

基于演化博弈研究 Moran 过程对合作的影响

周建新¹ 刘明华¹ 沈小伟^{1*} 吴金秀²

¹(华北理工大学电气工程学院 河北 唐山 063210)

²(华北理工大学以升创新教育基地 河北 唐山 063210)

摘要 利用 Repast 仿真软件建立合作行为演化模型,研究空间囚徒博弈中 Moran 过程对合作行为演化的影响。在策略更新过程中加入噪声,研究该模型对噪声的敏感程度。仿真结果表明,与学习最优规则相比,个体采用 Moran 过程进行策略更新时合作水平明显提高,Moran 过程表现出明显的优越性。同时 Moran 过程对噪声不敏感,抗干扰能力较强。

关键词 合作 空间互惠 囚徒困境博弈 Moran 过程 噪声

中图分类号 TP3 文献标志码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.11.041

EFFECT OF MORAN PROCESS ON COOPERATION BASED ON EVOLUTIONARY GAME THEORY

Zhou Jianxin¹ Liu Minghua¹ Shen Xiaowei^{1*} Wu Jinxiu²

¹(College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

²(College of Yisheng, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract The Repast simulation software is used to build a cooperative behavior evolution model to study the effect of the Moran process on the evolution of cooperative behavior in spatial prisoner's dilemma game. Noise is added to the strategy update process to study how sensitive the model is to noise. The simulation results show that compared with the learning optimal rule, the level of cooperation is significantly improved when individuals use the Moran process to update their strategies, and the Moran process shows obvious superiority. At the same time, the Moran process is not sensitive to noise and has strong anti-noise ability.

Keywords Cooperation Spatial reciprocity Prisoner's dilemma game Moran process Noise

0 引言

生命起源于合作,2005 年 Science 杂志就已将“合作行为如何演化”这一问题列入 25 个 21 世纪最突出的科学问题之中^[1]。如何达成和维持合作行为,则是当前经济学、生态学、社会学及信息科学研究的重要问题。

然而,现实生活中的合作往往并不容易达成。当个人利益与集体利益冲突时,人们出于自私会选择对自己有利的策略,而这种策略往往是对集体有害的,从而导致个人和集体的利益均受损,最终导致合作行为

很难达成^[2]。

2006 年,Nowak 等^[3]总结了生物之间“合作”得以达成的五种机制:亲缘选择^[2]、直接互惠^[4-5]、间接互惠^[5-6]、空间互惠^[7]、群体选择。空间互惠作为促进合作的一种重要机制,引起了诸多学者的广泛关注。相关学者对空间互惠的研究不断深入,提出了很多促进合作的机制,如模仿、惩罚、信誉和奖励等机制。Helbing 等^[8-9]研究了噪声环境中成功驱动型的迁移机制对合作演化的影响,结果表明合作水平随着噪声强度的增大而降低,但是适度的噪声值可以加速个体向合作行为的转变,合作水平有一定程度的提高。廖列法等^[10]研究了移动个体中噪声对合作行为的影响,结果

表明噪声和移动性同时存在时,适中的噪声值能够促进合作行为的涌现。Zhang 等^[11]研究了空间公共物品博弈中宽容的惩罚对合作演化的影响,结果表明宽容的惩罚通过加强空间互惠促进了合作。Guo 等^[12]研究了信誉与网络连接权重的协同演化,连接权重随着信誉的增强而增强,结果表明信誉与连接权重的协同演化能够促进合作,并且连接权重越强,合作水平越高。

除上述机制外,不同的策略更新规则对个体行为的影响也各不相同。Vainstein 等^[13]研究了基于学习最优规则的移动个体合作行为的演化,结果表明移动性具有双重作用:合作者可以通过移动逃避背叛者,向合作者团簇移动而提高合作水平;合作者种群可以被移动的背叛者入侵,导致合作的瓦解。Zhang 等^[14]提出了一种新的策略更新规则,即个体根据周围环境选择规则,研究表明这种新的规则在智能个体利用不同邻居的信息时能够促进合作,合作水平明显提高。Danku 等^[15]研究了雪堆博弈和猎鹿博弈中创新与学习最优两种更新规则的竞争,结果表明更新规则的竞争与传播取决于收益参数,即博弈模型的差异。

上述很多文献研究了策略更新规则对合作行为的影响^[16],包括学习最优规则、创新规则、Fermi 函数^[17]等,但是关于 Moran 过程的研究还比较少。因此本文针对 Moran 过程进行深入研究,建立合作行为演化模型并进行仿真,分析并讨论空间囚徒博弈中 Moran 过程对合作行为的影响。

