

文章编号:1007-6735(2011)01-0024-06

人类的迁徙行为与社群合作之演化

汪秉宏^{1,2,3}, 杨涵新³

(1. 上海理工大学 复杂系统科学研究中心, 上海 200093; 2. 上海系统科学研究院 复杂适应系统研究所, 上海 200093;
3. 中国科学技术大学 近代物理系, 合肥 230026)

摘要: 通过空间结构(规则格子、连续平面和复杂网络)框架中的空间演化博弈研究, 揭示无偏向的迁徙行为对于合作究竟起何作用. 研究发现: 迁移对于合作起一种普遍的作用, 无论其空间结构如何. 如果迁徙得太快, 合作者将由于无法形成抵抗背叛者攻击的合作者簇团而难于生存. 但若迁徙得慢一些, 则与无迁徙静态的空间博弈比较, 合作将显著强化, 这是由于合作者沿着合作者簇团边界的随时加入积累而使得合作者簇团边界趋于硬厚坚固. 在迁徙速度适中的情况下, 合作者簇团之边界变得比无迁徙静态情况下更为牢固, 边界附近的背叛者可以被合作者吸收同化, 从而使合作者簇团膨胀, 这又使得合作更加方便. 同时还特别研究了引入满意度控制的迁徙对于合作演化所起的作用, 用广泛的模拟加启发式的解释来证实迁徙所起的普遍性的作用.

关键词: 演化博弈; 合作; 迁徙
中图分类号: N 941 **文献标志码:** A

Role of human migration in the evolution of cooperation

WANG Bing-hong^{1,2,3}, YANG Han-xin³

(1. *The Research Center for Complex System Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093 China*; 2. *The Institute for Adaptive Complex Systems, Shanghai Academy of System Science, Shanghai, 200093 China*; 3. *Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract: The role of unbiased migration in cooperation was explored based on the study of spatial evolutionary game in the framework of a variety of spatial structures, including regular lattice, continuous plane and complex network. A striking finding is that migration plays a universal role in cooperation, regardless of the kind of spatial structures. For high degree of migration, cooperators cannot survive due to the failure of forming cooperator clusters to resist attacks from defectors. While for low degree of migration, cooperation is considerably enhanced compared with that in statically spatial game, which is due to the strengthening of boundary of cooperator clusters by the occasionally accumulation of cooperators along the boundary. The cooperator cluster thus becomes more robust than that in static game and defectors nearby the boundary may be assimilated by coop-

收稿日期: 2010-11-25
基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB705500); 国家重大研究计划资助项目(91024026); 国家自然科学基金资助项目(10975126, 10635040); 高校博士点基金资助项目(2093402110032).
作者简介: 汪秉宏(1944-), 男, 教授. 研究方向: 复杂性科学及理论物理. E-mail: bhwang@ustc.edu.cn

erators, so the cooperator cluster expands, which facilitates cooperation. The general role of migration can be substantiated by sufficient simulations associated with heuristic explanations. An aspiration-induced migration was proposed which individuals will migrate to new sites provided that their payoffs are below some aspiration level. It is found that moderate aspiration level can best favor cooperative behavior. In particular, moderate aspiration level enables cooperator clusters to maintain and expand whereas induces defector clusters to disintegrate, thus promotes the diffusion of cooperation among population. The results provide insights into understanding the role played by migration in the emergence of cooperative behavior.

