

# Development of Evolutionary Dynamics and Its Research and Application Progress

Yinding Zhang<sup>1</sup>, Ziyan Zhang<sup>2</sup>, Junqiu Zhang<sup>1</sup>, Yitian Li<sup>1</sup>, Yujie Hu<sup>1</sup>, Aziya<sup>1</sup>, Xiang Gao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Mathematical Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>College of Environmental Science, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Email: zyd@ouc.edu.cn, zzy@ouc.edu.cn, \*gaoxiangshuli@126.com

Received: Feb. 28<sup>th</sup>, 2018; accepted: Mar. 14<sup>th</sup>, 2018; published: Mar. 21<sup>st</sup>, 2018

## Abstract

Evolution is one of the basic patterns in the creation and development of things, characterized by changed inheritances. Evolutionary dynamics is a science that explores the mathematical principles of biological evolution. It uses mathematics to describe processes, such as the process of propagation, selection, mutation, random drift and space movement in evolution units, to study the conditions, directions and processes of evolution. Evolutionary dynamics originated from the study of biological evolution, not only can explain the mode of biological evolution, but also can successfully explain some economic, social and cultural evolution. This paper introduces the development of evolutionary dynamics and reviews the research and application of evolutionary dynamics in recent 5 years.

## Keywords

Evolutionary Dynamics, Evolutionism, Biomathematics, Development, Application

# 进化动力学的发展及其研究与应用进展

张寅丁<sup>1</sup>, 张子琰<sup>2</sup>, 张君秋<sup>1</sup>, 李怡甜<sup>1</sup>, 胡玉洁<sup>1</sup>, 阿兹娅<sup>1</sup>, 高翔<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国海洋大学数学科学学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>中国海洋大学环境科学学院, 山东 青岛

Email: zyd@ouc.edu.cn, zzy@ouc.edu.cn, \*gaoxiangshuli@126.com

收稿日期: 2018年2月28日; 录用日期: 2018年3月14日; 发布日期: 2018年3月21日

## 摘要

进化是事物产生与发展的基本模式之一, 其特征是有改变的继承。进化动力学是探讨生物进化的数学原理\*通讯作者。

文章引用: 张寅丁, 张子琰, 张君秋, 李怡甜, 胡玉洁, 阿兹娅, 高翔. 进化动力学的发展及其研究与应用进展[J]. 生物过程, 2018, 8(1): 11-19. DOI: 10.12677/bp.2018.81002

理的一门科学，它使用数学描述进化单位繁殖、选择、突变、随机漂变和空间运动等过程，研究进化发生的条件、方向及作用过程。进化动力学起源于对生物进化的研究，但其不仅可以解释生物进化的模式，也能成功地解释经济、社会和文化方面的一些演化现象。本文回顾了进化动力学的发展历程，并对近5年来进化动力学的研究，以及生态学、运筹学、临床医学、社会学和经济学等领域的应用进行综述。

## 关键词

进化动力学，进化论，生物数学，发展，应用

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

进化是事物产生与发展的基本模式之一，其特征是有改变的继承。

进化的概念最初出现于生物学领域，用于解释物种起源。生物进化的系统假说最早由法国博物学家 Lamarck 提出，他的进化思想被简要概括为用进废退。但后来事实证明 Lamarck 的进化并不适合于解释生物的进化，Darwin 的自然选择学说在生物进化的问题上取得了巨大的成功。Darwin 进行了五年的环球考察之旅，受 Lyell 及 Malthus 思想的启发，于 1838 年首次产生了自然选择进化的想法，于 1858 年与 Wallace 同时宣读了陈述自然选择思想的论文[1]，并于 1859 年出版了《物种起源》。20 世纪末和 30 年代初，Fisher、Haldane、Wright 等对达尔文主义进行修正，形成了以自然选择学说为核心的现代综合论。20 世纪 60 年代末 Kimura 等提出了分子进化中性理论，对分子水平上的生物进化进行了新描述[1] [2]。

自然选择形式的进化能够成功地解释生物的进化，事实证明，这是一种更广泛的进化模式，不仅可以解释生物进化的模式，同时也可以成功地解释经济、社会和文化方面的一些演化现象。