1 模型描述

1.1 博弈范式

本文采取囚徒博弈作为研究模型,其博弈过程中个体两两进行交互,个体在合作和背叛两者中独立选择其一。如果双方都选择合作,则都获得报酬 R ; 如果双方都选择背叛,则都获得惩罚 P ; 如果一个个体选择背叛,另一个个体选择合作,则合作者获得收益 S , 而背叛者获得收益 T 。图 1 为囚徒博弈收益矩阵,其中参数满足: $T > R > P > S$ 且 $R > (T + S)/2$ 。Nowak 等^[18]提出了一种简化的囚徒博弈模型,即 $R = 1, S = P = 0, T = 1.4$, 其分析方便,因此本文与其保持一致。

		B	
		合作	背叛
A	合作	R, R	S, T
	背叛	T, S	P, P

图 1 囚徒博弈收益矩阵

1.2 策略更新规则

1.2.1 学习最优规则

当个体采取学习最优规则时,比较自己和所有邻居的收益大小,选择产生最高收益的邻居,学习其博弈策略作为自己下一次的博弈策略^[13]。如果不同邻居的收益相等,则随机选择一个邻居作为学习目标。

1.2.2 Moran 过程

Moran 过程是一种根据适应度进行个体选择的方法,描述了有限种群的演化^[19-20]。Moran 过程根据个体生和灭的先后顺序分为生灭过程和灭生过程。生灭过程即先选择个体进行繁殖,而后选择个体灭亡;灭生过程则与上述顺序相反^[21]。采用生灭过程进行策略更新时,个体 i 被选择出来繁殖后代的概率 P_i 正比于其适应度;而采用灭生过程进行策略更新时,个体 i 被选择出来灭亡的概率 P_i 反比于其适应度。 P_i 计算公式如下:

$$P_i = \frac{w_i}{\sum_{j=0}^n w_j} \quad (1)$$

式中: w_i 为个体 i 的收益; n 为种群个体数目。

生灭过程中,以正比于个体适应度的概率选择个体进行繁殖,子代放在其附近,而后随机选择个体灭亡;灭生过程中,以反比于个体适应度的概率选择个体灭亡,而后随机选择个体进行繁殖,子代放在其附近^[20]。

