

文章编号:1001-5132(2007)02-0202-04

初态变化对四物种捕食模型演化行为的影响

陈 婷, 姜罗罗, 应崇杨

(宁波大学 理学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:采用 Monte Carlo 数值模拟方法对二维正方格子上的四物种循环捕食模型进行研究. 相对于四物种等概率的初始条件, 研究了四物种不等概率随机分布的初始条件对系统动力学相变行为的影响. 研究表明:系统初态状态对体系的动力学演化过程和非平衡相变行为具有非常重要的影响.

关键词:格子模型; 多畴自组织斑图; 防御联盟

中图分类号: O469; Q141 **文献标识码:** A

非平衡相变及其临界行为作为平衡相变的对应物, 引起了愈来愈多的关注, 成为目前最前沿的研究热点之一. 非平衡相变的研究对许多其他领域来说都有重要意义, 比如晶体界面生长过程^[1]、化学的表面催化反应^[2,3]、生态系统 Lotka-Volterra 模型^[4-7]等. 但由于非平衡系统状态无法用热力学势函数来描述, 目前缺乏统一的理论框架, 所以一般通过具体模型的研究来了解非平衡相变.

对于具有吸收态的非平衡相变研究, 发现大量模型中所呈现的非平衡连续相变的临界行为可以归属为几种少数的普适类, 目前了解最为清楚的包括 DP(Directed Percolation)类^[8-10]和 PC(Parity Conserving)类^[11,12]. 对于单组分体系在短程相互作用、没有对称性、没有淬火无序特性、只存在唯一吸收态的非平衡连续相变, 其临界行为都属 DP类. 研究较为深入的另外一类是具有 2 个对称的吸收态的体系, 这类体系往往又和动力学过程中的奇偶守恒性联系在一起, 以至于此类的名称为 PC类. 对于多

组分体系以及存在多吸收态的体系的研究还刚刚起步, 其相变行为和临界行为的普适性还需要进一步的探讨.

本论文在二维空间上研究了四物种循环捕食的多组分模型^[13], 四物种在动力学演化规则中具有同等地位. 随着体系中空位密度的增加, 体系呈现出从活性态到具有无穷多吸收态的非平衡非连续的相变行为. 但是, 体系的无穷多吸收态可以分为等价的两类, 当体系初态为四物种等概率随机分布时, 体系随机地进入到任意一类吸收态的概率相等. 相对于四物种等概率的初始条件, 我们研究了四物种不等概率随机分布的初始条件对系统动力学相变行为的影响. 研究表明, 通过调整体系的初始状态, 四物种的对称地位被打破, 体系随机地进入到两类无穷多吸收态中的一类的概率不再相等, 只会随机地进入较强势的一类无穷多吸收态, 体系的非连续相变改变为连续的, 而且体系在临界点的邻域内表现出明显的动力学标度行为.

收稿日期: 2006-12-23.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(10575055).

作者简介: 陈 婷(1983-), 女, 浙江台州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 生态系统的复杂动力学. E-mail: chenting_1983@tom.com

1 模型建立

对于包含有 4 个不同物种且物种间存在循环捕食关系的生态体系, 考虑其系统空间存在空位, 即空间某些位置没有被任一物种占据, 我们可以建立如下格子模型: 二维 $L * L$ 格子中任一格点 i 可以由 4 种物种中的一个个体占据, 或者处于空位状态, 即格点的态函数 $S_i = 0, 1, 2, 3$ 或 4 , 分别代表格点处于空位态或者被四类物种之一的 1 个个体占据. 4 类物种之间具有循环捕食关系, 即物种 1 捕食物种 2, 物种 2 捕食物种 3, 物种 3 捕食物种 4, 物种 4 捕食物种 1, 捕食发生后在被捕食者位置生成捕食者. 捕食过程发生在格点与其四个最近邻格点之间.

模型的动力学演化过程如下:

- (1) 随机选取一格点 i ;
- (2) 从格点 i 的 4 个最近邻格点中随机选取一格点 j ;
- (3) 如果占据格点 i 、 j 的物种是捕食者与被捕食者关系, 发生捕食反应, 比如 $(1, 2)$ 或 $(2, 1)$ 转变为 $(1, 1)$;
- (4) 如果格点 i 、 j 分别是物种与空位时, 物种跳跃到空位上, 比如 $(1, 0)$ 转变为 $(0, 1)$;
- (5) 如果 $S_i = S_j$ 或者是中立物种相遇时, 不发生反应, 比如 $(1, 1)$ 与 $(1, 3)$ 保持不变.

重复上述过程, 系统将最终进入非平衡定态或吸收态. 重复 $N = L * L$ 次计为 1 个 Monte Carlo 时间步 (MCS), 代表平均每个格点得到了一次机会改变自身状态.

四物种循环捕食模型中, 物种 1、3 之间及物种 2、4 之间不存在捕食关系, 而是中立关系, 甚至是相互保护、共同抵御外来侵略. 因此扩散作用, 即物种跳跃到空位的过程, 可能会导致只含 2 种中立物种的“防御联盟”形成. 所以此模型的吸收态除了 4 个单物种态之外, 还有两系列“防御联盟”态(防御联盟中的 2 个中立物种可以有不同比

例).

