2021年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

1. 项目名称

网络群体行为动力学理论

1. 提名者及提名意见

提名者：

陕西省物理学会

提名意见：

该项目基于演化博弈理论、斑图理论、生物数学等相关方法，围绕网络群体行为动力学展开深入系统的研究。构建了网络博弈的均衡解析理论，以准确揭示群体行为的涌现机理和刻画群体行为的演化特征、自组织模式；提出了耦合网络群体博弈理论，以准确分析耦合系统中群体行为演化规律和评估耦合信息机制对行为态势的影响；构建了种群斑图动力学框架，以准确刻画种群行为的时空扩散和自适应特征，为生态系统或传染病的动态监测提供新的预警指标。5篇代表作WoS总引201次，他引180次，研究成果多次被海内外知名学者积极评价。该项目在网络群体的行为决策模式等方面取得系列创新性成果，为公共安全、公共卫生、生态系统领域等提供了有效的理论支撑。

提名该项目为陕西省自然科学奖 二 等奖。

1. 项目简介

现实世界中存在各种各样的合作和竞争行为，例如蚂蚁共同运输食物、沙丁鱼集体洄游、无人机编队对抗、人机对弈，这些群体行为是自然界和人类社会赖以生存和稳定运行的基础。因此，如何揭示群体行为的涌现机理和激励机制，已成为当今最具挑战性的科学难题之一。针对这一难题，该项目基于演化博弈、斑图理论、数学生物学、复杂网络等方法，在网络群体行为模式涌现机理、演化规律、时空传播特征等方面取得系列创新成果，并成功应用于社交网络群体行为态势评估、植被多样性保护等实际工程。重要科学发现如下：

**1.构建了网络博弈的均衡解析理论，以准确揭示群体行为的涌现机理和刻画群体行为的演化特征、自组织模式**：基于演化博弈和马尔科夫决策过程，建立了行为策略变量与收益函数的耦合动力学方程，揭示了群体行为决策与策略空间分布特征的协同演化规律，实现了群体行为均衡态与相变空间的统一计算与预测。建立了基于稀疏交互的群体博弈动力学模型，揭示了交互结构对群体行为自组织模式和均衡态的影响，凝练了动态异质交互环境下群体合作行为的涌现机制。

**2.提出了耦合网络群体博弈理论，以准确分析耦合系统中群体行为演化规律和评估耦合信息机制对行为态势的影响**：提出了非对称性耦合网络博弈动力学，分析了有向的信息耦合机制对行为决策模式的影响，揭示了强非对称性可通过抑制主网的负反馈机制促进从属网的行为决策过程。提出了基于行为决策与学习更新规则的共演化模型，分析了不同共演化框架下耦合强度、耦合时间尺度对群体行为时空演化态势的影响（例如，时空班图的同步演化、一级相变式的群体行为爆炸性涌现、行为团簇渗流式聚集），揭示了群体最优合作行为与网络聚合团簇呈现正相关性，发展了耦合网络群体行为决策的互惠理论。

**3.构建了种群斑图动力学框架，以准确刻画种群行为的时空扩散和自适应特征，为生态系统或传染病的动态监测提供新的预警指标**：基于反应扩散方程和蒙特卡洛仿真方法构建了斑图动力学理论，结合现实数据分析了种群的多种移动方式和非线性作用等对群体行为空间分布特征的影响，发现了新的斑图结构（例如带状、点状、迷宫装、靶波、螺旋波）及其形成机制，揭示了种群及其传播规模与空间结构的交互机制,阐明了观测到的历史重大传染病斑图和植被分布的成因。

该项目的相关成果发表在PNAS、Nonlinear Dynamics、Physical Review E、New Journal of Physics等期刊，ESI高被引论文4篇。项目第一完成人获陕西青年科技、入选省级人才计划，第二完成人获国家优秀青年基金资助、入选国家特殊津贴专家，其他完成人也分别入选省部级人才计划。5篇代表作Web of Science总引201次，他引180次，代表作2入选ESI高被引论文。研究成果多次被海内外知名学者积极评价，也成功应用于社交网络群体行为态势评估、植被多样性保护等实际工程，产生了良好的经济效益和社会效益。此外，项目组已获批相关发明专利3项，在数学生物学年会、CJK年会等国内外知名会议做报告20余次。

1. 客观评价

主要论文被引用和评价的情况如下：

针对发现点1“**网络群体行为演化特征分析**”，同行评价如下：

1）斯特拉斯克莱德大学的Ruaridh Clark博士在Applied Mathematics and Computation 382 (2020) 125355中评价我们的工作《Aspiration driven coevolution resolves social dilemmas in networks》为：“These games represent different social dilemmas and **have been extensively studied** for understanding the evolution of cooperation”。

针对发现点2“**多层耦合网络群体行为决策动力学**”，同行评价如下：

1）世界知名网络专家、日本九州大学Jun Tanimoto 教授在Chaos, Solitons and Fractals 122 (2019) 1-5中评价我们的工作《Popularity enhances the interdependent network reciprocity》为“**a quite powerful tool** to analyze traffic flow from social dilemma point of view.”。

