

非对称合作系统的模型研究

贺军州 著



科学出版社

非对称合作系统的模型研究

贺军州 著

本书由云南财经大学博士基金和国家自然科学基金(31560134)资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

合作行为广泛存在于包括人类社会在内的几乎所有的生命系统中,然而对合作问题的理论解释却一直未得到有效解决.经典合作理论面临困境的本质原因可能是其对合作方之间具有非对称相互关系的忽视.本书将非对称相互关系引入经典的博弈模型,探讨了非对称合作系统中合作行为的演化及其稳定性维持,从非对称的角度揭示了合作系统的演化动力与系统维持机制.研究结果为合作系统中合作模式的多样化提供了合理解释,对相关研究领域理解合作行为的演化有一定的理论启示和借鉴意义.

本书可作为应用数学、理论生态学、行为经济学以及经济管理相关专业的高年级本科生或研究生教材,也可供从事数学、生态学以及经济管理等专业的科研工作者学习参考.

图书在版编目(CIP)数据

非对称合作系统的模型研究/贺军州著. —北京: 科学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-03-060794-2

I. ①非… II. ①贺… III. ①合作对策-系统模型-研究 IV. ①0225

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019) 第 044286 号

责任编辑: 王丽平 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 10 插页: 4

字数: 184 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

理性的悖论

经济学与生命科学理论大厦竣工前，天边飘来几片云朵。

从亚当·斯密和达尔文的时代开始，经济学和生物学经过了二百多年的蓬勃发展，到今天，一切行为或生命现象都可以用自私的基因或理性行为给予解释，经济学和生命科学的理论大厦似乎已经完成，就等着畅饮庆功的美酒了。

然而，这个理论大厦似乎有隐患，这个隐患将可能导致这座大厦的竣工变得遥遥无期，甚至会导致大厦的崩塌和重建。这个理论大厦的基石是这样的假设，我们假定个体或选择单元都是自私或理性的，这些自私或理性的个体通过竞争方式，形成并维持自然或社会系统的稳定性。

经济学鼻祖亚当·斯密和进化生物学创始人达尔文在他们的理论提出之初，就已经意识到该理论可能面临的困境。亚当·斯密在他的《国富论》中认为，人是自私的，正是在每个个体基于自私的理性考量驱动下，整个社会才形成一个稳定高效的社会系统。但亚当·斯密当时就意识到自己理论的局限性：自私性无法解释人类社会广泛存在的利他性合作行为，有些利他主义者甚至愿意牺牲自己的生命去帮助别人。亚当·斯密在写《国富论》之前就写了另外一部专著《道德情操论》，并穷其一生都在对该书进行反复修订。在该书中，他又认为人是有道德的，因而可以是无私的。显然，亚当·斯密在他最重要的两本专著中，对人做了一个相互矛盾的假设。科学史上把这一著名的理论矛盾称为“斯密之谜”，至今没有有效理论来回答这一历史之谜。

进化生物学创始人达尔文在撰写《物种起源》一书时也意识到“适者生存”这一概念的局限性。事实上像蜜蜂、蚂蚁等社会性昆虫，很多工蜂或工蚁完全不繁殖，而利他性地帮助蜂后或蚁后繁殖。达尔文从《国富论》得到启发而提出的“适者生存”的概念显然难以解释这类利他性的生物学现象，他由于当时无法给出其他合理解释，就以“这就是一个生物适应性现象”而一笔带过。

合作行为，尤其是利他性的合作行为如何演化而来，这是经济学“理性人”概念难以解释的，同样，达尔文的自然选择理论也难以令人信服。从二十世纪六十年

代开始,为解决这个难题,生物学家陆续提出了亲缘选择理论和互惠选择理论.亲缘选择理论认为由于合作双方之间存在亲缘关系,选择合作,能够提高自身基因在下一代的遗传频率;互惠选择理论认为合作双方存在利益交换,选择合作,甚至利他性的合作行为,能够提高彼此的收益,实现“双赢”.在上述情况下,选择合作策略,将是双方的严格优势策略.