进化动力学是研究事物进化所遵循的数学原理的一门交叉科学，它使用数学描述进化单位繁殖、选择、突变、随机漂变和空间运动等过程，研究进化发生的条件、方向及作用过程。进化动力学是生物进化理论的核心，是种群结构与动力系统、生态系统结构与动力系统和微进化等研究的基本工具[3]-[11]。其一方面已经广泛运用于农业和医学中，研究农业生态系统、癌细胞进化、传染病和寄生虫毒力的进化及病菌抗药性的进化等课题[2] [12]-[18]，另一方面正逐渐成为社会学、经济学和文化传播领域中诸如形式语言理论、协作产生、经济模式、文化传播等课题的新范式[2] [19]-[24]。并为博弈论、进化算法和细胞自动机等数学领域的发展提供了新的思路[25]-[30]。本文简要地对进化动力学的发展历程和研究与应用进展进行了综述。

## 2. 进化动力学的发展

《物种起源》发表后，Galton 和 Pearson 等率先将统计方法引入生物的遗传进化问题[1]。而有关生物进化的数学描述最早的显著成果是 Hardy 和 Weinberg 分别提出的 Hardy-Weinberg 定理，其通过简单的数学公式证明了孟德尔遗传随机交配下维持遗传多样性的机制，由此该定理成为有性繁殖种群进化的基本原理之一。20 世纪 20~30 年代，Fisher、Haldane、Wright 结合基因论和生物统计对达尔文主义进行修正，形成以自然选择为核心的现代综合理论，同时也创建了数学生物学这一全新学科，从数学上精确地描述了进化、选择和突变等概念[31]。20 世纪 50 年代 Kimura 提出随机漂变的概念，认为

大多数遗传突变只通过随机漂变就能够在种群中固定下来，并基于数理统计的工具发展出中性进化理论。1964年，Hamilton提出基因的“自私”选择有利于促进亲缘个体间利他行为的产生。1973年，Smith提出进化博弈理论。70年代中期May引用数学方法研究了种群和群落动力学系统，完善了理论生态学的核心概念并将这些工具应用于传染病和生物多样性的研究。1979年Eigen和Schuster首先提出准种理论，同一时期Taylor、Hofbauer和Sigmund等人就复制方程展开了相关研究，奠定了进化博弈动力学的基础[2]。90年代，进化博弈理论已经深深渗入生物学中的各个领域，包括生态学、物种形成、动物行为和细胞器等。21世纪以来，进化动力学进一步结合了博弈论和图论，图上博弈、动态博弈与合作产生的进化等成为新的前沿方向：Nakamaru, Iwasa, Abramson等人探讨了网络形成中的博弈；Flack, Krakauer和Waal, Flack等对灵长类动物之间的网络进行了研究；Sasaki, Hamilton和Ubeda等研究了空间博弈的问题，Mitteldorf, Taylor和Doebeli等研究了空间模型下合作的进化，Lloyd和Jansen描述了流行病的空间动力学；Killingback, Fehr, Sigmund和Boyd等分布研究了新策略(contrite TFT)和弃权行为对合作进化的影响；Turner和Chao描述了RNA病毒之间的囚徒困境，Nee分析了多分体病毒的进化；Pfeiffer, Schuster和Bonhoeffer研究了ATP代谢过程中的合作。此外，进化动力学的应用也开始从生物领域拓展到其它领域。

### 3. 进化动力学理论与生物学应用的进展

#### 3.1. 理论研究

进化动力学理论研究的一大前沿集中于有结构群体中的个体互动对进化过程的影响。Perc等[32]强调了群体互动的重要性，并展示了统计物理学和网络科学方法在研究进化动力学中群体作用时的适用性。他们认为，有结构的种群中的群体交互作用能够远远大于个体成对作用的总和。他们将统计物理学方法运用于研究演化博弈中模式的形成(pattern formation)、均衡选择(equilibrium selection)和自组织，发现在格子(lattices)上，团体互动有效地连接了群体中没有直接连接的个体，这使得群体在格子网络上的局部特性对演化过程的结果不是很重要，从而可以引入策略模拟中的确定性极限作为群体合作演化的最优解[33]。Szolnoki等[34] [35] [36] [37]的研究表明，由于空间格局的形成，策略的复杂性显著增加了了解的复杂性，他们所得的结果为社会学中长期存在的若干问题提供了优雅的解释，包括二阶搭便车问题[34]、奖励的稳定性[35]和制度的成功演变[36] [37]。