Key words: *evolutionary game; cooperation; migration*

合作是生物系统和社会系统形成的基本成因,理解哪些因素是有利于合作还是妨碍合作,是一个极有意义的问题.在演化博弈的框架内,已经发现了许多有利于合作的机制,如高代价的惩罚^[1-2]、名声^[3-4]、社会多样性^[5-7]等.最近,迁徙在合作行为中的作用受到越来越多的关注^[8-14],这是因为迁徙是自然和社会中的常见现象.如数以百万计的动物每年在非洲热带雨林的大草原上迁徙,成千上万的人们每天都在不同国家之间旅行.关于迁徙的研究,文献[10]考虑了在二维方格子上个体可以某种概率向邻近格点随机运动的方式.与无迁徙情形相比较,这种运动能够保持甚至强化合作.文献[13]研究了由连续平面上可移动个体构成的演化博弈.结果表明,倘若对于背叛的诱惑不是太高,个体移动的速度也不是太大,则合作可以存在.文献[11]提出一种成功-驱动的迁徙策略,这是因为人们往往被追求赢利之本性所驱动激励.具体地说,就是人们有倾向移动到估计可以获得最高报酬的邻近位置.有趣的是,这种迁徙在噪声环境下会引起合作的爆发.文献[14]建议了引进满意度的迁徙:参与者倘若在某一个地方所获取的报酬低于其满意程度,那么他就要迁徙到新的地方.他们发现,中等水平的满意度对于合作行为的形成和发展最为有利.虽然在一些规则格子的空间结构上已经证明迁徙能够促进演化博弈中的合作,但是迁徙对于其它种类的结构例如复杂网络会起什么作用,尚不清楚.究竟是迁徙对于合作起一种普适作用而与何种空间结构无关,还是存在迁徙所起作用对于空间结构的某种依赖关系.笔者研究多种空间结构(连续空间、规则结构及典型复杂拓扑)上的演化博弈的随机迁徙.发现随机迁徙对于合作之促进作用是普适的,而不论是哪种结构.这与直观相违背,因为一般认为个体的移动性会降低合作者簇团之稳定性,这种稳定性通常被看作对于合

作者之生存至关重要.但是本文中用广泛的模拟证实随机迁徙对于合作行为的确起正面的影响,并对于迁徙促进合作之机制进行解释.

1 空间结构上具有随机迁徙行为的博弈模型

采用囚徒困境博弈^[15]进行研究.囚徒困境博弈是两个人之间进行的博弈,每一个人在合作或者背叛这两个策略中独立选择其一.如果两人都选择合作策略,则两人皆获得报酬 R ,如果两人都选取背叛策略,则两人均得到惩罚 P .如果一人选择背叛,而另一人选择合作,则合作者获得收益 S ,而背叛者获得收益 T .4个收益报酬值大小的排序为

$$T > R > P > S$$

于是,不管对手选择何种策略,每一轮囚徒困境博弈所选取的最佳策略应该是背叛.在合作行为的理论与实验研究中,囚徒困境博弈已经吸引了人们的广泛注意.按照通常的做法^[16],设

$$T = b(1 < b < 2), R = 1, P = S = 0$$

式中, b 为背叛诱惑参数.

为了探求迁徙的作用,研究博弈者被置于某种空间结构上的空间博弈.自从文献[16]将空间结构与演化博弈结合在一起后,人们对于揭示从规则格子到复杂网络的各种人群结构究竟会给予合作行为哪些影响,就有了越来越浓厚的兴趣.在空间博弈中,博弈参与者之间的相互作用只限于最近邻之间.通常,任意一个参与者的最近邻是固定不变的.但是现在考虑迁徙存在的情况,一个人的邻居就可能改变,因为随着时间的变化,他会碰到不同的博弈对手.在文献[10]和文献[13]的具有里程碑意义的工作中,已经分别在二维方格和连续平面上的空间博弈中考虑了随机迁

徙. 受到这些工作的启发, 笔者将规则结构上的迁徙推广到复杂网络上, 来揭示人类的迁徙行为对于社群之间的合作究竟是促进还是削弱.

2 迁徙行为对于合作演化所起作用的模拟结果

首先考虑一个具有周期性边界条件的连续正方形平面. 起初, 博弈参与者随机地置于正方形中, 合作者和背叛者以相等的比例随机分布于平面上. 在每一时步, 每人与落在以其当前位置为中心以 r 为半径的圆圈内的所有其他人进行博弈. 每个人按照向最富者学习的原则同步更新其策略, 亦即每个人

将其自身的所获报酬与其所有邻居的所获报酬比较, 看谁的所获报酬最高, 他将按照获取最高报酬的邻居(也可能是他自己)的策略更新其自身的策略. 在策略更新过程之后, 博弈者就将以随机的运动方向和迁移速率 v 移动到一个新位置. v 之大小定义了博弈者在一个典型时步中可以移动的距离. 图 1(a) 显示了不同迁徙速率下的合作者比例 ρ_c 的模拟结果. 可以看到, 与静态博弈 ($v = 0$) 情形比较, 若个体移动速率比较慢 ($v = 0.04$), 则在背叛诱惑参数值变化的相当大范围内, 合作显著增强. 但在另一方面, 太快的移动 ($v = 1$) 将导致合作者的完全消失, 类似于充分混合人群所导致的结果.

