

陕西省自然科学奖公示信息

(2026年度)

一、项目基本情况

项目名称	时空异质反应扩散系统的阈值动力学
主要完成人	聂华、张磊、吴建华、石垚
主要完成单位	陕西师范大学、中国科学技术大学

二、提名意见（适用于提各单位）

提 名 者	陕西省教育厅
提名意见（不超过 600 字）： 本项目属于非线性反应扩散方程与生物数学应用基础研究领域，是项目组依托 4 项国家自然科学基金面上项目和陕西省杰出青年科学基金项目，经过近十年持续研究形成的系列原创性成果。围绕时空异质环境下种群入侵、持续与共存等核心科学问题，项目发展了非自伴算子主特征值参数分析方法，建立了非紧系统的主特征值与基本再生数理论；并将其应用于河流底栖—漂流模型、河流捕食—食饵模型、空间捕食型恒化器模型和季节性时滞莱姆病模型等，刻画了种群生灭演化以及疾病消亡与流行的阈值动力学，确立了基于关键参数临界值的入侵判据；揭示了水流、扩散和边界调控种群长期行为与空间集聚的内在机制，形成了从动力学理论到生态与疾病应用的系统研究体系。 5 篇代表性论文发表于美国工业与应用数学学会会刊《SIAM J. Appl. Math.》、《SIAM J. Math. Anal.》以及《J. Math. Biol.》、《J. Differential Equations》和《J. Dyn. Differ. Equ.》。5 篇代表性论文总他引 302 次，2 篇入选 ESI 高被引论文。成果建立了时空异质反应扩散系统的参数依赖阈值动力学，获 2024 年陕西高等学校科学技术一等奖。成果材料齐全、规范，经公示，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件，提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。	
说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。项目组与提各单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。	

二、提名意见（适用于专家提名）

[illegible]

三、项目简介

本项目属于非线性反应扩散方程与生物数学应用基础研究领域，是项目组近十年来系列研究工作的系统总结。项目组先后完成国家自然科学基金面上项目 4 项，并承担陕西省杰青项目。反应扩散方程是研究种群迁移、物种入侵和疾病传播的重要工具，也是连接偏微分方程理论与生命科学问题的重要桥梁。扩散、对流、空间异质性、边界和季节变化等时空因素会改变种群或病原体的空间分布与增长能力，进而引起种群灭绝与持续、物种入侵与共存以及疾病消亡与流行之间的动力学转变，是时空异质生物系统动力学的核心问题。这类转变通常发生于临界阈值处，主特征值和基本再生数是重要刻画工具。发展谱理论与阈值动力学方法，揭示时空因素、临界阈值与长期行为的关系，是非线性反应扩散方程与生物数学的重要研究方向。

本项目聚焦时空异质反应扩散系统的阈值动力学，围绕水流、扩散、空间异质、时间周期等因素对种群入侵、持续与共存的影响，建立了非自伴算子与强正非紧算子的主特征值理论，发展了本质谱分析与参数分析方法，构建了非紧时间周期系统的基本再生数理论。进而系统刻画了底栖—漂流模型、捕食—食饵系统河流模型和恒化器模型、莱姆病模型关键参数驱动的阈值动力学，提出了临界参数判定、稳态解分支与空间渐近分布研究的新方法，揭示了水动力与边界条件调控种群消长及空间集聚的机制，形成了从动力学理论到生态与疾病应用的完整研究体系。5 篇代表性论文分别发表于美国工业与应用数学学会会刊《SIAM J. Appl. Math.》、《SIAM J. Math. Anal.》以及《J. Math. Biol.》、《J. Differential Equations》和《J. Dyn. Differ. Equ.》。重要科学发现如下：

(1) 建立河流捕食—食饵反应扩散对流模型的参数依赖阈值动力学，揭示对流、扩散、边界调控种群入侵和空间集聚机制。

围绕 M. A. Lewis 院士提出的捕食者入侵临界流速问题，攻克对流导致算子非自伴、捕食系统缺乏单调结构及主特征值随扩散系数非单调变化等理论挑战，发展非自伴算子主特征值参数分析方法，建立河流捕食—食饵模型关于水流速率、扩散系数等参数依赖阈值动力学。系统刻画了开放河流中物种共同灭绝、食饵持续与入侵共存的动力学切换机制，建立封闭河流中扩散、对流和死亡率耦合的阈值判据及正稳态渐近分布。结果表明，强水流导致冲刷灭绝；快对流慢扩散诱发边界集聚，揭示了水动力与边界条件共同调控物种入侵和空间分布的机制。