2）早稻田大学的Hirofumi Takesue教授在Applied Mathematics and Computation 388 (2021) 125543中引用我们的工作《Popularity enhances the interdependent network reciprocity》为“Furthermore, several studies have demonstrated the coevolution of cooperation and interdependency among network layers [35], [36], [37], [38], [39].”。

针对发现点3“**群体行为斑图动力学**”，同行评价如下：

1）威洛尔大学的K. Durga Prasad教授在Theoretical Ecology, 2017(1):1-21中引用我们的工作《Predator cannibalism can give rise to regular spatial pattern in a predator–prey system》并评价为“**provide us with a wealth of information and interesting bifurcation aspects** along with conditions for Turing pattern formation.”；

2）马德里理工大学的Luciano Stucchi教授在非线性物理领域的Top期刊 PHYSICAL REVIEW E 100(6) (2019)中引用我们的工作《 Predator cannibalism can give rise to regular spatial pattern in a predator-prey system》为：“Ultimately, [9] showed that usinga quadratic term in a Holling-type II functional response also might generate Turing instabilities”；

3）奥塔哥大学的Robert A. Van Gorder教授在美国数学生物学学会的官方刊物Bulletin of Mathematical Biology 81(12) (2019) 5009-5053中引用我们的工作《Predator cannibalism can give rise to regular spatial pattern in a predator-prey system》为：“Heterogeneous predator dynamics, such as more than one type of predator or one species of predator partitioned into subspecies which behave in different ways (Alonso et al. 2002) or **predator cannibalism (Sun et al. 2009)**, have been shown to induce spatial patterning.”。

4）麦吉尔大学的Frederic Guichard教授在生物数学知名期刊Mathematical Biosciences上引用我们的工作《Pattern dynamics of a spatial predator–prey model with noise》为：“can be studied as stochastic systems to show **how demographic and environmental （Li et al. 2012）stochasticity can interact**”；

5）韩国大邱天主教大学的Hunki Baek教授在Discrete Dynamics in Nature and Society（2013）中引用我们的工作《Pattern dynamics of a spatial predator–prey model with noise》为：“occur only when the inhibitor (𝑃) diffuses faster than the activator （Li et al. 2012）, 指出我们的论文给出了斑图的形成机理。

1. 代表性论文专著目录（不超过8条，其中代表性论文不超过5篇，代表性专著不超过3部）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 论文专著  名称 | 刊名 | 作者 | 年卷页码（xx年xx卷xx页） | 发表时间 | 通讯作者 | 第一作者 | 国内作者 | 他引总次数 | 检索数据库 | 知识产权是否归国内所有 |
| 1 | Aspiration driven coevolution resolves social dilemmas in networks | Applied Mathematics and Computation | Chen Liu, Juan Shi, Tong Li, Jinzhuo Liu | 2019年342卷247-254页 | 2018年10月8日 | Jinzhuo Liu | Chen Liu | 刘晨，时娟，李彤，刘金卓 | 20 | Web of Science | 是 |
| 2 | Popularity enhances the interdependent network reciprocity | New Journal of Physics | Chen Liu, Chen Shen, Yini Geng, Shudong Li, Chengyi Xia, Zhihong Tian, Lei Shi, RuiwuWang, Stefano Boccaletti, Zhen Wang | 2018年20卷文献号123012 | 2018年12月14日 | Zhen Wang | Chen Liu, Chen Shen | 刘晨，申晨，耿旖旎，李树栋，夏承遗，田志宏，石磊，王瑞武，王震 | 21 | Web of Science | 是 |
| 3 | Predator cannibalism can give rise to regular spatial pattern in a predator–prey system | Nonlinear Dynamics | GuiQuan Sun, Guang Zhang, Zhen Jin, Li Li | 2009年58卷75-84页 | 2009年1月9日 | Zhen Jin | Guiquan Sun | 孙桂全，张广，靳祯，李莉 | 80 | Web of Science | 是 |
| 4 | Pattern dynamics of a spatial predator–prey model with noise | Nonlinear Dynamics | Li Li，  Zhen Jin | 2012年67卷1737–1744页 | 2012年6月16日 | Li Li | Li Li | 李莉，靳祯 | 54 | Web of Science | 是 |
| 5 | Pattern transitions in a vegetation system with cross-diffusion | Applied Mathematics and Computation | Chen Liu, Li Li, Zhen Wang, Ruiwu Wang | 2019年342卷  255-262页 | 2018年10月9日 | Ruiwu Wang | Chen Liu | 刘晨，李莉，王震，王瑞武 | 5 | Web of Science | 是 |
| 合 计 | | | | | | | | | 180 |  |  |

