J. R. Soc. Interface（2026年），**xx**：xx 1–20

arXiv:2603.25239v1 [q-bio.PE] 26 Mar 2026

研究论文

自我复制相图：描绘元胞自动机规则空间中生命何处成为可能

Don Yin[1]

[1]剑桥大学临床医学院，英国剑桥。**关键词：**元胞自动机、自我复制、相图、混沌边缘、人工生命

摘要

哪些基底特征能够孕育生命？我们对全部 262,144 条具有摩尔邻域的外全总二值元胞自动机规则进行穷举分类，研究其自我复制能力，并在 (λ, F) 平面上绘制相图，其中 λ为朗顿规则密度， F 为背景稳定性参数。在这些规则中，有 20,152 条（7.69%）支持模式增殖，且集中在规则密度较低（$\lambda \approx 0.15$–0.25）、背景稳定性较低至中等（$F \approx 0.2$–0.3）的区域，处于弱超临界区间（复制体的德里达系数为 $\mu = 1.81$，非复制体为 1.39）。自我复制规则更接近质量守恒（质量平衡为 0.21，对比 0.34），这一结论也推广至 k=3 摩尔规则。三级检测层级（模式增殖、延长时长确认和因果扰动）得出的因果性自我复制率估计值为 1.56%。在检测均衡化后，自我复制率随邻域大小增加而单调上升：冯·诺依曼邻域为 4.79%，摩尔邻域为 7.69%，扩展摩尔邻域为 16.69%。这些结果表明，背景稳定性和近似质量守恒是自我复制相边界的主要决定因素。

1. 引言

哪些基底特征能够孕育生命？自我复制，即图案产生自身副本的能力，是生命系统的基本标志。在 元胞自动机（CA）中，一些规则配置支持自我复制结构，而另一些则不支持 [21, 10]。尽管经过数十年的研究，仍没有工作系统地绘制出自我复制在基底参数空间中何处成为可能。

Langton [11] 确立了 CA动力学会随着规则密度的变化发生相变λ，复杂行为集中出现在一个中间临界值附近 λ_c [另请参见 12]。Woot- ters 和 Langton [23] 表明，随着元胞状态数量 k 增加，这种转变会变得更加尖锐。然而， λ 单独使用规则密度，难以准确预测个别规则的行为 [13]。Sakai 等人 [19] 引入了第二个参数 F 来度量静止背景稳定性，并指出，对于一维k=4 总和型规则，有序—混沌边界仅占据 ~11% 的 F 范围（固定 λ时），相较于仅使用 λ 规则密度，精确度提高了十倍。

自我复制的元胞自动机已在特定基底中得到研究：Langton [10] 设计了八状态环，Byl [2]将其简化为 6 个状态，Reggia 等人 [17]观察到元胞自动机空间中涌现的复制现象；Chou 和 Reggia [3] 证明，自我复制结构可以从随机初始条件中涌现；Yang [24] 、Hintze 和 Bohm [7] 则发现了二元元胞自动机中的自发分布式自我复制。Brown 和 Sneppen [1]最近编目了存活阈值各异的三状态生命游戏（GoL）扩展中的复制体。在连续系统中，Papadopoulos 等人 [14] 发现，多通道 Lenia 的相边界附近存在自我复制；Plantec 等人 [16] 则表明，质量守恒会提高自维持模式出现的频率。

另有研究对完整的类生命规则空间进行了表征（2^{18} = 262，144 条具有摩尔邻域的外总计二元规则），但并未以自我复制为研究目标。Eppstein [6]根据增长和衰减特性，对这些规则中非 B0 子集（约占一半）进行了分类。Turney [20] 为全部 262,144 条规则计算了行为特征向量，Kumar 等人 [9] 则在其 ASAL 框架中，使用基于 CLIP 的开放性评分，通过优化搜索类生命规则空间。这些研究都没有描绘自我复制在不同规则空间参数下的普遍程度。

然而，尚无研究对基底空间本身进行参数化（同时改变元胞状态、邻域几何、规则密度和背景稳定性），并绘制自我复制发生的位置图谱。在此，我们对其进行系统性绘制。我们穷举分类了所有 262,144 条采用摩尔邻域的外全等二进制 元胞自动机 规则，检验其自我复制能力，并绘制(λ， F) 平面上的相图。我们发现：

1. 自我复制集中出现在规则密度较低（$\lambda \approx 0.15$–0.25）且背景稳定性处于低至中等水平（$F \approx 0.2$–0.3）的弱超临界区间；德里达系数分析显示，复制体的系数为$\mu = 1.81$，非复制体则为 1.39，这表明自我复制发生在混沌边缘（$\mu = 1$）之上，而非其下。在均衡检测协议下，自我复制率随邻域大小增加而单调上升（冯·诺依曼邻域（vN）4.79% [3.6–6.3%], 摩尔邻域 7.69%，扩展摩尔邻域 16.69% [15.97–17.44%]）。
2. 262,144 条类生命规则中有 20,152 条（7.69%）支持模式增殖。
3. 与不具备自我复制的规则相比，具备自我复制的规则更接近质量守恒（质量平衡得分为 0.21 对 0.34），即使没有明确的守恒约束也是如此。
4. 三级检测层级发现，支持模式增殖的规则中有 97.8% 经延长时长复筛后得到确认，其中 20.8% 包含因果脆弱的自我复制模式，据此估算因果性自我复制率为 1.56%。具备自我复制的规则表现出更强的空间协同作用（O-信息 $\Omega = -0.30$ 对比 -0.24，$p < 10^{-12}$），不过多变量分析显示，这一信号在很大程度上可由质量平衡解释（逻辑回归曲线下面积 = 0.85，质量平衡占主导）。近似质量守恒也适用于 k=3 摩尔规则（$d = -1.04$，$p = 4.2 \times 10^{-227}$）。

2. 方法

2.1. 基底参数化

我们研究正方形格子上的二维 元胞自动机，并采用周期性边界条件。每个元胞取 k 种状态，并按照 外总和型（OT）规则同步更新：新状态仅取决于当前中心元胞状态和邻居状态之和。

我们扫描四个参数：

1. 元胞状态 $k \in \{2, 3\}$：控制每个元胞的信息容量。我们对 $k = 2$ 进行穷举，并对 $k = 3$进行抽样。2. 邻域几何：冯·诺依曼邻域（$|N| = 5$）和摩尔邻域（$|N| = 9$）。3. 规则密度 λ：规则表 [11]中非静止项所占的比例。我们将 λ 从 0.05 扫描至$1 - 1/k$，共分 20 步。4. 背景稳定性 F：根据 Sakai 等人的背景稳定性概念改编，并针对外全局规则重新加权。 F_{OT} 用于量化规则破坏静止背景区域的激进程度。对于 OT 规则：

$$F_{\mathrm{OT}} = \frac{\sum_{s=0}^{S_{\max}} w(s) \cdot \mathbb{1}[T(0,s) \neq 0]}{\sum_{s=0}^{S_{\max}} w(s)}, \quad w(s) = \left(1 - \frac{s}{S_{\max}}\right)^2$$

其中， $T(0,s)$ 是邻居总和为 s 时，中心状态为 0 对应的规则表输出； $S_{\max}$ 是可能的最大邻居总和； $w(s)$ 则对邻居总和较小的构型赋予更高权重（静止中心周围大多是静止邻居，是典型的“背景”条件）。

对于 $k=2$ 采用摩尔邻域时，OT 规则空间包含 $2^{18}=262,144$ 条规则（“类生命”规则），我们对其进行了穷举。对于 $k=2$ 采用冯·诺依曼邻域时，规则空间包含$2^{10}=1,024$条规则，同样进行了穷举。对于 $k=3$ 摩尔邻域、扩展摩尔邻域和 C4 规则，我们各抽取了 10,000 条规则，并按 λ （每个 λ 区间 500 条规则，共 20 个区间）进行分层；通过拒绝抽样使密度达到目标值。

(λ, F) 空间是一个离散组合格，而非连续体。$\lambda = n/(k\cdot|N|)$ 取 $k\cdot|N|+1$ 个等间距值（摩尔邻域对应 19 个），各层级的规则数量由 $\binom{k\cdot|N|}{n}$ 给出。F 是对静止中心行进行的加权子集和；对于摩尔邻域，它有 147 个不同的取值。因此，该格存在结构性空白区域（其中不可能存在任何规则），在相图中显示为白色单元格。

2.2. 定义自我复制：三个层次

相界位置取决于自我复制的定义。受 Cotler 等人对模式复制与自我复制所作形式区分的启发 [4], ，我们将三层检测标准操作化如下：

第1层（模式增殖）： 如果某条规则能使一个有界非静止模式 P 在 $T_{\max}$ 时间步内的副本数严格递增（至少增加3次），则该规则支持模式增殖。检测采用连通分量标记，并使用旋转和反射不变的规范哈希。