上述两种理论看似完美,却同样面临另外的理论困境:无论合作双方有多么高的亲缘或互惠关系,双方将必然因为有限的公共资源而发生竞争,这种竞争将导致合作关系的解体,这就是著名的“公共地悲剧”.另外,在一个合作系统中,如果个体采取投机的策略,那么它不用付出合作的代价却能坐收合作的收益,这种投机行为也将导致合作系统的解体.反观现实生活中的合作案例,我们总能看到兄弟残杀、朋友背叛等现象出现,显然亲缘选择和互惠选择理论都难以解释这类现象.

亲缘选择、互惠选择以及逐渐被抛弃的群选择理论,它们在解释合作行为是如何演化而来以及该系统如何维持稳定性时,遇到了这样的现象——这些理论的支持者不断完善其理论体系,试图解决这些理论所面临的困境,但他们总是又回到问题的起点,又无从着力.

这些理论从方法论来说,基本上就是沿袭了经典物理的研究范式:给定研究对象的初始条件,就可以给出研究对象的运动轨迹,这样任何研究结果就可能有其普适性和可重复性.而合作的演化理论中,即假定了个体是自私的、理性的,而且每个个体都是自私的、理性的,也就是该理论中不但假定了个体是自私的、理性的,而且假定了它们的空间位置是可以互换的,也就是对称性的假设.在这样一个对称、理性的前提假设下,系统内个体组成单元(个体或基因)通过竞争方式达到稳定的均衡状态;而物理学中已系统论证了每一个对称性都有一个守恒律(稳定性)与之对应.

跟经典力学在十九世纪初面临的悲喜剧一样:彼时物理学准备庆祝物理学理论大厦的竣工,天边飘来两片乌云令物理学家苦闷.经济学和生物学在经典力学方法论指导下建设起来的理论大厦,也同样面临天边飘来乌云的困境:无论合作双方有多高的亲缘关系或互惠程度,在几乎所有的现实合作案例中,我们总是能观测到由合作关系转化为竞争关系的案例,但我们却难以预测个体合作或者竞争行为的确切轨迹;有些利他性的合作行为甚至演化为自杀行为,但是这种利他性自杀行为为什么能够得以演化,以及在哪些情况下会出现且传染,甚至呈现井喷式爆发.现有理论无从回答,但我们却不能忽视.

然而,合作行为研究中出现的一线新的曙光似乎能为当前的理论困境提供线索.现实合作系统的实验与观测发现合作系统事实上并不是一个对称性的系统,而

是非对称性的。系统内相互作用的个体之间存在支付、演化路径和信息方面的非对称性。物理学上将此称为对称性的破缺。而正是合作者之间相互关系的非对称性导致合作者个体行为策略的不确定性，致使系统将不再处于均衡状态，而是非均衡状态。

这跟物理学二十世纪发生的故事存在惊人的相似。以海森伯“测不准原理”为代表的量子力学理论宣告了微观粒子的运动轨迹是无法精确预测的，随后物理学发现对称性的破缺在物理世界具有普遍性，而且这种对称性的破缺导致系统的非均衡状态。生物学、经济学的发展跟量子物理发展呈现惊人的相似性，而且方法论上存在如此惊人的相通性。

生物学、经济学的“量子物理”时代似乎已经破晓待出，也许将与二十世纪初量子物理学出现时代一样，也将是一个新的经济与生命科学的时代，将是一个英雄辈出的时代，是重建理论生物学与经济学的时代！不同领域的英雄或许将会加盟这个大厦重建的奠基，期待一个全新的理论生物与经济学的诞生！