(2) 建立具有快速演化特征的空间捕食型恒化器模型关于扩散系数的双临界阈值动力学，揭示扩散驱动的两种群灭绝、仅食饵持续与两种群共存的动力学转变。

Ellner 等《Science》(2000)和《Nature》(2003)实验发现，快速演化使恒化器

捕食—食饵动力学随稀释率经历灭绝及稳态—周期态—稳态切换，但模型守恒律失效和特征值分析困难使其缺乏严格数学分析。本项目发展了不等式估计、降维解耦和特征值参数分析方法，证明两个临界扩散系数将系统动力学分为三类：大扩散下两种群全部灭绝、中等扩散下仅食饵持续、小扩散下两种群共存，并得到由入侵阈值延伸的共存稳态分支。数值揭示共存区 Hopf 分岔及扩散在资源追踪与边界流失中的双重作用，部分解决了该切换问题，为理解快速演化重塑生态系统提供数学依据。

（3）建立非紧系统的主特征值与基本再生数理论，并应用于底栖—漂流种群和莱姆病模型的全局阈值动力学研究。

针对部分退化扩散、非局部作用引起的演化算子非紧问题，项目组与梁兴、赵晓强教授合作建立了强正非紧算子的主特征值理论，在谱半径大于本质谱半径时，获得主特征值的存在性、代数单重性、正特征向量唯一性和谱点分离性；通过分解周期演化算子的紧与非紧部分，得到了算子的本质谱点结构，并给出了主特征值的显式存在条件。进一步建立非紧时间周期泛函微分系统的基本再生数理论及数值计算方法，并应用于河流底栖—漂流模型和季节性时滞莱姆病模型，获得种群灭绝与持续、疾病消亡与流行的阈值判据。

研究成果在反应扩散方程、生物数学及算子谱理论等领域产生了广泛而持续的学术影响，被 Sze-Bi Hsu (SIAM Fellow)、Carlos Tomei (SIAM Fellow)、Jianhong Wu (加拿大皇家科学院院士)、Shigui Ruan (《B. Math. Biol.》Senior Editor)、庾建设教授(国家高层次人才计划)、王学锋(国家高层次人才计划)、楼元(SIAM J. Appl. Math. 副主编)、肖燕妮(国务院学科评议组成员)、孙桂全(国家高层次人才计划)等国内外知名学者实质性引用。**5 篇代表性论文他引共 302 次，2 篇入选 ESI 高被引论文。**相关引用成果发表于《Phys. Rep.》、《J. Math. Pures Appl.》、《Math. Ann.》、《SIAM J. Math. Anal.》、《SIAM J. Appl. Math.》、《J. Differential Equations》、《Calc. Var. Partial Differential Equations》、《J. Nonlinear Sci.》、《J. Math. Biol.》、《Bull. Math. Biol.》等国际著名期刊。

本项目建立的非自伴算子和强正非紧算子的主特征值和基本再生数理论，以及参数分析、临界阈值判定、稳态分支渐近分析等方法，已被推广应用于复杂捕食系统、非均匀恒化器、非局部扩散、年龄结构等多类生态与传染病模型，成为相关领域重要的分析工具。

四、客观评价

研究成果在反应扩散方程、生物数学及算子谱理论等领域产生了广泛而持续的学术影响, 5 篇代表性论文被 Sze-Bi Hsu (SIAM Fellow)、Carlos Tomei (SIAM Fellow)、Jianhong Wu (加拿大皇家科学院院士)、Shigui Ruan (《B. Math. Biol.》Senior Editor)、庾建设教授 (国家高层次人才计划)、王学锋 (国家高层次人才计划)、李万同 (重点项目主持人)、靳祯 (重点项目主持人)、楼元 (SIAM J. Appl. Math. 副主编)、肖燕妮 (国务院学科评议组成员)、孙桂全 (国家高层次人才计划) 等国内外知名学者的实质性引用, 相关成果发表于《Phys. Rep.》、《J. Math. Pures Appl.》、《Math. Ann.》、《SIAM J. Math. Anal.》、《SIAM J. Appl. Math.》、《SIAM J. Appl. Dyn. Syst.》、《J. Differential Equations》、《Calc. Var. Partial Differential Equations》、《J. Nonlinear Sci.》、《J. Math. Biol.》、《Bull. Math. Biol.》等国际著名学术期刊。本项目建立的非自伴算子与强正非紧算子的主特征值和基本再生数理论, 以及参数分析、临界阈值判定、稳态分支渐近分析等方法, 已被后续研究作为重要理论工具加以采用和发展, 并拓展至复杂捕食系统、非均匀恒化器、非局部或部分退化扩散、年龄结构及周期时滞等多类生态与传染病模型。具体引用如下:

