



中国科学院科技战略咨询研究院  
Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences



中国科学院  
文献情报中心  
NATIONAL SCIENCE LIBRARY  
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

Clarivate 科睿唯安

# 2025 研究前沿

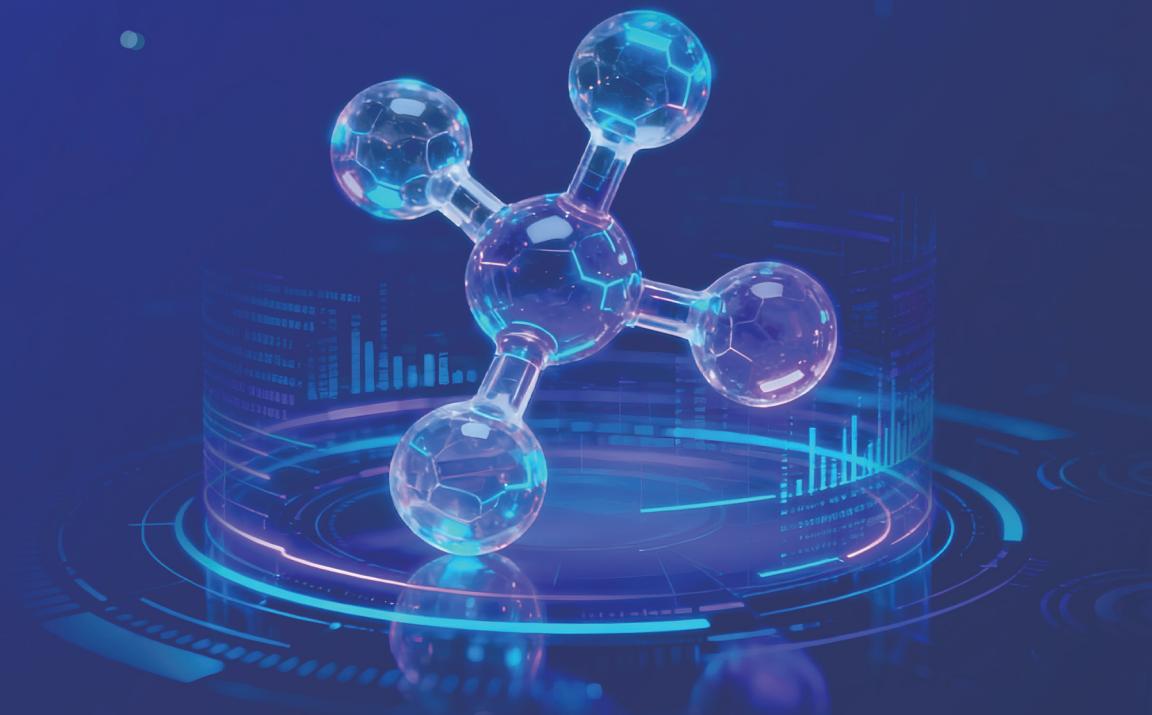
# RESEARCH

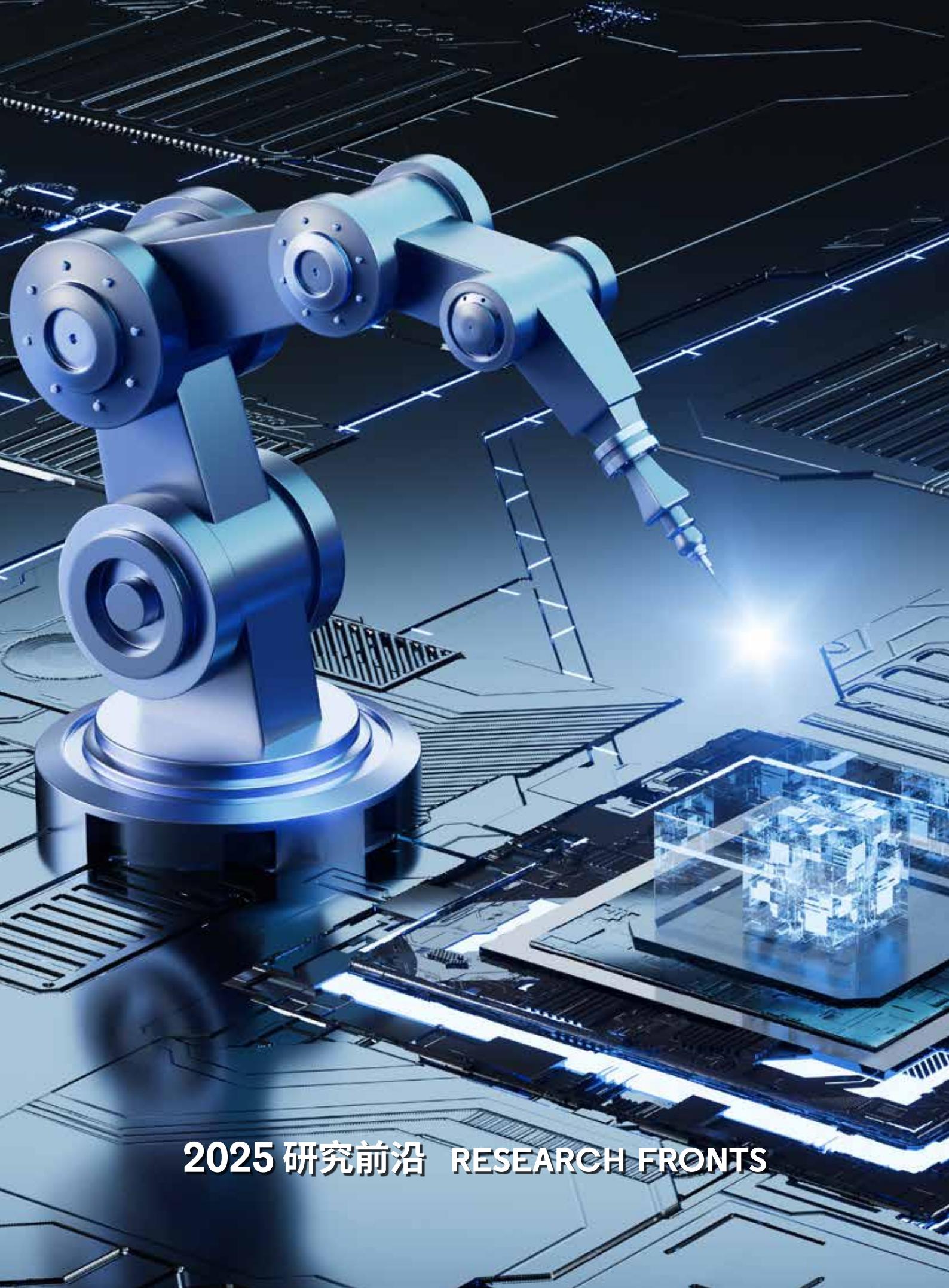
# FRONTS

中国科学院科技战略咨询研究院

中国科学院文献情报中心

科睿唯安





2025 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 目录 Contents

## 背景和方法论

1. 背景	005
2. 方法论	006
2.1 研究前沿的遴选与命名	006
2.2 研究前沿的分析及重点研究前沿的遴选和解读	007

## 农业科学、植物学 和动物学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	011
1.1 农业科学、植物学和动物学领域 Top10 热点前沿发展态势	011
1.2 重点热点前沿——“利用植物根际促生菌缓解植物的盐胁迫”	012
1.3 重点热点前沿——“基于深度学习的植物病害检测”	016
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	019
2.1 新兴前沿概述	019
2.2 重点新兴前沿——“花青素在食品智能包装膜中的应用”	019

## 生态与环境科学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	021
1.1 生态与环境科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	021
1.2 重点热点前沿——“行星边界突破与地球系统风险治理”	022
1.3 重点热点前沿——“基于生物质的活性多孔炭吸附剂制备及二氧化碳捕集性能”	026
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	029
2.1 新兴前沿概述	029
2.2 重点新兴前沿——“污泥厌氧发酵产挥发性脂肪酸的微生物机制研究”	029

## 地球科学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	031
1.1 地球科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	031
1.2 重点热点前沿——“中国陆相页岩油类型与重点地区资源潜力研究”	032
1.3 重点热点前沿——“骤旱事件成因与风险研究”	036
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	039
2.1 新兴前沿概述	039
2.2 重点新兴前沿——“中国区域性极端降水 - 滑坡动态模型研究”	039

---

## 临床医学

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>041</b>
1.1 临床医学领域 Top 10 热点前沿发展态势	041
1.2 重点热点前沿——“CFTR 调节剂三联疗法对囊性纤维化实现从症状控制到病因治疗”	042
1.3 重点热点前沿——“全切片病理图像的弱监督深度学习框架”	045
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>048</b>
2.1 新兴前沿概述	048
2.2 重点新兴前沿——“人工智能大语言模型 ChatGPT 等在医疗健康领域的应用”	049

---

## 生物科学

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>051</b>
1.1 生物科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	051
1.2 重点热点前沿——“网络药理学在中医药现代化研究中的应用”	053
1.3 重点热点前沿——“肿瘤微生物组”	056
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>059</b>
2.1 新兴前沿概述	059
2.2 重点新兴前沿——“AI 驱动的生物分子复合物结构预测与设计新突破”	060

---

## 化学与材料科学

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>063</b>
1.1 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	063
1.2 重点热点前沿——“废旧聚烯烃塑料的化学回收”	064
1.3 重点热点前沿——“用于全固态电池的卤化物固态电解质”	068
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>071</b>
2.1 新兴前沿概述	071
2.2 重点新兴前沿——“倒置钙钛矿太阳能电池稳定性及转换效率提升策略”	071

---

## 物理学

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>073</b>
1.1 物理学领域 Top 10 热点前沿发展态势	073
1.2 重点热点前沿——“超导二极管效应研究”	074
1.3 重点热点前沿——“拍瓦级激光器及其应用”	078
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>082</b>
2.1 新兴前沿概述	082
2.2 重点新兴前沿——“双层镍氧化物 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的高温超导特性研究”	082

**天文学与天体物理学**

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>085</b>
1.1 天文学与天体物理学领域 Top 10 热点前沿发展态势	085
1.2 重点热点前沿——“基于超新星光变曲线数据约束宇宙学参数”	086
1.3 重点热点前沿——“通过直接探测实验寻找低质量暗物质候选粒子”	089

**数学**

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>095</b>
1.1 数学领域 Top 10 热点前沿发展态势	095
1.2 重点热点前沿——“现代机器学习中的双降曲线与泛化现象研究”	096
1.3 重点热点前沿——“物理引导神经网络在偏微分方程求解中的方法与应用”	100

**信息科学**

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>105</b>
1.1 信息科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	105
1.2 重点热点前沿——“6D 目标姿态估计和跟踪技术”	106
1.3 重点热点前沿——“神经渲染和深度伪造的生成与检测”	110
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>113</b>
2.1 新兴前沿概述	113
2.2 重点新兴前沿——“可移动天线在智能无线通信中的性能优化研究”	113

**经济学、心理学及其他社会科学**

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>115</b>
1.1 经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	115
1.2 重点热点前沿——“机器人发展与就业转型”	116
1.3 重点热点前沿——“个性化与数据驱动的心理治疗研究”	120
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>123</b>
2.1 新兴前沿概述	123
2.2 重点新兴前沿——“生成式人工智能在商业领域的应用实践与风险治理”	123

<b>附录 研究前沿综述：寻找科学的结构</b>	<b>124</b>
<b>报告研究团队</b>	<b>134</b>

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

01

背景和方法论

## 1. 背景

科学研究的世界呈现出蔓延生长、不断演化的景象。科研管理者和政策制定者需要掌握科研的进展和动态，以有限的资源来支持和推进科学进步。对于他们而言，洞察科研动向、尤其是跟踪新兴专业领域对其工作具有重大的意义。

为此，科睿唯安发布了“研究前沿”（Research Fronts）数据和报告。定义一个被称作研究前沿的专业领域的方法，源自于科学研究之间存在的某种特定的共性。这种共性可能来自于实验数据，也可能来自于研究方法，或者概念和假设，并反映在研究人员在论文中引用其他同行的工作这一学术行为之中。

通过持续跟踪全球最重要的科研学术论文，研究分析论文被引用的模式和聚类，特别是成簇的高被引论文频繁地共同被引用的情况，可以发现研究前沿。当一簇高被引论文共同被引用的情形达到一定的活跃度和连贯性时，就形成一个研究前沿，而这一簇高被引论文便是组成该研究前沿的“核心论文”。研究前沿的分析数据揭示了不同研究者在探究相关的科学问题时会产生一定的关联，尽管这些研究人员的背景不同或来自不同的学科领域。

总之，研究前沿的分析提供了一个独特的视角来揭示科学的研究脉络。研究前沿的分析不依赖于对文献的人工标引和分类（因为这种方法可能会有标引分类人员判断的主观性），而是基于研究人员的相互引用而形成的知识之间和人之间的联络。这些研究前沿

的数据连续记载了分散的研究领域发生、汇聚、发展（或者是萎缩、消散），以及分化和自组织成更新的研究活动节点。在演进的过程中，每组核心论文的基本情况，如主要的论文、作者、研究机构等，都可以被查明和跟踪。同时，通过对该研究前沿的施引论文<sup>①</sup>的分析，可以发现该领域的最新进展和发展方向。

2013 年科睿唯安发布了《2013 研究前沿——自然科学和社会科学的前 100 个探索领域》白皮书。2014 年和 2015 年科睿唯安与中国科学院文献情报中心成立的“新兴技术未来分析联合研究中心”推出了《2014 研究前沿》和《2015 研究前沿》分析报告。2016 年至 2024 年，中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报中心和科睿唯安联合连续发布了 9 版年度《研究前沿》分析报告。这一系列报告引起了全球广泛的关注。2025 年，在以往系列研究前沿报告的基础上，推出了《2025 研究前沿》分析报告。报告仍然以文献计量学中的共被引分析方法为基础，基于科睿唯安的 Essential Science Indicators<sup>TM</sup> (ESI) 数据库中的 13830 个研究前沿 (Research Fronts)，遴选出 2025 年自然科学和社会科学的 11 大学科领域排名最前的 107 个热点前沿和 18 个新兴前沿（含前沿群；从 2025 年开始，将报告中遴选出的研究前沿或研究前沿群统称为研究前沿，下同），同时基于 Research Horizon Navigator<sup>TM</sup> (RHN) 数据库的新兴主题 (Emerging Topics) 遴选出 3 个热点前沿，合计 110 个热点前沿和 18 个新兴前沿。

<sup>①</sup> 引用核心论文的论文，也称引文。

## 2. 方法论

整个报告分析工作分为两个部分：研究前沿的遴选和命名由科睿唯安和中国科学院科技战略咨询研究院科技战略情报研究所合作完成，128个研究前沿的核心论文及其施引论文的数据由科睿唯安提供；研究前沿的分析和重点研究前沿（包括重点热点前沿和

重点新兴前沿）的遴选及解读由中国科学院科技战略咨询研究院科技战略情报研究所主持完成。此次分析主要基于2019-2024年的论文数据，数据下载时间为2025年3月。

### 2.1 研究前沿的遴选与命名

《2025研究前沿》分析报告反映了当前自然科学与社会科学的11大学科领域的128个研究前沿（包括110个热点前沿和18个新兴前沿）。我们将ESI数据库中20个学科的研究前沿和RHN数据库中的新兴主题划分到11个高度聚合的大学科领域<sup>②</sup>，以此为基础遴选出现较为活跃或发展迅速的研究前沿。报告中所列的128个研究前沿的具体遴选过程如下：

#### 2.1.1 热点前沿的遴选

今年热点前沿的遴选用了三种方法。方法1：沿用往年的热点前沿遴选方法。方法2：从2022年起，对数学领域和信息科学领域研究前沿的遴选方法进行了微调和拓展应用。方法3：2025年，对信息科学领域研究前沿的遴选新增RHN数据库中的新兴主题。

方法1：首先将每个ESI学科中的研究前沿，按照核心论文的总被引频次进行排序，提取排在每个ESI学科前10%的最具引文影响力的研究前沿，并按照大学科领域进行合并。然后根据核心论文平均出版年<sup>③</sup>重新排序，遴选出现每个大学科领域中那些“最年轻”

的研究前沿，并由各学科战略情报研究人员进行调整和归并。通过上述几个步骤在11个大学科领域分别选出若干个热点前沿。

方法2：首先按照11个大学科领域研究前沿中核心论文的篇均被引频次进行排序，选出超过本领域平均篇均被引频次的研究前沿，再根据核心论文平均出版年重新排序，由各学科战略情报研究人员判断这些研究前沿的研究主题是否显著促进了本领域的知识进步，并遴选出现若干备选前沿。

方法3：同方法1类似，首先在RHN数据库中的新兴主题中，按核心论文和共引论文<sup>④</sup>之间的引用网络密度排序，选出引文影响力排在前10%的新兴主题。然后根据核心论文平均出版年重新排序，遴选出现那些“最年轻”的新兴主题，并由各学科战略情报研究人员进行调整和归并。

结合上述三种方法，最终在每个大学科领域各遴选出现10个热点前沿，共计110个热点前沿。因为每个领域具有不同的特点和引用行为，有些学科领域中

<sup>②</sup> 11个大学科领域分别为：1. 农业科学、植物学和动物学；2. 生态与环境科学；3. 地球科学；4. 临床医学；5. 生物科学；6. 化学与材料科学；7. 物理学；8. 天文学与天体物理学；9. 数学；10. 信息科学；11. 经济学、心理学及其他社会科学。

<sup>③</sup> 核心论文出版年的平均值。

<sup>④</sup> 引用至少两篇核心论文的施引论文。

的研究前沿在总被引频次和篇均被引频次上会相对较少，所以从 11 大学科领域中分别遴选出的排名前 10（以下简称 Top10）的热点前沿，代表各大学科领域中最具影响力的研究前沿，但并不一定代表数据库（所有学科）中最大、最热的研究前沿。

### 2.1.2 新兴前沿的遴选

一个研究前沿有很多新近发表的核心论文，通常提示其是一个快速发展的专业研究方向。为了选取新兴的前沿，组成研究前沿的基础文献即核心论文的时效性是优先考虑的因素。这就是为什么我们称其为新兴前沿。

对 11 个大学科领域，为了识别新兴前沿，我们对研究前沿中的核心论文的出版年赋予了更多的权重或优先级，只有核心论文平均出版年在 2023 年 6 月之后的研究前沿才被考虑。将 20 个 ESI 学科中符合时间要求的研究前沿分别按被引频次从高到低排序，选取

被引频次排在前 10% 的研究前沿，然后由各学科战略情报研究人员经过调研和评审，遴选出每个 ESI 学科中的新兴前沿，并将其整合到 11 大学科领域中，从而遴选出 18 个新兴前沿，这 18 个新兴前沿最早的平均出版年是 2023.6。