夜，永远没有全黑的夜，总是星光点点；明天，太阳会继续升起，但谁将第一个看到明天的太阳呢？

贺军州出版此书或是去看日出，或是追逐太阳，看它升起，看它坠落。

贺军州

2016年8月10日于西北工业大学东馆

前 言

我认为,人不但要有科学技术,而且还要文化、艺术跟音乐 —— 钱学森

人类知识在 20 世纪的发展具有令人目眩的复杂性,如何很好地应用这些知识是我们面临的巨大挑战. 由于研究背景的不同,多样性的系统产生了各不相同的学科. 在这个过程中,以模型方式表述概念和理论,正变为任何科学不可或缺的部分(奥德姆, 1993). 正如 Gödel 所说 (Gödel, 1931; Nagel and Newman, 1958), 没有一个系统是被自身所认识,因为需要分析和理解系统的组分不是简单的拆分和叠加. 门铃响了,但它自身并不懂是如何响的. 然而,对人类自身来说,有足够的智力来想象出部件和功能以及其与外部的关系而预想出系统的结果. 因为我们可以建立简化了的模型去理解它们,利用这些模型,在一定的检验限度内对未知事件做出一定预测(奥德姆, 1993). 作为系统极小部分的人类要去掌握和认识系统的本质所遇到的困难是不难想象的,就像我们遥望浩渺的宇宙时疑问“宇宙的边缘是什么”一样.

然而我们可通过构建简化了的模型来了解这个世界的未知. 而构建一个合理有效的模型需要多学科理论、多研究方法的综合,这对专门化教育培育出来的我们来说,无疑是一个巨大的挑战. 本书以理论模型为基础,在经典的合作系统中合理引入非对称相互关系,并结合演化博弈理论、动力系统理论、理论生态学理论以及计算机模拟等,探讨了在一个非对称的合作系统中合作双方的合作行为是如何演化的,以及非对称合作系统是如何维持稳定性的问题,从非对称的角度揭示了合作系统演化动力与系统维持机制. 理论结果对生命系统包括人类社会组织等合作系统的稳定维持等问题提供了理论解释,并可能对企业的市场行为、生态环境保护等领域的研究提供一定的启示.

考虑到本书所得理论结果是由简化的理论模型推得的,难免出现系统的某些主要影响因素可能会被忽略的现象,进而影响模型预测的准确性. 然而对于一个真实的系统进行模型的构建,如果考虑因素过多,构建出的模型要么难以分析,要么无法体现系统的本质属性. 因而对模型构建者来说,系统影响因素的主次分析,系统变量、参数的取舍等都会左右模型的合理性和有效性. 对本书所涉及的合作系统来说,所有模型系统相较于真实的合作系统都差异巨大. 本书所提到的合作系统只能算是一个高度抽象化的封闭子系统,要想达到对合作系统更逼近的理解可能需把其

视为一个多流出和多流入的开放性系统 (von Bertalanffy, 1950, 1968), 并结合大型计算机对其进行模拟. 事实上, 合作的演化问题包含了复杂性问题的方方面面, 因此复杂系统理论的发展将可能会为合作行为的演化研究提供有效的理论支撑.

空间网络博弈研究方兴未艾, 尤其是复杂网络研究的兴起与快速发展, 并在包括物理学、生物学、博弈论等诸多研究领域得到了广泛应用. 这些研究所暗含的基本前提假设是博弈参与者之间具有对称性的相互关系, 事实上, 博弈参与者之间大都具有不同程度的非对称相互关系. 而利用计算机模拟从非对称的角度研究不同博弈模型、不同学习/模仿规则、不同策略更新规则及不同网络结构的网络博弈, 进而探讨非对称条件下合作行为的演化, 将可能会得到更丰富的理论结果, 为合作行为的演化提供更合理的理论解释.

博弈理论本是数学的一个分支, 随着其理论逐渐被经济学家、生物学家接受并广泛应用, 现在已成为一个蓬勃发展的交叉学科. 而根据博弈论的起源可看出数学理论的发展决定着博弈理论的发展进程, 在对本书所涉及问题的研究中笔者深有体会. 比如在对多人博弈进行研究时, 为便于分析, 总是对模型添加一些特殊假设以尽可能地去简化系统, 而这难免对系统的分析产生或多或少甚或根本性的不利影响. 而对多人多策略博弈的分析一直以来都是博弈论面临的一个难点问题, 因为多人多策略博弈的支付用一个矩阵已不能表示. 本质上, 多人多策略博弈的支付就是一个张量, 因而随着张量理论 (Qi, 2005) 的发展将可能会有助于解决多人多策略博弈面临的问题, 那时张量分析与多人多策略博弈的结合将可能促进博弈理论的又一次飞跃发展.