(1) 国家高层次人才计划庾建设教授等在文章[SIAM J. Appl. Math. 86(2026)]第 77 页强调, 本研究发现了低流速有利于捕食者的成功入侵。即“in [27] (代表性论文[1]), Nie, Wang, and Wu examined a predator-prey model with $b_0 = 0$ and $b_L = 1$. Their results demonstrate that a combination of small advection and a low predator mortality rate facilitates the successful invasion of the predator.”。

(2) 美国迈阿密大学 Shigui Ruan 教授等在文章[Math. Ann. 384(2022)]第 578 页指出, 其给出的主特征值存在充分条件与申请人及合作者基于广义 Krein-Rutman 定理建立的存在判据在一定意义下等价。即“We will observe a key fact that the sufficient conditions which we present for the existence of the principal eigenvalue of an operator from the theory of resolvent positive operators with their perturbations are equivalent to that in some sense obtained from the generalized Krein-Rutman theorem (see Edmunds et al. [16], Nussbaum [34] or Zhang [53] (代表性论文[4]))。”(注: 文献[53]是代表性论文[4]附录 A 的预印本)。

(3) 加拿大阿尔伯塔大学 Hao Wang 教授等在文章[J. Math. Biol. 89(2024)]第 17 页借用代表性论文[2]的证明思路 and 主要结果得到了他们的关键引理。即“The following result is derived from Theorem 3.9 in Wang and Nie (2022) and Theorem 2.1 in Nie et.al (2023) (代表性论文[2])”; “From Lemma 2.2 in Nie et al. (2020) or Lemma 3.1 in Nie et al. (2023), R_z is strictly decreasing ...”。

(4) 加拿大威尔弗里德·劳里埃大学 Yuming Chen 教授等在文章[J. Differential Equations 334 (2022)]中七处引用本研究关于河流反应扩散系统入侵动力学的五篇工作, 肯定本研究建立了基于临界对流率的河流捕食-食饵反应扩散对流系统的入侵阈值动力学, 并在本研究基础上拓展研究了具有 Holling-Tanner 型反应项的河流捕食-食饵系统的入侵动力学。具体引用参见该论文第

281、282、300、303 页“Nie et al. [20,21 (代表性论文[1])] obtained a complete classification on the dynamical behavior of the system when...It is worth mentioning that two-species competitive models including advection in homogeneous /heterogeneous environments have been extensively studied [16,24,27,28,30-32].”; “Following the approach as that in the proof of [21, Lemma 4.1] (代表性论文[1]), one can show that system (1.2) admits a unique positive solution ...”; “following the approach as that in the proof of [21, Lemma 4.3] (代表性论文[1]) with some mild modifications, one can prove that system (1.2) is uniformly persistent.”等。

(5) 加拿大阿尔伯塔大学 **Russell Milne** 等在文章[Math. Biosci. 400(2026)]中六处引用了代表性论文[3], 将其稳态解存在唯一性与一致持久性研究方法直接用于浮游生物—寄生虫传播模型。具体引用参见该论文第 2、3、5、9 页“in the chemostat framework, the natural mortality rate can be negligible relative to washout and biological interactions [14] (代表性论文[3]).”; “Using a proof similar to Theorem 1.2 (ii) in [14] (代表性论文[3]), it follows that system (3.12) is uniformly persistent...”; “Following Theorems 3.2 in [19] or Proposition 1.1 in [14] (代表性论文[3]), there exist unique positive (N_2, P_2) satisfying the first and second equations of (2.1)...”等。

(6) 国家高层次人才计划王学锋教授等在文章[J. Differential Equations 369(2023)]指出“nonlocal diffusion is allowed to be absent in some of the components of L , which is the main feature of [21] (代表性论文[4])”。