四物种等价模拟初始条件为每个格点的态函数 S_i 以 ρ_0 的概率赋值为 0, 即格子上的空位密度为 ρ_0 , 赋值为 1、2、3 或 4 的概率相等, 都为 $(1 - \rho_0)/4$. 四物种不等价模拟初始条件为每个格点的态函数 S_i 以 ρ_0 的概率赋值为 0, 即格子上的空位密度为 ρ_0 , 赋值为 1 或 3 的概率为 $0.15(1 - \rho_0)$, 而赋值为 2 或 4 的概率为 $0.35(1 - \rho_0)$. 模拟过程中采用周期边界条件, 且格子大小为 $200 * 200$.

2 模拟结果

模拟过程中, 我们记录下物理量 P_{pp} , 即所有最近邻对中具有捕食关系的反应所占比率, 同时也反映了敌对物种畴之间的畴界面的长度. 物理量 P_{pp} 可以定义为系统的序参量, 很好地描述了体系从活性非平衡定态到吸收态之间的动力学相变行为.

首先讨论系统初态为四物种随机等价分布时系统的动力学演化过程. 物种通过捕食作用增加自身的畴领域, 当空位密度 ρ_0 较小时, 四物种保持各自独立的畴领域, 又因为被捕食作用, 畴领域不会一直增大, 系统最终保持在较稳定的多畴自组织斑图定态. 而当空位密度 ρ_0 大于临界值 ρ_{0c} 时, 物种个体具有较多的扩散机会, 从而形成 1、3 同盟与 2、4 同盟, 通过双方的对峙与竞争, 引起了双方势力的此长彼消, 最后以其中一个同盟获胜另一个灭亡告终, 系统进入吸收态. 图 1 是双对数坐标图, 描写了不同控制参量 ρ_0 下, 系统物理量 P_{pp} 随时间 t 的动力学演化过程. 图 1 显示当空位密度 ρ_0 很小时, P_{pp} 最终保持为一稳定值, 系统处于较稳定的活性多畴自组织斑图定态, 系统内始终存在着具有捕食关系的最近邻反应对; 当空位密度 ρ_0 大于某一临界值 ρ_{0c} 时, P_{pp} 继续随时间 t 下降, 系统最终进入吸收态, 即物理量 P_{pp} 最终降为 0, 系统内不再存在具有捕食关系的反应对. 图 2 中的实

线是对应的系统相变图,可以看到系统表现出明显的非连续相变行为. 此结果与文献[13]的研究结论非常一致.

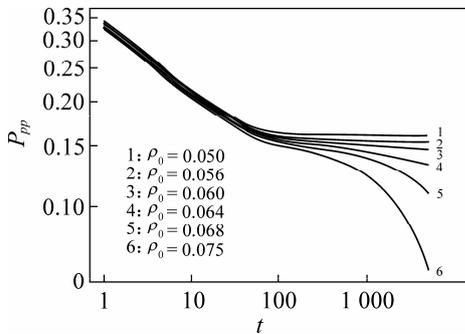


图1 物理量 P_{pp} 随时间 t 的动力学演化

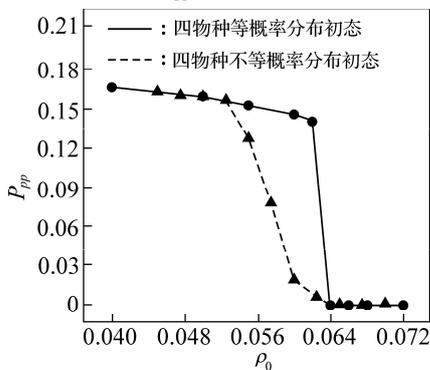


图2 系统的非平衡动力学相变

实际上,生态体系中很难保持各个物种的平等竞争地位,因此我们研究了四物种不等价的初始条件下系统的演化行为. 我们选择系统初态为四物种不等概率随机分布,其中物种1和3的势力小,赋值概率为 $0.15(1-\rho_0)$,而物种2和4的势力大,赋值概率为 $0.35(1-\rho_0)$. 从图2中的模拟结果(虚线),可以发现系统的相变行为为非平衡连续相变. 图2说明当空位密度 ρ_0 很小时,四物种的循环制约使得系统仍回到四物种等价的多畴自组织斑图定态;当空位密度 ρ_0 大于临界值 ρ_{0c} 时,系统迅速进入吸收态;但是,当空位密度 ρ_0 接近临界值 ρ_{0c} 时,系统的动力学演化特性相对于等几率的初始条件表现出明显的不同. 图3则记录了在临界点 ρ_{0c} 附近,系统活性样品的物理量 P_{pp} 随时间 t 的动力学演化过程,系统序参量随时间的变化表现出明显的幂次律 $P_{pp} \propto t^{-\delta}$,同样也表现了连续相变的特性. 为了得到更精确的动力学临界指数 δ 的值,可

通过计算等效指数

$$-\delta(t) = \frac{\lg[P_{pp}(t)/P_{pp}(t/m)]}{\lg m}$$

来得到曲线的局域斜率,其中 m 为常数,我们取 $m=10$,所得结果见图4. 当控制参量偏离临界点 ρ_{0c} 时, P_{pp} 值的局域斜率 δ 逐渐上偏或下偏. 而在临界点 ρ_{0c} 处,系统的动力学临界指数 δ 为 0.40 ± 0.03 . 其临界行为有待进一步的探索.