本书从构思到酝酿行文以及成稿, 离不开我的博士生导师李耀堂教授和博士后合作导师王瑞武研究员的诸多指导建议及鼓励支持. 李耀堂老师是我走向科研工作的引路人, 他严谨的治学态度, 缜密的思维, 敏锐的洞察力及宽厚长者的风范让我受益终生. 在此, 谨向李老师致以深深的敬意和衷心的感谢! 王瑞武老师是我博士和博士后期间的合作导师, 在科学研究方面给予我极大指导和鼓励. 他知识渊博、思维活跃、对科学问题有着极强的敏锐性和准确的宏观把握能力, 以及对科学研究工作充满激情. 这些优秀品质一直以来都激励着我积极进步. 在此, 向王老师表示诚挚的感谢!

感谢云南财经大学给予我一个广阔的平台, 正是云南财经大学的基金支持和积极向上的科研环境使我有动力完成本书. 在此感谢云南财经大学的石磊教授、朱锦余教授、王林教授、叶琼伟教授、王汉权教授、科研处费宇教授、人事处朱恒祥处长等以及统计与数学学院的各位同事给予我工作上的支持和照顾!

感谢我的师母张月锦老师，在来昆明的这十年间，她给予了我不倦的鼓励 and 教诲，使得我能够在工作和生活中不再畏惧困难和艰辛。感谢 Pratt Institute 的 Christopher X. J. Jensen 副教授和西北工业大学的 Derek W. Dunn 教授给予我英文写作的帮助。感谢王波、陈春给予我研究方面的帮助和有益探讨。感谢李肇天、文晓岚、杨森、罗军、李立立、罗天逊、耿向宗、吴佳等不厌其烦地向我介绍榕树-榕小蜂、散白蚁等系统的生态学现象。感谢云南大学的李朝迁副教授、宝鸡文理学院的王亚强博士和高磊博士、贵州民族大学的赵建兴、王峰教授以及云南大学博士生焦爱全、刘奇龙师弟等对我工作和生活上的帮助和鼓励，他们使我的研究工作变得轻松愉快。

最后，感谢我的爱人，你的理解和支持是我前进的最大动力。感谢我即将满三周岁的儿子，你的到来在给我带来无限幸福的同时也完善着我的心智。感谢我的岳母及其家人，没有他们对我的帮助和包容，我无法完成这份工作。感谢弟弟李青云帮我设计论著的封面。感谢我的父亲、母亲等亲人对我无尽的疼爱，虽然我们身距两千公里，但此刻我能嗅到家乡夏收的麦香和夏种翻开泥土的芬芳。

贺军州

2017 年 6 月于云南财经大学北苑

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 合作的问题	1
1.2 经典合作理论及其面临的挑战	4
1.2.1 亲缘选择理论	4
1.2.2 互惠选择理论	6
1.2.3 群选择理论	11
1.2.4 合作理论面临的挑战	14
1.3 合作系统的非对称性相互关系与不确定性选择	15
1.3.1 对称性与非对称性	15
1.3.2 确定性与不确定性	21
第 2 章 相关理论	23
2.1 博弈及演化博弈理论	23
2.2 系统稳定性理论	27
2.2.1 微分方程稳定性理论	27
2.2.2 差分方程稳定性理论	28
2.3 生态学相关概念及理论	30
第 3 章 非对称合作系统博弈模型范式分析	32
3.1 非对称性鹰鸽博弈模型及分析	32
3.1.1 问题背景	32
3.1.2 建立模型	33
3.1.3 模型分析与讨论	35
3.2 具关系系数的非对称志愿者困境博弈模型及分析	40
3.2.1 问题背景	40
3.2.2 非对称志愿者困境博弈回顾	42
3.2.3 非对称志愿者困境博弈中非对称度对合作行为的定性分析	44