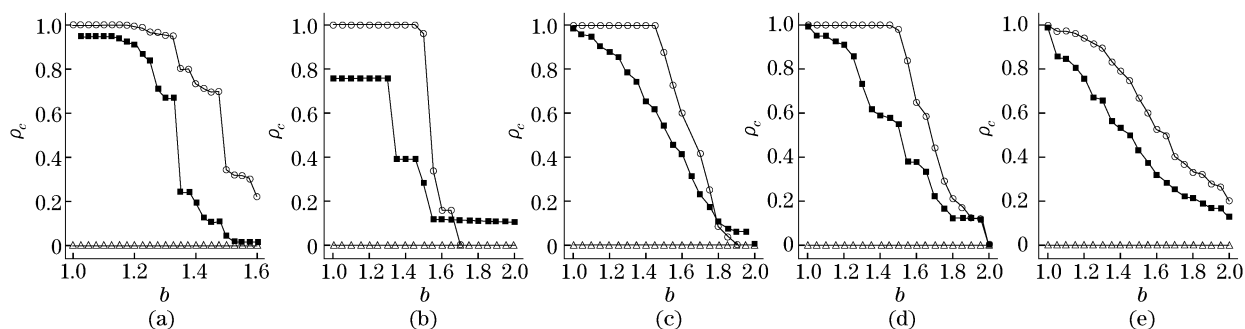


图 1 ρ_c 与 b 的关系

Fig.1 Relation between ρ_c and b

研究包括方格子, 随机图^[17], 小世界网络^[18]和无尺度网络^[19]的各种网络模型上面的个体迁徙. 开始时, 网络的每一节点被一个博弈参与者占据, 参与者的策略(合作还是背叛)是随机分布的. 在每一时步, 每一个博弈者与置于同一节点和临近节点上的参与者博弈. 所有参与者按照向最成功者学习的原则同步更新其策略, 然后每一个参与者以 p 跳跃到一个随机选取的最近邻节点上去(一个节点可以被多于一个参与者占据). 模拟结果显示在图 1(b) - 图 1(e) 上. 可以看到, 与静态无迁徙情形 ($p = 0$) 比较, 低的 p ($p = 0.001$) 在 b 的很大范围内都是促进合作的, 除了在方格子和随机图情形, 大 b 值下的合作者比例会低于 $p = 0$ 静态情形. 这与连续平面的结果类似. 但对于高 p ($p = 1$), 背叛者将占据整个人群.

计算中参与者位于边长为 $L = 20$ 并有周期性边界条件的连续正方形平面中, 互作用半径 $r = 1$. 图 1(a) 中的实方块、空心圆及空心三角形分别对应 $v = 0$ 、 $v = 0.04$ 和 $v = 1$ 的结果. 图 1(b) 到图 1(e) 分别是将博弈者放在方格、随机图、小世界网络和无

尺度网络上的结果. 方格和无尺度网络平均度为 4, 随机图和小世界网络的平均度为 6. 实心方块、开心圆圈和开心三角显示了跳跃概率为 0, 0.001, 1 的模拟结果. 人口数为 1 024, 合作者的平衡比例是在 10^5 时步的暂态, 过程后再对 10^5 时步求平均得到.

图 2(a) 表示博弈者位于边长为 $L = 20$ 的连续正方形平面中迁徙, $b = 1.35$, $r = 1$. 图 2(b) 表示博弈者在各种网络上迁徙, $b = 1.5$, 网络平均连接度 $z = 4$ (对于 SL 和 SF) 或者 $z = 6$ (对于 RG 和 SW). 人口数为 1 024, 每一个数据点相当于 1 000 次模拟的平均, 亦即是对于同一类图的 10 个不同实现的 100 次平均的结果.