第2层（延长时长确认）： 在延长模拟时长（512步，8个检查点，而非4个）下应用相同的模式增殖判据，从而独立确认检测稳健性。

第3层（因果性自我复制）： 将一个复制模式单独置于空网格中，确认其能够独立自我复制，然后逐一删除其中的每个元胞并重新运行模拟。如果删除单个元胞的试验中有 ≥50%导致复制失败（共 $N=10$ 次试验），则该模式在因果上是脆弱的；其结构是复制所必需的，而不仅仅是充分条件。

图 1 以 HighLife（B36/S23）复制子为示例，展示了这三个层级。

2.3. 检测流程

阶段 1（筛选）： 每条规则都在两种初始密度（$D_0=0.15$ 和 0.35）下进行测试：在 64×64网格上运行 256 个时间步，每 64 步生成一次快照。若任一指标触发，则将该规则标记： (A) 分量数量在 3+ 个检查点上单调增加；或 (B) 任意多元胞规范分量哈希在所有快照中累计出现 3+次。

阶段 2（延长时长复筛）： 对于标记规则，在 512 个时间步、8 个检查点的条件下（为初始筛查时长的两倍）重新应用相同的增殖判据，以独立确认检测稳健性。

阶段 3（因果检验）： 对于在延长时长下得到确认的规则，通过最少量的单细胞删除，在早期（网格稀疏时）进行扰动实验以摧毁父模式。

2.4. 派生度量

对于每条规则，我们计算：

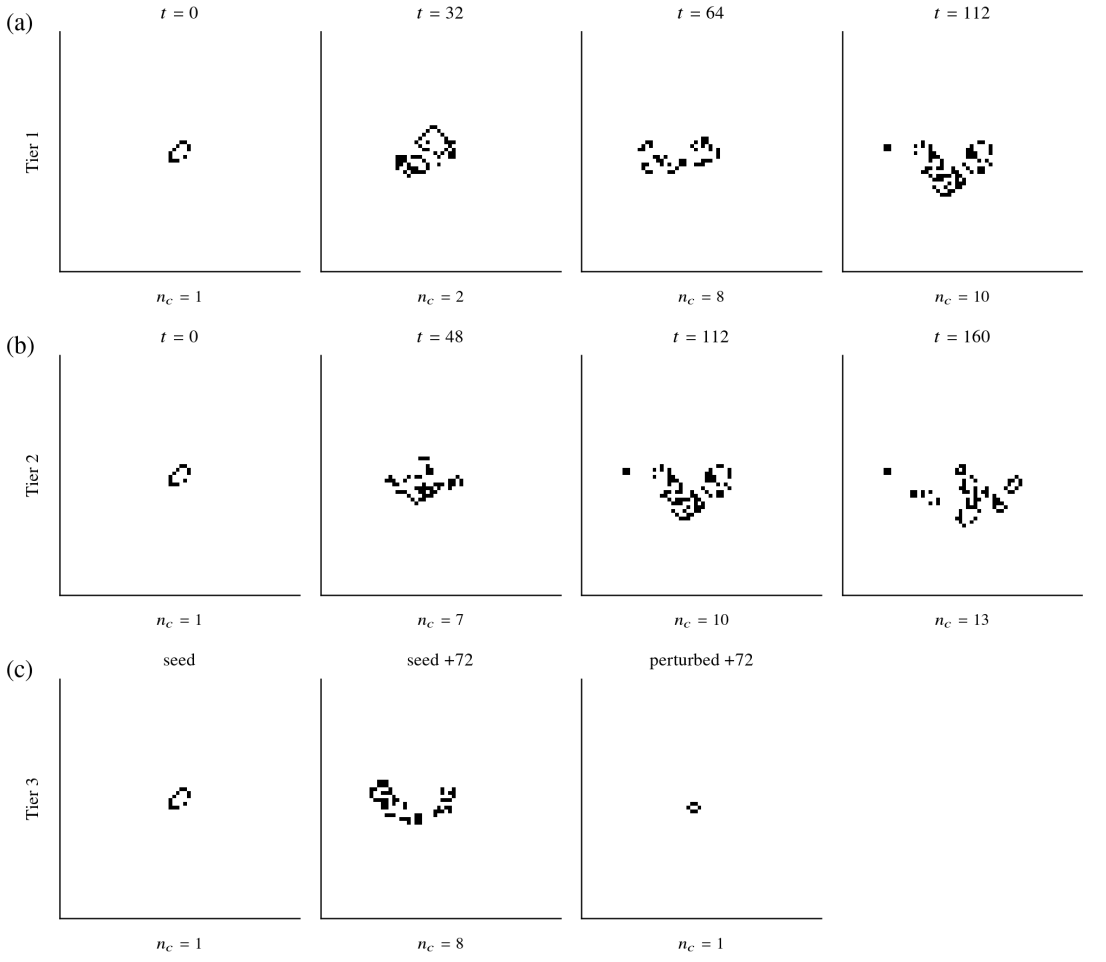


图1：使用 HighLife（B36/S23）演示三级检测层级。*(a)* 第1层：分量数量 n_c 在 112 步内从 1 增加到 10，触发模式增殖判据。*(b)* 第 2 层：将同一模式在延长的时长（ 160 步）下进行测试；增殖仍在继续（$n_c = 13$），这证实了持续复制。*(c)* 第3层：将种子图样置于空网格中隔离后，它会自我复制（$n_c = 1 \rightarrow 8$）；从种子图样中删除单个元胞会阻止复制（$n_c = 1$），由此确立了因果脆弱性。

• **Mas** **s-平衡分数**：每步平均绝对质量变化，以网格面积归一化 ：

$$M = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\frac{|m(t) - m(t-1)|}{W \times H}$$

其中， $m(t) = \sum_{i,\ j} c_{ij}(t)$ 表示第 t 步的活细胞总数， $W \times H = 64 \times 64$ 表示网格大小。我们通过一次初始密度为 $D_0 = 0.15$ 的专门 64 步模拟来计算 M 。较低的值表示动力学近似守恒的程度较高。

• **O-信息** Ω = 总相关–双重总相关 [18]：根据以下对象的联合分布计算： 3×3 模拟快照中的空间区块。负值 Ω表示协同主导（整体携带的信息多于各部分之和）；正值 Ω表示冗余。

- **空间　熵**：在网格中对 3×3 个区块计算得到的平均局部香农熵。

2.5. 德里达系数

为通过实验确定混沌边缘，我们计算了 μ [5] 抽样规则的德里达系数。对于每条规则，我们将一个 32×32 网格初始化为 50% 的密度，然后进行了 100 次单元扰动试验：每次试验中，随机选择一个元胞并翻转其状态，再分别演化原始网格和扰动后的网格 $T = 10$ 步，并在每一步记录快照。每一步都记录两条演化轨迹之间的汉明距离 δ_t。德里达系数定义为相邻距离之比的平均值：

$$\mu = \langle \delta_{t+1} / \delta_t \rangle$$

对所有时间步和所有扰动试验取平均，其中 $\delta_t > 0$ 和 $\mu < 1$。$\mu < 1$ 表示有序（亚临界）动力学，$\mu = 1$ 标示临界点，而 $\mu > 1$ 表示混沌（超临界）动力学。

2.6. 计算细节

模拟采用基于快速傅里叶变换的卷积计算邻居总和，每条规则（包括检测）耗时 118ms。完整的 $k = 2$ Moore 普查（262,144 条规则）在单台工作站上耗时 8.7 小时完成。

检测流程已使用已知基准进行测试：生命游戏（B3/S23）和 HighLife（B36/S23）被正确识别为支持自我复制，而一条失活规则（全零表）和一条高λ 混沌规则则被正确识别为不支持自我复制。所有代码均可在以下网址获取：https://github.com/Don-Yin/self-replication。

3. 结果

3.1. 类生命规则的穷尽普查

我们穷尽测试了所有 262,144 条OT 二元CA 摩尔邻域规则的模式增殖能力。其中，20,152 条规则（7.69%）支持模式增殖。作为比较，冯·诺依曼邻域（$|N| = 5$，在均衡检测协议（第3.4节）下，穷尽测试的 1,024 条规则一级比率为 4.79%。

3.2. （λ，F）平面中的相图

图2 展示了所有 262,144 条类生命规则在(λ, F) 平面中的自我复制相图。自我复制集中在一个局部区域内，该区域的规则密度较低（$\lambda \approx 0.1$–0.3），背景稳定性较低至中等（$F \approx 0.15$–0.35）。

图3 展示了根据同一组数据插值得到的平滑三维曲面，直观呈现出局部的“生命孤岛”：在原本平坦、没有任何复制的景观中，突兀地耸起一个尖峰。

自我复制在 $\lambda \approx 0.15$–0.25处达到峰值。Derrida 分析（第3.3节）表明，混沌边缘（$\mu = 1$）出现在 $\lambda \approx 0.05$–0.10，因此自我复制规则集中在弱超临界区间（$\mu \approx 1.4$–1.8），略高于临界阈值，而非深处于混沌相中。这与生物学要求相符：复制子需要具备足够动力学能力的基底来传播结构，但混乱程度又不能过高，否则模式会遭到破坏。