3.2.4	具关系系数的非对称志愿者困境博弈	47
3.2.5	结果及分析讨论	53
3.3	超理性条件下的非对称志愿者困境博弈模型分析	55
3.3.1	问题背景	56
3.3.2	具超理性策略的非对称志愿者困境博弈分析	57
3.3.3	超理性策略下系统公共品的提供	62
3.3.4	结果分析与讨论	65
第 4 章	基于复制动态方程的非对称性合作系统的演化稳定性分析	69
4.1	非对称合作系统的公共品提供——基于非对称志愿者困境博弈的进化稳定分析	69
4.1.1	公共品问题的研究背景	70
4.1.2	非对称志愿者困境博弈演化模型建立及稳定性分析	71
4.1.3	结果讨论与分析	77
4.2	动物婚配制度演化的成本-收益分析 基于性别战博弈模型的进化稳定分析	78
4.2.1	问题背景	78
4.2.2	婚配体制演化的研究现状及存在的问题	80
4.2.3	动物婚配制度演化的成本-收益分析	82
第 5 章	非对称空间网络博弈的不确定性分析	90
5.1	空间网络演化博弈	90
5.2	模型假设及模拟	92
5.2.1	模型假设	92
5.2.2	模拟结果	93
5.3	分析讨论	97
第 6 章	非对称合作系统的公共资源利用——基于榕树-榕小蜂非对称合作系统的集合种群演化	99
6.1	榕树-榕小蜂共生系统	99
6.2	集合种群模型回顾	103
6.2.1	单种群集合种群动态模型: Levins 模型	103
6.2.2	两种群集合种群动态模型: Nee-May 模型	104
6.2.3	多种群集合种群动态模型: Tilman 模型	107
6.3	榕树-榕小蜂互惠共生集合种群模型	107

6.3.1	模型建立及稳定性分析	108
6.3.2	数值模拟与结果分析	110
6.4	榕树、传粉蜂、非传粉蜂互惠寄生集合种群模型	112
6.4.1	模型构建	112
6.4.2	稳定性分析	114
6.4.3	结果分析及讨论	118
参考文献		125
彩图		

第1章 绪论

合作行为广泛存在于包括人类社会在内的几乎所有的生命系统中,而对合作问题的解释却一直未得到有效解决.虽然经济学鼻祖亚当·斯密及演化理论鼻祖达尔文分别从理性人和适应性的角度对人的合作行为以及动物的合作行为给出了解释,但是,这两个假说都面临着生命系统中利他行为的挑战. Hamilton (1964) 和 Trivers (1971) 从亲缘和互惠的角度对该问题进行了探讨并形成亲缘选择和互惠选择理论.然而 Boyd 和 Lorberbaum (1987) 及 Hauert 和 Doebeli (2004) 的研究表明上述理论可能都是不可信的.时至今日,合作行为演化的动力及系统维持机制仍然是进化生物学和经济学所关注的重要但尚未完全解决的重大科学问题.