#### 3.2. 进化动力学与数学

进化动力学作为数学与生物学交叉形成的新体系，也在为数学，尤其是博弈论的发展提供新的思路。Shakarian等[38]探讨了进化图论(EGT)在博弈论中的作用并探讨了以下问题：第一，模型如何针对某些应用进行调整？第二，我们可以从历史数据中学习模型和/或突变体的适应性吗？第三，是否可以用于计算固定概率和固定时间程序的大数据集？

EGT对于生物学，经济学，博弈论和计算机科学等领域而言仍是一个相对较新的工具，但关于这个主题的研究论文数量正稳步增加，EGT在各种应用中都有很大的潜力，例如Zhou [39]利用EGT建模，对个人决策公司、多人决策公司和股份公司的商业模式稳定性进行了分析，而Voelkl和Kasper [40]利用EGT研究灵长类互动网络的社会结构。这些应用工作很可能只是EGT广泛应用的新趋势的一个开始。

Lacobelli等[41]研究了网络上的进化游戏动力学(EGN)，发现当玩家的收益函数和初始条件是等价的时，同一个可分区划分块中的玩家具有等价的动态行为。因此，属于同一个分区块的顶点可以被合并成一个单一的顶点，从而产生一个简化的图形，从而形成一个简化的方程组。他们还引入了一个更强的条件，称为强流动性，可以其用来识别EGN中与系统中玩家互换性相关的动态对称性。

### 3.3. 生物进化中基因选择与合作的进化

进化动力学的分析也有助于对 DNA 测序所显示的结果进行更深入的理解, 如此前著名的 Charlesworth 等[8]对真核生物的重复 DNA 的研究; 进化动力学也可以用于研究和发展 DNA 工具, 如有较大影响力的 Schlötterer [11]对微卫星 DNA 的研究。用进化动力学对生物进化过程进行分析的工作仍在继续, 进展较多的主要是两个方面的探索: 其一是对基因水平的突变与选择等进化过程的分析, 其二是对种群层面由合作产生的进化进行分析。对于第一方面, 适应度景观和准种的概念等已被广泛运用于生物进化的研究中。Barbosamoraís 等[42]研究了脊椎动物物种选择性剪接的进化景观, 尝试解释蛋白质编码基因类似的物种如何在表型水平有如此显著的差异。他们比较了来自脊椎动物的器官转录组, 发现在 3 亿 5 千万年的进化中, 脊椎动物谱系间选择性剪接的复杂性有显著差异, 其中灵长类动物复杂度最高。在 6 百万年以内, 生理等效器官的选择性剪接相比于器官类型, 更多地与物种的特征相关。Merkin [43]等探讨了哺乳动物组织中基因和同种型调控的进化动力学, 以前所未有的深度对来自四种哺乳动物的九种组织和一种鸟类的互补 DNA 进行测序。研究者发现虽然组织特异性基因表达程序在很大程度上是保守的, 但选择性剪接仅在部分组织中保守, 并常常是谱系特异性的。选择性剪接往往会使得蛋白磷酸化, 限制激酶信号的作用范围。Levy 等[44]使用高分辨率谱系追踪的定量进化动力学。在酿酒酵母中构建了基于测序的超高分辨率谱系追踪系统, 使研究者能够同时监测约 50 万谱系的相对频率。研究的发现与一些预期相反, 有益突变的适应性效应谱既不是指数型也不是单调型, 而这一发现在早期适应中有惊人的重现性。

对于种群层面的合作行为演化的分析, 则主要运用了进化博弈理论。众所周知, 团体合作对智人进化的显著成功至关重要, 在对智人的进化与合作进化的研究中, Bowles 等[45]认为有证据表明群体之间的冲突可能有助于增强群体内部的团结, Hrdy [46]发现照顾群体内其它人的后代也能激发群体合作的进化。比较新颖的是, Toupou 等[47]将人类认知的双重过程理论与演化博弈理论相结合, 通过研究自动控制决策过程的演变过程, 揭示了进化与人类自我意识以及理性之间的联系, 从进化视角探寻了智人理性的发展的必要的条件。