从 11 大学科领域中遴选新兴前沿，并不按学科限定其遴选数量，因此这些新兴前沿在各个大学科领域中分布并不均匀，例如，2025 年数学领域没有遴选出新兴前沿，而生物科学领域选出了 4 个新兴前沿。

通过以上两个流程，本报告突出显示了 11 个高度聚合的大学科领域中的 110 个热点前沿和 18 个新兴前沿。

### 2.1.3 研究前沿的命名

由各学科战略情报研究人员，根据研究前沿的核心论文的研究主题、主要内容和特点等，对 128 个研究前沿逐一进行命名，并结合专家意见调整确定。

## 2.2 研究前沿的分析及重点研究前沿的遴选和解读

本报告在遴选的 128 个研究前沿的数据的基础上，由中国科学院科技战略咨询研究院的战略情报研究人员对 11 大学科领域的 110 个热点前沿的发展趋势进行了分析，并对 31 个重点研究前沿进行了详细的解读（见后续各章）。重点研究前沿既包括重点热点前沿，也包括重点新兴前沿。

研究前沿由一组共同高被引的核心论文和一组引用核心论文的施引论文组成。核心论文来自于 ESI 数据库中的高被引论文，即在同学科同年度中根据被引频次排在前 1% 的论文。这些有影响力的核心论文的作者、机构、国家在该领域做出了不可磨灭的贡献，本报告对其进行了深入分析和解读。同时，引用研究前沿核心论文的施引论文可以反映出核心论文所提出

的技术、数据、理论等在核心论文发表之后是如何被进一步发展的，即使这些引用核心论文的施引论文本身并不是高被引论文。本报告对相关内容也进行了一定程度的揭示。

### 2.2.1 重点研究前沿的遴选

2014 年设计了遴选重点研究前沿的指标——年篇均被引频次 (CPT)，2015 年在该指标的基础上，又增加了规模指标——核心论文数 (P)。

(1) 核心论文数 (P)

ESI 数据库用共被引文献簇（核心论文）来表征研究前沿，并根据核心论文的元数据及其统计结果揭

示研究前沿的发展态势，其中核心论文数（P）标志着研究前沿的大小，核心论文的平均出版年和论文的时间分布标志着研究前沿的进度。核心论文数（P）表达了研究前沿中知识基础的重要程度。在一定时间段内，一个研究前沿的核心论文数（P）越大，表明该前沿越活跃。

### （2）年篇均被引频次（CPT）

遴选重点研究前沿的指标年篇均被引频次（CPT）的计算方法是用核心论文的总被引频次（C）除以核心论文数（P），再除以施引论文所发生的年数（T）。施引论文所发生的年数（T）指施引论文集合中最新发表的施引论文与最早发表的施引论文的发表时间的差值加1。如最新发表的施引论文的发表时间为2024年，最早发表的施引论文的发表时间为2020年，则该施引论文所发生的年数为5。

$$CPT = (C / P) / T = \frac{C}{P \cdot T}$$

年篇均被引频次（CPT）实际上是一个研究前沿的平均引文影响力和施引论文发生年数的比值，该指标越高代表该前沿越热或越具有影响力。它反映了某个研究前沿的引文影响力的广泛性和及时性，可以用于探测研究前沿的突现、发展以及预测研究前沿下一个时期可能的发展。该指标既考虑了某个研究前沿受到关注的程度，即核心论文的总被引频次，又考虑了该研究前沿受关注的时间长短，即施引论文所发生的年数。在研究前沿被持续引用的前提下，当两个研究前沿的P和T值分别相等时，则C值较大的研究前沿的CPT值也较大，指示该研究前沿引文影响力较大。当两个研究前沿的C和P值分别相等时，则T值较小的研究前沿的CPT值会较大，指示该研究前沿在短期内受关注度较高。当两个研究前沿的C和T值分别相等时，P值较小的研究前沿的CPT反而会较大，指示该研究前沿中核心论文的平均引文影响力较大。

《2025研究前沿》在重点研究前沿的遴选过程中，

从每个大学科领域的10个热点前沿中，利用核心论文数（P）和年篇均被引频次（CPT）指标，结合战略情报研究人员的专业判断，遴选出两个重点热点前沿。专业判断主要考虑该前沿是否对解决重大问题有重要意义。一方面，选择核心论文数（P）最高的前沿，如果P最高的前沿已经在往年的研究前沿中解读过且核心论文没有显著变化，则选择P次高的前沿，依次类推。同时，用年篇均被引频次（CPT）指标结合专业判断遴选重点热点前沿。综合这两种方法共遴选出指标表现突出、主题意义重大的22个重点热点前沿。从新兴前沿中，利用CPT指标结合战略情报研究人员的判断，遴选出9个重点新兴前沿（8个新兴前沿和1个由4个新兴前沿组成的新兴前沿群）。总计从128个研究前沿中共遴选出31个重点前沿。

## 2.2.2 研究前沿的分析和解读

在报告遴选的128个研究前沿的数据基础上，综合分析11大学科领域的110个热点前沿的发展趋势，概括阐述新兴前沿的研究主题，并对31个重点研究前沿进行了详细的解读。

### （1）热点前沿分析及重点热点前沿的解读

对于每个大学科领域，结合Top10热点前沿的核心论文的数量、被引频次、核心论文平均出版年，以及施引论文的年度变化，分析Top10热点前沿的发展趋势，包括覆盖的学科领域方向、前沿分布特征及演变趋势。每个学科领域的第一张表展示本领域Top10热点前沿的核心论文的数量、被引频次以及核心论文平均出版年。每个领域的Top10热点研究前沿中引用核心论文的论文（施引论文）的年度分布用气泡图的方式展示，气泡大小表示施引论文的数量。大部分研究前沿的施引论文每年都有一定程度的增长，因此气泡图也有助于对研究前沿发展趋势的理解。对每个学科领域遴选出的两个重点热点前沿，深入分析解读其概念内涵、发展脉络、研究力量布局等，绘制核心论

文被引频次分布曲线，揭示被引频次较高的核心论文的研究内容、价值、影响。每个重点热点前沿的第一张表对该热点前沿的核心论文的产出国家/地区、机构活跃状况进行了统计分析，有助于揭示出哪些国家/地区、机构在该热点前沿中有较大贡献。第二张表则对该热点前沿的施引论文的产出国家/地区和机构进行了统计分析，有助于探讨哪些国家/地区、机构在该热点前沿的发展中发挥作用。

## (2) 新兴前沿分析及重点新兴前沿的解读

新兴前沿的核心论文及其施引论文数量较少，数据统计分析意义不大。因此，主要由战略情报研究人员揭示新兴前沿的研究主题，并对重点新兴前沿的核心论文及相关信息进行内容方面的定性分析解读，籍此可以了解重点新兴前沿的基本概念、最新科研突破及未来发展前景等。

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 02

## 农业科学、植物学和动物学



# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 农业科学、植物学和动物学领域 Top10 热点前沿发展态势

农业科学、植物学和动物学领域排名前 10 的热点前沿主要分布在动物健康与公共卫生、植物抗胁迫、植物分子机制、植物进化生物学与遗传资源挖掘、植物病害防治及食品科学与工程 6 个子领域（表 1）。其中，动物健康与公共卫生子领域重点开展高致病性禽流感病毒 H5N1 的洲际传播与跨物种感染研究；植物抗胁迫子领域关注非生物胁迫下植物的防御机制研究，以及缓解植物盐胁迫的技术开发；植物分子机制子领域聚焦植物对环境的温度感应机制，以及植物 N6- 甲基腺苷修饰的表观转录调控；进化生物学与遗传资源挖掘子领域集中在陆生植物起源与早期进化，以及小麦野生近缘种的抗性基因挖掘；植物病害防治子领域强调深度学习和金属纳米粒子的生物合成等新技术在病害检测和防治中的应用；食品科学与工程子领域关注食品营养与工程技术的融合，重点研发适合吞咽困难人群的食品。

纵观该领域近 12 年的前沿研究，可以发现几个突出的特点：一是动物健康与公共卫生子领域自新冠疫情以来备受关注，2021 年和 2022 年均有 1 个前沿入选 Top10 热点前沿，分别是“非洲猪瘟的流行病学和病毒学研究及防控”和“新型冠状病毒对家养动物的感染及其传播”，今年“高致病性禽流感病毒 H5N1 的洲际传播和跨物种感染”也进入 Top10。二是 N6- 甲基腺苷修饰成为表观转录调控的研究热点，去年和今年连续两年入选 Top10 热点前沿。三是人工智能赋能植物病害检测成为新的研究热点，继“深度迁移学习方法在病害检测中的应用”入选 2024 年新兴前沿，今年“基于深度学习的植物病害检测”入选 Top10 热点前沿。四是食品营养与工程技术结合日益深入，2022 年“3D 打印食品研究”入选 Top10 热点前沿，今年“吞咽困难食品的 3D 打印”入选。

表 1 农业科学、植物学和动物学领域 Top10 热点前沿

序号	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	高致病性禽流感病毒 H5N1 的洲际传播和跨物种感染	46	2354	2023.1
2	非生物胁迫下植物的生理生化反应和抗氧化防御	17	1181	2022.3
3	金属纳米粒子的生物合成及其在控制植物病害和促进植物生长中的作用	16	1526	2022.1
4	植物 RNA 中 N6- 甲基腺苷修饰的检测、调控与功能	22	1322	2022.1
5	陆生植物的起源与早期进化	20	2374	2022.0
6	从野生作物近缘种挖掘用于小麦改良的抗性基因	20	2244	2021.6
7	<b>利用植物根际促生菌缓解植物的盐胁迫</b>	<b>19</b>	<b>1729</b>	<b>2021.5</b>
8	拟南芥的温度感应机制	11	1140	2021.5
9	<b>基于深度学习的植物病害检测</b>	<b>46</b>	<b>5951</b>	<b>2021.2</b>
10	吞咽困难食品的 3D 打印	13	1656	2021.0



图 1 农业科学、植物学和动物学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“利用植物根际促生菌缓解植物的盐胁迫”

盐胁迫是威胁全球作物可持续生产的主要非生物胁迫之一，预计到 2050 年，受盐分影响的地区将覆盖约 50% 的农业用地。盐胁迫对植物的生理、生化和分子特征会产生各种不利影响，进而降低生产力。其中，利用植物根际促生菌（Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR）缓解植物的盐胁迫已成为一个多学科交叉的前沿领域。从 21 世纪初到现在，对 PGPR 的研究经历了从早期的现象观察到如今的分子机制解析和微生物组工程应用，呈现出三大发展趋势：一是作用机制研究持续深化；二是菌种挖掘从单一菌株转向复合菌群；三是菌剂的田间试验和产业化推广持续推进。未来可以结合人工智能和大数据构建模型，预测 PGPR 菌株或菌群在特定环境条件下的功能特性，以实现更精准的农业应用。总之，PGPR 作为生物调

控工具，在缓解盐胁迫、提升作物产量方面具有广阔前景。

该热点前沿共有 19 篇核心论文，重点研究了 PGPR 新菌株的资源挖掘、菌株的作用机理及耐盐性评估等。资源挖掘方面主要研究了如何从玉米根际土壤及海滩的沙丘植物群分析新菌株；作用机理的研究则揭示了 PGPR 可以通过调节植物激素水平、养分获取、氧化还原电位、离子稳态、光合能力、次生代谢产物和分子反应、叶绿素含量、脯氨酸含量、总可溶性糖、电解质渗漏和抗氧化酶活性等，来缓解盐胁迫；耐盐性评估主要研究了 PGPR 对豌豆、大豆、玉米、番茄、花生、芥菜、油菜、棉花等作物耐盐性及生长发育的影响。

其中，被引频次最高的一篇研究性论文是伊朗的德黑兰大学和加拿大的滑铁卢大学的研究人员合作发表的，2020年发表于《环境与实验植物学》(Environmental and Experimental Botany)，被引频次是160次（图2）。该文通过对盐生植物根际微生物

组进行研究得出结论：盐生植物的微生物组在盐胁迫下对盐敏感植物的生长发育起着主导作用；与盐生植物相关的耐盐植物促生菌表现出多种促生长特征，包括不同植物激素的产生、不溶性无机磷酸盐的溶解、铁载体的产生、分子固氮和病原体抑制等。

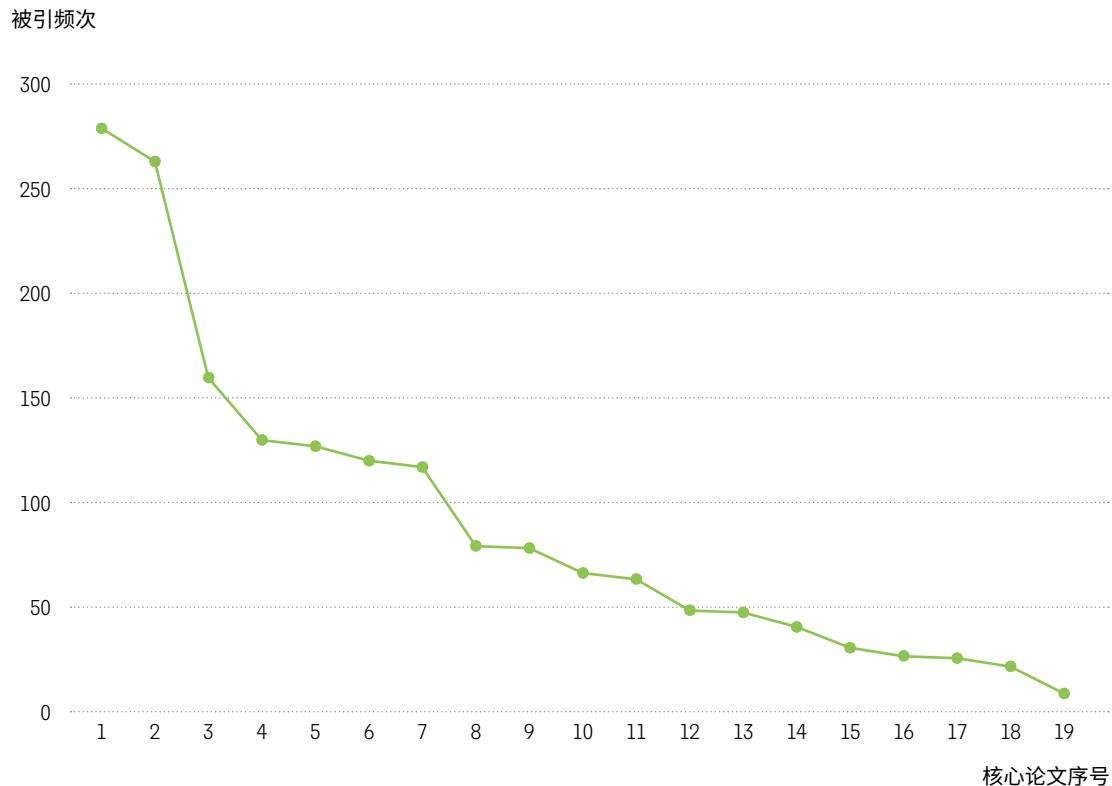


图2 “利用植物根际促生菌缓解植物的盐胁迫”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

核心论文 Top 产出国家和机构中（表 2），中国和印度贡献最多，各有 6 篇，占比均约为 32%。巴基斯坦、加拿大、伊朗和意大利等各有 2 篇。加拿大的

滑铁卢大学、伊朗的德黑兰大学以及印度的巴布萨赫布·比姆拉奥·安贝德卡大学各有 2 篇核心论文。

表 2 “利用植物根际促生菌缓解植物的盐胁迫”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家 / 地区	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	中国	6	31.6%	1	滑铁卢大学	加拿大	2	10.5%
1	印度	6	31.6%	1	德黑兰大学	伊朗	2	10.5%
3	巴基斯坦	2	10.5%	1	巴布萨赫布·比姆拉奥·安贝德卡大学	印度	2	10.5%
3	加拿大	2	10.5%					
3	伊朗	2	10.5%					
3	意大利	2	10.5%					

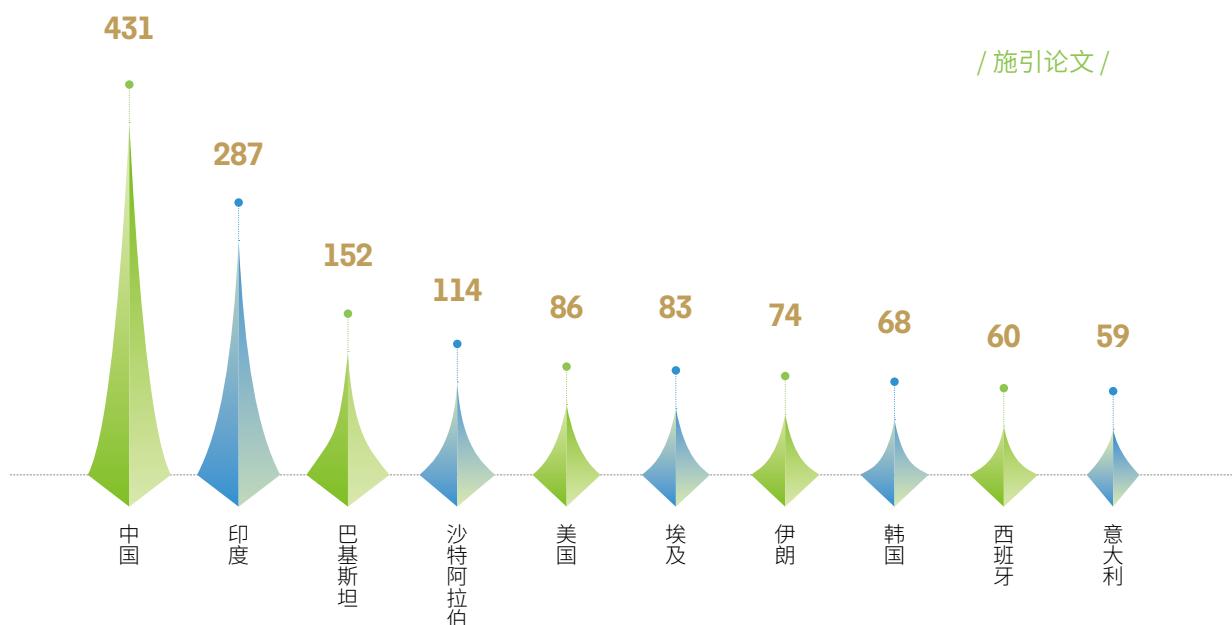


施引论文 Top10 产出国家和机构中（表 3），产出最多的国家是中国，有 431 篇，占比约为 33%，远领先于其他国家，表明中国在该研究方向上的关注和跟进。印度排名第二，有 287 篇，占比约为 22%。巴

基斯坦、沙特阿拉伯积极跟进，继中国和印度之后，在施引论文数量上形成第三梯队。施引机构方面，沙特阿拉伯的沙特国王大学排名第一，有 57 篇；中国科学院和印度农业研究委员会紧随其后，各有 50 篇。