1.1 合作的问题

合作是文明的基础——阿克塞尔罗德

“合作”(cooperation)一词源于拉丁文,其原意是指个体之间的共同行动或协作行动.《辞海》中对“合作”解释有五层意思:①共同创作,如“从前在小学校里,有时也共同作文,全级的同学合作一篇文章”(夏丏尊,叶圣陶《文心》);②共同从事,如“通力合作,且耕且战”(清·魏源《圣武记》卷七);③依法制作,如“於是神人授以素书,朱英丸方,道灵教戒,五行变化,凡二十五篇……墨子拜受合作,遂得其验”(晋·葛洪《神仙传·墨子》);④合奏,如“乐用龟兹、鼓、笛各四部,与胡部等合作”(《新唐书·南蛮传下·骠》);⑤书画诗文等合于法度,如“即如悼亡诗,必缠绵婉转,方称合作”(清·袁枚《随园诗话》).《现代汉语词典》把“合作”一词定义为“为了共同的目的一起工作或共同完成某项任务”.而西方文献中“合作”(cooperation)一词最早出现在1879年坎贝尔(Campbell)所写的《按图书馆进行地区分组》一文中(Campbell, 1897),清末传入我国时借用日语译法译为“产业组合”,后按汉语语法才改译为“合作”(张平, 2009).而我们日常语境中言及“合作”大都指个人与个人、群体与群体或个体与群体之间为达到共同之目的,彼此相互配合的一种联合行动,也即《辞海》所给出的前两层意思和第四层之引申意.

在现代社会,合作无处不在,人们的衣、食、住、行、工作、学习、社交等所涉

及的一切人类活动无不与合作密切相关. 著名社会科学家哈耶克 (Hayek) 在其著作《致命的自负》一书中曾这样论述合作: 我们的文明, 不管是它的起源还是它的维持, 都取决于这样一件事情, 它的准确表达, 就是在人类社会中不断扩展的秩序 (哈耶克, 2000). 而马克思认为, 人的本质是一切社会关系的总和, 并指出, 社会关系的含义是指许多个人的合作, 至于这种合作是在什么条件下, 用什么方式和为了什么目的进行的, 则是无关紧要的 (马克思和恩格斯, 1972). 从马克思和恩格斯的论述中可以看出社会关系就是人与人之间的合作. 如果说人的初级本质是“一切社会关系的总和”, 那么, 人的深层次本质就在于合作 (张平, 2009). 正如博弈论和社会政治学家阿克塞尔罗德 (Axelrod) 曾指出的那样, 合作是文明的基础 (Axelrod, 1984).

合作现象不仅存在于人类社会中, 几乎所有的生命系统都存在着不同程度的合作行为 (图 1.1.1). 小到细胞以及细胞各组分染色体基因之间, 大到个体、种群、公司、国家之间等都存在着不同形式的合作. 如动物在有性繁殖过程中两性之间的繁殖合作, 对子女抚养及照看的合作, 以及在联合捕食、应对天敌或环境威胁等方面的合作. 上述合作都是指物种内部个体之间的合作, 而在不同的物种之间也存在着广泛的合作行为, 如根瘤菌与豆科植物之间 (根瘤菌为豆科植物固氮, 而豆科植物为根瘤菌输送必需的氧气) 的合作, 榕树和榕小蜂之间 (榕树为榕小蜂提供繁殖场所, 而榕小蜂为榕树传粉) 的合作等 (图 1.1.1).



(a) 猴群个体之间的合作



(b) 榕树和榕小蜂之间的合作



(c) 豆科植物与根瘤菌之间的合作

图 1.1.1 合作的形式 (彩图见文后)

种内合作 (a), 种间合作 (b)、(c)

合作意味着贡献者 (donor) 承担一定的合作成本, 从而使得接受者 (recipient) 获得收益. 在进化生物学中, 合作的成本和收益是用适合度 (fitness) 来度量的. 然而合作个体与不合作或欺骗个体对弈时, 其适合度 (收益) 明显低于不合作或欺骗的个体, 囚徒困境 (prisoner's dilemma) 模型是给这一悖论的很好隐喻. 在囚徒困境博弈中, 假定两个博弈参与者都有两个策略: 选择合作或选择背叛, 每个参与者都必须在不知道对手选择的情况下同时作出对自己的最优选择, 而最优策略的选择依赖表 1.1.1 所示的支付矩阵.