### 3.4. 有关临床医学的研究

癌是一个进化过程的结果, 其可以看作背叛整体合作的“自私”细胞激增的过程。在癌症的研究中, 进化动力学已经被深入应用, 如探寻成癌机理、癌细胞突变及扩散过程。自上世纪七十年代由 May 引用到流行病的研究中, 进化动力学就成为了流行病传播、变异和耐药性进化分析中的重要工具。此前, 国内早有学者利用进化动力学理论对弓形虫毒力, HIV-1 和人冠状病毒等[47] [48] [49]进行研究。Gillies 等[50]研究了癌发生的进化动力学和靶向治疗不起作用的原因, 他们认为缺氧、酸中毒和活性氧类等微环境既具有高度的选择性又还能诱导遗传不稳定性, 恶性肿瘤在这些微环境中的细胞动态演化几乎可以确保耐药个体的出现; 而另一方面, 化疗对癌细胞也会施加强烈的进化选择压力, 从而增加其进化速度。张兴安等[31]利用数学建模分析探寻了癌症的形成机理, 建立了癌症的多次打击模型和反应扩散方程的模型。杨建课等[51]从 Flu 和 GISAID 两大数据库中取得中国台湾地区全部已释放的 H6N1 病毒的 HA 序列, 构建了系统发育树和进化动力曲线, 推测了其进化速率并分析 HA 序列的适应性进化特征。他们认为中国台湾地区 H6N1 病毒的 HA 已发生了明显的适应性进化, 有发生疫情的风险, 人们应及时进行监测和防治。童汪霞等[52]研究了丙型肝炎患者中 HCV 在这中国的进化动力学特征, 从基于基因型的分析中还还原了 1993 年至 2000 年期间由于“单采血浆”事件造成的 HCV 在中国的感染数量的“指数”增长期。

## 4. 进化动力学在其它学科中应用的国内进展

### 4.1. 社会行为与监管策略

进化动力学尤其是进化博弈理论正被广泛地应用于分析社会中个体、企业或其它组织群体在有限理性下的行为, 其对认识社会现象, 提供政策指导和监管方案等方面提供了一个崭新的视角。而影响较大的是运用进化动力学对我国产业改革进行的分析。于斌斌[53]基于产业链上下游企业的进化博弈模型分析了传统产业和战略性新兴产业的创新链接机理。陆立军和于斌斌[54]用进化博弈理论分析了传统产业和战略性新兴产业的融合发展问题, 讨论了企业行为和政府策略对其演化的影响, 并以浙江绍兴为例对该理论进行了实证分析, 结果发现传统产业与战略性新兴产业融合发展有明显的阶段性, 其中政府和龙头企业的策略选择会显著地影响演化趋势及最终的融合度。与之类似的, 接玉梅[49]运用进化博弈的双种群博弈理论研究了水源地和下游之间的生态补偿合作演化, 艾建国等[55]研究了有限理性下的保障房退出机制, 为政府合理制定奖惩标准解决保障房退出难的问题提供了一种思路。代应等[56]研究了低碳经济下企业节能减排技术改造。韩德军等[57]研究了中国农村土地制度的历史变迁。

还有许多人利用进化动力学研究了政府与行业间以及行业内部相互博弈的过程, 并探讨了博弈过程中政府干扰造成的影响, 例如赵湜[58]研究了以有限理性为前提下的可见保险险种的创新进化, 发现在博弈过程中, 只要有一方主动选择积极策略, 则另一方也会逐步向积极的方向发展。他认为新险种能带来超额收益是保险公司选择开发新险种策略的必要条件, 而科技保险市场具有活力, 且干预行为具有良好的社会效应则是政府进行有效干预险种创新的基础。

上述方面的一大类应用是研究有效的监管模式。周晶[59]对有限理性框架下构建保险监管机构间的非对称进行了分析, 并指出多个险监管者共存时, 监管行为不同步, 容易出现监管漏洞, 而监管收益和监管成本是造成监管不同步及监管漏洞的重要原因, 结合此前英国 V&G 公司破产的案例, 验证了该博弈模型及其结论的合理性与可靠性。余孝军等[60]建立了公路可监管问题的进化博弈模型, 发现在有限理性的基础上, 进化稳定策略与博弈双方的收益、系统所处的初始状态等有关。王永刚等[61]利用进化博弈论对不完全信息状况下的民航安全监管进行了研究, 建立了不完全信息状况下民航安全监管的进化博弈模型。研究表明安全投入、监管成本、航空公司规模等因素的变化将对安监部门和航空公司之间的博弈产生重要影响, 进而影响航空公司的安全运营策略。与之类似, 唐柳[62]研究了政府监管金融服务外包供应商的策略选择对监管效果的影响; 程道光[63]分析了高职院校的学生管理策略。闫杰[64]分析了安全监管部门和承包商的行为特征以及进化稳定策略, 提出对安全监管部门的策略建议。何学锋等[48]分析了科技项目财政资金监管与使用。