1.3 演化过程

(1) 初始化:在 50×50 的二维网格中随机放置个体,密度为 0.7,个体随机选择合作或背叛。

(2) 博弈:个体同其所有的 von Neumann 邻居进行囚徒博弈并计算收益。

(3) 策略更新:根据策略更新规则进行策略更新。

(4) 移动:个体在其 von Neumann 邻居中随机选择一个空位,以一定的移动概率移动到该空位上,若邻居中没有空位置,则不移动。

(5) 重复步骤(2) - 步骤(4),直至系统达到停止条件为止。

2 仿真结果及分析

本文利用 Repast 仿真软件^[22]对演化博弈过程进行建模并仿真,每组数据运行 100 次,每次运行 10 000 步。

2.1 学习最优规则对个体行为演化的影响

图 2 为学习最优规则演化结果截图,从左至右移动概率依次为 0、0.01、0.1、0.2 和 0.5,圆形代表合作

者,方形代表背叛者。图 3 为学习最优规则下合作水平随移动概率的变化。



图 2 学习最优规则演化结果截图 2 仿真结果及分析

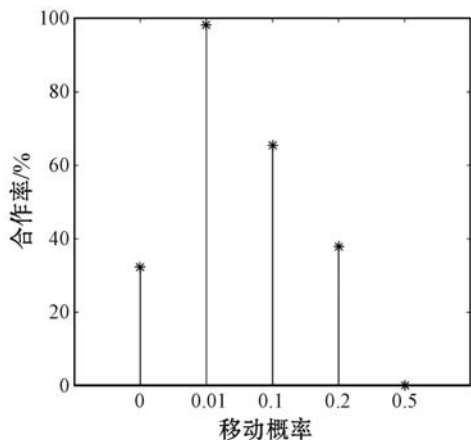


图 3 学习最优规则下合作水平随移动概率的变化

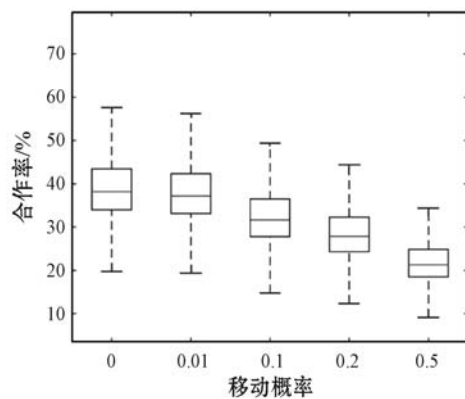
当移动概率为 0 即个体静止时,合作水平约为 32.5%。由于个体静止,合作者只能和周围的邻居形成较小的团簇,合作水平较低。当移动概率为 0.01 时,个体合作水平达到 100%。合作者能够通过移动来逃避背叛者,与其他合作者形成较大团簇来避免背叛者的入侵,直至背叛者全部消失。当移动概率大于 0.01 时,合作水平随着移动概率的增大而降低。随着移动概率的增大,背叛者对合作者种群的入侵作用增强,合作者团簇不断被入侵瓦解,合作水平不断降低。因此,学习最优规则下较低的移动概率促进了合作行为的发生。

2.2 Moran 过程对个体行为演化的影响

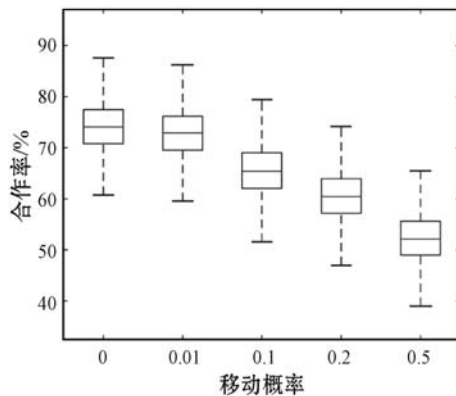
2.2.1 无噪声

图 4 为 Moran 过程下合作水平随移动概率的变化,

采用箱形图表示。图 5 为 Moran 过程演化结果截图,其中:上图为生灭过程演化结果,下图为灭生过程演化结果;从左至右移动概率依次为 0、0.01、0.1、0.2 和 0.5;圆形代表合作者,方形代表背叛者。



(a) 生灭过程



(b) 灭生过程

图 4 合作水平随移动概率的变化

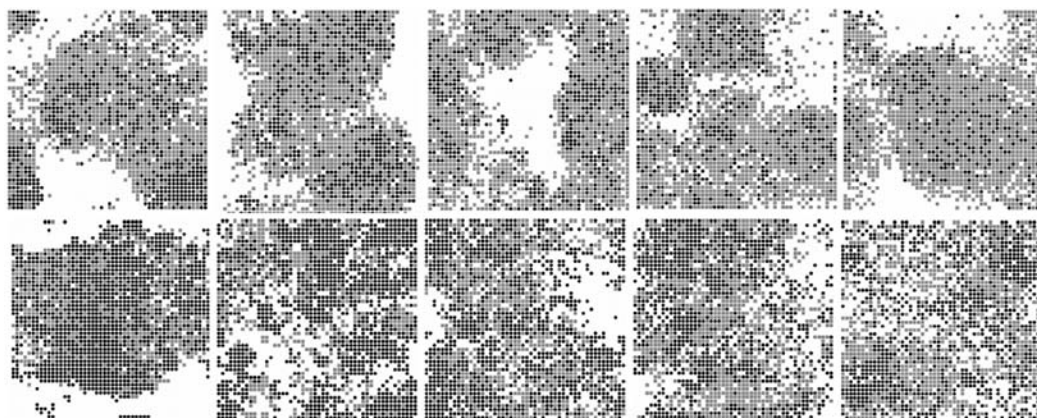


图 5 无噪声 Moran 过程演化结果截图

个体采用 Moran 过程进行策略更新时,被选中的个体繁殖的子代以父代为中心由内向外寻找空位置,因此合作者和背叛者是混合的。从演化截图上看,无论是生灭过程还是灭生过程,背叛者的数目都随着移动概率的增大而增多。但是灭生过程下合作者更多,合作水平更高。

从箱形图上看,不论是生灭过程还是灭生过程,随着移动概率的增大,合作率平均值都在不断降低。移动性使收益较高个体的子代不断移动,可能会移动到对自己不利的位上,因此随着移动概率的增大,移动性对合作的形成及维持极为不利。

与学习最优规则相比,在移动概率为 0 即个体静止时,灭生过程的合作水平高于学习最优规则。但是,

移动概率 0.01 条件下 Moran 过程的合作水平低于学习最优规则。随着移动概率的增大,即移动概率为 0.1、0.2、0.5 时, Moran 过程的合作率均高于学习最优规则。因此,在移动概率较大的情况下, Moran 过程表现出明显的优越性,更能促进合作行为的发生,提高合作水平。