“生命岛”在定性上不受 F 加权方案选择的影响。在对 F 中的诞生/存活贡献采用均匀、线性和二次加权时，生命岛在这三种情况下均持续存在，峰值复制率均为 ~14%，但峰值在 F 轴上的位置会发生偏移（分别为 0.225、0.275 和 0.375

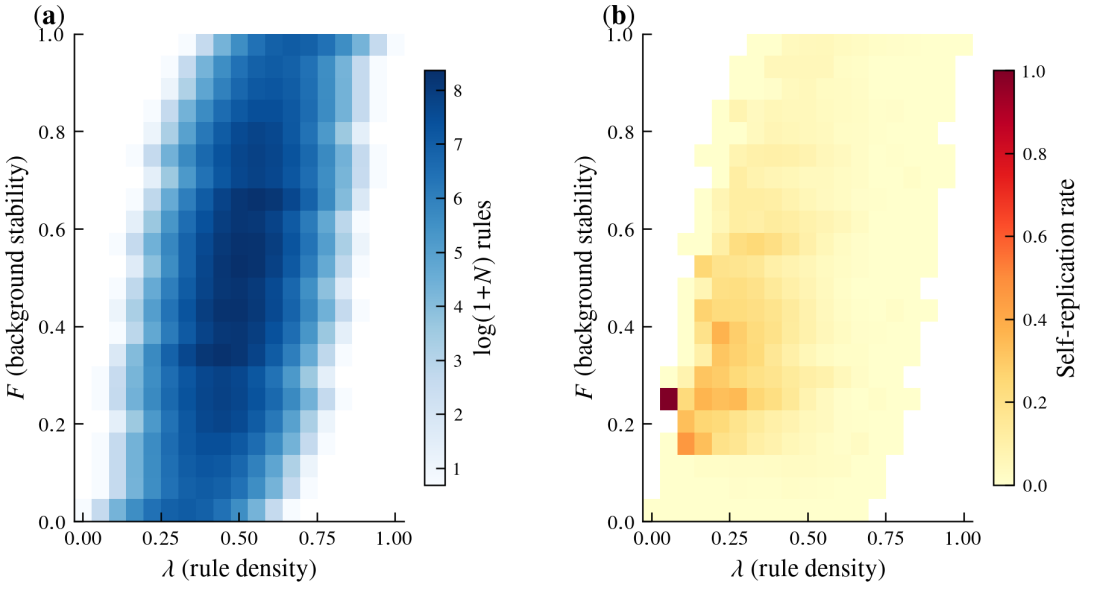


图2：全部 262,144 条类生命（外全和型 $k = 2$ 摩尔邻域）规则的相图。各列对应 19 个精确 $\lambda = n/18$ 取值； F 被分为 22 个区间（147 个不同的 F 取值——它们是二进制规则表条目的加权子集和——过于密集，无法逐一分辨）。白色元胞表示没有规则存在的结构性空白区域。（a）规则密度（对数刻度）：在 $\lambda \approx 0.5$ 处的二项分布集中反映了 $\binom{18}{9} = 48,620$ 条规则。（b）自我复制率：低 λ和低至中等 F 条件下的“生命岛”集中在 Derrida 分析（第3.3节）确定的弱超临界区间。

）。因此，生命岛的存在是类生命规则空间的一项结构性特征，而其确切的 F 坐标则取决于加权约定。

图4 展示了以λ为变量、按F三分位数分组的自我复制率。图5 展示了互补视角：以F为变量、按λ三分位数分组的自我复制率。自我复制率在低至中等 F (≈ 0.2–0.4)时达到峰值，在两个极端处则会下降。

3.3. 德里达系数与混沌边缘

为了通过实验而非启发式方法确定混沌边缘，我们测量初始状态彼此接近的构型之间后继状态对的平均汉明距离比，从而计算每条规则的德里达系数μ 。数值 $\mu < 1$ 表示有序（亚临界）动力学； $\mu = 1$ 表示临界点； $\mu > 1$表示混沌（超临界）动力学。

Tier-1 阳性规则的平均德里达系数为 $\mu = 1.81$，而 Tier-1 阴性规则为 $\mu = 1.39$；两组规则的平均状态都处于超临界，但复制体的超临界程度更高。按 λ 对规则分组后，可见其呈现单调变化趋势： μ 从 0.76（$\lambda < 0.1$）上升至 1.41（0.1–0.2）、1.63（0.2–0.3）、1.78（0.3–0.4）和 1.82（0.4–0.5）。混沌边缘（$\mu = 1$）位于 $\lambda \approx 0.05$–0.10，因此自我复制峰值（$\lambda \approx 0.15$–0.25）稳居弱超临界区间。自我复制规则并非反常地处于亚临界状态；它们恰好位于临界阈值之上，动力学的扩张性足以传播副本，同时结构性又足以维持模式连贯性。图6展示了（λ, F）平面上的德里达系数。

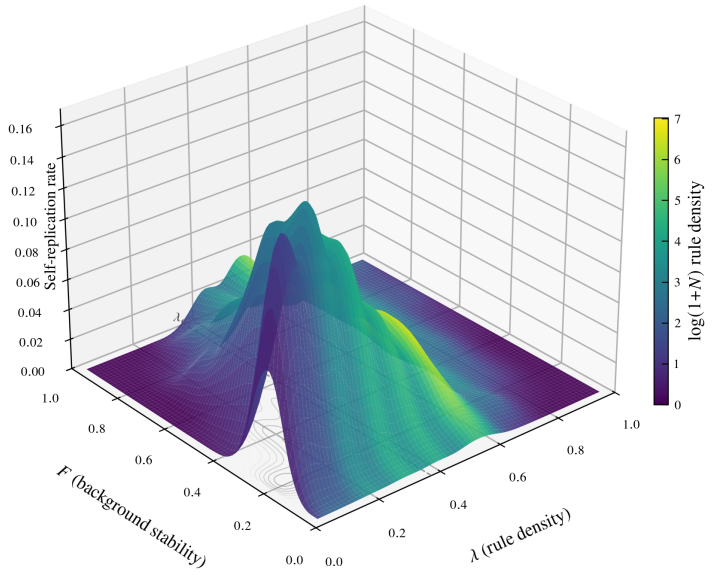


图3：关于(λ, F)平面的自我复制率平滑三维曲面（高斯滤波器$\sigma = 0。8$，三次样条插值；颜色表示对数规则密度）。低λ和低F处的尖峰表明，支持生命的规则在参数空间中占据一个狭窄的孤岛。Derrida 分析（第3.3节）将这一峰值定位于弱超临界区间（$\mu \approx 1。4–1。8$），恰位于混沌边缘之上。注意：λ和F均为离散变量；平滑曲面仅为视觉辅助，并不表示连续性。

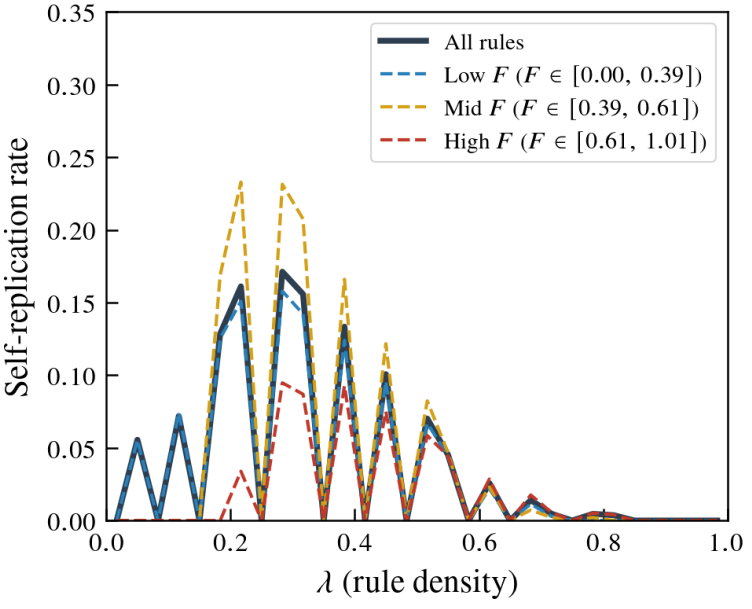


图4：总体自我复制率（黑色）与按F三分位数分组后的自我复制率（彩色）随λ的变化。峰值随F水平移动，这表明背景稳定性在λ之外增加了判别能力。

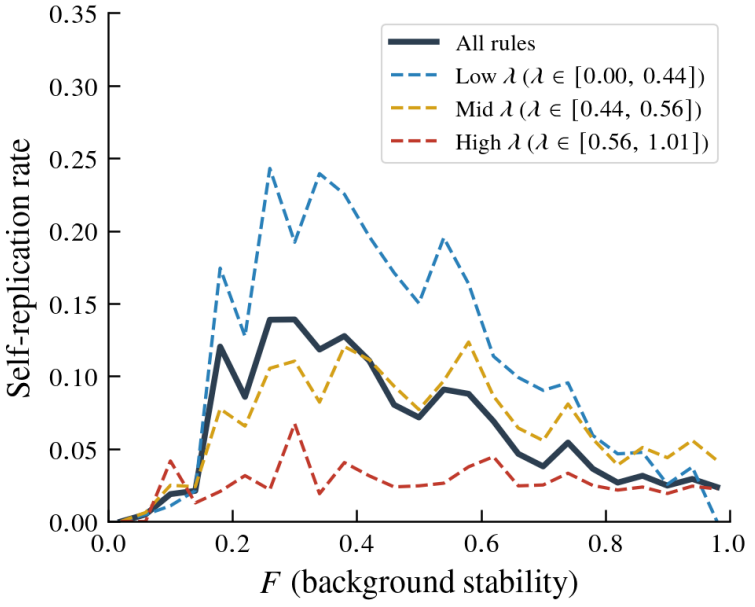


图5：自我复制率与 F的关系：总体情况（黑色）以及按 λ 三分位数划分的情况（彩色）。自我复制在低至中等 F （$\approx$ 0.2–0.4）时达到峰值，在两端均有所下降，这与相图中局部化岛的特征一致。