由图 2, 可以发现, 与无迁徙的空间博弈相比较, 低的 v 或 p 可以显著地促进合作, 而太高的 v 或 p 则有利于背叛. 这在定性上与博弈所处的空间结构无关. 研究当 b 固定不变时, 合作者比例随 v 或 p 的变化. 随着 v 和 p 的增加, 合作者比例单调下降. 众所周知^[20-21], 在空间博弈中, 合作者是通过簇团的形成而保存的, 在这种合作簇团中, 相互合作的好处超过面对背叛者的损失, 从而能够使合作得

以保持. 结合图1与图2, 可以看到迁徙对于合作的作用是多重的. 对于高的 v 或 p , 合作是抑制的, 因为合作簇团难于形成, 这是由于邻居的变化过于频繁. 没有簇团结构的保护, 合作者很难生存. 而对于低程度的迁徙, 迁徙对于合作行为如何影响, 不太容易想象. 一种启发式的解释是, 在合作者簇团构造之后, 由于迁徙而引起的沿着边界的小扰动能够触发合作者簇团之膨胀, 从而增大合作者比例.

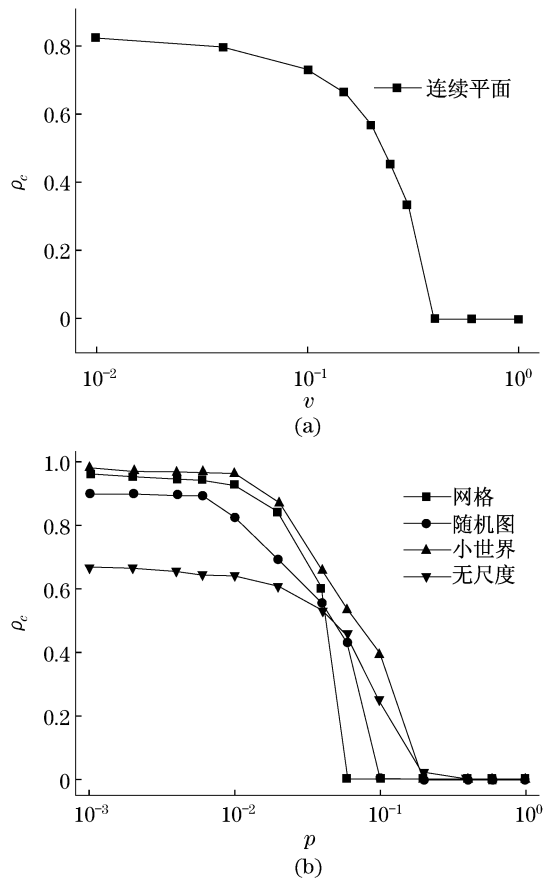


图2 ρ_c 与 v 或 p 的关系

Fig.2 Relation of ρ_c versus v and p

为了直观地理解合作者簇团周围的扰动对于合作的影响, 构造方格子上一个被背叛者所包围的十字架合作簇团(包括5个合作者), 见图3. 图中红色球代表背叛者, 蓝色球代表合作者. 每一个博弈者与

处在相同方格或者其紧邻格子上的博弈者进行博弈. 背叛诱惑参数 $b = 1.4$. 在一个合作者从簇团边界移动到簇团之核心后, 合作者簇团扩大. 如果博弈者是不可移动的, 那么十字架合作簇团是稳定的, 保持不变. 而当有迁徙存在时, 簇团边界处所发生的情况可分为4类: a. 在边界处的合作者进入背叛者簇团; b. 边界处的一个背叛者侵入合作者簇团; c. 一个背叛者离开边界进入背叛者簇团; d. 一个合作者从边界移动进入其合作者簇团. 在a类情况中, 侵入背叛者簇团的合作者转变为背叛者. 在b类情况中, 侵入的背叛者转变为合作者. 在c类情况中, 没有任何变化发生. 可见a-c类情况对于系统中的合作者比例并无很大的改变. 但是, 在d类情况中, 合作者簇团的地域将向方格子的其它区域扩大, 合作者数目从5增加到12, 如图3所示. 所以, 就是c类情况的出现, 推动了合作者在人群中的流行普及. 一般来说, 多个合作者出现在同一个节点这种方式代表了合作者簇团边界的强化(沿着边界处合作者密度提高). 一个直接的结果是, 沿边界处的合作者所获报酬增加, 边界附近的背叛者将被合作者吸收同化. 因此, 合作者簇团扩大, 合作增强.