除此以外, 也有一些不从政府或监管者作用角度讨论的研究。例如, 廖开际和吴敏[65]基于有限理性和进化群体博弈对网络团购的分析。冯珍等[66]对智慧旅游服务供应链中企业之间相互竞争的进化博弈的分析。

### 4.2. 资源配置优化

在资源配置的问题上, 许多时候需求是相互冲突的, 面对这类问题进化博弈论可以用于优化配置策略, 达到总体最佳性能。颀斌等[67]基于进化博弈论研究了云计算虚拟计算资源配置的配置策略, 建立了相应的自适应资源配置模型, 并以性能为进化博弈目标, 通过该模型得到最优策略; 实验发现, 相比 SLA 的资源调度策略, 该策略能有效减少资源的使用。徐明等[68]利用进化博弈理论对带宽资源的调度进行优化, 在此基础上提出了一种 MAC 协议以降低水声传感器网络低带宽、高延迟特性对介质访问 MAC 层性能的影响。该协议针对空间复用和时间复用这两种策略利用复制动力学方程演化得到稳定策略。仿真实

验的结果表明, 该水声传感器网络 MAC 协议相比传统协议, 有效提高了网络吞吐量及数据包发送成功率。

### 4.3. 合作与共享

企业间的知识共享是典型的博弈情形, 如果能正确引导, 促进企业或组织的信任, 这对企业发展及社会经济发展都有促进作用。也有学者针对这一问题的情形进行了进化动力学的分析。刘臣等[69]针对组织间知识共享的问题建立了单群体和多群体动态博弈模型, 并分析了模型的进化稳定策略和稳定域。翟丽丽等[70]讨论了软件企业有限理性下, 产业虚拟集群企业间的信任进化, 引入合作收益、收益分配系数、风险成本以及背信成本等影响因素, 构建软件产业虚拟集群企业间信任进化博弈模型。研究表明, 通过提高软件企业间合作收益, 降低风险成本, 适当调整收益分配系数与背信成本, 均可以提高软件产业虚拟集群企业间信任。孙晶磊等[71]建立了一个进化博弈数理模型研究 Web2.0 环境下组织内部的知识共享, 发现了得出了类似的结论。陈萍风[72]对比分析了强关系和弱关系企业网络中的知识共享, 发现当均不共享成本很高时, 强关系企业网络相对于弱关系企业网络更有利于企业间知识的共享; 当知识共享的纯收益大于搭便车的纯收益时, 企业更倾向于知识共享。

### 4.4. 其它应用

文化演化与生物进化的类比最早由道金斯提出弥母的概念开始。在文化演化的交叉领域, 进化动力学很快被用于分析在文化和语言的演化。张德玉等[21]研究了语言模因的进化动力学, 利用博弈进化论的框架解释了语言进化中的语言创新问题, 并发现在语言进化中, 突变策略只有满足策略的复杂性条件才能成为进化稳定策略。刘春兴[73]运用进化动力学方法研究了一般意义上的法律现象在人类社会历史上的起源过程, 并以进化动力学的视角重新考察了法律与道德的关系, 同时讨论了法学数学化以及进化法理学等内容。

## 5. 前景展望

进化动力学是生命科学的核心理论, 生命系统所呈现的一切现象追根溯源都一定可以从进化的角度得到解释, 进化动力学是生物学中一切分支学科的基础[2]。另一方面, 进化动力学已经逐渐渗入到生命科学以外的其它领域。自十八世纪以来, 人们已经意识到世界不是一成不变的, 随着人类对自己生存的世界以及生命本质的不断探索, 人们开始逐渐发现有许多事物的演变都有进化特征, 进化动力学为这些领域提供了崭新的视角与数学理论的支持。除此以外, 进化动力学也为运筹学和进化算法的发展提供许多启发。从目前的研究来看, 进化博弈理论与进化图论是发展势头最迅猛的两个分支, 不仅理论成果斐然, 同时也被积极地应用于生物学外的其他领域, 在未来的进一步发展中, 进化动力学作为一门研究事物演化的科学, 应当与计算机模拟深入结合, 并进一步开展跨学科交叉应用。进化动力学理论具有极为广阔的理论扩展空间和实际应用空间, 目前其在生物学及其他方面的研究与应用很可能只是一个新趋势的开始。

### 基金项目

山东省研究生教育创新计划项目“一线贯通式几何方向研究生课程群及信息化平台建设”(SDYY15129), 山东省研究生导师指导能力提升项目“布尔巴基观点下的几何与代数方向研究生课程体系与课程群建设”(SDYY17009)。

### 参考文献

- [1] 袁志发. 群体遗传学、进化与熵[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 23-29.