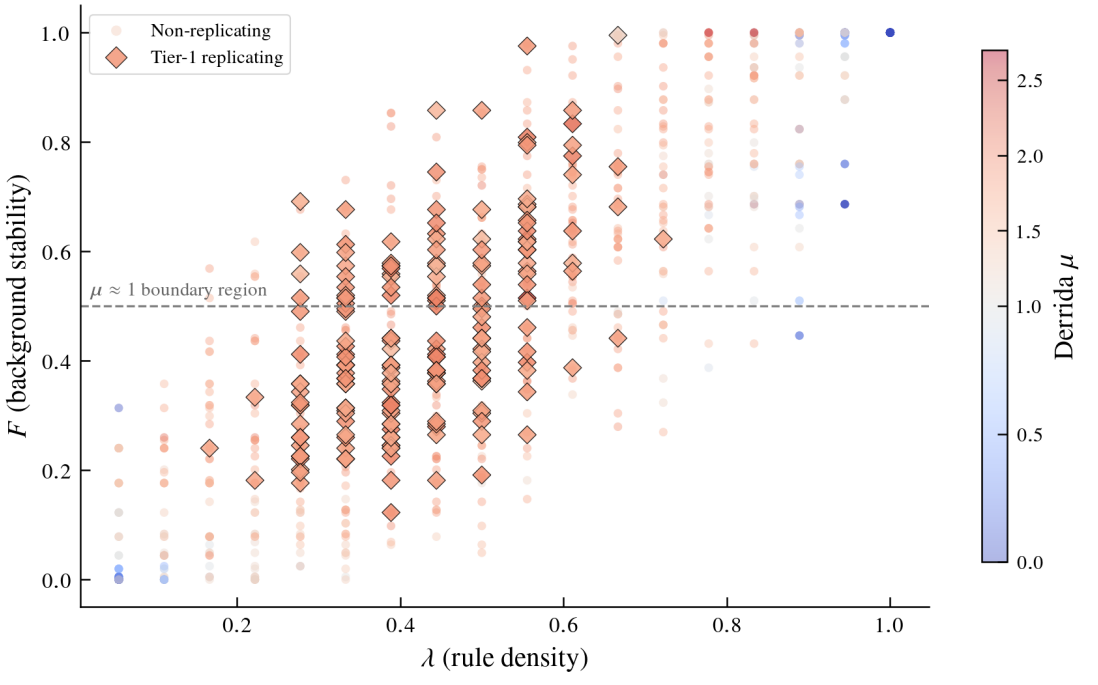


图6：(λ, F)平面上的德里达系数 μ。颜色表示 μ （蓝色：亚临界， $\mu < 1$；红色：超临界， $\mu > 1$；虚线： $\mu = 1$边界）。Tier-1 阳性规则（菱形）聚集在红色区域的 $\mu \approx 1.4$–1.8处，高于临界阈值。

3.4. 冯·诺依曼邻域与摩尔邻域的比较

在原始检测方案下（每种密度 4 个初始条件，512 步），冯·诺依曼邻域（$|N| = 5$）的一级比率为 33.2%（340/1,024），高于摩尔邻域（7.69%）。然而，原始方案分配给冯·诺依曼邻域规则的检测工作量多于摩尔规则。为控制这一因素，我们按照与摩尔筛选条件相匹配的均衡化协议（每种密度 1 个初始条件，256 步），重新对全部冯·诺依曼邻域规则进行了普查。在均衡化检测下，冯·诺依曼邻域的一级比率降至 4.79%（95%置信区间[1]：[36%，6.3%]；49/1,024）。

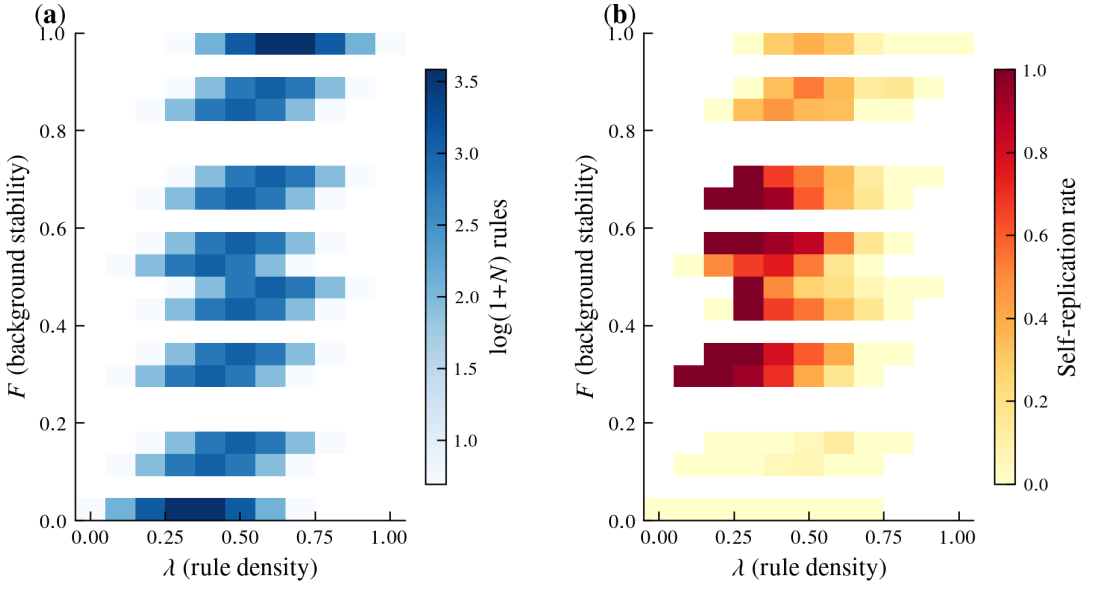


图7：离散 $k = 2$ 冯·诺依曼邻域格点上全部 1,024 条外全等计数型（λ，F）规则的相图。在均衡化检测下（每种密度 1 个初始条件，256 步），一级比率为 4.79%。该格点较粗（$\lambda = n/10$，共 11 个取值），因为冯·诺依曼邻域规则表只有 10 个条目。

我们还采样了 10，000 k=2 条扩展摩尔邻域规则（$|N| = 25$）。自我复制率为 16.69%（95%置信区间：[15.97%，17.44%]）。在均衡化检测下，邻域大小与自我复制之间呈单调递增关系，具体为 $|N|$：冯·诺依曼邻域 4.79% [3.6–6.3%]（$|N| = 5$）<摩尔邻域 7.69%（$|N| = 9$）<扩展摩尔邻域 16.69% [15.97–17.44%]（$|N| = 25$）。更大的邻域为每个元胞提供了更宽的感受野，从而支持更丰富的局部计算，并提高了支持自我复制的规则空间比例。原始协议下冯·诺依曼邻域的较高比率反映了更高的检测灵敏度（更多初始条件、更长的模拟时间），不一定是假阳性；均衡化协议则牺牲灵敏度，以换取不同基底之间的可比性。

3.5. 边界处的派生度量

我们从摩尔普查中抽取了 300 条复制阳性规则和 300 条复制阴性规则，并计算了派生度量。表 1 总结了比较结果，图8 展示了分布情况。

质量平衡差异是最强的信号：自我复制规则比非复制规则更接近质量守恒，差距为 1.6×，尽管没有明确的守恒约束。这与以下假设一致：守恒有助于自我复制 [16, 15]，即使在离散的

[1]所有报告的置信区间均为威尔逊得分区间。

度量	复制+	复制–	差异	p (曼-惠特尼检验)	Cohen 的 d
质量平衡	0.210	0.345	–0。135	$1。9 \times 10^{-26}$	–0。94
O-信息（Ω）	–0。299	–0。236	–0。063	9.3×10^{-13}	–0。27
双重总相关	0.774	0.621	+0.153	1.2×10^{-7}	+0。27
总相关	0.474	0.385	+0。090	$6。7 \times 10^{-4}$	+0.17
空间熵	0.798	0.719	+0。080	$0.055^{\dagger}$	+0。39