2.2.2 有噪声

图 6 为噪声强度 $k=0.01$ 时 Moran 过程演化结果截图,其中:上图为生灭过程演化截图,下图为灭生过程演化截图;从左至右移动概率依次为 0、0.01、0.1、0.2 和 0.5;圆形代表合作者,方形代表背叛者。图 7 为噪声强度 $k=0.01$ 时 Moran 过程下合作水平随移动概率的变化。

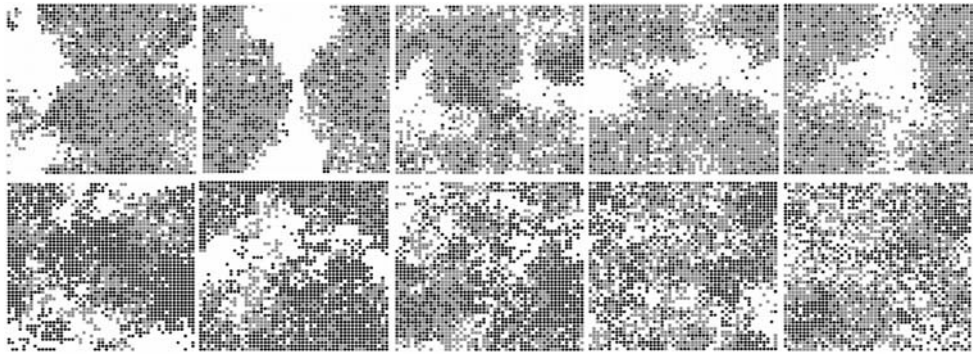
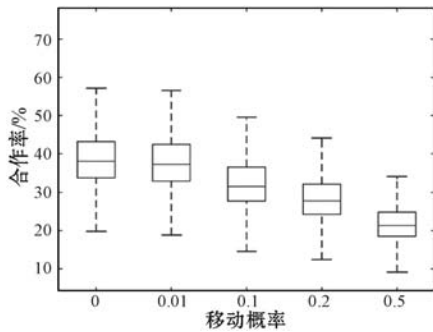
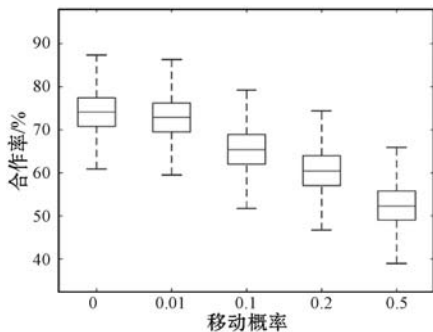


图 6 噪声强度 $k=0.01$ 时 Moran 过程演化结果截图



(a) 生灭过程



(b) 灭生过程

图 7 噪声强度 $k=0.01$ 时合作水平随移动概率的变化

从演化截图上看,背叛者数目随着移动概率的增大而增多,合作水平随着移动概率的增大而明显降低。从箱形图上看,无论是生灭过程还是灭生过程,合作水平平均随着移动概率的增加而降低。

表 1 为不同更新规则和不同移动概率下的平均合作水平。与无噪声 Moran 过程仿真结果相比,虽然演化截图不一样,但合作率相差不大,最大相差 1.7%,说明噪声对合作水平的影响很小。因此,基于 Moran 过程的个体行为演化模型对噪声不敏感,抗干扰能力较强。

表 1 平均合作水平 %

策略更新规则	移动概率				
	0	0.01	0.1	0.2	0.5
学习最优规则	37.9	100	65.6	35.8	0
生灭过程无噪声	37.6	36.5	31.4	27.3	21.2
灭生过程无噪声	74.6	72.5	66.5	58.9	51.6
生灭过程有噪声 $k=0.01$	38.3	37.5	30.6	26.8	22.4
灭生过程有噪声 $k=0.01$	75.8	73.2	64.8	57.6	52.1

3 结 语

基于 Moran 过程的个体行为演化为合作行为的促进提供了新的思路。本文利用 Repast 博弈仿真环境构建了基于 Moran 过程的合作行为演化模型,并进行仿真分析,然后结合噪声因素分析了该模型对噪声的

敏感程度。仿真结果表明,与学习最优规则相比,在移动概率较大时,个体采用 Moran 过程进行策略更新时合作水平明显提高,Moran 过程表现出明显的优越性。同时,Moran 过程对噪声不敏感,抗干扰能力较强。