表 3 “利用植物根际促生菌缓解植物的盐胁迫”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	431	32.8%	1	沙特国王大学	沙特阿拉伯	57	4.3%
2	印度	287	21.8%	2	中国科学院	中国	50	3.8%
3	巴基斯坦	152	11.6%	2	印度农业研究委员会	印度	50	3.8%
4	沙特阿拉伯	114	8.7%	4	费萨拉巴德农业大学	巴基斯坦	45	3.4%
5	美国	86	6.5%	5	费萨拉巴德政府学院	巴基斯坦	27	2.1%
6	埃及	83	6.3%	6	中国农业科学院	中国	24	1.8%
7	伊朗	74	5.6%	7	庆北国立大学	韩国	23	1.7%
8	韩国	68	5.2%	8	德黑兰大学	伊朗	22	1.7%
9	西班牙	60	4.6%	9	岭南大学	韩国	20	1.5%
10	意大利	59	4.5%	10	滑铁卢大学	加拿大	19	1.4%



### 1.3 重点热点前沿——“基于深度学习的植物病害检测”

植物病害不仅会大幅降低农产品的质量和数量，而且会对食品安全造成重大影响。早期检测是有效预防和控制植物病害的基础，在农业生产的管理和决策中起着至关重要的作用。传统的病害诊断方法通常依赖专家人工进行目视检查，费时费力且容易受到主观因素的影响。近年来，深度学习作为人工智能的一个分支，其快速发展为植物病害的自动化检测提供了新的解决方案，并取得了较大进展。即使是植物保护和统计专业水平不高的研究人员也可以利用深度学习技术，自动提取植物病害点的图像特征和分类，免去传统图像识别技术的特征提取和分类器设计的大量工作。同时，深度学习可以表达原始图像特征，具有端到端的特点。这些特点使得深度学习技术在植物病害识别中得到了广泛应用，并成为研究热点。

该热点前沿共有 46 篇核心论文，重点研究基于卷积神经网络、深度卷积神经网络和深度残差神经网

络的深度学习方法，构建植物叶片病害识别模型，从整个叶片或叶子的单个病变和斑点来识别植物病害。相关研究涉及众多作物种类，包括粮食作物和瓜果蔬菜，如水稻、小麦、番茄、黄瓜、苹果、柑橘、香蕉、葡萄等，研究的病害种类有水稻白叶枯病、假黑穗病、褐叶斑病、稻瘟病和纹枯病，小麦壳针孢叶枯病、褐斑病和条锈病，番茄灰斑病、早疫病、晚疫病和叶霉病，以及葡萄黑腐病、黑麻疹和螨病等。

其中，被引频次最高的是由中国的北京科技大学与国家林业和草原局林草调查规划院合作发表的一篇研究性论文，于 2019 年发表在《农业中的计算机和电子产品》(Computers and Electronics in Agriculture) 上，被引频次是 401 次 (图 3)，论文对基于图像的植物病害分类的深度卷积神经网络进行微调和评估，对深度学习架构进行了实证比较，旨在找到快速准确的植物病害识别模型。

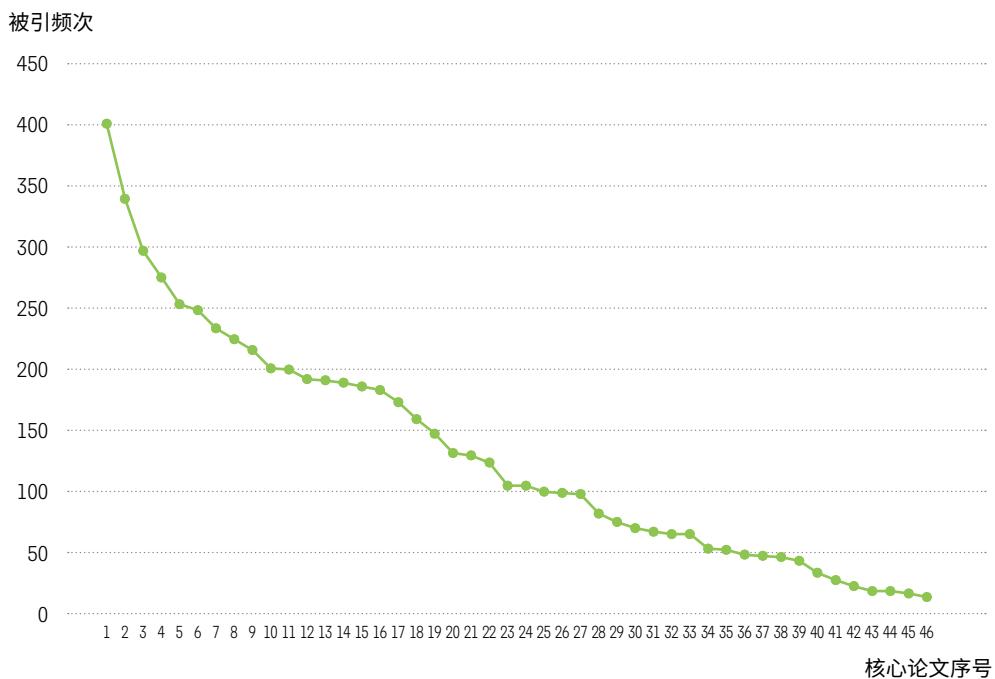


图 3 “基于深度学习的植物病害检测”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

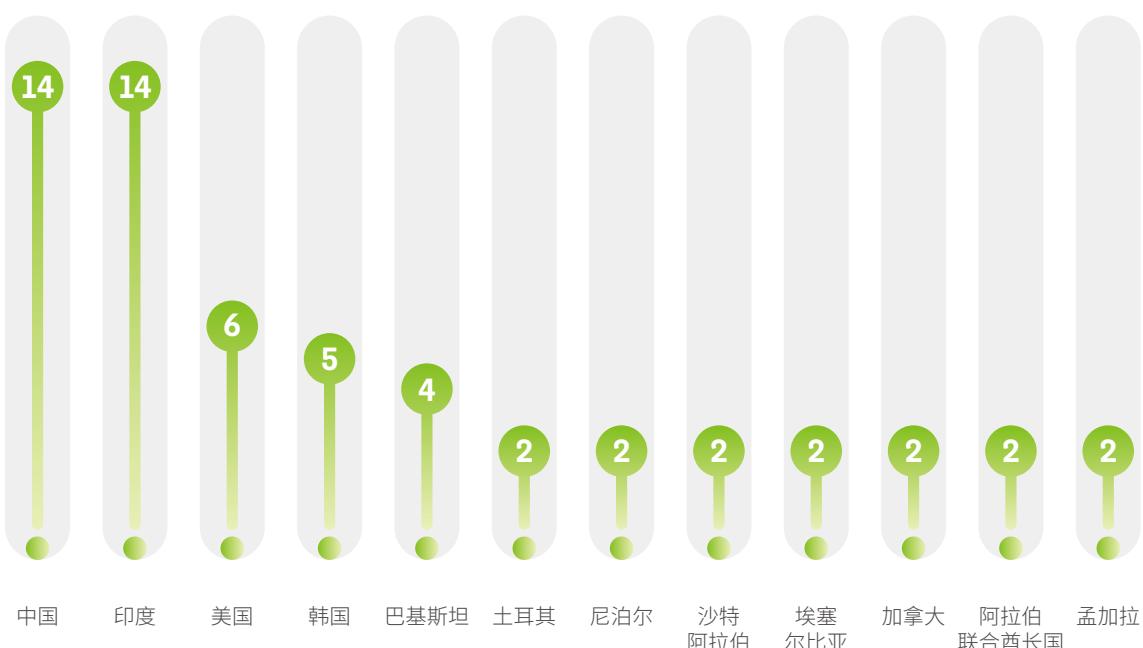
核心论文 Top 产出国家和机构中（表 4），中国和印度贡献最多，并列第一，均有 14 篇，各自占比约为 30%; 其次是美国和韩国，分别贡献了 6 篇和 5 篇。

中国的中国农业大学、潍坊科技学院与韩国的世宗大学在核心论文 Top 机构中表现相对突出，并列第一。

表 4 “基于深度学习的植物病害检测”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	中国	14	30.4%	1	世宗大学	韩国	3	6.5%
1	印度	14	30.4%	1	中国农业大学	中国	3	6.5%
3	美国	6	13.0%	1	潍坊科技学院	中国	3	6.5%
4	韩国	5	10.9%	4	韦洛尔理工学院	印度	2	4.3%
5	巴基斯坦	4	8.7%	4	扎耶德大学	阿拉伯联合酋长国	2	4.3%
6	土耳其	2	4.3%	4	西北农林科技大学	中国	2	4.3%
6	尼泊尔	2	4.3%					
6	沙特阿拉伯	2	4.3%					
6	埃塞尔比亚	2	4.3%					
6	加拿大	2	4.3%					
6	阿拉伯联合酋长国	2	4.3%					
6	孟加拉	2	4.3%					

/ 核心论文 /

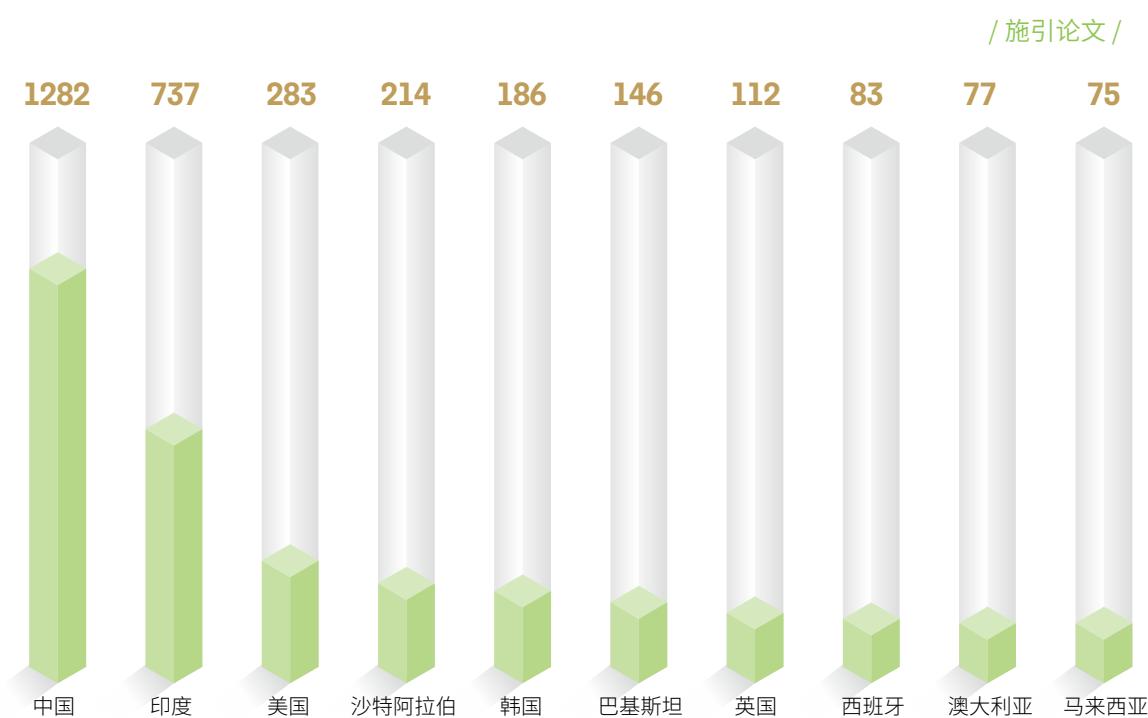


施引论文 Top10 产出国家和机构中（表 5），产出最多的是中国，有 1282 篇，约占 40%；印度排名第二，有 737 篇，约占 23%，表明中印两国在该研究方向上的持续关注，且远领先于其他国家，尤其中国，核心论文贡献与印度并列第一，而施引论文超出印度 540

多篇。美国的施引论文产出与其核心论文产出排名一致，依然为第三。施引论文机构方面，中国机构表现突出，有 6 个机构排名进入 Top10，其中，中国农业大学、中国农业科学院和中国科学院依次位列前三；印度有 3 个机构进入 Top10，分列第四、第七和第九。

表 5 “基于深度学习的植物病害检测”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	1282	39.5%	1	中国农业大学	中国	109	3.4%
2	印度	737	22.7%	2	中国农业科学院	中国	66	2.0%
3	美国	283	8.7%	3	中国科学院	中国	65	2.0%
4	沙特阿拉伯	214	6.6%	4	韦洛尔理工学院	印度	53	1.6%
5	韩国	186	5.7%	5	华南农业大学	中国	48	1.5%
6	巴基斯坦	146	4.5%	6	西北农林科技大学	中国	44	1.4%
7	英国	112	3.5%	7	印度农业研究委员会	印度	41	1.3%
8	西班牙	83	2.6%	8	浙江大学	中国	39	1.2%
9	澳大利亚	77	2.4%	9	沙特国王大学	沙特阿拉伯	38	1.2%
10	马来西亚	75	2.3%	9	SRM 科学技术学院	印度	38	1.2%



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

农业科学、植物学和动物学领域有1个方向入选新兴前沿，是“花青素在食品智能包装膜中的应用”（表6）。

表6 农业科学、植物学和动物学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	花青素在食品智能包装膜中的应用	10	169	2023.8

### 2.2 重点新兴前沿——“花青素在食品智能包装膜中的应用”

花青素是一种天然色素，具有多种生物活性，对健康有益，经常用于食品加工。近年来又成为了食品智能包装领域的研究热点，不仅可以提高包装的功能性，还能为食品提供更好的保护。智能包装是一种能够实现智能功能（如检测、传感、记录、跟踪、通信）的包装系统，能促进决策、延长货架期、增强食品安全性、提高食品质量、提供食品相关信息，并预警潜在风险。由于花青素的结构和颜色会随着环境pH值的变化而变化，因此通常被作为pH指示剂，用于智能包装中监测食品的新鲜度。此外，由于花青素具有较强的抗菌和抗氧化性能，对食品包装贮藏也发挥了重要作用。同时，温度、湿度、气体、压力、光、化学反应等环境条件也影响着花青素的变化，因此，花

青素将来也有望被作为时间-温度指示器和气体指示器等。

该新兴前沿共有10篇核心论文，重点研究以花青素为指示剂监测食品新鲜度的食品智能包装膜的制备。制备所使用的花青素主要提取自蝴蝶豌豆花、构树果实、越橘、山竹果壳、蓝莓等；制备智能包装膜采用的成膜基质主要有壳聚糖和明胶复合物，云母纳米片、魔芋葡甘露聚糖、卡拉胶和结冷胶复合物，藻酸卡拉胶钠多糖基质，天然多糖壳聚糖，羧甲基纤维素和玉米淀粉复合物或小麦面筋蛋白和苹果果胶复合物等；研究的保鲜食品主要集中在牛肉、虾和鱼类。研究结果显示，这些智能包装膜在指示食品新鲜度和延缓变质方面显示出巨大的潜力。

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

03

生态与环境科学

# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 生态与环境科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

生态与环境科学领域的 Top 10 热点前沿主要分布在生态科学和环境科学两个子领域（表 7）。

环境科学子领域的热点前沿主要涉及新污染物的健康毒理研究、污染处理及固碳技术等。新污染物生态与健康毒理研究是当前环境科学研究的热点问题，其中微塑料主题近十余年来热度持续不衰，相关研究在 2015-2017、2020-2024 年多次入选热点前沿和新兴前沿。继 2024 年之后，“人体组织微塑料污染的发现与定量检测”和“轮胎磨损颗粒的环境归趋与生态毒理”这两个研究前沿于 2025 年再次共同入选热点前沿。此外，污染控制技术相关的研究前沿还包括“单原子催化剂活化过硫酸盐高选择性降解污染物的机制”和“高效分离锂离子的纳滤膜技术研究及应用”。其中，过硫酸盐降解污染物相关的研究前沿同样连续多年入选热点前沿。同时，应对气候变化的固碳技术日益受到广泛关注，2025 年与之相关的热点研究前沿是“基于生物质的活性

多孔炭吸附剂的制备及二氧化碳捕集性能”。

生态科学子领域的热点前沿主要涉及生物多样性研究和保护。遗传多样性是生物多样性的重要方面，对生态系统的稳定性和适应性至关重要。2025 年，“遗传多样性在生物多样性保护中的重要性及应用研究”成为热点前沿。

此外，一些生态与环境交叉热点问题相关的研究前沿在 2025 年进一步凸显，包括覆盖环境和生态问题的行星边界理论相关热点前沿“行星边界突破与地球系统风险治理”，气候变化相关的“全球航空业的气候影响及净零排放途径”，中国碳中和政策研究相关的“中国实现碳中和的路径研究与能源系统低碳转型”和“中国低碳城市试点政策效果评估研究”。

总体来看，2025 年生态与环境领域的热点研究前沿更多聚焦于新污染物、碳中和及全球或区域层面的宏观生态环境热点问题。

表 7 生态与环境科学领域 Top 10 热点前沿

序号	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	轮胎磨损颗粒的环境归趋与生态毒理	43	2958	2023.0
2	<b>行星边界突破与地球系统风险治理</b>	<b>7</b>	<b>1954</b>	<b>2022.4</b>
3	单原子催化剂活化过硫酸盐高选择性降解污染物的机制	21	4427	2021.8
4	中国实现碳中和的路径研究与能源系统低碳转型	12	1933	2021.8
5	<b>基于生物质的活性多孔炭吸附剂制备及二氧化碳捕集性能</b>	<b>26</b>	<b>2916</b>	<b>2021.7</b>
6	全球航空业的气候影响及净零排放途径	11	1563	2021.5
7	高效分离锂离子的纳滤膜技术研究及应用	38	6050	2021.4
8	中国低碳城市试点政策效果评估研究	14	2627	2021.4
9	遗传多样性在生物多样性保护中的重要性及应用研究	15	2138	2021.3
10	人体组织微塑料污染的发现与定量检测	6	4862	2021.2



图 4 生态与环境科学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“行星边界突破与地球系统风险治理”

行星边界 (Planetary Boundaries) 又称地球界限、地球限度或地球边界，是 2009 年斯德哥尔摩大学 Johan Rockström 领衔的 28 位世界顶尖科学家团队提出的一个理论框架。该框架定义了人类在不对环境造成重大干扰情况下可安全操作的极限，界定了地球系统的“安全运行空间”，即人类活动的合理范围或程度，旨在避免全球范围内剧烈的人为环境变化，降低人类活动超出地球系统生态阈值的风险，使地球当前环境功能和生命支持系统维持在与过去 10000 年相近的状态，以保障人类的生存。在这个界限内，人类及其子孙后代可以继续繁荣发展，若跨越这些界限则会增加突发性或不可逆的环境变化风险。框架提出了调节地球系统稳定性和恢复力的 9 个关键的地球系统过程，量化了部分过程的阈值。这 9 种关键的地球系统过程包括气候变化

