时减缓所有人的速度——这是另一种不一致的解决方案（通过放慢人群速度，让人们得以脱身）。不一致性为我们过度优化、因而脆弱的文明提供了应对之策，其基础是看似低效的特质（异质性、缓慢、错误、冲突、随机性等）。它是应对不断放大的恶性循环的有效良方，也是决策者可以付诸实践的工具。

致谢

感谢丹尼斯·米多斯（Dennis Meadows）、巴拉顿小组（Balaton Group）以及米歇尔·塞尔研究所（Michel Serres Institute）就这一主题展开的富有助益的讨论。

利益冲突声明

作者声明，其遵守 PCI 规则，即不存在与本文内容相关的财务利益冲突。

资金支持

作者声明，本研究未获得任何专项资助。

参考文献

1. J. B. Foster、B. Clark、R. York，《资本主义与能源效率的诅咒：杰文斯悖论的回归》。《月刊评论》 **62**，1（2010）。2. O. Hamant，植物科学家再也不能忽视杰文斯悖论了。《自然植物》 **6**，720–722（2020）。3. D. H. Meadows、J. Randers、D. L. Meadows，《增长的极限：30年更新版》（Earthscan，2009）。4. D. H. Kim，《系统原型》（Pegasus Communications，1994）。5. D. H. Meadows、D. Wright，《系统思维：入门指南》（Chelsea Green Pub，2008）。6. D. J. Nicholson，细胞真的是一台机器吗？《理论生物学杂志》 **477**，108–126（2019）。7. G. T. Reeves，将转录型非相干前馈环与负反馈相结合的工程原理。《生物工程杂志》 **13**，62（2019）。8. H. R. Ueda，等，哺乳动物昼夜节律钟背后转录回路的系统级识别。《自然遗传学》 **37**，187–192（2005）。9. I. Joanito、J.-W. Chu、S.-H. Wu、C.-P. Hsu，一个非相干前馈环使拟南芥生物钟在两种滞后状态之间快速切换。《科学报告》 **8**，13944（2018）。10. A. Creff，等，证据表明胚乳膨压既促进又限制种子的生长与大小。《自然通讯》 **14**，67（2023）。11. B. Moulia、S. Douady、O. Hamant，波动通过本体感受塑造植物。《科学》 **372**，eabc6868（2021）。12. W. R. Ashby，必要多样性及其对复杂系统控制的影响。《控制论》，83–99（1958）。13**97**，163 179 2008。D. E. Ingber，从宏观到微观的基于张拉整体结构的机械感知。《生物物理与分子生物学进展》 –（）。14. O. Hamant，《生命的第三条道路》（Odile Jacob，2022）。15. G. Hardin，公地悲剧。《科学》 **162**，1243–1248（1968）。16. E. Ostrom，《治理公地：集体行动制度的演变》（剑桥大学出版社，1990）。17. F. Laloux，《重塑组织：创建受人类意识下一发展阶段启发的组织指南》，第1版（Nelson Parker，2014）。18. J. D. Orton、K. E. Weick，松散耦合系统：重新概念化。《管理学会评论》 **15**，203–223（1990）。19. M. Serres，《自然契约》（Editions F. Bourin，1990）。20. Y. Hart，等，分泌分子通过悖论式信号传导实现细胞水平的稳态。《细胞》 **158**，1022–1032（2014）。21. E. A. Vidal，等，硝酸盐响应型miR393/AFB3调控模块控制拟南芥的根系构型。《美国国家科学院院刊》 **107**，4477–4482（2010）。