为了更清楚看到低程度的迁徙如何影响合作者簇团和背叛者簇团的演化, 开始便在一个正方形平面的中心区域放置一群合作者, 其余区域则分布背叛者. 图4(见下页)是边长为 $L = 20$ 的正方形平面上合作者(蓝色)与背叛者(红色)分布之快照. 开始时刻处于平面中央区域的是合作者(合作区域为大小是 10×10 的小正方形), 处在周边其它区域的都是背叛者, 整个人群的数目为500. $q = 1, b = 1.5$. 图4(a) - 图4(c)显示了当 $v = 0.1$ 、时间 t 为0, 263, 1315时的快照, 及 $v = 0$ 时系统达到平衡的快照. 可以看到, 对于低速率的迁徙, 随着 t 的增加, 合作者簇团逐渐膨胀扩大, 最终合作者布满整个人群. 而对于博弈者静止不动的无迁徙情形, 合作者簇团几乎不随时间而变, 见图4(d).

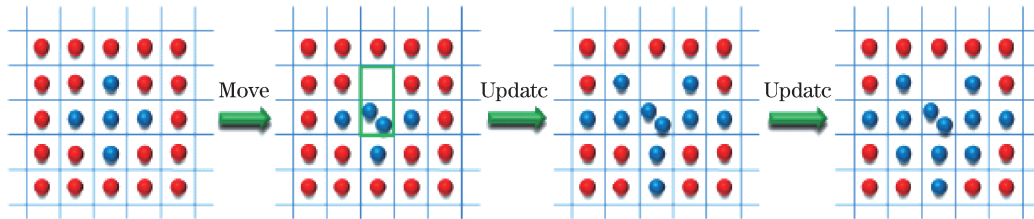


图3 团簇周围扰动对合作影响

Fig.3 Tmpalt of pertbatans arolmd olustors on cooperatlons

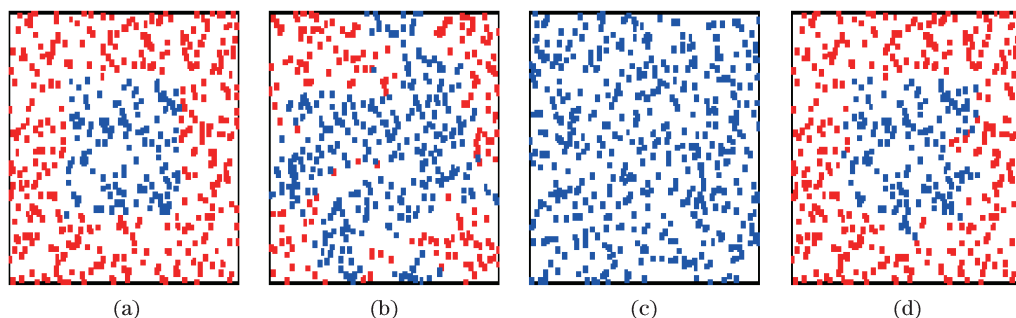


图4 合作者与背叛者的分布

Fig.4 Distribution patterns for cooperators and defectors

3 由满意度控制的迁徙行为对于合作行为的影响

在真实生活中,人们仅仅在对当前所处的环境不满意才决定迁徙.动物之所以要迁移到另一地方,是因为它们已经不可能在原来的栖身之处找到足够的食物.受到这一现象的启示,引进满意度控制的迁徙来研究合作之演化.

博弈参与者仍置于方格子阵列中.每一方格或空或被一个博弈者占据.在每一时步,一个随机选择的个体将与其4个相邻格子上的博弈者进行博弈,然后累加搜集其博弈收益.如果这一个体的总收益达到或者超过其满意程度,那么他将停留在当前所处位置.否则,他就要移动到在其4个相邻近的格子中随机选择的一个空格子中去.

一个博弈者个体 i 的满意程度定义为

$$P_{ia} = k_i A$$

式中, k_i 为第 i 个体之邻居数目; A 为一个满意度的控制参数.