表1：自我复制相边界处规则的派生度量（每类300条规则，Mann– Whitney U 检验）。质量平衡是区分力最强的指标（$d = -0.94$，效应量大）；O-信息的单变量效应较小（$d = -0.27$），且在多变量控制下不再显著（第 3.12节）。
†在 $\alpha = 0.05$ 水平上不显著。

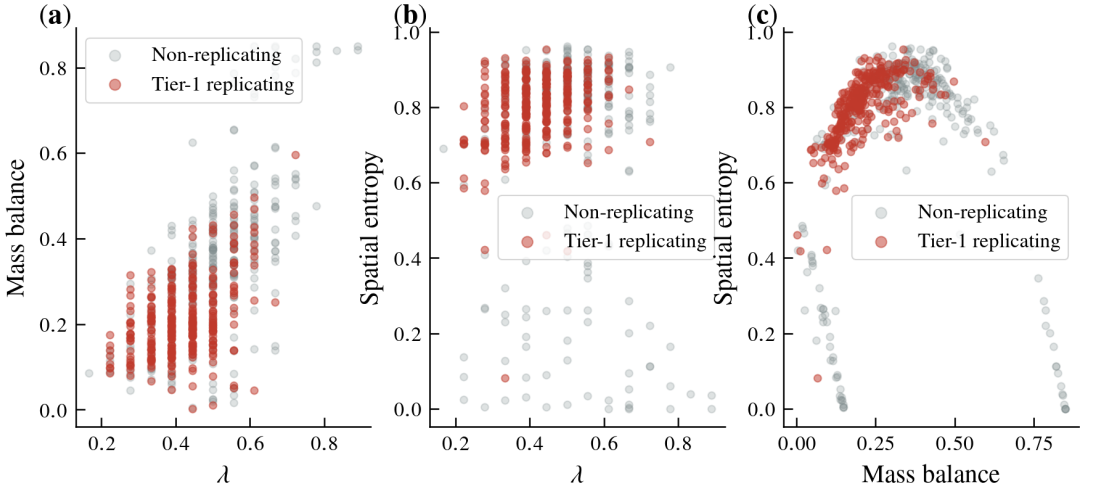


图 8：比较复制阳性（红色）与复制阴性（灰色）规则的散点图。*(a)* 质量平衡与 λ：复制规则聚集在质量平衡较低的位置（更接近质量守恒）。*(b)* 空间熵与 λ。*(c)* 质量平衡与空间熵：这两项度量结合起来能够区分这两类规则。

规则系统中，精确的数目守恒也会迫使二元相邻细胞规则呈现内在的一维动力学 [22]，，这严重限制了可用的结构类型。

为控制自我复制状态与其在（λ, F）空间中位置之间可能存在的混杂，我们使用 λ/F匹配的阴性对照重复了比较（在（λ, F）平面上进行最近邻匹配）。匹配后，质量平衡信号仍然存在（Cohen's $d = -0.94$, $p = 1.9 \times 10^{-26}$），O-信息也同样如此（$d = -0.27$, $p = 9.3 \times 10^{-13}$）。置换检验（10,000 次随机置换）得出，质量平衡的结果为 $p < 10^{-4}$，O-信息的结果为 $p = 0.001$。

3.6. O-信息：边界处的协同作用

我们计算了 300 条复制阳性规则和 300 条复制阴性规则的 O-信息 [18]。我们根据模拟快照中 3×3 空间区块的联合分布，估算了总相关（TC）、双重总相关（DTC）及其差值 $\Omega = \mathrm{TC} - \mathrm{DTC}$。负值 Ω 表示

协同主导（整体携带的信息多于各部分之和）；正值 Ω 则表示冗余。

两组均由协同作用主导（$\Omega < 0$），但自我复制规则表现出更强的协同作用：$\Omega = -0。30$适用于复制阳性规则，而 $-0。24$ 适用于复制阴性规则。复制规则的双重总相关 ~25% 高出（DTC = 0。77，而0。62），这表明其高阶统计依赖更强。图 9展示了这些分布。

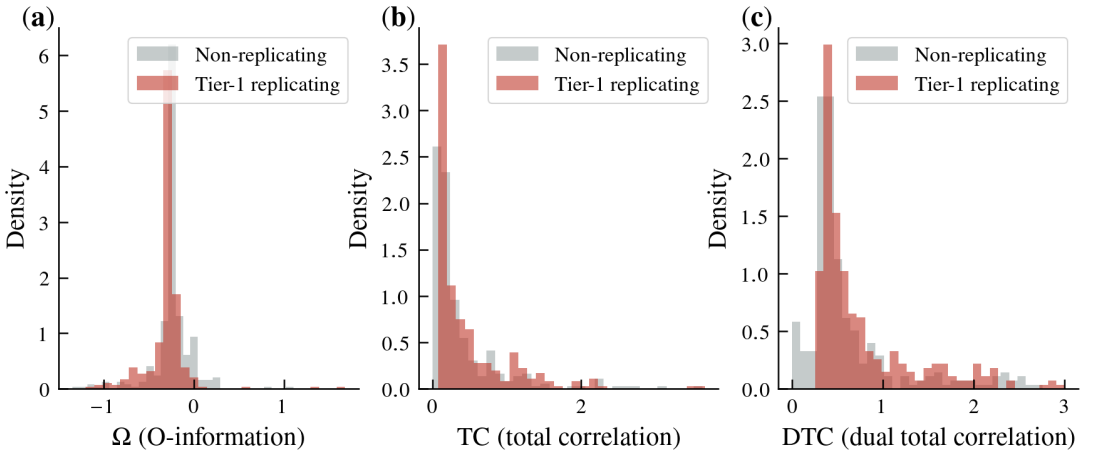


图 9：自我复制边界处的信息论度量。左：O-信息（负值表示= 协同作用）。中：总相关（TC）。右：双重总相关（DTC）。复制规则（红色）表现出更强的协同作用（O-信息更负 Ω），且 TC 和 DTC 的尾部更厚。

协同信号表明，自我复制基底呈现的信息结构无法分解为成对相关；复制子的空间模式承载着高阶依赖。然而，正如第 3.12 节的多变量分析所示，该信号并未在质量平衡之外增加预测能力，这表明 O-信息与近似守恒具有大量共同方差。

3.7. 多状态扩展：$k = 3$

为检验相边界是否会随状态数量发生偏移，我们抽取了 10,000 OT $k = 3$ 个摩尔规则，分布于 $20\,\lambda$ 个分箱中。自我复制率为 15.55%（95%置信区间：[14.85%，16.28%]），约为 $k = 2$ 基准率（7.69%）的两倍。图 10 比较了这些 λ 分布。

从 $k = 2$ 到 $k = 3$ 的翻倍表明，状态数量是自我复制相图的一个坐标轴：更多状态会使相边界向外移动，并提高支持自我复制的规则空间比例。

3.8. 规则对称性：全称约束有助于实现

为检验外部全局计数约束是限制还是促进自我复制，我们从离群元胞自动机 $k = 2$ 所处的 2^{140} 维空间中抽样了 10,000 条旋转对称（C4）元胞自动机[24] 摩尔规则。C4 规则保留四重旋转对称性，但打破反射对称性，且不受仅依赖邻居和的约束。

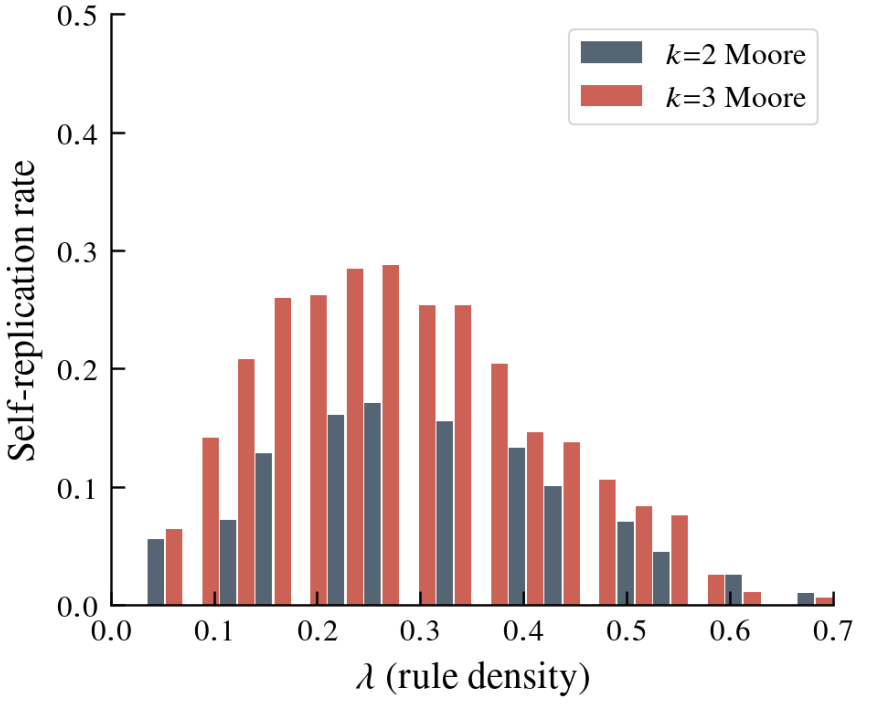


图 10： λ 自我复制率与 $k = 2$ （蓝色，穷举）和 $k = 3$ （红色，抽样）的关系。$k = 3$ 的自我复制率始终较高，且峰值对应的 λ略高，这与更丰富的状态字母表能够实现更紧凑的复制体相一致。