(Climate change)、生物地球化学循环 (Biogeochemical flows)、淡水变化 (Freshwater change)、土地系统变化 (Land system change)、生物圈完整性 (Biosphere integrity)、新合成物质 (Novel entities)、海洋酸化 (Ocean acidification)、大气气溶胶负荷 (Atmospheric aerosol loading)、平流层臭氧损耗 (Stratospheric ozone depletion)。目前，所有这些过程都受到了人类活动的严重干扰。该理论框架提出后即引起了国际科学界和社会的广泛关注，启发了各级治理战略和政策。同时，该框架也在根据最新的科学认识不断更新。

本热点前沿的 7 篇核心论文主要聚焦行星边界框架的理论发展和更新完善，提出了增加新的行星边界控制变量，如绿水、新型实体污染；呼吁需要更强大的科学和政策工具来分析整个地球系统，并指导政治进程；强

调在科学界定行星边界的同时纳入公正性考量，减少对人类福祉的损害。该框架有望引领人类抓住全球可持续发展的重大机遇，激励世界迈向切实维护并强化地球系统稳定性的未来。

本前沿被引频次最高的核心论文来自丹麦哥本哈根大学 Katherine Richardson 领衔的 29 位科学家组成的团队，行星边界理论框架奠基人 Johan Rockström 为合著者。该文 2023 年 9 月发表于《科学进展》（*Science*

Advances），已被引用 506 次。这项研究更新了行星边界的最新状态：九项行星边界中有六项已超出安全运行界限，海洋酸化即将被突破，区域性气溶胶负荷已超过边界，平流层臭氧水平在人类社会的努力下略有恢复，所有先前被确定为突破的边界的超越水平均有所恶化，表明地球现已远超出安全运行界限。研究强调须从整体系统视角下审视人类活动对地球系统的影响，关注地球系统内部生物圈 - 地圈的相互作用，并重视土地系统变化这一边界的重要意义。

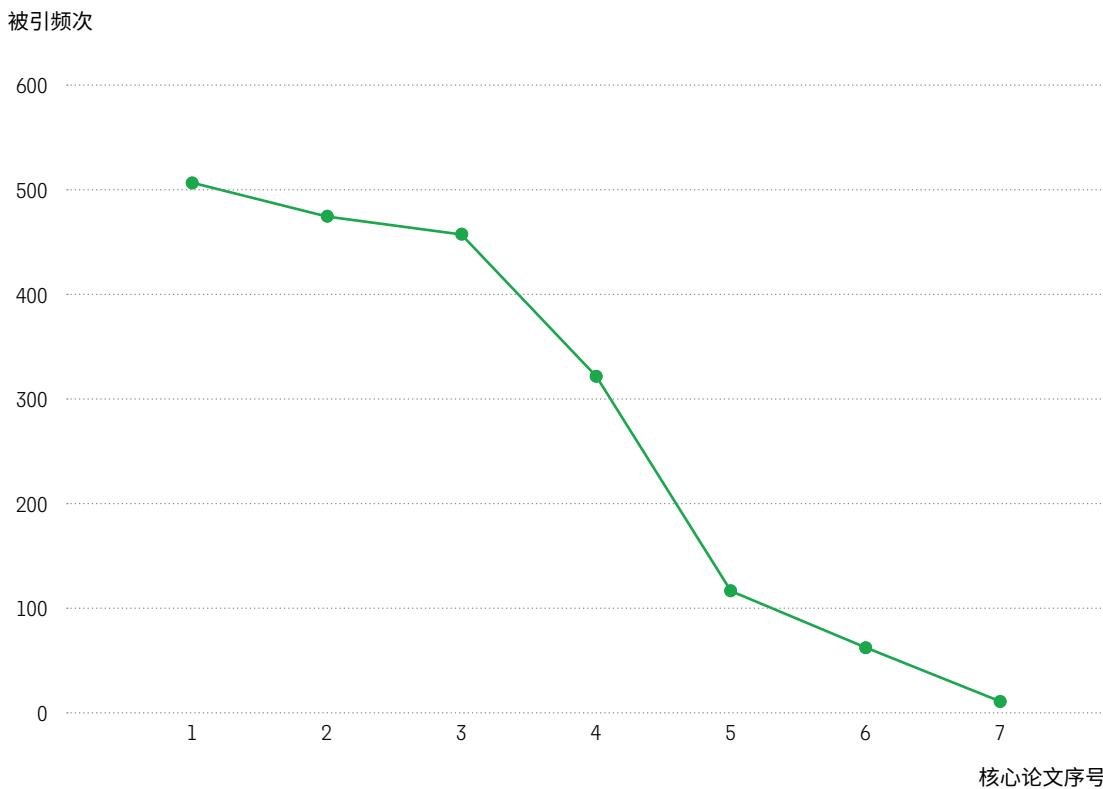


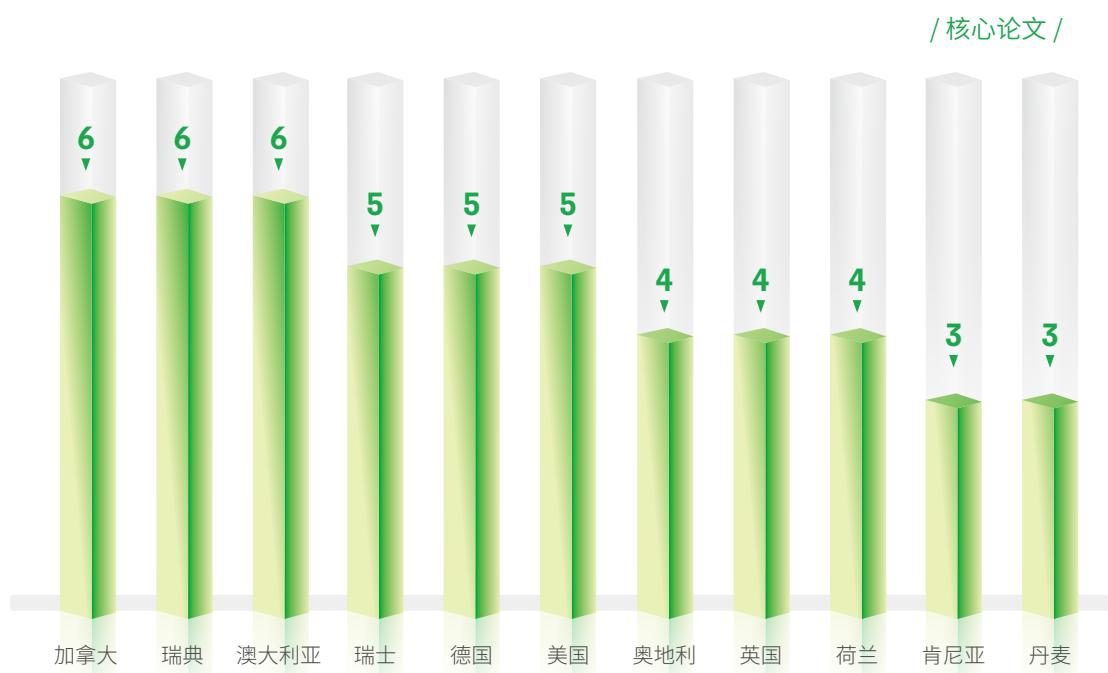
图 5 “行星边界突破与地球系统风险治理”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

从核心论文的产出国家和机构来看（表8），欧美发达国家是该前沿核心论文的主要产出国。其中瑞典、加拿大和澳大利亚核心论文发文量并列最多，均贡献6篇；瑞士、德国、美国各发表5篇。本前沿核心论文主

要来自国际可持续发展、气候变化等领域的知名研究机构。其中，核心论文发文量最多的是瑞典斯德哥尔摩大学，德国波茨坦气候影响研究所、澳大利亚国立大学核心论文量分列排第二、三位。

表8 “行星边界突破与地球系统风险治理”研究前沿中核心论文的Top10 产出国和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	国家	核心论文	比例
1	加拿大	6	85.7%	1	斯德哥尔摩大学	瑞典	6	85.7%
1	瑞典	6	85.7%	2	德国波茨坦气候影响研究所	德国	5	71.4%
1	澳大利亚	6	85.7%	2	澳大利亚国立大学	澳大利亚	5	71.4%
4	瑞士	5	71.4%	4	阿姆斯特丹大学	荷兰	4	57.1%
4	德国	5	71.4%	5	格里菲斯大学	澳大利亚	3	42.9%
4	美国	5	71.4%	5	波茨坦大学	德国	3	42.9%
7	奥地利	4	57.1%	5	国际应用系统分析研究所	奥地利	3	42.9%
7	英国	4	57.1%	5	乌得勒支大学	荷兰	3	42.9%
7	荷兰	4	57.1%	5	瑞典皇家科学院	瑞典	3	42.9%
10	肯尼亚	3	42.9%	5	埃克塞特大学	英国	3	42.9%
10	丹麦	3	42.9%					

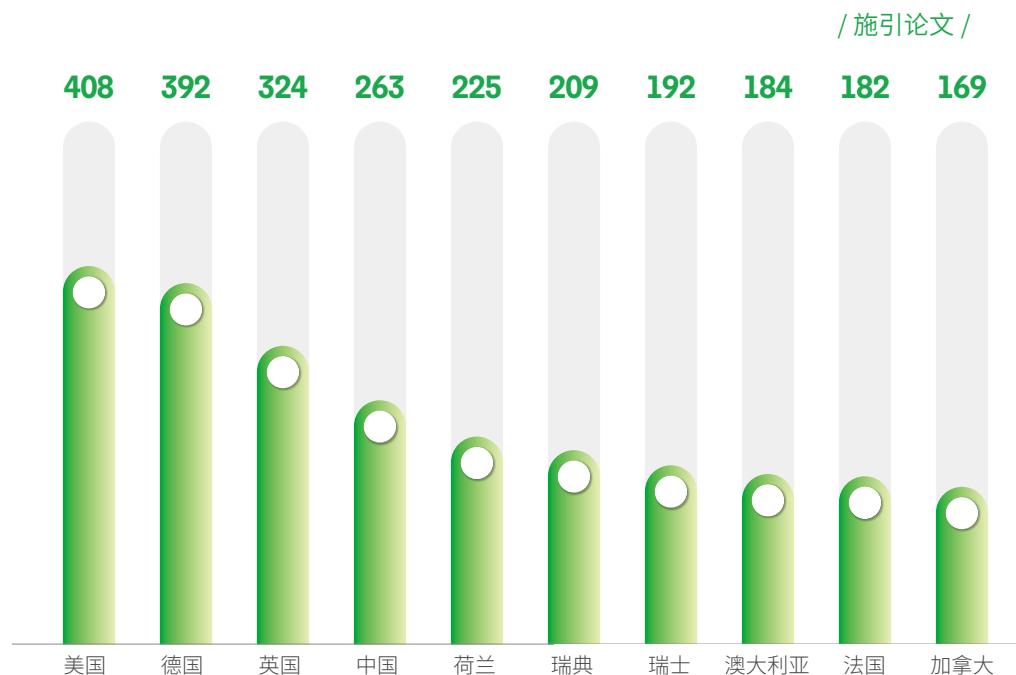


从施引论文的来源国家和机构来看（表9），美国、德国和英国排在前三位，各约占总量的五分之一。中国产出263篇施引论文，占比为15.3%，位列第四。施引论文产出机构方面，与核心论文机构类似，瑞典斯德哥

尔摩大学仍位居首位，发文量为96篇；紧随其后的是德国亥姆霍兹联合会，以94篇排名第二；法国国家科学研究中心和中国科学院分列第三、四位，施引论文量分别为79篇和75篇。

表9 “行星边界突破与地球系统风险治理”研究前沿中施引论文的Top10产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	国家	施引论文	比例
1	美国	408	23.7%	1	斯德哥尔摩大学	瑞典	96	5.6%
2	德国	392	22.8%	2	亥姆霍兹联合会	德国	94	5.5%
3	英国	324	18.8%	3	法国国家科学研究中心	法国	79	4.6%
4	中国	263	15.3%	4	中国科学院	中国	75	4.4%
5	荷兰	225	13.1%	5	苏黎世联邦理工学院	瑞士	69	4.0%
6	瑞典	209	12.2%	6	丹麦科技大学	丹麦	54	4.0%
7	瑞士	192	11.2%	6	瓦格宁根大学	荷兰	54	3.1%
8	澳大利亚	184	10.7%	8	伦敦大学	英国	49	2.8%
9	法国	182	10.6%	9	法国国家农业食品与环境研究院	法国	47	2.7%
10	加拿大	169	9.8%	10	埃克塞特大学	英国	44	2.6%



### 1.3 重点热点前沿——“基于生物质的活性多孔炭吸附剂制备及二氧化碳捕集性能”

碳捕集利用封存 (CCUS) 是降低大气中二氧化碳浓度的有效方法, 是实现净零排放的一项必不可少的解决方案。在众多碳捕集材料中, 经济高效的二氧化碳吸附剂备受关注。二氧化碳的吸附通常需要使用具有优越的纹理和表面特性或经过适当功能化以产生高吸附能力的材料。在吸附材料中, 多孔碳基材料和有序纳米多孔材料最为普遍。生物质在无氧条件下, 可通过热解制备出生物炭。在生物炭制备前或制备后添加活化剂, 可制得具有更高比表面积和更发达孔隙率的活性多孔碳材料。生物质衍生的多孔炭具有优异的纹理特性、可调孔隙率、低成本和相对简单易行的合成方法以及高二氧化碳吸附能力, 被视为首选的二氧化碳吸附材料。

本热点前沿共 26 篇核心论文, 研究内容主要聚焦于以多种生物质废弃物为原料, 利用不同的活化方法和活化剂, 制备氮、硫等杂原子掺杂的表面改性多孔碳材料的方法。材料合成方法绿色简易、成本低廉, 能实现高效率、高选择性的二氧化碳吸附、捕获与分离。

本研究前沿中被引频次最高的研究论文来自南京师范大学, 2020 年发表于《化学工程杂志》(Chemical Engineering Journal), 被引频次为 367 次。作者使用不同的活化剂 (空气、二氧化碳、磷酸和氢氧化钠) 由甘蔗渣制备出多孔活性炭。与物理活化的炭相比, 化学活化的多孔炭表现出更好的物理化学性质, 二氧化碳吸附性能优越。

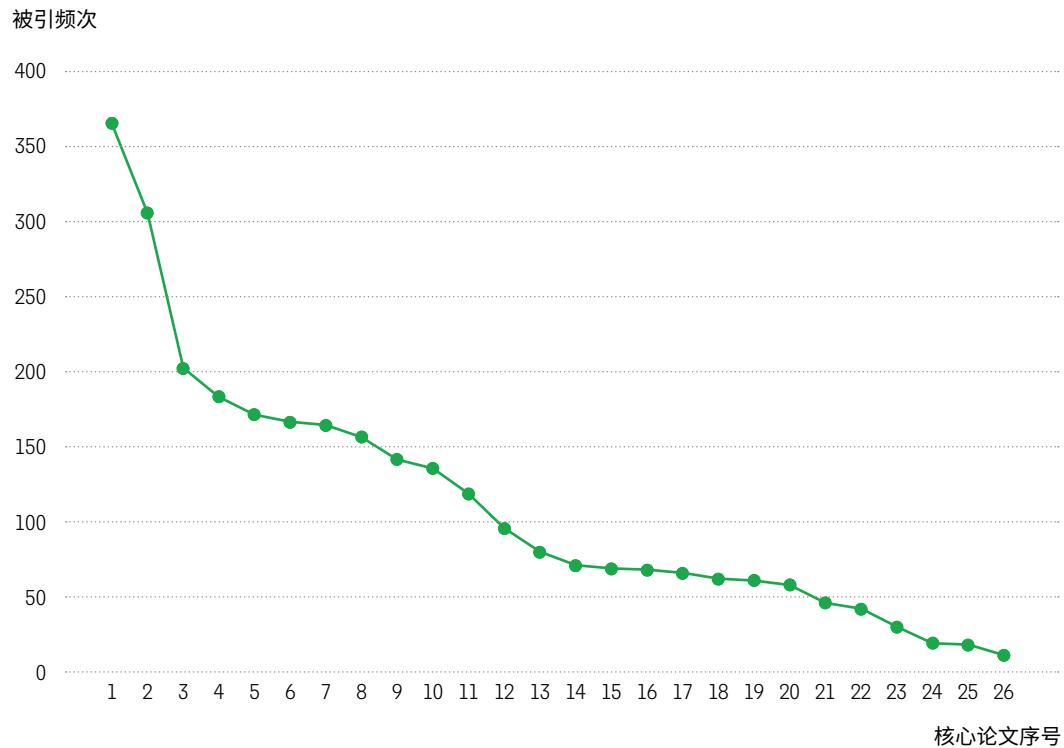


图 6 “基于生物质的活性多孔炭吸附剂制备及二氧化碳捕集性能”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

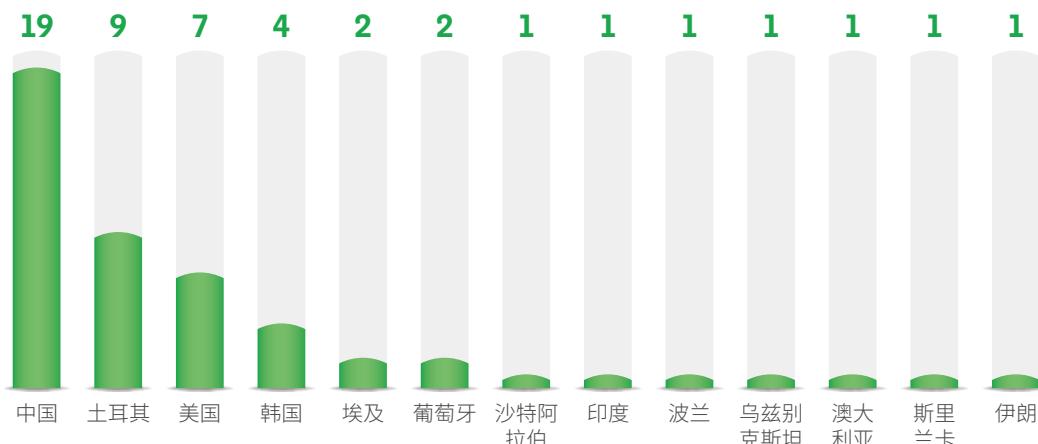
从核心论文产出国家和机构来看（表10），中国是核心论文的最大贡献国，共有19篇核心论文，接近核心论文总量的四分之三；土耳其9篇，占比超过总量的三分之一；美国7篇，占比均超过总量的四分之一，排名第三位。在机构层面，浙江师范大学发表