图5为在不同 b 时,合作者比例 ρ_c 随 A 的变化.模拟是在 100×100 网格进行的,网格被个体占据比例为 $f = 0.5$.平衡态的合作者比例是经过20 000时步的暂态过渡之后对于2 000时步的平均结果.每一时步是由所有参与者平均而言都经过一次策略更新而构成.所得到的结果对于100次不同实现的平均^[14].可以看出,存在满意度的一个中等适度最佳区域,能够得到最强的合作.对于低的满意程度,大多数参与者是不动的.因而,合作者簇团与背叛者簇团共存,在稳态下几乎保持不变,阻止合作者在人群中的散布.对于太高的满意程度,大多数参与者都在运动.由于邻居的频繁变化,合作者不能够组成簇团而抵抗背叛者的侵入.在中等适度的满

意度下,合作者就能够形成稳定的簇团,这是因为相互合作的好处保证他们能够很安逸地停留在合作者簇团里,而背叛者则须避免聚集在一起,因为彼此背叛的报酬是低于满意程度的.所以背叛者簇团解散,背叛者将运动.一个运动的背叛者,如果与合作者簇团接触,或者遇到一个在背叛者及其邻居中具有最高收益的合作者,将变为合作者.因此,对于中等适度的满意程度,合作者簇团不仅能够保持,而且还能够由于迁徙之存在而膨胀扩大.

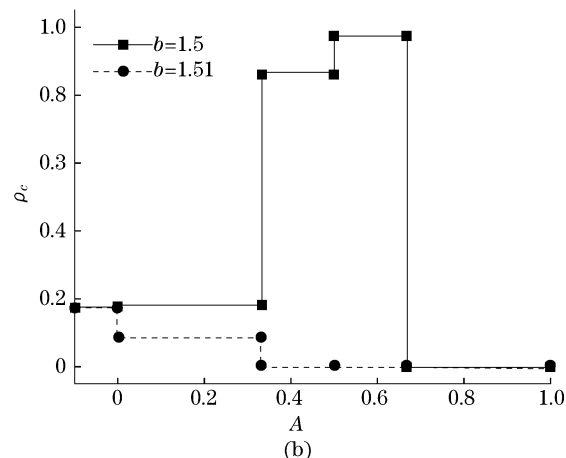
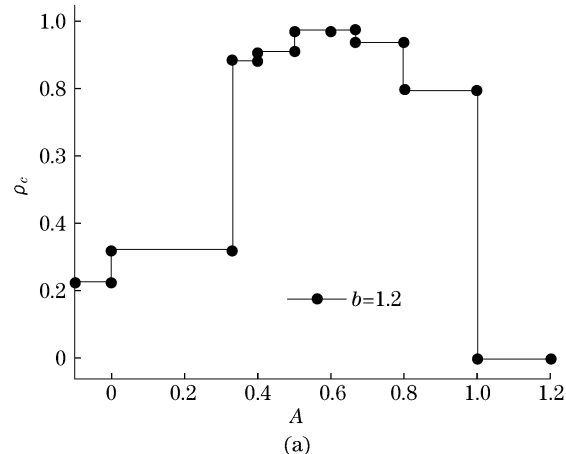
图5 ρ_c 随 A 的变化Fig.5 Relation of ρ_c versus A

图6为运动合作者数目 N_{mc} 及运动背叛者数目 N_{md} 随时间 t 之变化. 在 100×100 网格上空格比例为 50%, $b = 1.5$, $A = 0.6$. 所得结果是对 100 次不同实现的平均^[14]. 图6显示出, 在演化过程期间, 运动背叛者数目要比运动合作者数目多得多.