- [2] Martin A. Nowak. 进化动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 1-6.
- [3] Shi, T., Huang, H., Sanderson, M.J., *et al.* (2014) Evolutionary Dynamics of Leucine-Rich Repeat Receptor-Like Kinases and Related Genes in Plants: A Phylogenomic Approach. *Journal of Integrative Plant Biology*, **56**, 648-662. <https://doi.org/10.1111/jipb.12188>
- [4] 刘蕊. 一类捕食者—食饵模型的种群动力学和进化动力学分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2014.
- [5] 张文艳. 选择性干扰下的捕食模型的种群动力学和进化动力学问题的研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2014.
- [6] 李自珍, 韩晓卓, 李文龙, 等. 具有生态位构建作用的种群进化动力学模型及其应用研究[J]. 应用数学和力学, 2006, 27(3): 293-299.
- [7] 韩民锦. 家蚕 MITE 转座子的鉴定、进化和功能以及家蚕转座子的进化动力学研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [8] Charlesworth, B., Sniegowski, P. and Stephan, W. (1994) The Evolutionary Dynamics of Repetitive DNA in Eukaryotes. *Nature*, **371**, 215. <https://doi.org/10.1038/371215a0>
- [9] Bergelson, J., Kreitman, M., Stahl, E.A., *et al.* (2001) Evolutionary Dynamics of Plant R-Genes. *Science*, **292**, 2281. <https://doi.org/10.1126/science.1061337>
- [10] Schoener, T.W. (2011) The Newest Synthesis: Understanding the Interplay of Evolutionary and Ecological Dynamics. *Science*, **331**, 426-429. <https://doi.org/10.1126/science.1193954>
- [11] Schlotterer, C. (2000) Evolutionary Dynamics of Microsatellite DNA. *Chromosoma*, **109**, 365-371.
- [12] 杨宁, 于淑琴, 孙占祥, 等. 生物多样性影响农业生态系统功能及其机制研究进展[J]. 辽宁农业科学, 2008, 2008(1): 27-31.
- [13] 杨阳. 两类 SI 传染病模型的毒性的适应性进化[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2014.
- [14] 刘晔. 微分动力系统 在弓形虫病研究中的应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2012.
- [15] 杨蕾. 弓形虫病传播与进化动力学模型研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [16] 桂滔. 我国部分地区 HIV-1 流行及进化动力学研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2015.
- [17] 张越. 人冠状病毒 OC43 分子流行病学与种系进化动力学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京协和医学院, 2014.
- [18] Grenfell, B.T., Pybus, O.G., Gog, J.R., *et al.* (2004) Unifying the Epidemiological and Evolutionary Dynamics of Pathogens. *Science*, **303**, 327-332. <https://doi.org/10.1126/science.1090727>
- [19] 黄德斌, 许新胜. 人类语言的复杂性[J]. 自然杂志, 2005, 27(5): 278-282.
- [20] 蒋国银, 胡斌. 人群工作协同进化动力学模型及模拟[J]. 科学学与科学技术管理, 2008, 29(12): 151-156.
- [21] 张德玉, 吴炳章. 语言模因的进化动力学研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2011(1): 94-99.
- [22] 刘春兴. 进化动力学: 社会科学数学化的新范式[J]. 佛山科学技术学院学报(社会科学版), 2013, 31(5): 7-10.
- [23] 班晓倩. 基于进化动力学的企业创新模型研究[J]. 当代经济, 2015(31): 132-134.
- [24] Santos, F.C., Pacheco, J.M. and Lenaerts, T. (2006) Evolutionary Dynamics of Social Dilemmas in Structured Heterogeneous Populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**, 3490-3494. <https://doi.org/10.1073/pnas.0508201103>
- [25] 王磊. 复杂网络与进化动力学共演化下的博弈机制研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- [26] 王向军, 林春生, 龚沈光. 基于中性进化、自组织和自然选择的进化算法[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(4): 398-402.
- [27] Lindgren, K. and Nordahl, M.G. (1994) Evolutionary Dynamics of Spatial Games. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **75**, 292-309. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(94\)90289-5](https://doi.org/10.1016/0167-2789(94)90289-5)
- [28] Nowak, M.A. and Sigmund, K. (2004) Evolutionary Dynamics of Biological Games. *Science*, **303**, 793-799. <https://doi.org/10.1126/science.1093411>
- [29] Ruesta, M.B. and Lombardo, E. (2005) Evolutionary Dynamics on Graphs. *Nature*, **433**, 312-316. <https://doi.org/10.1038/nature03204>
- [30] Foster, D. and Young, P. (1990) Stochastic Evolutionary Game Dynamics. *Theoretical Population Biology*, **38**, 219-232. [https://doi.org/10.1016/0040-5809\(90\)90011-J](https://doi.org/10.1016/0040-5809(90)90011-J)