10篇核心论文，占比超过三分之一，位居首位；中国科学院位列第五。土耳其的研究机构表现也较为突出，其中土耳其科学技术研究理事会和奥斯曼科尔特大学各贡献6篇核心论文，排名并列第二。

**表10 “基于生物质的活性多孔炭吸附剂制备及二氧化碳捕集性能”研究前沿中核心论文的Top10产出国家和机构**

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	国家	核心论文	比例
1	中国	19	73.1%	1	浙江师范大学	中国	10	38.5%
2	土耳其	9	34.6%	2	土耳其科学技术研究理事会	土耳其	6	23.1%
3	美国	7	26.9%	2	奥斯曼科尔特大学	土耳其	6	23.1%
4	韩国	4	15.4%	4	海峡大学	土耳其	4	15.4%
5	埃及	2	7.7%	5	中国科学院	中国	3	11.5%
5	葡萄牙	2	7.7%	5	罗切斯特理工学院	美国	3	11.5%
7	沙特阿拉伯	1	3.8%	5	仁荷大学	韩国	3	11.5%
7	印度	1	3.8%	8	中国科学技术大学	中国	2	7.7%
7	波兰	1	3.8%	8	四川大学	中国	2	7.7%
7	乌兹别克斯坦	1	3.8%	8	武汉理工大学	中国	2	7.7%
7	澳大利亚	1	3.8%	8	艾斯尤特大学	埃及	2	7.7%
7	斯里兰卡	1	3.8%	8	布拉干萨理工大学	葡萄牙	2	7.7%
7	伊朗	1	3.8%	8	波尔图大学	葡萄牙	2	7.7%
				8	庆熙大学	韩国	2	7.7%
				8	伊斯坦布尔科技大学	土耳其	2	7.7%
				8	阿贡国家实验室	美国	2	7.7%
				8	芝加哥大学	美国	2	7.7%
				8	内布拉斯加大学林肯分校	美国	2	7.7%

/核心论文/



从施引论文产出的国家和机构来看（表 11），中国在该领域的后续研究最为活跃，共发表 1211 篇施引论文，占比超过 60%，远超其他国家。印度、韩国分列第二、三位。统计施引论文的来源机构，排名前十位的

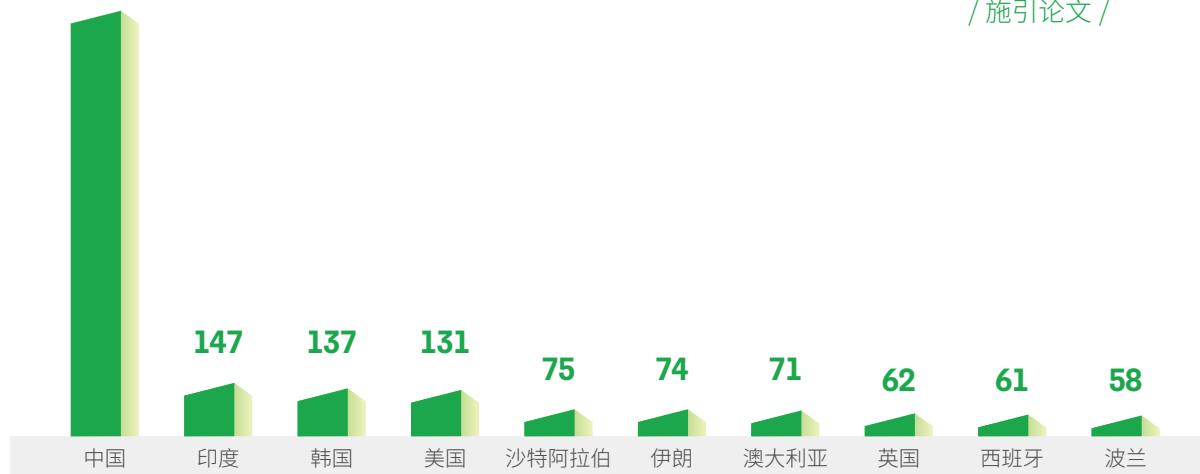
机构均来自中国。其中，中国科学院的施引论文数量遥遥领先，达到 121 篇，中南大学、南京工业大学以 55 篇施引论文并列第二。

**表 11 “基于生物质的活性多孔炭吸附剂制备及二氧化碳捕集性能”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构**

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	国家	施引论文	比例
1	中国	1211	61.2%	1	中国科学院	中国	121	6.1%
2	印度	147	7.4%	2	中南大学	中国	55	2.8%
3	韩国	137	6.9%	2	南京工业大学	中国	55	2.8%
4	美国	131	6.6%	4	四川大学	中国	54	2.7%
5	沙特阿拉伯	75	3.8%	5	武汉理工大学	中国	44	2.2%
6	伊朗	74	3.7%	6	中国科学技术大学	中国	42	2.1%
7	澳大利亚	71	3.6%	7	浙江师范大学	中国	39	2.0%
8	英国	62	3.1%	8	太原理工大学	中国	37	1.9%
9	西班牙	61	3.1%	9	华中科技大学	中国	32	1.6%
10	波兰	58	2.9%	9	南京林业大学	中国	32	1.6%

**1211**

/ 施引论文 /



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

生态与环境科学领域有 1 个方向入选新兴前沿，是“污泥厌氧发酵产挥发性脂肪酸的微生物机制研究”（表 12）。

表 12 生态与环境科学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	污泥厌氧发酵产挥发性脂肪酸的微生物机制研究	5	148	2023.6

### 2.2 重点新兴前沿——“污泥厌氧发酵产挥发性脂肪酸的微生物机制研究”

污水处理产生的剩余活性污泥（WAS）富含大量复杂有机物和多种微生物，是制备高价值挥发性脂肪酸（VFs）的主要有机底物。厌氧发酵是促进剩余活性污泥产生挥发性脂肪酸、实现资源高效回收利用的关键途径，但其整体效率常常受到不良干扰物的限制。同时，为促进剩余活性污泥中溶解有机物的释放，进而促进挥发性脂肪酸的合成，通常采用各种预处理方法，包括添加预处理剂等。

该新兴前沿包含 5 篇核心论文，主要聚焦剩余活性污泥发酵过程中溶解有机物的动态变化与细菌群落网络、组装过程和微生物特性之间发生的错综复杂的相互作用，研究了各类抗菌药（如广谱杀菌剂吡硫锌、甲基异噻唑啉酮）以及活性污泥预处理方法（如氯化胆碱、单宁酸处理等）对促进底物利用、调节微生物群落和代谢特性、促进挥发性脂肪酸产生的过程和机理，开发了剩余活性污泥发酵的预处理方法，阐明了新兴污染物对剩余活性污泥厌氧消化过程的环境行为以及微生物代谢调节和适应性反应的相互关系。

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

04

地球科学



# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 地球科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

2025 年地球科学领域 Top10 热点前沿中，地质学有 5 个，大气科学和地理学各 2 个，行星科学 1 个，总体聚焦能源资源、极端气候变化事件以及先进技术在地球科学中的应用。在地质学领域，中国陆相页岩油类型与重点地区资源潜力研究以及稀土元素的先进分离与回收技术进展，是关乎国家能源安全的战略要点，愈发得到各国政府高度重视。在大气科学领域，汤加火山全球影响研究、骤旱事件成因与风险研究两

个前沿，展现出对气候系统突变与极端事件风险的认知深度日益加深。在行星科学领域，小行星地表特征和成分分析连续 4 年入选《研究前沿》报告。同时，基于机器学习的水文水资源预测、全新世温度变化、放射性碳测年技术等研究也多次入选，反映了学术界对拓展地球科学认知边界的基础科学问题研究的持续关注。

表 13 地球科学领域 Top 10 热点前沿

序号	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	汤加火山全球影响研究	21	2124	2021.9
2	<b>中国陆相页岩油类型与重点地区资源潜力研究</b>	<b>45</b>	<b>5073</b>	<b>2021.8</b>
3	极端干旱对欧洲森林影响评估	9	1355	2021.6
4	<b>骤旱事件成因与风险研究</b>	<b>8</b>	<b>1296</b>	<b>2021.4</b>
5	稀土元素的先进分离与回收技术进展	19	3112	2021.3
6	基于机器学习的水文水资源预测	18	2387	2021.3
7	海洋生物泵中碳通量研究	7	1007	2021.3
8	放射性碳测年校正曲线研究、数据集分析与应用	7	6064	2021.1
9	全新世温度变化研究	24	3557	2020.9
10	小行星地表特征和成分分析	18	3072	2020.9

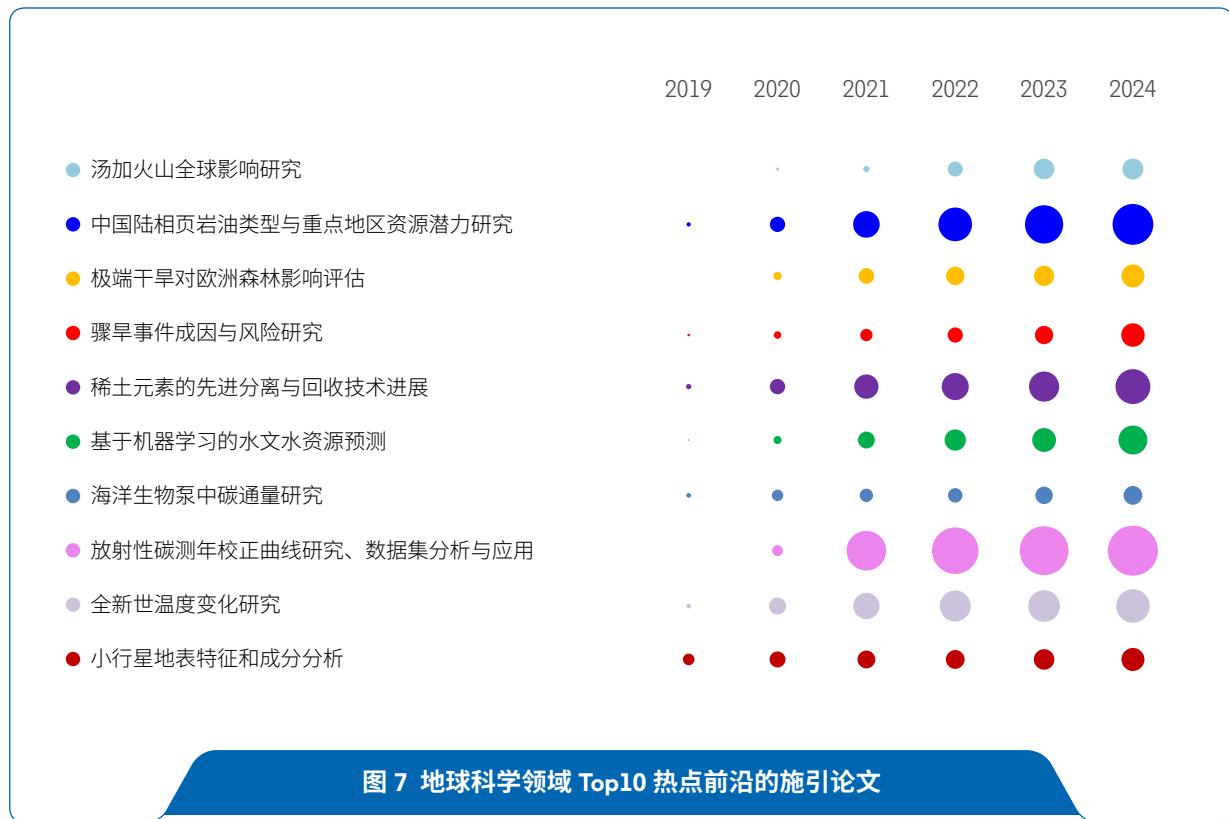


图 7 地球科学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“中国陆相页岩油类型与重点地区资源潜力研究”

页岩油是指以富含有机质的页岩层系中所含的石油资源，涵盖泥页岩孔隙和裂缝中的石油以及泥页岩层系内碳酸盐岩或碎屑岩薄互层中的石油。与北美海相页岩油主要分布于海相地层不同，中国已探明的页岩油主要赋存于陆相富有机质泥页岩层系，资源潜力巨大，被视为支撑中国原油持续增长与长期稳产的重要接替领域，在国家能源安全战略中扮演“压舱石”角色。2022年中国陆相页岩油产量约为 $3.18 \times 10^6$ 吨，占中国原油产量的1.6%。由于陆相页岩分布的非均质性特征，中国不同陆相盆地页岩油类型多样，目前各

油田企业和研究机构根据陆相页岩油的沉积环境、相态、储层类型、热成熟度、岩性组合、源储组合等参数指标对页岩油提出了多种分类方案，但尚未形成统一的划分标准。

近年来，中国陆续在准噶尔盆地二叠系芦草沟组和风城组、鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段、渤海湾盆地古近系沙河街组和孔店组、松辽盆地白垩系青山口组、四川盆地侏罗系大安寨组、江汉盆地古近系潜江组和新沟嘴组等主要陆相沉积盆地的一些典型富有机质页岩地层中相继取得了页岩油勘探突破。

本热点前沿包括 45 篇核心论文，主要聚焦陆相页岩油赋存机理、页岩储层孔隙特征、古环境地球化学氧化还原代理、富集评价方法以及勘探与开采技术。论文被引频次排名前三的论文均由美国辛辛那提大学教授、中国地质大学特聘教授 Thomas Algeo 领导的中美研究团队合作完成。2020 年 10 月发表在《地球化学与宇宙化学学报》(Geochimica et Cosmochimica Acta) 上的 “Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks” 被引 344 次，论文建立了 3 种元素比阈值，并验证其在华北鄂尔多斯盆地

和东北渤海湾盆地等古代陆相页岩古盐度重建中的有效性。同样发表在该期刊的 “Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems” 被引 212 次，论文提出了一种改进沉积体系中元素氧化还原代理校准的新方法，并强调阈值在沉积系统之间可能会有很大差异。另有一篇 2020 年 3 月发表在《化学地质》(Chemical Geology) 上的 “A re-assessment of elemental proxies for paleoredox analysis” 被引 336 次，论文评估了 21 种元素替代指标，并用主成分分析法揭示其成矿相依赖性。

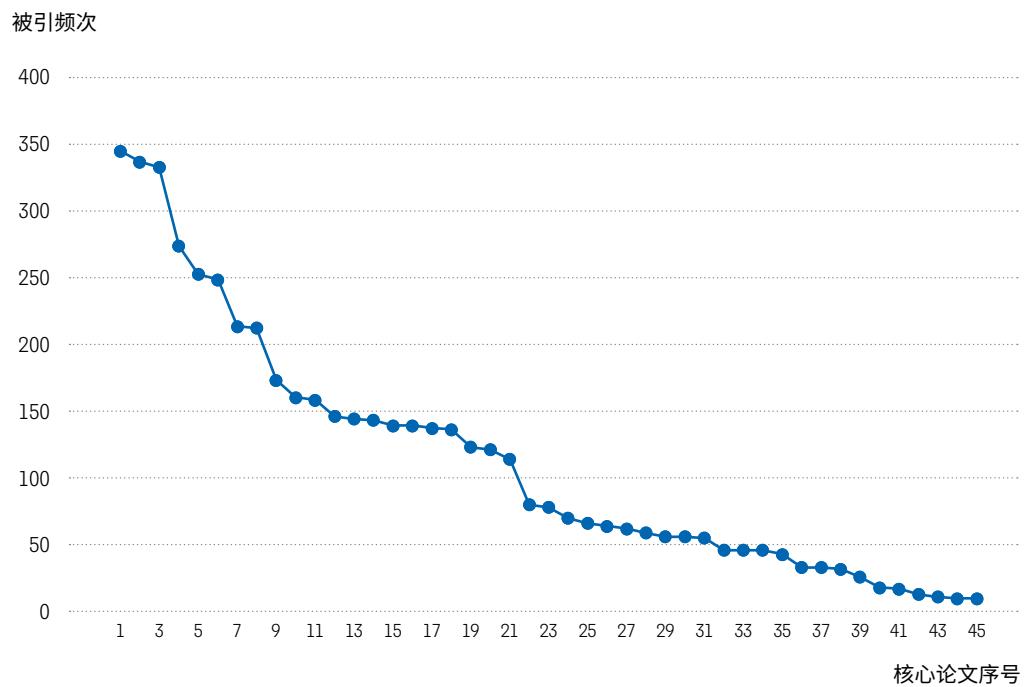


图 8 “中国陆相页岩油类型与重点地区资源潜力研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

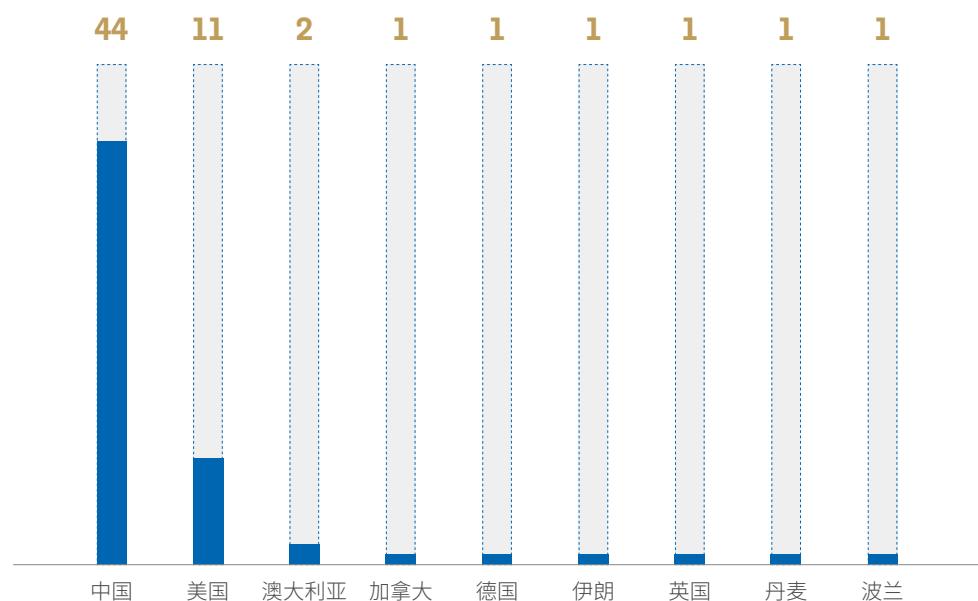
在本热点前沿中,中国与美国、澳大利亚、加拿大、德国、伊朗、英国、波兰等国合作了44篇核心论文,其中美国所发表的11篇论文全部来自与中国的合作。此外,澳大利亚和丹麦合作发表一篇。从机构角度看,