表 1.1.1 囚徒困境模型

策略	背叛 D	合作 C
背叛 D	$P = -8, P = -8$	$T = 0, S = -10$
合作 C	$S = -10, T = 0$	$R = -1, R = -1$

注: P 为策略组合 (D, D) 时双方的收益, T 为策略组合 (D, C) 时采取 D 策略方的收益, S 为策略组合 (D, C) 时采取 C 策略方的收益, R 为策略组合 (C, C) 时双方的收益. 囚徒困境博弈支付参数需满足: $T > R > P > S$

一个显而易见的问题是: 一个理性参与者在这样的博弈中应该怎样选择自己的最优策略呢? 假如对方选择合作, 因 $T > R$, 则自己选择背叛将获得更高收益; 而当对手选择背叛时, 因 $P > S$, 自己选择背叛仍然可获得更高收益. 也即无论对手选择什么策略, 自己选择背叛总是比选择合作获得更高的收益, 因此若两个参与者都是理性的, 则博弈的均衡结果是博弈双方都选择背叛. 而该博弈的困境是若双方都选择合作所获得收益远大于双方都背叛所获得收益 $T + T > P + P$. 上述困境是在个体理性和完全信息静态博弈的假设条件下得到的一次博弈的均衡结果, 而对于有限次重复博弈, 无名氏定理 (the folk theorem) 给出的博弈均衡结果同样悲观, 即在有限次重复的囚徒困境博弈中博弈双方无法达成合作或帕累托效率 (弗登博格和梯若尔, 2002). 一旦博弈重复的次数是有限的, 博弈的参与者就都知道自己在最后一轮的最优策略是选择背叛, 以此类推, 倒数第二轮背叛仍然是自己的最优选择, 等等, 因此有限次囚徒困境博弈的结果是每次博弈个体的最优策略都选择背叛即不合作.

上述困境问题广泛存在于现实中, 如寡头竞争、团队协作、军备竞赛、公共品供给等, 在此需说明的是囚徒困境反映的是合作问题中的个体理性与集体理性之间的冲突. 与此悲观结论相悖的是, 正如前面所提到的现实个体之间却广泛存在着不同形式的合作. 那么, 合作是如何在遵循利益最大化 (个体理性) 的个体中发生的? 或者说个体到底是如何跳出这种种的囚徒困境迷局? 换言之, 这些潜在的合作行为

是如何得以在不合作占优势的环境中幸存下来并得以维持的?对这一问题的追寻一直困扰着社会政治、经济学家和生物学家 (Axelrod, 1984; Frank, 1998; Dopfer, 2004; 张军, 1999; Wang and Shi, 2010; Wang et al., 2011). 合作行为,尤其是利他性合作行为如何演化而来,是自然科学中至今未曾解决的重要科学问题之一. 生命科学中诸如癌症、流行病、意识或脑科学等都与这一基本的科学问题密切相关. 像癌症这类疾病本质上是某个或某类基因的过度复制 (不合作行为) 而导致的系统崩溃,只有基因与基因稳定合作,才能形成一个正常的细胞. 而人类社会很多社会问题诸如战争、恐怖主义等也正是源于有效的合作机制未曾形成. *Science* 2005 年把合作行为的形成机制列为 125 个未曾解决的科学问题第 16 位. Robert May 在 2005 年皇家学会主席的就职演说中认为合作行为的演化是生命科学研究和人类社会学研究中最为重要的,而又未被解决的科学问题.

1.2 经典合作理论及其面临的挑战

1.2.1 亲缘选择理论

经济行为人的理性假设是现代经济学体系构建的逻辑基石,也即在古典/主流经济学中的行为人具有全知全能的本领,他所作出的决策方案可以实现自身利益的最大化或稀缺资源的最优配置. 亚当·斯密在其巨著《国富论》(又名《国民财富的性质和原因的研究》)一书中曾指出,我们每天所需要的食物和饮料,不是出自屠户、酿酒商或面包师的恩惠,而是出于他们自利的打算 (亚当·斯密, 2006). 人们的行为遵循自利原则,即被奉为经济学的基本前提:行为主体 (人) 是理性 (自私) 的. 亚当·斯密进一步指出人们在“看不见的手”的指引下追求小小的私人目的的同时,却始料未及地实现着增进人类福利的更大的社会目的. 然而,如果我们认为选择的单元是个体或假定个体在演化的过程中是自私的或理性的,那么为什么自然界或人类社会中还存在大量的利他性合作行为,而这些利他性的合作行为明显会失掉或完全失去自己的利益或直接适合度 (Hirschman, 1970; 张军, 1999; Frank, 2003). 就连提出个人行为受自利原则驱使是“经济学第一原则”的埃奇沃思 (Edgeworth),也不得不承认这个原则并不是一个非常现实的东西. 经济学家戴维·科勒德 (David Collard) 在他《利他主义与经济》一书中通过系统地研究利他主义经济现象后认为,自利原则用之于利他主义经济现象上,显然是无力的或者说是牵强的 (Collard, 1978).