1. 主要完成人情况（不超过6人）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位 | 完成单位 | 对本项目贡献 |
| 刘晨 | 1 | 无 | 副教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 构建了网络博弈的均衡解析理论，完善并发展了网络群体博弈动力学理论：建立了行为策略变量与收益函数的耦合动力学方程（对应发现点1）；构建了群体属性与群体行为决策的多层网络共演化模型，发现了“双重层间互惠效应”（对应发现点2）；构建了种群斑图动力学研究的理论框架，研究了交叉扩散系数对植被的影响（对应发现点3）。该完成人为代表性论文1、5的第一作者，为代表性论文2的共同第一作者；为项目“放牧对林下草地植被、土壤空间异质性及其相互关系的调控机制”的第一完成人。 |
| 孙桂全 | 2 | 无 | 教授 | 中北大学 | 中北大学 | 基于反应-扩散方程提出了种群斑图形成的新机制，发现了带状、动态波新的斑图结构和形成机制，构建了种群斑图的理论框架，揭示了不同生物斑图对应的生态功能，建立了带有空间扩散的捕食-食饵模型，发现了捕食者的同类相食行为对空间格局的形成有很大的影响，即使环境是异质的，系统仍然能出现图灵斑图(对应发现点3)。该完成人为代表作3的第一作者；为项目“具有时空时滞的传染病模型斑图动力学研究”和“基于反应扩散方程的布鲁氏菌病传播动力学研究”的第一完成人。 |
| 刘金卓 | 3 | 无 | 副教授 | 云南大学 | 云南大学 | 提出了个体特征属性与个体行为决策的共演化博弈动力学模型，发现策略多态循环现象；构建了建立了非对称耦合网络群体行为动力学的平均场、对近似模型，刻画了不同非对称强度下网络群体行为的演化规律，完善了多层耦合网络互惠理论，为非对称耦合网络群体行为的控制与预测提供了理论依据（对应发现点1、2）。该完成人为代表性论文2的通讯作者。 |
| 李莉 | 4 | 无 | 副教授 | 中北大学 | 中北大学 | 研究了噪声对种群斑图结构的影响，发现噪声会导致种群从持续变为灭绝，并给出了种群持续和灭绝的参数区域。从结构决定功能角度刻画了不同种群时空斑图结构对应的生态功能，为种群的保护提供了新的量化指标（对应发现点3）。该完成人为代表作4的第一作者；为项目“基于人类行为的复杂网络传染病动力学建模与分析”的第一完成人。 |

1. 主要完成单位情况（不超过3个）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 完成单位 | 排名 | 对本项目主要贡献（限600字） |
| 西北工业大学 | 1 | 西北工业大学是我国唯一一所以同时发展航空、航天、航海（三航）人才培养和科学研究为特色的多科性、研究型、开放式大学，现也是国家“211工程”，“985工程”和“一流大学”建设高校（A类），隶属于工业和信息化部。学校为该项目组提供了良好的工作环境，从管理和服务上保证了项目的顺利完成。该单位主要贡献如下：构建了网络博弈的均衡解析理论，揭示了交互结构对群体行为自组织模式和均衡态的影响。提出了耦合网络群体博弈理论，以准确分析耦合系统中群体行为演化规律和评估耦合信息机制对行为态势的影响：构建了种群斑图动力学框架，以准确刻画种群行为的时空扩散和自适应特征，为生态系统或传染病的动态监测提供新的预警指标。 |
| 中北大学 | 2 | 中北大学是国家国防科技工业局与山西省人民政府共建高校、山西省重点建设大学，入选中西部高校基础能力建设工程、卓越工程师教育培养计划山西首批创新创业教育改革示范高校、山西大众创业万众创新示范基地等。学校为该项目组提供了良好的工作环境，从管理和服务上保证了项目的顺利完成。该单位主要贡献如下：构建了种群斑图动力学框架，以准确刻画种群行为的时空扩散和自适应特征，为生态系统或传染病的动态监测提供新的预警指标：基于反应扩散方程和蒙特卡洛仿真方法构建了斑图动力学理论，结合现实数据分析了种群的多种移动方式和非线性作用等对群体行为空间分布特征的影响，发现了新的斑图结构（例如带状、点状、迷宫装、靶波、螺旋波）及其形成机制，揭示了种群及其传播规模与空间结构的交互机制，阐明了观测到的历史重大传染病斑图和植被分布的成因。 |
| 云南大学 | 3 | 云南大学是教育部与云南省“以部为主、部省合建”的全国重点大学，世界一流大学建设高校，入选211工程、一省一校、中西部高校基础能力建设工程，云南省重点支持的国家一流大学建设高校。学校为该项目组提供了良好的工作环境，从管理和服务上保证了项目的顺利完成。该单位主要贡献如下：基于演化博弈和马尔科夫决策过程，建立了行为策略变量与收益函数的耦合动力学方程，揭示了群体行为决策与策略空间分布特征的协同演化规律。提出了非对称性耦合网络博弈动力学，分析了有向的信息耦合机制对行为决策模式的影响。 |

1. 完成人合作关系说明

刘晨副教授与刘金卓副教授合作完成了代表作1-Aspiration driven coevolution resolves social dilemmas in networks，该工作发表在Applied Mathematics and Computation上。

孙桂全教授与李莉副教授合作完成了代表作3-Predator cannibalism can give rise to regular spatial pattern in a predator–prey system，该工作发表在Nonlinear Dynamics上。

刘晨副教授与李莉副教授合作完成了代表作5-Pattern transitions in a vegetation system with cross-diffusion，该工作发表在Applied Mathematics and Computation上。