中国国家石油公司的表现最为活跃,贡献了35.6%的核心论文,其次是中国地质大学(武汉)、中国石化集团公司和东北石油大学。

表14 “中国陆相页岩油类型与重点地区资源潜力研究”研究前沿中核心论文的Top产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	中国	44	97.8%	1	中国国家石油公司	中国	16	35.6%
2	美国	11	24.4%	2	中国地质大学(武汉)	中国	12	26.7%
3	澳大利亚	2	4.4%	3	中国石化集团公司	中国	11	24.4%
4	加拿大	1	2.2%	4	东北石油大学	中国	10	22.2%
4	德国	1	2.2%	5	西南石油大学	中国	7	15.6%
4	伊朗	1	2.2%	6	四川建筑职业技术学院	中国	5	11.1%
4	英国	1	2.2%	7	中国科学院	中国	4	8.9%
4	丹麦	1	2.2%	7	北京大学	中国	4	8.9%
4	波兰	1	2.2%	7	辛辛那提大学	美国	4	8.9%
				10	西安石油大学	中国	3	6.7%
				10	天然气地质四川省重点实验室	中国	3	6.7%
				10	中国石油大学	中国	3	6.7%

/核心论文/

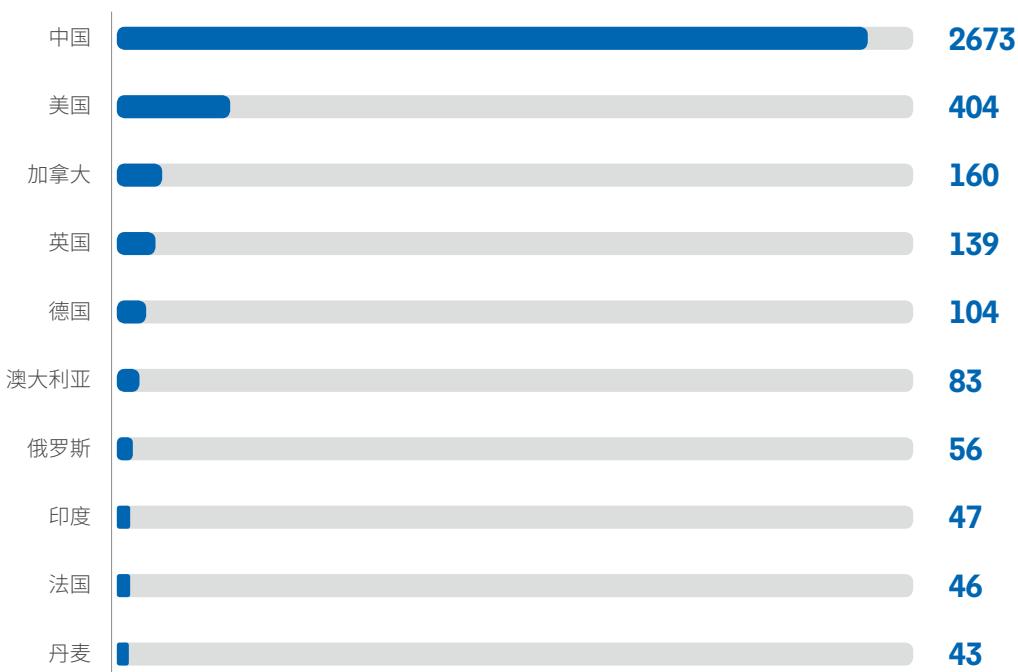


从施引论文的角度看（表 15），中国以绝对的优势排名第一，美国、加拿大次之。施引论文 Top10 产出机构全部来自中国，其中中国国家石油公司排名第一，中国石油大学和中国地质大学（武汉）分别位列第二、三位。

表 15 “中国陆相页岩油类型与重点地区资源潜力研究”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	2673	84.6%	1	中国国家石油公司	中国	825	26.1%
2	美国	404	12.8%	2	中国石油大学	中国	649	20.6%
3	加拿大	160	5.1%	3	中国地质大学（武汉）	中国	484	15.3%
4	英国	139	4.4%	4	中国石化集团公司	中国	418	13.2%
5	德国	104	3.3%	5	中国科学院	中国	372	11.8%
6	澳大利亚	83	2.6%	6	东北石油大学	中国	245	7.8%
7	俄罗斯	56	1.8%	7	西南石油大学	中国	227	7.2%
8	印度	47	1.5%	8	中国地质调查局	中国	190	6.0%
9	法国	46	1.5%	9	成都理工大学	中国	162	5.1%
10	丹麦	43	1.4%	10	北京大学	中国	149	4.7%

/ 施引论文 /



### 1.3 重点热点前沿——“骤旱事件成因与风险研究”

骤旱的概念最早于 2002 年由美国科学家 Mark D. Svoboda 提出，用以描述快速加剧的干旱状况。但直到 2012 年一场席卷美国中西部的特大骤旱事件才引起了全球性的研究热潮。骤旱的快速性和突发性使其危害巨大，且常常与热浪并发，形成破坏力倍增的复合极端事件。从北美大平原到中国长江流域，再到澳大利亚农牧区，骤旱事件造成巨大经济损失和生态破坏已成为全球性的科学与政策议题。

骤旱的形成与演变是大气、海洋、陆地多圈层相互作用的复杂过程，既有大的环流异常为背景，又与地表的气象、水文、土壤、植被、地形、地貌等有明显关系。在全球变化背景下，这些过程的协同与放大效应，共同塑造了骤旱的时空分布格局与长期演变趋势。

本热点前沿包含的 8 篇核心论文主要聚焦骤旱的识别、形成机制、时空分布变化、气候变化影响、预测预警及风险评估等方面的研究。其中，南京信息工程大学在《自然 - 通讯》(Nature Communications) 上发表的 “Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China” 被引频次最高，该研究提出了一种明确表征骤旱事件的新方法，发现人类活动导致的气候变化是骤旱事件的主要推手，易旱区范围将明显扩张，到本世纪中期，中国骤旱风险将增加 23%。美国国家大气研究中心在《自然 - 气候变化》(Nature Climate Change) 上发表的 “Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction” 也引起了广泛关注，该研究讨论了骤旱的预测难点，评估现有预报能力，提出了两种可将骤旱事件纳入早期预警系统与风险管理的概念。

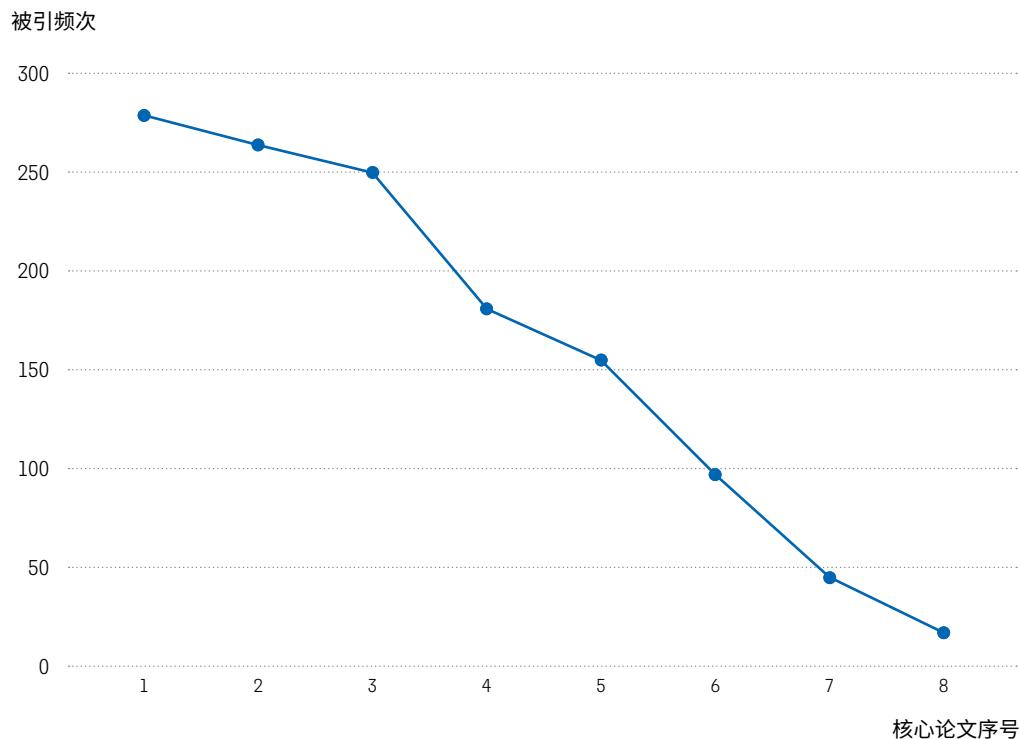


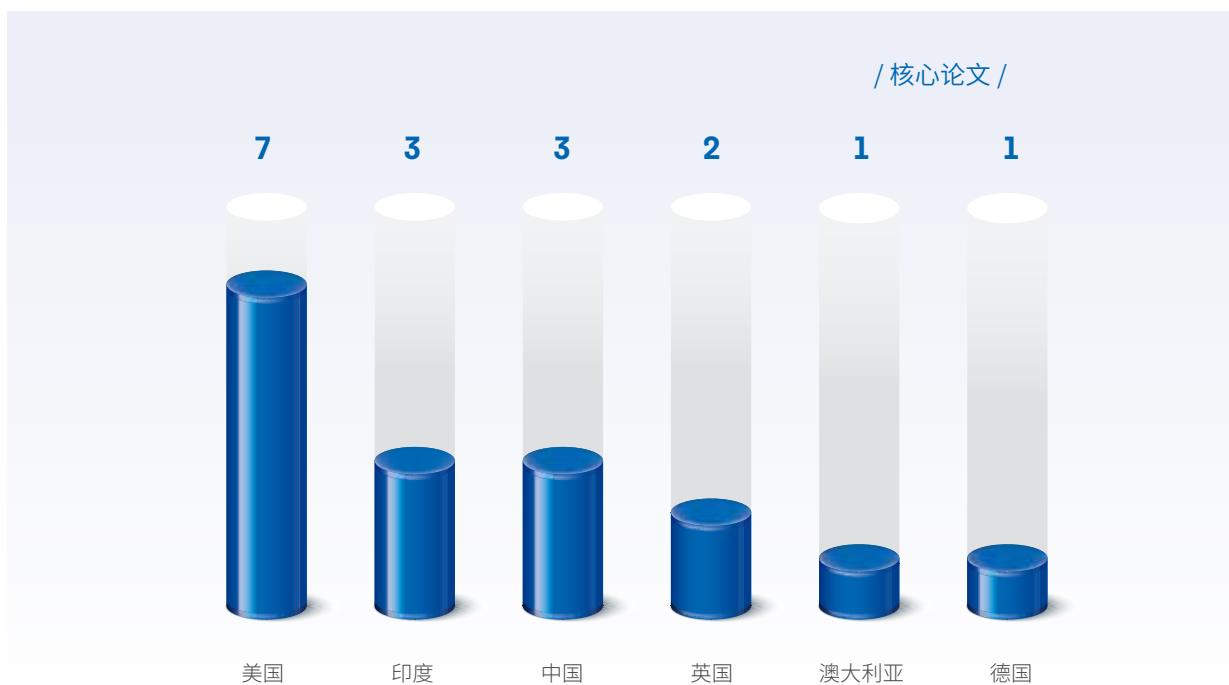
图 9 “骤旱事件成因与风险研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

在核心论文方面，美国的表现最为活跃，发文量占核心论文总量的 87.5%。威斯康星大学麦迪逊分校、俄克拉荷马大学和内布拉斯加大学林肯分校等美国大

气科学领域学术实力较强的高校位列 Top10 产出机构前三名。印度理工学院、中国南京信息工程大学、英国南安普顿大学等也开展了相关研究工作（表 16）。

表 16 “骤旱事件成因与风险研究”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	7	87.5%	1	威斯康星大学麦迪逊分校	美国	5	62.5%
2	印度	3	37.5%	2	俄克拉荷马大学	美国	4	50.0%
2	中国	3	37.5%	3	内布拉斯加大学林肯分校	美国	3	37.5%
4	英国	2	25.0%	3	印度理工学院	印度	3	37.5%
5	澳大利亚	1	12.5%	5	南安普顿大学	英国	2	25.0%
5	德国	1	12.5%	5	美国国家海洋与大气管理局	美国	2	25.0%
				5	科罗拉多大学博尔德分校	美国	2	25.0%
				5	南京信息工程大学	中国	2	25.0%



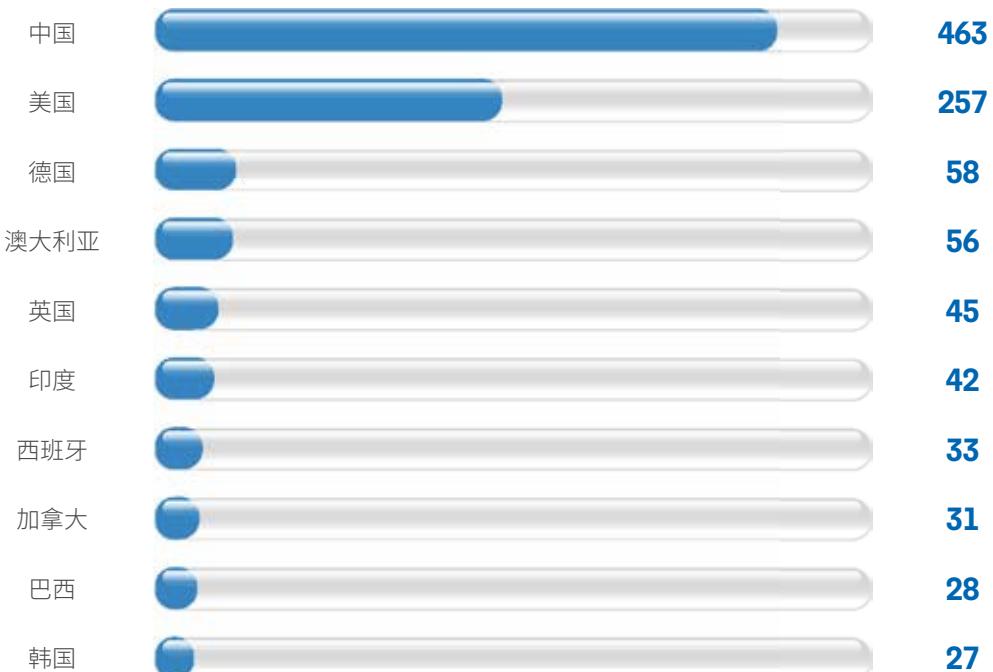
从施引论文的角度看（表 17），中国表现远超其他国家，表现出对该领域的高度关注，其后依次为美国、德国、澳大利亚等。在施引论文 Top10 产出机构中，中国科学院以 156 篇的施引论文数量位列第一。南京

信息工程大学、北京师范大学、武汉大学、河海大学和中山大学也都有亮眼表现。美国威斯康星大学麦迪逊分校位列第三。

表 17 “骤旱事件成因与风险研究”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	463	57.3%	1	中国科学院	中国	156	19.3%
2	美国	257	31.8%	2	南京信息工程大学	中国	94	11.6%
3	德国	58	7.2%	3	威斯康星大学麦迪逊分校	美国	35	4.3%
4	澳大利亚	56	6.9%	4	北京师范大学	中国	33	4.1%
5	英国	45	5.6%	5	武汉大学	中国	31	3.8%
6	印度	42	5.2%	6	河海大学	中国	29	3.6%
7	西班牙	33	4.1%	7	中山大学	中国	28	3.5%
8	加拿大	31	3.8%	8	内布拉斯加大学林肯分校	美国	28	3.5%
9	巴西	28	3.5%	9	印度理工学院	印度	26	3.2%
10	韩国	27	3.3%	10	美国国家航空航天局	美国	25	3.1%
				10	科罗拉多大学博尔德分校	美国	25	3.1%

### / 施引论文 /



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

地球科学领域有 1 个方向入选新兴前沿，是“中国区域性极端降水 - 滑坡动态模型研究”（表 18）。

表 18 地球科学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	中国区域性极端降水 - 滑坡动态模型研究	8	185	2023.8

### 2.2 重点新兴前沿——“中国区域性极端降水 - 滑坡动态模型研究”

在全球气候变化日益加剧的背景下，极端降水事件频发，由此引发的滑坡等地质灾害对人民生命财产安全和社会经济发展构成了严重威胁。新兴前沿“中国区域性极端降水 - 滑坡动态模型研究”由 8 篇研究论文组成，聚焦探明极端降水的水汽来源和动力成因，深入解析降雨触发滑坡的具体物理机制，通过构建并应用水文 - 地质耦合动态模型，定量揭示特定区域内由极端降水引发滑坡的物理机制及其时空演化过程，未来有望广泛应用于灾害预警、气候变化适应性规划、重大工程安全保障和国家应急管理等领域。

其中发表于《地球物理研究快报》（*Geophysical Research Letters*）的论文颠覆了中国西北干旱区的水汽完全依赖外部输送的传统观点，研究发现在新疆极端降水的增量中，本地再循环的贡献（49%）几乎与外部输送（51%）同等重要，为理解西北地区“暖湿化”趋势提供了关键的物理机制。发表在《地球科学模型开发》（*Geoscientific Model Development*）的论文则实现了重要模型突破，提出一种“从雨到坡”的全链

条模拟工具——iHydroSlide3D 模型，并在若干流域成功复现了洪水 - 滑坡级联事件。另一项历时长达 15 年的综合研究指出，随着近年极端天气事件增多，滑坡变形的主控因素正逐渐从相对可预测的“库水位升降”向更为突发和猛烈的“极端降雨”转变，同时滑坡的破坏模式也向推覆式、整体平移的复合模式演化，这一深刻洞察对大型水利工程区的长期地质风险管理预警具有重要指导意义。

此外，该前沿涉及的其他主要突破还包括：通过对比不同天气类型，揭示了驱动华北地区强降雨的高空急流与斜压槽等动力机制的差异；确定来自西太平洋的水汽输送是造成长江流域“大气河”型极端降水的决定性因素；构建用于模拟城市排水管道淤积的智能流固耦合模型（CFD-DEM），为城市防洪提供新工具；推导出针对特定基岩边坡的降雨入渗 - 变形耦合问题的更为精确的解析解；首次识别并量化了新型复合灾害“旱涝急转”，揭示了其在中国日益频发的趋势及其不同的区域性驱动机制。

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 05

## 临床医学



# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 临床医学领域 Top 10 热点前沿发展态势

2025 年临床医学领域 Top10 热点前沿主要集中于肿瘤、呼吸道传染病、阿尔茨海默病、囊性纤维化、抑郁症等疾病的预防和治疗，以及人工智能技术在医学中的发展和应用。

其中肿瘤的治疗方面重点关注免疫治疗、靶向治疗、联合疗法等在各类癌症中的应用，包含“晚期宫颈癌的免疫治疗及联合疗法”等 5 个前沿方向。这些方向延续了近些年免疫和分子靶向治疗肿瘤等疑难病症的研究热度。