C4 规则的自我复制率为 3.57%（95%置信区间： [3.22%，3.95%]；357 / 10,000），低于 OT规则的 7.69%。这有悖直觉：放宽全局计数约束，名义上允许更丰富的动力学，却降低了自我复制出现的频率。一种解释是，全局计数约束发挥了正则化器的作用。它将规则表限制为依据邻居数量（18 个条目），而非特定邻居配置（512 个条目），从而抑制混沌动力学，并提高处于结构化状态、因而可能发生自我复制的规则所占比例。与守恒发现一样，限制动力学自由度的结构性约束，反而可能提高复杂行为的出现频率。

3.9. 二级确认：延长时长重新筛查

为区分真正的自我复制与瞬态伪影，我们对 1,000 条复制阳性规则进行了延长模拟时长的重新筛查（512 步，8 个检查点；第 2 节）。其中，978 条（97.8%，95%置信区间： [96.7%，98.6%]）在延长时长筛查中确认呈阳性。

如此高的确认率表明，初始筛查标记出的绝大多数规则在更长的时间范围内都能持续增殖，而不只是产生瞬态伪影或边界条件复制。2.2%的未确认率为筛查误差提供了一个上限。

3.10. 第三级因果检验：模式级扰动

我们对全部 978 条二级确认规则进行了因果性自我复制测试。对于每条规则，我们（1）从早期模拟快照中识别出一个复制组件，（2）将其单独放置在空网格上

并确认它能够独立自我复制；（3）系统地从种子图样中逐个删除元胞（每条规则进行 10 次试验），并检查是否会因此阻止复制。

在测试的 978 条规则中，203 条（20.8%，95%置信区间：[18.3%，23.4%]）通过了因果自我复制测试（预防率 ≥ 0.5）。其余规则分为三类：571 条（58.4%）是稳健复制体，其种子图样能够单独复制，但可耐受单细胞扰动；119 条（12.2%）表现出分布式复制，即模式从随机初始条件中增殖，但无法从孤立的种子图样中增殖；另有 85 条（8.7%）由于密度或提取方面的局限性而无法测试。

分布式复制类别（12.2%）包含的规则只能通过协同多组分动力学支持模式增殖，而不能依靠任何单一的自我复制结构。这与 Hintze 和 Bohm 在 Outlier 元胞自动机中观察到的分布式自我性相符 [7]，并表明在类生命规则空间中，分布式自我复制可能比以往认为的更为常见。

综合三级检测层级各层的通过率（第1层为 7.69%，第2层为 97.8%[96.7–98.6%]，第3层为 20.8% [18.3–23.4%]），估计全部262,144条类生命规则中有**1.56%**（95%置信区间：[1.2%，2.0%]）是因果自我复制体。

3.11. 检测稳健性

为检验普查结果是否取决于检测超参数，我们在 5,000 条规则（2,500 条原始阳性规则、2,500 条阴性规则）上重新运行一级检测，步数设为 512，并调整快照间隔（32、64、128）和最小增幅阈值（2、3、4、5）。在普查设置（间隔 64、阈值 3）下，99.9% 的原始一级规则被检出。在更严格的设置（间隔 64、阈值 4）下，仍有 96.3% 被检出，而原始阴性规则中的假阳性率从 66% 降至 40%。在全部 12 种参数组合下，原始阳性规则与阴性规则之间的区分始终一致，这支持了以下结论：尽管绝对一级比率会随检测严格度而变化，相图结构仍然稳健。

3.12. 自我复制的多变量预测

在（λ、 F、质量平衡、空间熵、O-信息）上训练的逻辑回归模型，在预测自我复制状态时取得了曲线下面积= 0。85 （5 折交叉验证）。质量平衡是最主要的预测因子（标准化系数 −2。09），其次是空间熵（+1。35）和 λ （−0。42）。在控制其他特征后，O-信息的贡献微乎其微（系数 −0。01），这表明表 1 中的 O-信息信号在很大程度上可由其与质量平衡及 λ的共享方差解释。

质量平衡信号可推广至不同基底。对于 $k = 3$摩尔规则，复制阳性与阴性规则之间的质量平衡差异较大（科恩 $d = -1$。04， $p = 4$。2×10^{-227}），超过了 $k = 2$ 效应量。对于冯·诺依曼邻域 规则（采用原始协议中的第 1 层标签， $n_{\mathrm{pos}} = 340$），效应较弱且不显著（$d = -0$。31， $p = 0$。30），这可能同时反映了规则空间较小（1,024 条规则），以及冯·诺依曼邻域参数空间的统计功效较低。因此，近似质量守恒是自我复制的跨基底预测因子，至少对于组合丰富度足够高的规则空间而言如此。图冯·诺依曼邻域参数空间。近似质量守恒因此是自我复制的跨基底预测因子，至少对于具有足够组合丰富度的规则空间而言。图11总结了跨基底比较。

3.13. 与 *ASAL* 开放性的交叉比较

为了检验自我复制是否与视觉开放性相关，我们计算了每条规则的第 1 层复制状态与其 ASAL 开放性得分之间的 Spearman 秩相关系数 [9]，该得分量化了模拟轨迹中生成的 CLIP 嵌入视觉图案的多样性。

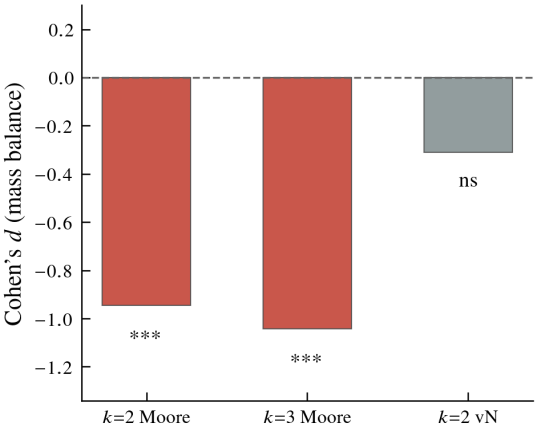


图 11：三个基底上复制阳性规则与复制阴性规则之间质量平衡差异的 Cohen's d 。 k=2摩尔邻域和 k=3 摩尔邻域表现出显著的大效应； k=2冯·诺依曼的效应较弱且不显著。

相关系数实际上为零（$\rho = -0.002$， $p = 0.24$）。因此，自我复制与基于 CLIP 的视觉开放性相互独立：生成多样视觉图案的规则，支持自我复制的可能性并不高于（或低于）收敛为均匀或重复场的规则。这种分离表明，自我复制所需的计算要求（近似守恒、中等程度的动力学复杂性）与基础模型嵌入所衡量的视觉多样性要求彼此正交。

3.14. 更大尺度上的验证

为检验图案增殖结果是否为有限尺寸伪影，我们在 256×256 网格上对 λ 个复制阳性规则中数值最低的 100 条重新运行了 8,192 个时间步（相比之下，普查中使用的是 64×64 和 256 个时间步）。在更大尺度下，全部 100 条规则（100%）均呈阳性，且没有假阳性。这表明普查中检测到的图案代表了尺度稳健的增殖动力学。

3.15. 复制子示例

图 12 展示了三个自我复制体示例的延时可视化：HighLife（B36/S23）、一个低λ 复制子（$\lambda = 0。28$），以及一个中等λ 复制子（$\lambda = 0。44$）。三者均呈现出局部结构向静止空间中生成副本的典型模式。

4. 讨论

4.1. 超越混沌边缘：守恒作为约束条件

按照 Langton 的观点，传统预期认为，自我复制应集中在混沌边缘，此处动力学活动达到最大，同时仍可控。我们的数据对这一图景作了进一步修正。自我复制在 $\lambda \approx 0.15$–0.25处达到峰值，此时德里达系数已超过临界值：在匹配的 λ下，Tier-1 阳性规则为 $\mu = 1.81$，而 Tier-1阴性规则为 $\mu = 1.39$。混沌边缘（$\mu = 1$）本身位于 $\lambda \approx 0.05$–0.10，低于自我复制峰值。

这意味着自我复制体并非处于临界性边缘，而是存在于弱超临界区间。此外，在相同的 λ下，复制规则的动态活跃程度更 高，而非更低。德里达差距（$\Delta\mu \approx 0.4$）与这样一种图景相符：复制需要足够的