(7) 国务院学科评议组成员肖燕妮教授等在文章[J. Math. Biol. 85(2022)]中采用本项目建立的基本再生数理论定义了泛函偏微分 SIS 模型的基本再生数, 并得到了其变分刻画。即“We now make use of the theory developed in Liang et al. (2019) [31] (代表性论文[5]) to derive the basic reproduction number of system (2).”。

(8) 国家高层次人才计划孙桂全教授等在综述文章 [Phys. Rep. 1111 (2025)] 中, 将代表性论文[4]列为退化时间周期反应—扩散系统主特征值理论的重要进展。即“Further studies explore degenerate periodic reaction–diffusion systems [115] (代表性论文[4]), spatial reaction–diffusion PDE epidemic models [116], and almost periodic reaction–diffusion epidemic models [117].”。

(9) 丹麦技术大学 **Michael Pedersen** 等在文章[J. Differential Equations 365(2023)]中多处采用代表性论文[4][5]的主特征值与基本再生数研究具有脉冲效应的河流模型: 依据[4]的定理判定脉冲特征值问题的主特征值, 即“ As in Theorem 2.7 in [15] (代表性论文[4]), we claim that μ_1 is the principal eigenvalue of the eigen-value problem (3.2).”; 采用[5]提出的广义幂迭代算法计算其模型的基本再生数, 即“we can compute the spectral radii of the Poincaré maps of the periodic eigenvalue problems with impulses (2.2), (3.2) and (3.4) by the generalized power method in Lemma 2.5 in [14] (代表性论文[5]).”。

五、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，应公开发表 2 年以上，即 2024 年 8 月 1 日前)

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 (年月 日)	通讯作者 (含共 同)	第一作 者(含 共同)	国内作者 (中文)	他引总 次数	检索数 据库	知识产权 是否归国 内所有
1	Invasion analysis on a predator-prey system in open advective environments	Journal of Mathematical Biology	Hua Nie Biao Wang Jianhua Wu	2020 年 81 卷 1429- 1463 页	2020 年 12 月 15 日	Jianhua Wu	Hua Nie	聂华 王彪 吴建华	50	Web of Science 核心合 集	是
2	Effects of diffusion and advection on predator-prey dynamics in closed environments	Journal of Differential Equations	Hua Nie Shixia Xin Hongying Shu	2023 年 367 卷 290-311 页	2023 年 9 月 15 日	Hongying Shu	Hua Nie	聂华 辛世霞 舒洪英	31	Web of Science 核心合 集	是
3	The effect of diffusion on the dynamics of a predator-prey chemostat model	SIAM Journal on Applied Mathematics	Hua Nie Yao Shi Jianhua Wu	2022 年, 82 卷 821-848 页	2022 年 8 月 3 日	Jianhua Wu	Hua Nie	聂华 石垚 吴建华	16	Web of Science 核心合 集	是

4	The principal eigenvalue for degenerate periodic reaction-diffusion systems	SIAM Journal on Mathematical Analysis	Xing Liang Lei Zhang Xiao-Qiang Zhao	2017 年 49 卷 3603-3636 页	2017 年 12 月 14 日	Xing Liang	Xing Liang	梁兴 张磊	63	Web of Science WOS 核心合集	是
5	Basic reproduction ratios for periodic abstract functional differential equations (with application to a spatial model for lyme disease)	Journal of Dynamics and Differential Equations	Xing Liang Lei Zhang Xiao-Qiang Zhao	2019 年 31 卷 1247-1278 页	2019 年 9 月 5 日	Xiao-Qiang Zhao	Xing Liang	梁兴 张磊	142	Web of Science 核心合集	是
6											
7											
8											
合 计									302		
补充说明（视情填写）:											

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

六、主要完成人情况表

姓 名	聂华	排 名	1
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
对本项目主要学术贡献： 建立了河流捕食-食饵模型与空间捕食型恒化器模型的参数依赖阈值动力学，发展了非自伴算子主特征值的参数分析方法，揭示了对流、扩散与边界条件调控物种入侵和空间分布的机制，为项目重要科学发现点 1、2 提供了关键学术思想，支持论文[1, 2, 3]。			