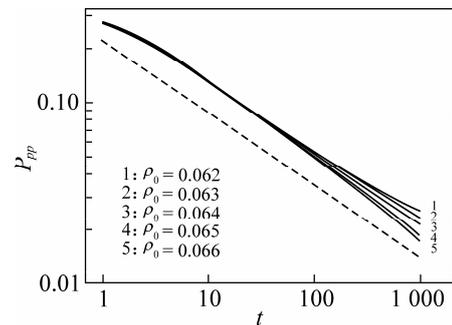


图3 临界点附近,物理量 P_{pp} 的动力学演化

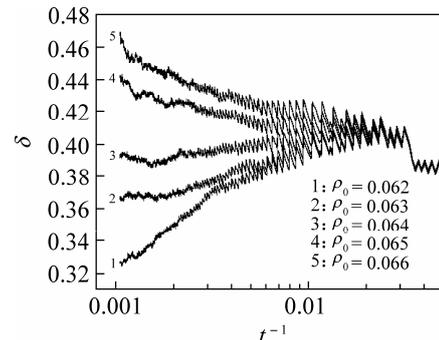


图4 指数 δ 与时间倒数 t^{-1} 的函数图

3 结论

通过调整体系的初始状态,四物种的对称地位被打破,随着外控参数的变化,体系不再等概率地进入两类无穷多的吸收态,体系的非连续相变改变为连续相变,而且体系在临界点的邻域内表现出明显的动力学标度行为 $P_{pp} \propto t^{-\delta}$,其中动力学临界指数 δ 约为 0.40 ± 0.03 .

致谢 感谢导师华达银教授的悉心指导.

参考文献:

[1] Hinrichsen H, Odor G. Roughening transition in a model

- for Dimer adsorption and desorption[J]. Phys Rev Lett, 1999, 56:1 205-1 208.
- [2] Field R J, Burger M. Oscillations and traveling waves in chemical systems[M]. New York: Wiley Interscience, 1985.
- [3] Cross M, Hohenberg P C. Pattern formation outside of equilibrium[J]. Rev Mod Phys, 1993, 65:851-1 112.
- [4] Smith J M. Evolution and theory of games[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- [5] Lotka A J. Analytical note on certain rhythmic relations in organic systems[J]. Proc Natl Acad Sci, 1920, 6:410-415.
- [6] Frachebourg L, Krapivsky P L. Spatial organization in cyclic Lotka-Volterra systems[J]. Phys Rev: E, 1996, 54:6 186-6 200.
- [7] Ben N E, Frachebourg L, Krapivsky P L. Coarsening and persistence in the voter model[J]. Phys Rev: E, 1996, 53: 3 078-3 087.
- [8] Janssen H K. On the nonequilibrium phase transition in reaction-diffusion systems with an absorbing stationary state[J]. Z Phys B, 1981, 42:151-154.
- [9] Grassberger P. On phase transitions in Schlögl's second model[J]. Z Phys B, 1982, 47:365-374.
- [10] Odor G. Universality classes in nonequilibrium Lattice systems [J]. Rev Mod Phys, 2004, 76:663-724.
- [11] Kim M H, Park H. Critical behavior of an interacting Monomer-Dimer model[J]. Phys Rev Lett, 1994, 73: 2 579-2 582.
- [12] Bassler K E, Browne D A. Nonequilibrium critical dynamics of a three species Monomer-Monomer model[J]. Phys Rev Lett, 1996, 77:4 094-4 097.
- [13] Szabó G, Sznajder G A. Phase transition and selection in a four-species cyclic Predator-Prey model [J]. Phys Rev: E, 2004, 69:031911-1-5.

The Effect of Initial Conditions of a Four-species Cyclic Ecological Model

CHEN Ting, JIANG Luo-luo, YING Chong-yang

(Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A four-species cyclic Lotka-Volterra system on a two-dimensional square lattice is studied by Monte Carlo simulation. The influence of initial condition is discussed in two cases. When the initial state is that the sites of the square lattice are occupied by the four species with equal probability, the system exhibits a discontinuous phase transition from a self-organizing poly-domain pattern state to a “defensive alliance” absorbing state. On the other hand, when the initial state is that the sites of the square lattice are occupied by the four species with unequal probability, the discontinuous phase transition changes into a continuous one. The dynamical exponent is calculated to be $\delta = 0.40 \pm 0.03$.

Key words: lattice model; self-organizing poly-domain pattern; defensive alliance

CLC number: O469; Q141

Document code: A

(责任编辑 章践立)