为解释人类社会中广泛存在的合作甚至完全利他性的合作行为,亚当·斯密在

其另一巨著《道德情操论》中把人的行为归结为“同情心”。假定人类是有社会道德的生物个体,由于道德、正义等,人类又会表现出无私的品质。在《道德情操论》中亚当·斯密把同情心作为社会行为基础而在《国富论》中又把人类的行为归结于理性(自私),这一悖论被后人称为斯密问题或斯密矛盾。那么,如果亚当·斯密的这两个前提假设都是对的,人类个体在什么情况下表现为自私性,而又在什么情况下表现出道德优势即表现为无私的利他性合作行为呢?不幸的是,至今没有任何理论或假说能够有效地回答上述问题。

同时,我们也注意到利他性的合作行为并不是人类社会所特有的,自然界其他生命形式中也广泛存在着不同形式的利他合作行为。达尔文对自然界中的合作行为解释为自然选择,而利他合作行为被简单解释为适应现象(Darwin, 1872; Leigh, 1977; Frank, 2003)。在此需指出的是,经济学的理性原则被达尔文自然选择理论中的“适者生存”所替代。与经济学中遇到的困境一样,自然选择理论依然面临着利他行为的巨大挑战:比如蚂蚁、蜜蜂中的工蚁/蜂完全不生殖而帮助蚁/蜂后繁殖,而这些利他行为显然会失掉部分甚至全部适合度(Wilson, 1975; Hamilton, 1972; Dawkins, 1989)。这类利他性的合作后来也被证明广泛存在于鸟类、哺乳动物等其他类群中,如知更鸟、画眉、山雀等鸟类中发现捕食者的个体会向同类报警;黑猩猩不仅会分享合伙狩猎得来的食物,而且还会对失去父母的幼猩实行抚育等(West et al., 2002)。研究还发现不同物种之间也广泛存在高度的合作行为,而且越来越多的证据表明几乎所有物种都存在不同程度的种间合作行为(Bronstein, 2001a, 2001b)。显然这样的合作行为是适应现象所不能简单解释的。

利他行为最明显的例子就是动物的双亲行为,我们都知道后代个体身上携带了亲代的基因,为了最大限度地繁殖后代的个体所表现的双亲行为在遗传学上讲是自私的(理性的)。英国 Hamilton(1964)最先认识到亲缘关系与利他行为的这种重要联系,并通过个体之间的亲缘关系系数来测度利他行为,而亲缘关系系数由基因的相似程度决定。具体来讲就是如果利他行为的成本、收益及亲缘关系系数三者之间满足 $B/C > 1/r$ 或者 $rB > C$, 那么因亲缘关系而进化出来的利他行为就会发生(即 Hamilton 法则),其中 C 为利他给予者所付出的成本, B 为接受利他行为的受益者所获得的收益, r 为给予者和受益者之间的亲缘关系系数(Hamilton, 1964)。同年, Maynard Smith(1964)提出了亲缘选择这一概念,即有利于近亲(包括子代和非直系亲属)存活的行为特征会受到自然选择的青睐,其中从子代所得的收益可以用直接适合度(direct fitness)来度量,而通过帮助非直系存活得到的收益与通过自身繁殖子代得到的适合度之和可以用广义适合度(inclusive fitness)来度