随着演化博弈论的发展,未来研究可以将本文模型推广到其他复杂网络上,比如随机网络、小世界网络、无标度网络和自相似网络等,相信其对个体行为的演化会有不同的影响。

参 考 文 献

- [1] Donald K, Colin N. What don't we know? [J]. *Science*, 2005,309(5731):75.
- [2] 道金斯. 自私的基因[M]. 卢允中,张岱云,陈复加,等译. 北京:中信出版社,2012.
- [3] Nowak M A. Five rules for the evolution of cooperation[J]. *Science*,2006,314(5805):1560 - 1563.
- [4] 阿克塞尔罗德. 合作的进化[M]. 吴坚忠,译. 上海:上海人民出版社,2017.
- [5] 黄璜. 合作进化模型综述[J]. *北京大学学报(自然科学版)*,2011(1):185 - 192.
- [6] Nowak M A, Sigmund K. Evolution of indirect reciprocity [J]. *Nature*,2005,437(7063):1291 - 1298.
- [7] Kokubo S, Wang Z, Tanimoto J. Spatial reciprocity for discrete, continuous and mixed strategy setups [J]. *Applied Mathematics and Computation*,2015,259:552 - 568.
- [8] Helbing D, Yu W J. The outbreak of cooperation among success-driven individuals under noisy conditions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,2009,106(10):3680 - 3685.
- [9] Helbing D, Yu W J. Migration as a mechanism to promote cooperation [J]. *Advances in Complex Systems*,2008,11(4):641 - 652.
- [10] 廖列法,孙玮,刘朝阳. 基于演化博弈研究移动和噪声对合作的影响[J]. *计算机应用与软件*,2015,32(3):53 - 56.
- [11] Zhang S H, Zhang Z P, Wu Y E, et al. Tolerance-based punishment and cooperation in spatial public goods game [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*,2018,110:267 - 272.
- [12] Guo H, Chu C, Shen C, et al. Reputation-based coevolution of link weights promotes cooperation in spatial prisoner's dilemma game [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*,2018,109:265 - 268.
- [13] Vainstein M H, Silva A T C, Arenzon J J. Does mobility decrease cooperation? [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2007,244(4):722 - 728.
- [14] Zhang Y F, Shu G, Li Y. Strategy-updating depending on local environment enhances cooperation in prisoner's dilemma game [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2017, 301:224 - 232.
- [15] Danku Z, Wang Z, Szolnoki A. Imitate or innovate: competition of strategy updating attitudes in spatial social dilemma games [J]. *EPL (Europhysics Letters)*,2018,121(1):18002.
- [16] 刘雪松. 基于策略更新机制的合作演化研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.
- [17] Cui G H, Wang Z, Yang Y C, et al. Evolution of cooperation under the influence of environments on individual-performed interactions [J]. *International Journal of Modern Physics C*,2018,29(8):1850070.
- [18] Nowak M A, May R M. Evolutionary games and spatial chaos [J]. *Nature*,1992,359(6398):826 - 829.
- [19] Nowak M A. 进化动力学[M]. 李镇清,王世畅,译. 北京:高等教育出版社,2010.
- [20] 谭少林,吕金虎. 复杂网络上的演化博弈动力学——一个计算视角的综述[J]. *复杂系统与复杂性科学*,2017,14(4):1 - 13.
- [21] 高雷阜,毕玲玲. 具有选择差异的随机博弈进化动力系统 [J]. *生物数学学报*,2015,30(1):161 - 167.
- [22] 王宇宾. 基于 Repast Symphony 平台的建模与仿真技术 [J]. *计算机系统应用*,2015,24(10):17 - 22.
- ~~~~~
- (上接第 177 页)
- [19] 刘生礼,唐敏,董金祥. 遗传模拟退火算法在约束求解中的应用 [J]. *中国图象图形学报*,2003,8(8):938 - 945.
- [20] 王安祥,张晓军,曹运华. 遗传模拟退火算法在玻璃和晶体色散方程参量反演中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2015,44(11):3197 - 3203.
- [21] 张之猛,刘伯胜. 遗传模拟退火算法用于浅海声速反演的仿真研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*,2006,27(4):505 - 508,513.
- [22] 章颖,梁漫春,黎岢,等. 基于遗传-模拟退火算法的源项反演方法研究 [J]. *核电子学与探测技术*,2014,34(4):451 - 455,473.
- [23] Batista J D C, Sampaio E E S. Magnetotelluric inversion of one- and two-dimensional synthetic data based on hybrid genetic algorithms [J]. *Acta Geophysica*, 2019, 67(1):1365 - 1377.
- [24] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2002.
- [25] 王华军. 正余弦变换的数值滤波算法 [J]. *工程地球物理学报*,2004,1(4):329 - 335.
- [26] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [27] 李锋平,杨海燕,邓居智,等. TEM 正演响应计算的几种频域转换方法对比 [J]. *物探与化探*,2016,40(4):743 - 749.
- [28] Marquardt D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters [J]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963,11(2):431 - 441.