- [31] 陆征一. 生物数学前沿[M]. 武汉: 科学出版社, 2008: 176-181.
- [32] Perc, M., Szolnoki, A., Floría, L.M., *et al.* (2013) Evolutionary Dynamics of Group Interactions on Structured Populations: A Review. *Journal of the Royal Society Interface*, **10**, Article ID: 20120997. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0997>
- [33] Szolnoki, A., Perc, M. and Szabó, G. (2009) Topology-Independent Impact of Noise on Cooperation in Spatial Public Goods Games. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, **80**, Article ID: 056109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.80.056109>
- [34] Helbing, D., Szolnoki, A., Perc, M., *et al.* (2010) Evolutionary Establishment of Moral and Double Moral Standards through Spatial Interactions. *PLOS Computational Biology*, **6**, e1000758. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000758>
- [35] Szolnoki, A. and Perc, M. (2010) Reward and Cooperation in the Spatial Public Goods Game. *EPL*, **92**, Article No. 38003. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/92/38003>
- [36] Szolnoki, A., Szabó, G. and Perc, M. (2011) Phase Diagrams for the Spatial Public Goods Game with Pool Punishment. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, **83**, Article ID: 036101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.036101>
- [37] Szolnoki, A., Szabó, G. and Czakó, L. (2011) Competition of Individual and Institutional Punishments in Spatial Public Goods Games. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, **84**, Article ID: 046106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.84.046106>
- [38] Shakarian, P., Roos, P. and Johnson, A. (2012) A Review of Evolutionary Graph Theory with Applications to Game Theory. *Biosystems*, **107**, 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2011.09.006>
- [39] Zhou, A.N. (2011) Stability Analysis for Various Business Forms. In: *Applied Economics, Business and Development*, Springer, Berlin Heidelberg, 1-7. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23023-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23023-3_1)
- [40] Voelkl, B. and Kasper, C. (2009) Social Structure of Primate Interaction Networks Facilitates the Emergence of Cooperation. *Biology Letters*, **5**, 462-464.
- [41] Iacobelli, G., Madeo, D. and Mocenni, C. (2016) Lumping Evolutionary Game Dynamics on Networks. *Journal of Theoretical Biology*, **407**, 328-338. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2016.07.037>
- [42] Barbosamorais, N.L., Irimia, M., Pan, Q., *et al.* (2012) The Evolutionary Landscape of Alternative Splicing in Vertebrate Species. *Science*, **338**, 1587-1593. <https://doi.org/10.1126/science.1230612>
- [43] Merkin, J., Russell, C., Chen, P., *et al.* (2012) Evolutionary Dynamics of Gene and Isoform Regulation in Mammalian Tissues. *Science*, **338**, 1593-1599.
- [44] Levy, S.F., Blundell, J.R., Venkataram, S., *et al.* (2012) Quantitative Evolutionary Dynamics using High-Resolution Lineage Tracking. *Nature*, **519**, 181-186.
- [45] Bowles, S. and Gintis, H. (2011) A Cooperative Species: Human Reciprocity and Its Evolution. *Economics Books*, **50**, 797-803. <https://doi.org/10.1515/9781400838837>
- [46] Hrdy, S.B. (2010) Mothers and Others: The Evolutionary Origins of Mutual Understanding. Space Station Automation II: The International Society for Optical Engineering.
- [47] Toupo, D.F.P., Strogatz, S.H., Cohen, J.D., *et al.* (2015) Evolutionary Game Dynamics of Controlled and Automatic Decision-Making. *Chaos*, **25**, Article ID: 073120. <https://doi.org/10.1063/1.4927488>
- [48] 何雪峰, 酒莉莉, 康莉. 科技项目财政资金监管与使用进化博弈分析[J]. 财会通讯, 2013(32): 61-63.
- [49] 接玉梅, 葛颜祥, 徐光丽. 基于进化博弈视角的水源地与下游生态补偿合作演化分析[J]. 运筹与管理, 2012, 21(3): 137-143.
- [50] Gillies, R.J., Verduzco, D. and Gatenby, R.A. (2012) Evolutionary Dynamics of Carcinogenesis and Why Targeted Therapy Does Not Work. *Nature Reviews Cancer*, **12**, 487-493. <https://doi.org/10.1038/nrc3298>
- [51] 杨建课, 朱晓蕾, 汪洋, 等. 中国台湾地区 H6N1 禽流感病毒血凝素基因的适应性进化[J]. 病毒学报, 2014, 30(5): 529-534.
- [52] 童汪霞, 朱建芸, 雷姿颖, 等. HCV 在中国流行多样性和独特生长史的分析[J]. 中华实验和临床病毒学杂志, 2014, 28(5): 336-338.
- [53] 陆立军, 于斌斌. 传统产业与战略性新兴产业的融合演化及政府行为: 理论与实证[J]. 中国软科学, 2012(5): 28-39.
- [54] 于斌斌. 传统产业与战略性新兴产业的创新链接机理——基于产业链上下游企业进化博弈模型的分析[J]. 研究与发展管理, 2012, 24(3): 100-109.
- [55] 艾建国, 陈泓冰, 鲁璐. 保障房退出机制研究[J]. 城市问题, 2012(2): 76-80.