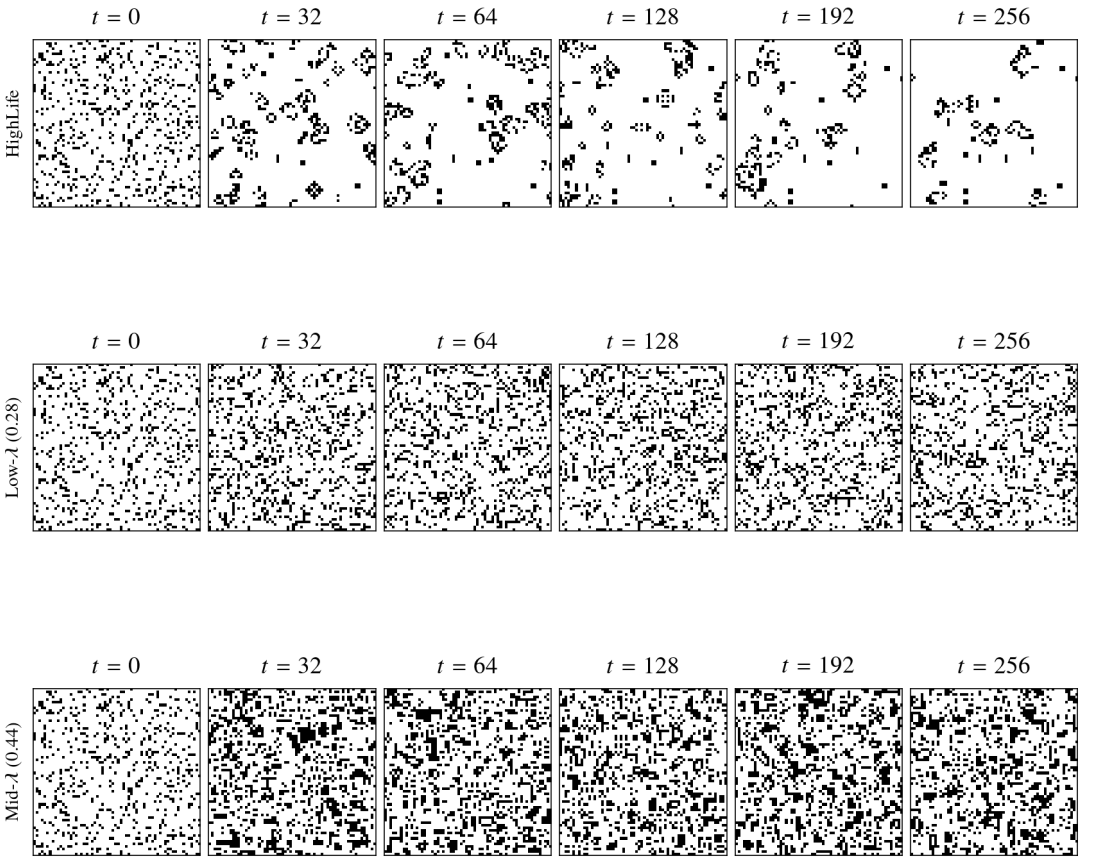


图 12：密度为 $D_0 = 0.15$ 时，64×64 网格上三个自我复制体的延时可视化。各列显示 $t = 0, 32, 64, 128, 192, 256$ 时的快照。上：HighLife（B36/S23）。中：低-λ复制子。下：中-λ 复制子。它们都呈现随时间增殖的局部结构。

扰动增长来传播空间副本，而仅仅保持结构、却不放大结构的规则，无法维持增殖。

如果仅有动力学活动就足够，那么自我复制率应在 Derrida 最大值附近达到峰值，远高于 $\lambda = 0.25$。但事实并非如此，因为第二个约束会先起作用：近似质量守恒。较高 λ 处的规则是超临界的，但不守恒；其动力学会在副本形成之前更快地破坏模式。因此，起约束作用的是守恒，而非临界性。自我复制要求弱超临界性以及近似守恒，而两项条件同时满足的狭窄 λ 窗口，定义了相图中的生命岛。

这重新诠释了 Langton 假说。达到或超过混沌边缘的动力学活动是必要条件（有序区域中的规则（$\mu < 1$）几乎从不自我复制），但并非充分条件。守恒提供了额外的结构性约束，将超临界动力学引导至保留图样的复制，而非摧毁图样的混沌。

4.2. 背景稳定性这一隐藏变量

适配后的 F 参数（第 2节；参见 [19]）捕捉了规则结构的一个维度，而 λ 遗漏了：规则表中哪些条目是非静止的。两条规则具有相同的 λ，但 F 不同，它们具有

相同的活动水平，但活动是否会扰乱静止区域则有所不同。我们的相图显示，自我复制集中在（λ， F）平面上；背景稳定性是刻画支持生命的基底时一个相关的维度。

4.3. 无设计的近似守恒

自我复制规则更趋于近似质量守恒，这一发现与近期关于质量守恒元胞自动机的研究相联系。Plantec 等人 [16]发现，在 Lenia 中加入精确的质量守恒，会使系统从自维持模式罕见转变为自维持模式大量出现。Papadopoulos 和 Guichard [15] 在连续元胞自动机中利用 MaCE 框架报告了类似的模式。我们的数据将这一模式扩展到了离散系统：即使没有明确的守恒约束，恰好近似保持质量守恒的规则，也最有可能支持自我复制。这种关联在 λ/F 匹配（Cohen's $d = -0。94$）和置换检验（$p < 10^{-4}$）后依然成立。

守恒效应并不局限于二元摩尔规则。对于 k=3 外总和 Moore 规则，质量平衡效应更强（$d = -1。04$， $p = 4。2\times10^{-227}$），这表明随着状态字母表增大，守恒会成为更有力的判别因素。对于冯·诺依曼邻域，效应较弱（$d = -0。31$），不过这一估计仅基于均衡化协议下的 49 条 Tier-1 阳性规则，统计效力可能不足。在这三种基底中，近似守恒是支持生命的规则所共有的特性，而不只是通过设计施加的工程便利。

4.4. 质量平衡作为首要判别因素

结合 λ、 F、质量平衡、空间熵和O-信息的逻辑回归模型，在预测自我复制状态方面达到了曲线下面积= 0.85，其中质量平衡是主导特征（标准化系数 –2.09）。尽管O-信息具有显著的单变量信号（$d = -0.27$， $p < 10^{-12}$），但在控制质量平衡后，其贡献可以忽略不计（系数 $\approx$ 0）。这表明，在复制规则中观察到的空间协同作用与近似守恒存在大量共同方差：近似守恒质量的规则往往也会产生由协同作用主导的空间模式。与其说是高阶信息结构本身，不如说是守恒这一更为根本的基底属性与自我复制相关。

4.5. 邻域大小：自我复制单调递增

在均衡检测协议下（使不同邻域之间的初始条件数量和模拟时长保持一致），自我复制率随邻域大小单调增加：vN($|N|$=5，4.79%）＜摩尔邻域（$|N|$=9，7.69%）＜扩展摩尔邻域（$|N|$=25，16.69%）。原始vN 自我复制率为33.2%，反映了采用更多初始条件和 4× 更长模拟时长 2×的检测方案具有更高的检测灵敏度；一旦这些因素得到均衡，vN 邻域产生的是最低的复制率，而不是最高的复制率。

这种单调关系有一种直观的解释：更大的感受野能为每个元胞提供更多空间信息，用于编码复制机制。一个 5×5 扩展摩尔核能够表示摩尔核 3×3 无法表示的空间模板，因此能够编码比 4 元胞冯·诺依曼邻域核更丰富的邻居交互。因此，邻域大小与自我复制之间的关系取决于信息容量，而非局部性与信息稀释之间的矛盾。

需要指出一个注意事项：扩展摩尔邻域的 Moore 速率（16.69%）基于从2^{50} 规则空间中抽取的 10,000 条规则样本，而 Moore 普查则涵盖了全部规则。抽样方差可能影响扩展摩尔邻域的估计值，实际总体比率可能有所不同。

4.6. 自我复制与开放式演化

将我们对自我复制进行的全面普查，与 Kumar 等人针对相同 262,144 条规则得出的 ASAL 开放性得分进行比较， [9] 结果显示二者几乎没有相关性（$\rho = -0。002$）。基于 CLIP 的视觉新颖性无法预测自我复制；与不具备复制能力的规则相比，自我复制规则并没有更“有趣”或更乏味，在 ASAL 的意义上也是如此。

这一零结果有着明确的含义：自我复制是一种基底结构现象，受守恒和轻度超临界性支配，而非由基础模型嵌入所捕捉的那类视觉复杂性决定。规则可以产生视觉上新颖的开放式动力学，却不支持自我复制；反过来，许多自我复制规则产生的图案在视觉上重复性很强，在 ASAL 新颖性评分中得分较低。自我复制的底层机制（近似守恒、低 λ、适当的 F）是规则表的结构特征，而不是动力学涌现出的审美属性。