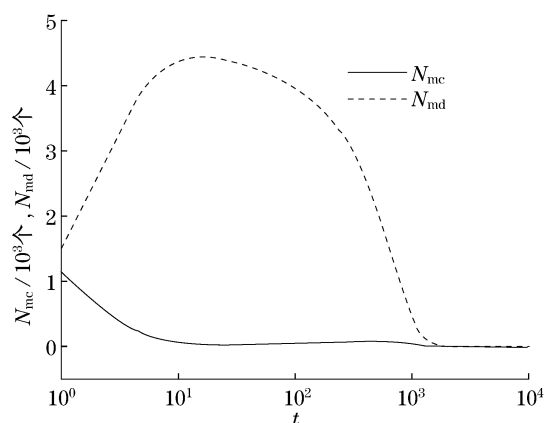


图6 N_{mc} 和 N_{md} 随 t 的变化

Fig.6 Relations of N_{mc} and N_{md} versus t

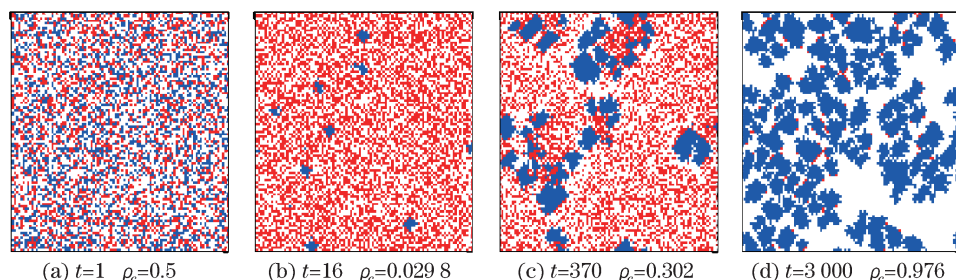


图7 不同时刻合作者与背叛者的典型分布

Fig.7 Typical distribution patterns for cooperators and defectors

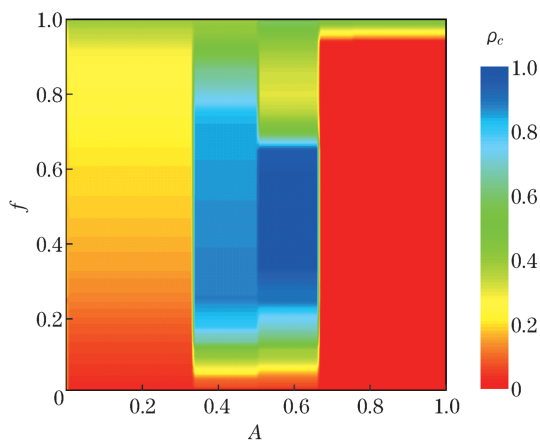


图8 ρ_c 与 f 和 A 的关系

Fig.8 Relation of ρ_c versus f and A

4 结论

研究了空间囚徒困境博弈在各种空间结构框架下, 迁徙行为对于合作的作用. 研究发现: 尽管高度的

图7为方格阵列 ($b = 1.5$ 和 $A = 0.6$) 上不同时刻 t 合作者和背叛者的典型分布快照. 蓝色、红色和白色分别表示合作者、背叛者和空格. 模拟是对 100 $\times$ 100 网格 (空格比例为 50%) 所作的^[14]. 图7(a)显示了开始时刻 ($t = 1$), 合作者和背叛者是以相同比例随机分布的. 图7(b)显示了合作者和背叛者分别组成簇团, 但在这一时刻, 合作者密度低于初始状态的密度, 这是因为在稳定的合作者簇团形成之前合作者受到太多的背叛者攻击. 随着时间的增加, 合作者簇团膨胀, 背叛者簇团收缩, 见图7(c). 最后, 合作者在人群中占压倒多数, 背叛者仅仅分散地存活于合作者簇团附近见图7(d). 这说明中等适度的满意度, 可以有效地触发背叛者簇团之解体崩塌和激励合作者簇团之膨胀扩大. 图8也为在一个 100×100 网格上, ρ_c 作为 A 和 f 的函数. $b = 1.5$, 所得结果是对 100 次不同实现的平均^[14]. 图8也显示了合作者比例随满意度和方格阵列占据比例之变化.

迁徙因破坏合作者簇团的形成而造成合作者的灭亡, 但低度的迁徙能够通过沿着合作者簇团边界增加合作者密度而显著增强合作. 由于合作者沿着边界处的积聚, 相互合作的好处可以超越面对边界附近的背叛者的损失, 从而不仅能够使簇团中的合作者得以保持, 而且能够使合作者簇团膨胀, 与静态无迁徙空间博弈形成鲜明对照. 弱度迁徙所导致的合作者边界的增厚对于合作之增强起关键作用, 这与演化博弈发生在什么空间结构上无关. 如果迁徙行为受到满意度的控制, 则本文阐明了中等适度的满意度, 可以有效地触发背叛者簇团解体并激励合作者簇团膨胀, 从而给出对于合作行为的最强促进作用.

参考文献:

- [1] HAUERT C, TRAULSEN A, BRANDT H, et al. Via freedom to coercion: The emergence of costly punishment[J]. Science, 2007, 316: 1905 - 1907.

(下转第 88 页)