“疫苗和单克隆抗体用于预防呼吸道合胞病毒感染”关注传染病预防研究。

“早期阿尔茨海默病抗淀粉样蛋白靶向疗法的临床验证与安全性管理”则聚焦于阿尔茨海默病等神经

退行性疾病的靶向疗法和临床管理。

CFTR 调节剂三联疗法是囊性纤维化治疗领域的里程碑。它将囊性纤维化从一种只能对症治疗的进行性致命疾病，转变为一种可以被有效管理和控制的慢性病，真正实现了从症状控制到病因治疗的跨越。

热点前沿“赛洛西宾治疗抑郁症的疗效”则是关于传统的致幻药赛洛西宾作为抑郁症药物治疗的新选择，涉及其效果、作用机制、安全性等多方面研究。

此外，随着人工智能的快速发展，其在临床医学领域中的应用研究热度越来越高。从去年的“人工智能与牙科学”，到今年的“全切片病理图像的弱监督深度学习框架”，可以预测人工智能一定会深刻影响未来的临床诊疗模式。

表 19 临床医学领域 Top 10 热点前沿

序号	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	疫苗和单克隆抗体用于预防呼吸道合胞病毒感染	38	4559	2022.9
2	晚期宫颈癌的免疫治疗及联合疗法	14	2233	2022.4
3	复发难治多发性骨髓瘤 (RRMM) 的免疫治疗靶点突破与耐药机制	28	5828	2022.3
4	早期阿尔茨海默病抗淀粉样蛋白靶向疗法的临床验证与安全性管理	20	5365	2022.3
5	<b>CFTR 调节剂三联疗法对囊性纤维化实现从症状控制到病因治疗</b>	<b>30</b>	<b>4471</b>	<b>2022.2</b>
6	可手术非小细胞肺癌 (NSCLC) 的精准治疗：靶向与免疫双策略	41	8183	2022.1
7	赛洛西宾治疗抑郁症的疗效	11	2469	2022.1
8	双免疫检查点阻断 (PD-1/LAG-3) 在黑色素瘤新辅助与辅助治疗中的疗效	23	4983	2021.5
9	晚期肝细胞癌免疫联合疗法	29	15779	2021.3
10	<b>全切片病理图像的弱监督深度学习框架</b>	<b>29</b>	<b>6537</b>	<b>2021.1</b>

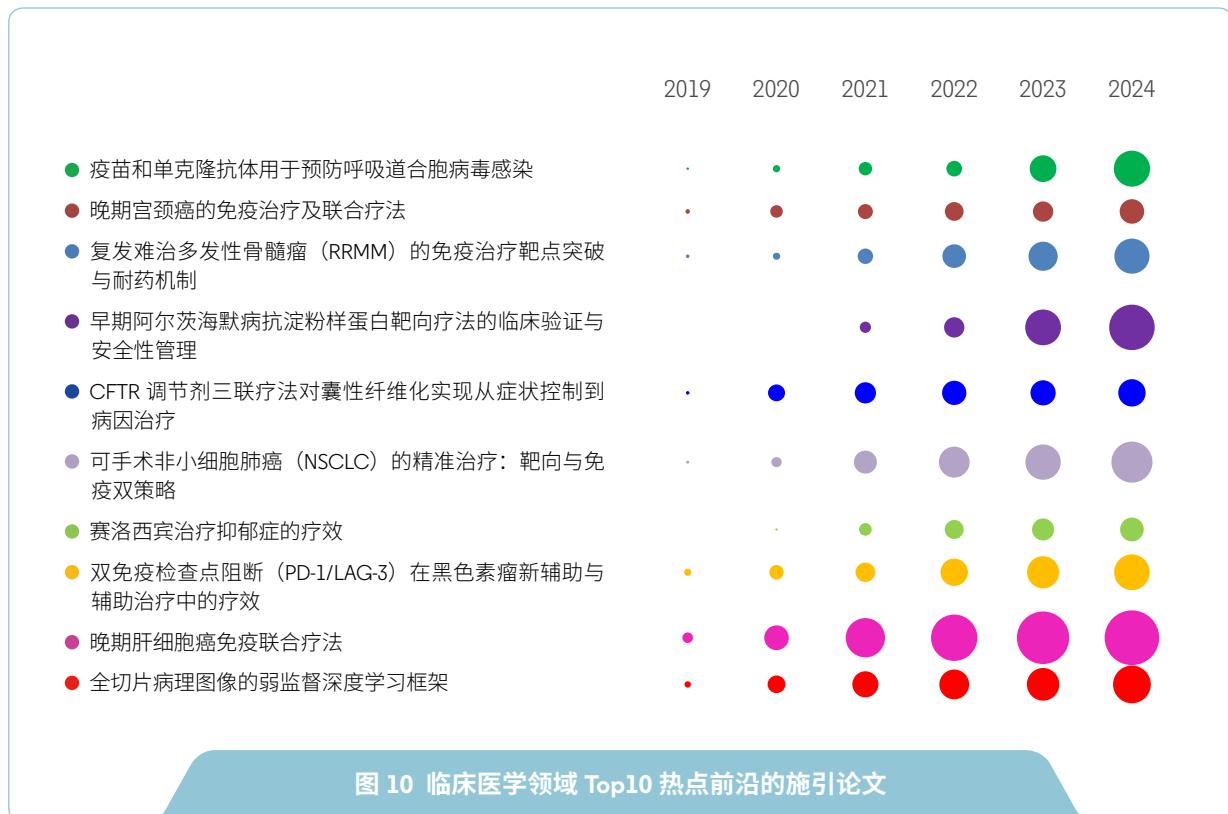


图 10 临床医学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“CFTR 调节剂三联疗法对囊性纤维化实现从症状控制到病因治疗”

囊性纤维化 (cystic fibrosis, CF) 是一种常见的致命的遗传性疾病，它由编码 cystic fibrosis transmembrane conductance regulator (CFTR) 的基因突变引起。CFTR 广泛表达于上皮细胞的细胞表面，调节体内多个组织器官的水盐平衡。CFTR 缺失或异常会引起营养不良、肝脏疾病、反复细菌感染、慢性炎症及呼吸衰竭。过去的医疗手段集中于“症状控制”，通过繁复的物理排痰、大剂量抗生素对抗感染、胰酶补充剂助消化等，尽力延缓肺功能不可逆的衰退和并发症的发生。然而，这一切都未能触及疾病的根源——由 CFTR 基因突变导致的蛋白质功能缺陷。直到 CFTR 调节剂三联疗法 (Elexacaftor/Tezacaftor/

Ivacaftor, ETI) 的出现，这场抗争才发生了根本性的转折。ETI 疗法是囊性纤维化治疗领域的里程碑，这一革命性疗法的问世，标志着 CF 治疗从对症管理迈入根源纠治的精准医学新时代。

该热点前沿的 30 篇核心论文的核心研究主题非常集中：评估 ETI 疗法的疗效、安全性、作用机制及其对 CF 患者全方位的临床影响。

主题 1：关键性临床试验与疗效验证，这些关键论文共同构成了这一划时代疗法的科学基石，为其通过美国 FDA 对囊性纤维化三联疗法的批准提供了临床验证的完整链条。

2019年10月，FDA首次批准ETI疗法用于 $\geq 12$ 岁、携带至少一个F508del突变的CF患者。这一决定主要基于2019年发表在《新英格兰医学杂志》(The New England Journal of Medicine)和《柳叶刀》(The Lancet)两篇关键论文的III期临床试验结果，也就是该研究前沿中被引频次最高的两篇论文。这两项研究共同构成了ETI疗法对最主要CF患者群体有效的决定性证据，是FDA做出初始批准的首要科学依据。在初始批准后，后续研究将受益人群拓展到儿童患者和罕见突变患者。其关键依据是《囊性纤维化杂志》(Journal Of Cystic Fibrosis)等发表的一系列体外功能研究，这些研究在细胞模型中证明了ETI对这些罕见突变能够恢复CFTR蛋白功能，体现了精准医疗的先进理念。

主题2：作用机制的深入探索，这部分研究回答了“ETI为什么如此有效”的科学问题。相关研究揭

示了ETI“协同救援”F508del突变蛋白的分子结构基础，并在分子和细胞水平证实了ETI不仅能纠正F508del突变，还能改善CFTR蛋白的功能。

主题3：真实临床效果研究，在药物获批后，研究重点转向其在真实临床环境中的长期效果。多项注册登记研究在更大规模、更广泛的患者群体中验证了临床试验的结果，显示肺功能改善、住院率下降等。

ETI疗法彻底改变了CF的疾病图景，将CF从一种进行性、致命性疾病转变为一种可管理的慢性病，实现了从“控制症状”到“纠正病因”的根本性跨越。此外ETI疗法还是精准医疗的成功典范，从基于基因型选择患者，到利用体外数据为罕见突变患者提供个体化治疗方案，CF领域成为精准医疗从理论到实践的完美范例。

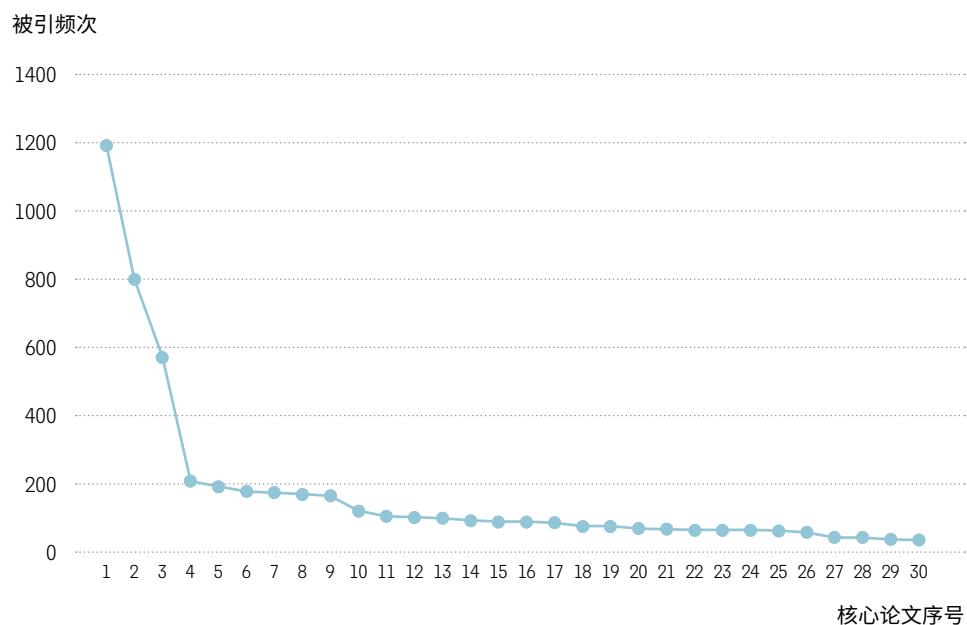


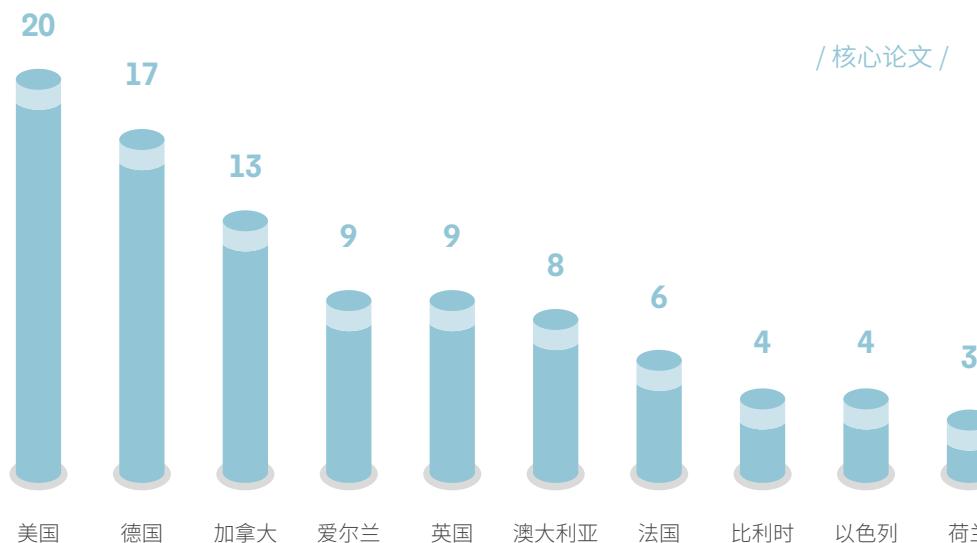
图11 “CFTR调节剂三联疗法对囊性纤维化实现从症状控制到病因治疗”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

该热点前沿 30 篇核心论文的 Top10 产出国家中，美国贡献最大，占比为 66.7%，其次是德国和加拿大。该前沿的核心论文多是典型的全球多中心临床试验，参与国家和机构的广度和深度极高。Top10 产出机构汇集了全球 CF 治疗领域的领导者，确保了试验结果

的广泛适用性和权威性。其中美国福泰制药公司作为唯一入选的企业是关键注册临床试验和核心机制研究的发起者、资助者和主导者，同时也是一些核心论文的数据提供者和药物提供者。

表 20 “CFTR 调节剂三联疗法对囊性纤维化实现从症状控制到病因治疗”研究前沿中核心论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	20	66.7%	1	柏林夏里特医学院	德国	14	46.7%
2	德国	17	56.7%	2	多伦多大学	加拿大	12	40.0%
3	加拿大	13	43.3%	3	华盛顿大学	美国	11	36.7%
4	爱尔兰	9	30.0%	3	福泰制药公司	美国	11	36.7%
4	英国	9	30.0%	5	国立犹太健康中心	美国	8	26.7%
6	澳大利亚	8	26.7%	5	阿拉巴马大学伯明翰分校	美国	8	26.7%
7	法国	6	20.0%	5	都柏林大学	爱尔兰	8	26.7%
8	比利时	4	13.3%	8	哈佛大学	美国	5	16.7%
8	以色列	4	13.3%	8	科罗拉多大学	美国	5	16.7%
10	荷兰	3	10.0%	8	巴黎西岱大学	法国	5	16.7%

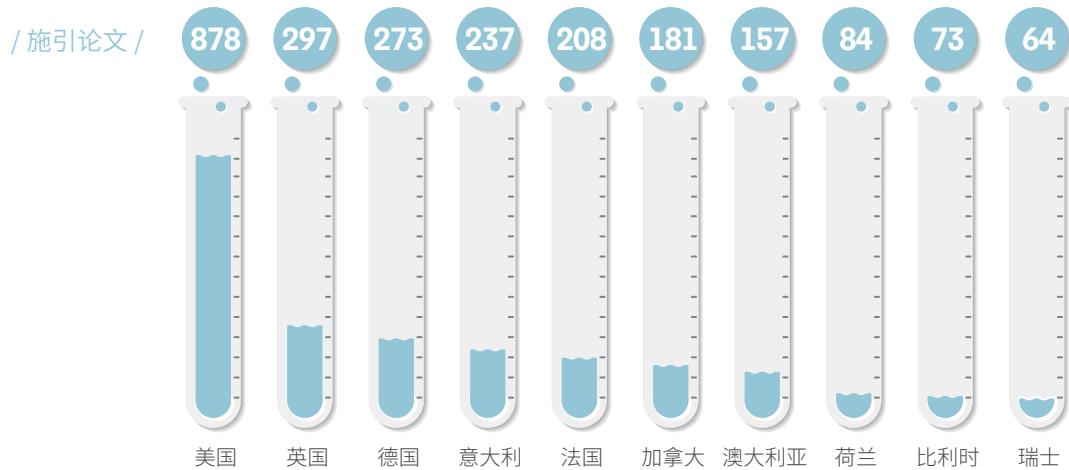


施引论文方面,美国贡献最大,占比达到42.4%,显著超过第二位的英国。施引论文Top10产出机构中,法国的2家机构法国国家健康与医学研究所、巴黎西岱大学分别排名第一、第二。美国华盛顿大学

与巴黎西岱大学并列第二。德国的柏林夏里特医学院排名第四。加拿大多伦多大学排名第五。排名6-10的5家机构均来自美国。

表21 “CFTR调节剂三联疗法对囊性纤维化实现从症状控制到病因治疗”研究前沿中施引论文的Top10产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	美国	878	42.4%	1	法国国家健康与医学研究所	法国	150	7.2%
2	英国	297	14.3%	2	巴黎西岱大学	法国	125	6.0%
3	德国	273	13.2%	2	华盛顿大学	美国	125	6.0%
4	意大利	237	11.4%	4	柏林夏里特医学院	德国	95	4.6%
5	法国	208	10.0%	5	多伦多大学	加拿大	92	4.4%
6	加拿大	181	8.7%	6	国立犹太健康中心	美国	90	4.3%
7	澳大利亚	157	7.6%	7	北卡罗来纳大学教堂山分校	美国	87	4.2%
8	荷兰	84	4.1%	8	阿拉巴马大学伯明翰分校	美国	85	4.1%
9	比利时	73	3.5%	9	哈佛大学	美国	81	3.9%
10	瑞士	64	3.1%	10	科罗拉多大学	美国	79	3.8%



### 1.3 重点热点前沿——“全切片病理图像的弱监督深度学习框架”

数字病理学的快速发展为人工智能辅助诊断提供了前所未有的机遇。全切片图像(Whole Slide Images, WSIs)作为病理诊断的基础,通常具有极高的分辨率,但同时也带来了巨大的计算挑战。传统的深度学习方

法需要像素级或区域级精细标注,需要病理专家投入大量时间进行手工标注,成为制约其临床应用的主要瓶颈。弱监督深度学习则利用切片级标签等弱标注数据,有效减轻了对精细标注的依赖,为病理诊断自动

化提供了可行解决方案。

“全切片病理图像的弱监督深度学习框架”热点前沿包括 29 篇核心论文，主要是评估弱监督深度学习框架在病理诊断中的应用效果，总体上弱监督深度学习在癌症的诊断与分型、预后预测、生物标志物发现等很多方面已取得显著成果。其中被引频次最高的核心论文是由美国纪念斯隆凯特琳癌症中心的研究人员 2019 年发表于《自然医学》(Nature Medicine)，率先提出了一种基于多实例学习 (Multiple Instance Learning, MIL) 框架的深度学习系统，开创了弱监督深度学习应用于病理学的先例。该研究仅需切片级标签，避免了昂贵耗时的像素级人工标注，并利用大规模全切片

图像数据集对该框架进行评估，结果显示该系统能够训练出准确的分类模型，敏感性可达 100%。2021 年哈佛医学院 Ming Y. Lu 研究团队报告的一种可解释的弱监督深度学习方法——聚类约束注意力多实例学习 (CLAM)，则提升了大型全切片图像 (WSIs) 数据集的处理效率，其性能优于标准的弱监督分类算法。