4.7. 与 ***Brown*** 和 ***Sneppen***（***2025***）的比较

Brown 和 Sneppen [1] 研究了生命游戏（“3-Life”）三状态扩展中的复制子，并改变存活阈值，发现自我复制更容易出现在低活性区域。他们的研究入选 PRE 编辑推荐，对单一规则族中的复制子动力学进行了深入刻画。我们的研究采取了互补的方法：我们没有在一个规则族内改变阈值，而是全面考察了完整的 262,144 个外总计数二元规则空间，并对 10,000 k=3条规则进行抽样，以描绘不同基底参数下的自我复制相边界。两项研究都发现复制倾向于出现在低活性区域，这一趋同结果增强了我们的信心，认为这是类生命基底的一种普遍性质，而非某个特定规则族造成的假象。

我们的 k=3 扫描（一级比率为 15.55%，95%置信区间： [14.85%、16.28%]）为 Brown 和 Sneppen 的分析提供了定量补充：通过在 k=3 外总计数规则空间中进行抽样，而非局限于单一规则，我们能够估算自我复制的普遍程度如何随 λ 和 F变化。质量平衡结果（$d = -1.04$，对应 k=3）表明，近似守恒可能也与 3-Life 有关，不过 Brown 和 Sneppen [1] 并未直接检验这一点。两项研究的差异在于研究范围与深度：我们针对基底参数绘制了系统的相图，并指出守恒和轻度超临界性是约束条件；而 Brown 和 Sneppen[1] 则在单一基底内对复制子动力学进行了细致的机制分析，包括复制周期和空间组织。两种视角互为补充，共同表明，自我复制的条件既十分苛刻，又普遍存在于类生命元胞自动机之中。

4.8. 局限性

我们的模式增殖定义较为宽松，但延长时长复筛（第3.9节）重新检出了 97.8% 的标记规则，因此未确认率上限为 2.2%。因果扰动测试（第3.10节）进一步将这一比例缩小至估计的 1.56% 真实因果自我复制率。在$n = 978$ 个经测试并确认的规则中，被归类为“稳健复制体”的比例（即能在孤立状态下复制、但能耐受单细胞删除的规则）可能代表一种真正的鲁棒自我复制类别，也可能需要通过多细胞扰动测试才能揭示其脆弱性。此外，我们只测试了外全局规则。目前已知的所有非平凡自我复制体 $k > 2$ 都采用具有方向性信息流的非总和规则 [10, 7]。外全局规则这一限制在结构上可能排除了自我复制机制

在更高的 k下，不过我们的 C4 旋转对称样本（第3.8节）开始探索非全计数规则空间。

该 F 参数在相图中的轴位置取决于计算时采用的加权方案：采用不同的加权方式时，生命岛会沿着 F 轴移动，但在所有测试的加权方式下，它的存在及定位均保持不变。这意味着我们报告的精确 F 坐标取决于约定，而定性的结论——背景稳定性是一个相关的第二轴——则具有稳健性。

均衡化的 冯·诺依曼邻域 普查表明，邻域比较对检测方案很敏感。原始 冯·诺依曼邻域 率（33.2%）与均衡化后的比率（4.79%）相差近一个数量级，这凸显了采用协议匹配的比较对于跨基底论断至关重要。

4.9. 展望

接下来的工作包括：(1) 将扫描范围扩展至 $k = 4$、6、8，并纳入外总计数规则和旋转对称规则；(2) 在相边界处计算因果涌现 [8]，以检验自我复制规则的宏观尺度动力学所携带的有效信息是否多于其微观尺度动力学；(3) 将 Derrida 分析扩展至连续 元胞自动机 基底（Lenia、Flow-Lenia），以检验弱超临界区间是否适用于离散系统以外的情形；(4) 探究为何质量平衡效应在 冯·诺依曼邻域 中弱于摩尔邻域和 k=3，以及这反映的究竟是真实的基底差异，还是仅仅源于均衡化检测下较小的样本量。

参考文献

[1] F. D. Brown 和 Kim Sneppen，《类生命游戏自动机中的复制体》，《物理评论E》**111** (2025), 054306.[2] John Byl，《小型元胞自动机中的自我繁殖》，《物理学D：非线性现象》**34**(1989), 295–299.[3] Hui-Hsien Chou 和 James A. Reggia，《元胞自动机空间中自我复制结构的涌现》，《物理学 D：非线性现象》 **110**(1997), 252–276.[4] Jordan Cotler、Clément Hongler 和 Barbora Hudcova，《自我复制与计算普适性》，arXiv 预印本 arXiv:2510.08342 (2025).[5] Bernard Derrida 和 Yves Pomeau，《自动机随机网络：一种简单的退火近似》，《欧洲物理快报》**1** (1986), 45–49.[6] David Eppstein，《类生命元胞自动机中的增长与衰减》，《生命游戏元胞自动机》(2010), 71–98.[7] Arend Hintze 和 Christopher Bohm，《重新思考自我复制：在 Outlier 元胞自动机中检测分布式自我性》，《npj复杂性》**3** (2026年), 11.[8] Erik P. Hoel、Larissa Albantakis 和 Giulio Tononi，《量化因果涌现表明宏观可胜过微观》，《美国国家科学院院刊》**110** (2013), 19790–19795.[9] Akarsh Kumar、Samuel Earle 等，《ASAL：人工生命自动搜索》，arXiv 预印本 arXiv:2412.17799 (2024).[10] Christopher G. Langton，《元胞自动机中的自我繁殖》，《物理学D：非线性现象》**10** (1984), 135–144.[11] ，《混沌边缘的计算：相变与涌现计算》，《物理学D：非线性现象》**42** (1990), 12–37.[12] Wentian Li、Norman H. Packard 和 Christopher G. Langton，《元胞自动机规则空间中的转变现象》，《物理学D：非线性现象》**45** (1990), 77–94.[13] Melanie Mitchell、Peter T. Hraber 和 James P. Crutchfield，《重新审视混沌边缘：演化元胞自动机以执行计算》，《复杂系统》**7** (1993), 89–130.[14] Vassilis Papadopoulos、Guilhem Doat、Arthur Renard 和 Clément Hongler，《在连续元胞自动机的相边界寻找复杂性》，《遗传与进化计算会议论文集增刊》，2024年。

[15] Vassilis Papadopoulos 和 Etienne Guichard，《MaCE：元胞自动机的一般质量守恒动力学》，arXiv 预印本 arXiv:2507.12306 (2025).

[16] Erwan Plantec、Gautier Hamon 等，*Flow-Lenia*：质量守恒连续元胞自动机中涌现的演化动力学，《人工生命》（2025）。

[17] James A. Reggia、Steven L. Armentrout、Hui-Hsien Chou 和 Yun Peng，展现自我导向复制的简单系统，《科学》**259**（1993），1282–1287。

[18] Fernando E. Rosas、Pedro A. M. Mediano、Michael Gastpar 和 Henrik J. Jensen，通过互信息的多变量扩展量化高阶相互依赖，《物理评论E》**100**（2019），032305。

[19] Sunao Sakai、Megumi Kanno 和 Yukari Saito，广义元胞自动机规则空间的相图，《物理评论E》**69**（2004），066117。

[20] Peter D. Turney，元胞自动机的行为相似性测量，《人工生命》**27**（2021），62–71。

[21] John von Neumann，《自我复制自动机理论》，伊利诺伊大学出版社，1966年，由 Arthur W. Burks 编辑并完成。

[22] Barbara Wolnik 和 Bernard De Baets，所有基于相邻元胞的二进制数守恒元胞自动机都是内禀一维的，《物理评论E》**100**（2019），022126。

[23] William K. Wootters 和 Christopher G. Langton，《确定性元胞自动机是否存在突变相变？》，《物理学D：非线性现象》**45**（1990），95–104。

[24] Bo Yang，二进制元胞自动机中自我复制的层级结构的涌现，《人工生命》**31**（2025），96–105。

致谢

作者　　或感谢剑桥信托和医学研究博士培训计划提供支持　　rt.

伦理

这项工作是计算　　性的，不涉及人类参与者、动物受试对象或个人数据。无需获得伦理审批　　.

人工智能及人工智能辅助技术

GitHub Copilot 用于协助写作和检查语法。作者已审阅、核实并编辑所有生成内容，并对内容承担全部责任。

数据可访问性

所有代码和数据均可在https://github.com/Don-Yin/self-replication获取。整个流程均可通过唯一入口`run.py`完全复现。仓库中还包含中间结果（JSON）和发表用图（PNG）。

人工智能使用声明

请参阅上文关于人工智能及人工智能辅助技术的声明。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

作者贡献

D.Y.：概念化、方法学、软件、形式分析、调查、数据管理、写作（初稿）、写作（审阅与编辑）、可视化。

资金
D.Y. 获得医学研究博士培训计划（DTP-MR）、剑桥大学临床医学院及剑桥信托的支持。