姓 名	张磊	排 名	2
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	中国科学技术大学
对本项目主要学术贡献： 建立了非紧系统的主特征值与基本再生数理论，并应用于底栖-漂流种群和莱姆病传播模型的全局阈值动力学研究，为项目重要科学发现点 3 提供了关键学术思想，支持论文[4, 5]。			

姓 名	吴建华	排 名	3
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
对本项目主要学术贡献： 建立了捕食-食饵型反应扩散系统的参数依赖阈值动力学，发展了非线性反应扩散系统的动力学理论，为项目重要科学发现点 1, 2 提供了关键学术思想，支持论文[1, 3]。			

姓 名	石 垚	排 名	4
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	长安大学	完成单位	陕西师范大学
对本项目主要学术贡献： 建立了具有快速演化特征的空间捕食型恒化器模型关于扩散系数的双临界阈值动力学，揭示扩散驱动的种群灭绝、单种持续、入侵共存及稳态分岔机制，为项目重要科学发现点 2 提供了关键学术思想，支持论文[3]。			

七、主要完成单位情况表

单位名称	陕西师范大学
对本项目主要学术贡献： 1) 组织并完成了项目策划和实施工作； 2) 为项目的顺利实施提供了人力资源与优质的工作环境与场所； 3) 提供了本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源。	

单位名称	中国科学技术大学
对本项目主要学术贡献： 1) 组织并完成了项目合作工作； 2) 为项目的顺利实施提供了人力资源与优质的工作环境与场所； 3) 提供了本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源。	

八、完成人合作关系说明

四位完成人长期致力于该项目合作研究，为项目目标达成均做出了不可或缺贡献。聂华、吴建华为陕西师范大学教授，他们长期合作从事反应扩散系统阈值动力学相关问题的研究，已合作发表学术论文 44 篇，合作在科学出版社出版专著 2 部，合作完成国家自然科学基金项目 5 项。

张磊为陕西师范大学副教授，与吴建华教授、聂华教授合作发表学术论文各 1 篇，并正参与聂华主持的国家自然科学基金面上项目：底栖—浮游耦合的反应扩散模型的入侵机制研究（No. 12471464）。石垚为长安大学副教授，是吴建华教授培养的博士研究生（聂华协助培养），他们已合作发表学术论文 4 篇，石垚参与了聂华主持的国家自然科学基金面上项目：空间异质的河流生态系统演化入侵机制研究（No. 12071270）。

本项目 5 篇代表性论文，是项目组近十年来在空间异质反应扩散系统动力学领域研究工作的代表，是团队长期合作的结果。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	共同 立项	聂华（1） 张磊（2）	2025.1.1 至 2028.12. 31	底栖—浮游耦合 的反应扩散模型 的入侵机制研究	见附件 2 国家自然科学基金 面上项目 12471464
2	共同 立项	聂华（1） 吴建华（3）	2017.1.1 至 2020.12. 31	基于反应扩散对 流模型的生物入 侵机制研究	见附件 2 国家自然科学基金 面上项目 11671243
3	共同 立项	聂华（1） 吴建华（3）	2013.1.1 至 2016.12. 31	一类具有营养质 的反应扩散模型 正解及大时间行 为	见附件 2 国家自然科学基金 面上项目 11271236
4	共同 立项	聂华（1） 吴建华（3）	2013.1.1 至 2016.12. 31	一类具有复杂生 态网络结构的非 均匀恒化器模型	见附件 2 陕西省青年科技 新星项目 2015KJXX -21
5	共同 立项	聂华（1） 石焱（4）	2021.1.1 至 2024.12. 31	空间异质的河流 生态系统演化入 侵机制研究	见附件 2 国家自然科学基金 面上项目 12071270
6	论文 合著	聂华（1） 吴建华（3）	2018.9 至 2020.9	Invasion analysis on a predator- prey system in open advective environments	见附件 1 代表性论文 1
7	论文 合著	聂华（1） 吴建华（3） 石焱（4）	2019.9 至 2022.5	The effect of diffusion on the dynamics of a predator-prey chemostat model	见附件 1 代表性论文 3

8	论文 合著	聂华（1） 张磊（2）	2022.9 至 2025.2	Dynamics analysis of a reaction- diffusion- advection benthic-drift model with logistic growth	未列入附件
9	论文 合著	张磊（2） 吴建华（3）	2023.9 至 2025.11	The principal eigenvalue of cooperative systems with applications to a model of nonlinear boundary conditions	未列入附件