- [56] 代应, 宋寒, 蒲勇健. 低碳经济下企业节能减排技术改造进化博弈分析[J]. 工业技术经济, 2013(3): 137-141.
- [57] 韩德军, 朱道林. 中国农村土地制度历史变迁的进化博弈论解释[J]. 中国土地科学, 2013(7): 21-27.
- [58] 赵滢, 谢科范. 科技保险险种创新方案与构想[J]. 科技管理研究, 2011(19): 104-109.
- [59] 周晶. 基于进化博弈论的保险监管行为研究[J]. 云南社会科学, 2014(1): 74-76.
- [60] 余孝军, 方春华. 公路客运监管的进化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2013(2): 243-248.
- [61] 王永刚, 江涛. 基于进化博弈论的不完全信息状况下的民航安全监管研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(1): 61-64.
- [62] 唐柳, 俞乔, 李志铭. 政府监管金融服务外包供应商的策略选择研究——基于进化博弈论的视角[J]. 软科学, 2014, 28(6): 29-34.
- [63] 程道光. 基于进化博弈理论的高职学生管理策略探析[J]. 职教论坛, 2013(8): 4-6.
- [64] 闫杰. 基于进化博弈理论的建筑工程项目安全监管分析[J]. 统计与决策, 2012(13): 186-188.
- [65] 廖开际, 吴敏. 基于群体博弈的网络团购分析[J]. 统计与决策, 2012(1): 66-69.
- [66] 冯珍, 王程. 智慧旅游服务供应链中竞争企业的进化博弈[J]. 贵州社会科学, 2014(3): 94-97.
- [67] 颀斌, 杨扬, 钟泽伟. 一种基于进化博弈论的云计算虚拟计算资源配置模型[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(5): 75-79.
- [68] 徐明, 刘广钟, 孙伟. 基于进化博弈论的水声传感器网络介质访问控制协议[J]. 计算机应用, 2014, 34(11): 3160-3163.
- [69] 刘臣, 单伟, 于晶. 组织内部知识共享的类型及进化博弈模型[J]. 科研管理, 2014, 35(2): 145-153.
- [70] 翟丽丽, 柳玉凤, 王京, 等. 软件产业虚拟集群企业间信任进化博弈研究[J]. 中国管理科学, 2014, 22(12): 118-125.
- [71] 孙晶磊, 赵西萍, 周密, 等. 基于进化博弈论的 Web2.0 环境下组织内部知识共享研究[J]. 软科学, 2013, 27(5): 105-107.
- [72] 陈萍, 彭文成. 强关系与弱关系下企业网络中的知识共享进化博弈分析[J]. 情报理论与实践, 2014, 37(4): 28-31.
- [73] 刘春兴. 法律起源的进化动力学模型[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2017.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5566, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [bp@hanspub.org](mailto:bp@hanspub.org)