尽管弱监督学习在病理学领域的应用取得了显著进展，但是，现阶段仍面临多项挑战，如标注噪声处理、可解释性提升、计算效率优化，未来趋向开发更高效的弱监督框架，进一步减少对标注数据的依赖，探索自监督与弱监督的结合，提高模型的可解释性和可靠性，以期早日实现临床转化，改善患者诊疗体验。

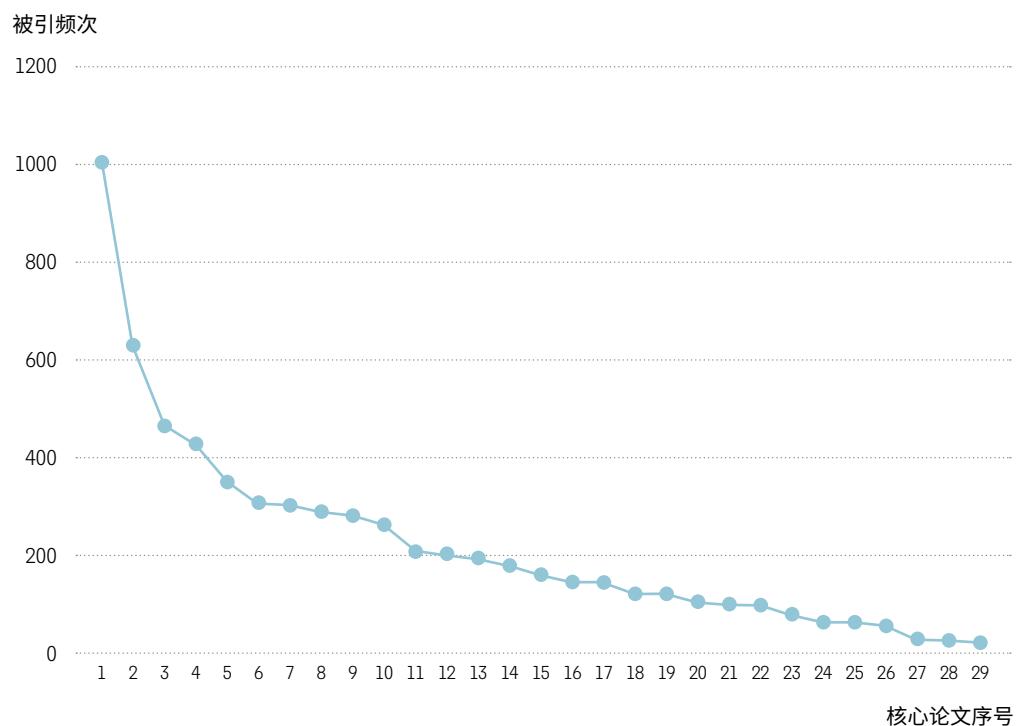


图 12 “全切片病理图像的弱监督深度学习框架”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

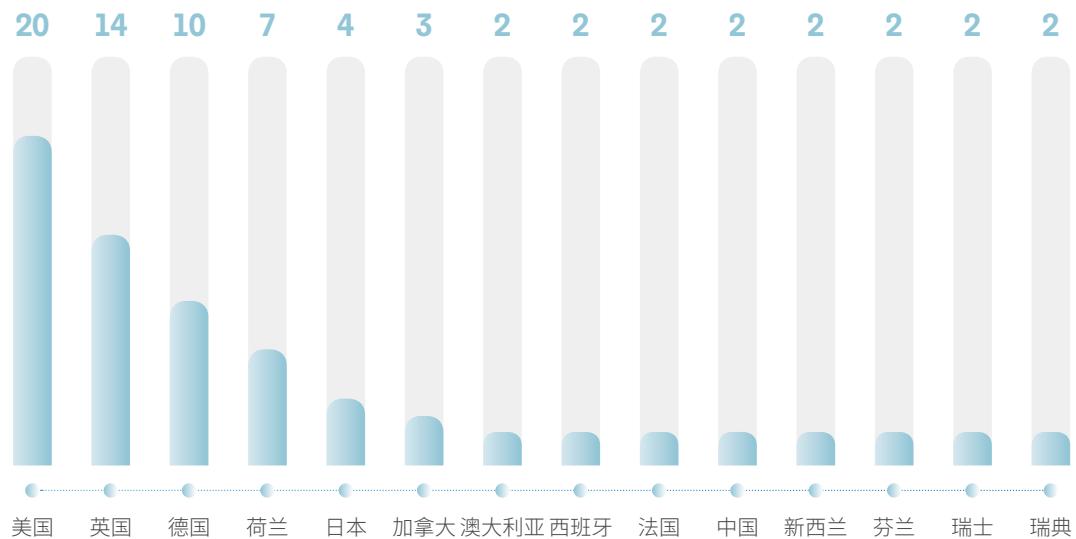
该热点前沿核心论文 Top10 产出国家中，美国贡献了近 70% 的核心论文，在该前沿领域优势明显；其他也多为欧美国家，亚洲只有日本和中国上榜。Top10

产出机构中有 5 家来自美国，其余 5 家均是欧洲机构，包括 3 家德国机构、1 家英国机构、1 家荷兰机构，欧美在该前沿方向已然形成垄断局面。

表 22 “全切片病理图像的弱监督深度学习框架”研究前沿中核心论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	20	69.0%	1	亚琛工业大学	德国	8	27.6%
2	英国	14	48.3%	1	亥姆霍兹联合会	德国	8	27.6%
3	德国	10	34.5%	3	海德堡大学	德国	7	24.1%
4	荷兰	7	24.1%	3	利兹大学	英国	7	24.1%
5	日本	4	13.8%	5	马斯特里赫特大学	荷兰	5	17.2%
6	加拿大	3	10.3%	5	哈佛大学	美国	5	17.2%
7	澳大利亚	2	6.9%	7	丹纳 - 法伯癌症研究所	美国	4	13.8%
7	西班牙	2	6.9%	7	博德研究所	美国	4	13.8%
7	法国	2	6.9%	7	麻省理工学院	美国	4	13.8%
7	中国	2	6.9%	7	芝加哥大学	美国	4	13.8%
7	新西兰	2	6.9%					
7	芬兰	2	6.9%					
7	瑞士	2	6.9%					
7	瑞典	2	6.9%					

/ 核心论文 /

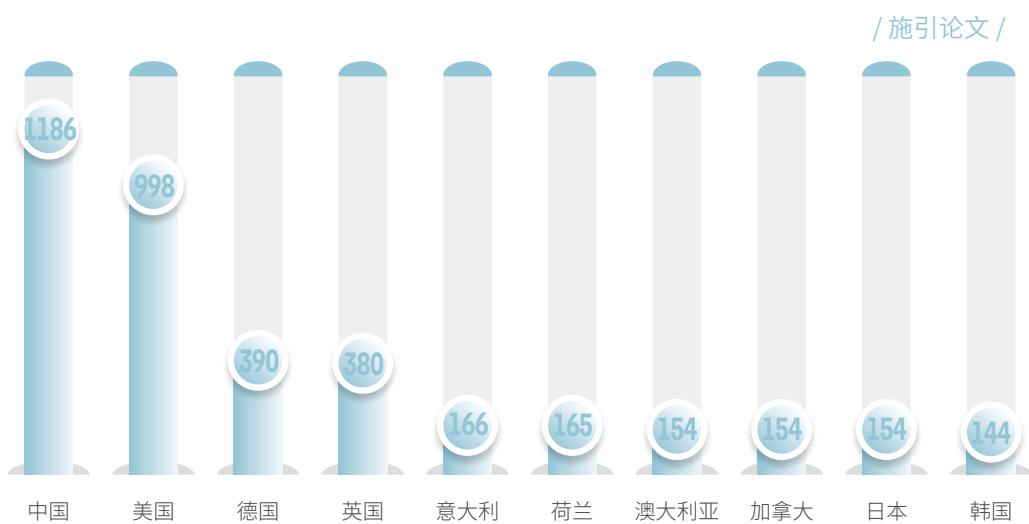


施引论文方面，中国数量最多，占比超过 1/3；美国紧随其后，也贡献了将近 1/3，说明中美对该前沿研究方向的关注远超其他国家。Top10 产出机构则

集中分布于美国、德国和中国，其中美国的哈佛大学、德国的亥姆霍兹联合会和中国的中国科学院分别是三个国家的代表。而 Top10 中半数来自中国。

表 23 “全切片病理图像的弱监督深度学习框架”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	1186	35.3%	1	哈佛大学	美国	158	4.7%
2	美国	998	29.7%	2	亥姆霍兹联合会	德国	143	4.3%
3	德国	390	11.6%	3	中国科学院	中国	130	3.9%
4	英国	380	11.3%	3	海德堡大学	德国	130	3.9%
5	意大利	166	4.9%	5	中山大学	中国	129	3.8%
6	荷兰	165	4.9%	6	亚琛工业大学	德国	99	2.9%
7	澳大利亚	154	4.6%	7	斯坦福大学	美国	93	2.8%
8	加拿大	154	4.6%	8	复旦大学	中国	89	2.7%
9	日本	154	4.6%	9	上海交通大学	中国	84	2.5%
10	韩国	144	4.3%	10	南方医科大学	中国	75	2.2%



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

临床医学领域 2025 年入选 7 个新兴前沿，主要涉及 CAR-T 细胞的免疫治疗机制、新抗原疫苗对肿瘤的治疗、新型模块化手术机器人系统 (Hugo 等) 在泌尿与胃肠等外科的临床应用、人工智能大语言模型 ChatGPT 等在医疗健康领域的应用四个方面，其中“人工智能大语言模型 ChatGPT 等在医疗健康领域的应

用”前沿群包括四个新兴前沿，分别关注人工智能大语言模型 ChatGPT 等在放射学、眼科、耳鼻喉科、护理等医疗健康领域的应用 (见表 24)。综合 CPT 指标、前沿发展潜力及科技情报研究人员的判断，最终选取“人工智能大语言模型 ChatGPT 等在医疗健康领域的应用”前沿群作为重点分析对象。

表 24 临床医学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	CAR-T 细胞的免疫治疗机制	7	155	2024.0
2	新抗原疫苗对肿瘤的治疗	4	565	2023.8
3	<b>人工智能大语言模型 ChatGPT 等在专科医疗场景中可靠性、适用性及边界的系统性验证</b>	12	245	2023.8
4	<b>人工智能大语言模型 ChatGPT 等在放射学领域的临床应用潜力与局限性</b>	17	492	2023.7
5	新型模块化手术机器人系统 (Hugo 等) 在泌尿与胃肠等外科的临床应用	11	220	2023.7
6	<b>人工智能大语言模型 ChatGPT 等在眼科疾病分类、诊断、护理、教育等方面的应用</b>	25	742	2023.6
7	<b>人工智能大语言模型 ChatGPT 等在护理教育及医疗健康领域的应用、影响、挑战与整合路径</b>	8	180	2023.6

## 2.2 重点新兴前沿——“人工智能大语言模型 ChatGPT 等在医疗健康领域的应用”

ChatGPT 是一个使用深度学习技术生成类似人类对自然语言输入的响应的高级语言模型，是 OpenAI 开发的生成式预训练转换器 (GPT) 模型家族的一部分，并且是目前最大的公开可用的语言模型之一，能够捕捉人类语言的细微差别和复杂性，使其能够跨广泛提示生成适当且与上下文相关的响应，在医疗健康领域的潜在应用范围可从识别潜在研究主题到协助专业人员进行临床和实验室诊断。

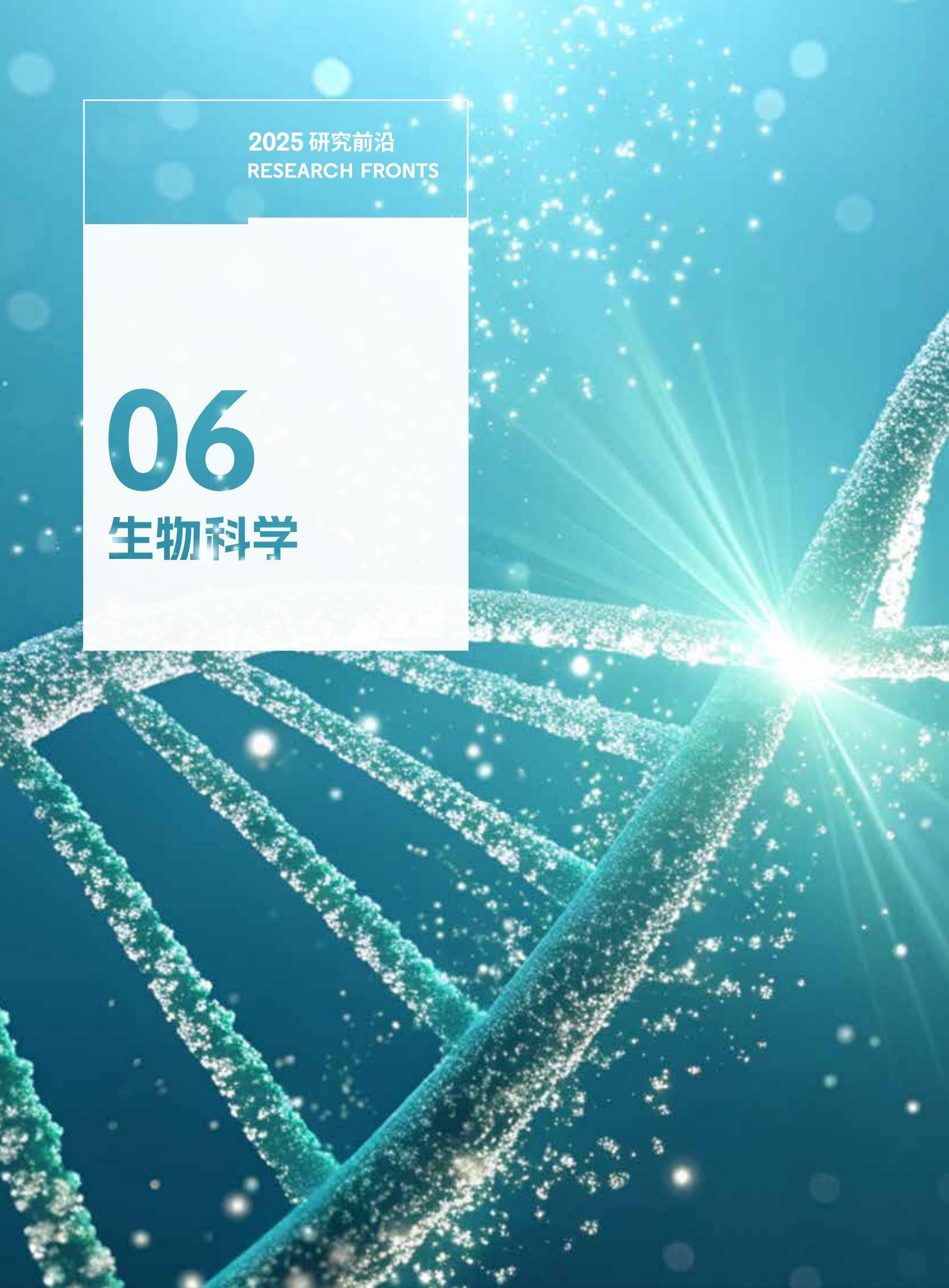
“人工智能大语言模型 ChatGPT 等在医疗健康领域的应用” 新兴前沿群的研究内容包括 ChatGPT 对耳鼻喉科专业问题的分析、ChatGPT 对涎腺内窥镜临床决策和患者信息的支持、评估比较 ChatGPT-3.5 和 GPT-4 生成的耳鼻咽喉头颈外科信息的准确性及可读性、ChatGPT 和 GPT-4 对肺肿瘤 CT 报告的数据挖掘、GPT-4 对影像学及眼科诊断的辅助作用、ChatGPT 在眼科知识评估中的作用、比较 Google 与 ChatGPT 生成的阑尾炎及白内障等临床相关问题的准确性、ChatGPT 对护理教育的影响等。通过对文献内容的解

读发现，现阶段 ChatGPT 在耳鼻咽喉头颈外科、影像诊断、眼科及护理的应用更多被视为一种补充工具，增强而不是取代临床医师的知识与技能。其具体用途包括诊断、术前计划、术中指导、术后护理、患者沟通和教育改进、医学临床教学和科研。在影像诊断、眼科等专业性较强的领域内，ChatGPT 的表现还不够好，仍需进行从常识性知识到生物医学领域知识的迁移和进一步的学习训练，以提升其在专业领域中的表现。此外，ChatGPT 在患者教育方面展现出了优势，既能为患者提供易于理解的健康信息，提高他们的健康知识素养，还能根据具体问题提供定制化答案。总而言之，ChatGPT 为医疗健康带来了新的视角和工具，不仅可以帮助医生更准确地预测疾病风险和结果，为患者提供更加个性化的治疗方案，还可以优化诊断和记录流程。然而也必须认识到 ChatGPT 是把双刃剑，不可忽视其局限性与潜在风险，例如生成的内容应用于商业目的时须注意不侵犯版权并符合相关法律法规。

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 06

## 生物科学



# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 生物科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

生物科学领域排名前十的热点前沿可归为 4 类主题：技术创新类、微观机制类、医学应用与转化研究类、宏观交互与健康影响类。

技术创新类以革命性的技术方法为生命科学研究提供强大引擎，包括 4 个技术相关的热点前沿：高通量单细胞技术、基因编辑技术、蛋白质组学和空间转录组学技术。这四项技术共同构成了 21 世纪生命科学研究的核心支柱技术，已持续多年入选研究前沿，它们为生物学发现提供了关键工具支撑，持续推动生命科学领域向更精准、更系统化的方向迈进。

微观机制类主要揭示生命活动的分子基础，包括 1 个热点前沿：“蛋白质乳酸化”，它揭示了经典代谢物乳酸的全新信号功能，为理解免疫、肿瘤等生理病理过程提供了全新的分子视角。

医学应用与转化研究类旨在解决重大健康问题，推动精准医学发展，包括 3 个相

关的热点前沿：“网络药理学在中医药现代化研究中的应用”是中医药研究首次进入研究前沿；“mRNA-LNP 疫苗的免疫原性机制与免疫应答调控研究”聚焦 mRNA-LNP 疫苗研究直接服务于传染病防控；“肿瘤微生物组”从微生物互作角度为癌症等疾病研究提供新视角。

宏观交互与健康影响类主要关注机体与内外部环境的复杂互作及其健康效应，包括 2 个相关的热点前沿：一是“宿主遗传与肠道菌群的因果机制及其对代谢与免疫疾病的影响研究”，探讨内在宏界面与疾病的因果机制；二是“聚苯乙烯微塑料诱导小鼠雄性生殖毒性”，微塑料污染相关的研究一直是近 10 年生态与环境科学领域的热点前沿，当前关于聚苯乙烯微塑料等新兴环境污染物的研究正从生态环境领域的现象研究深化到对生物体的致病机制研究。

这些方向共同体现了当前生命科学多组学研究、技术驱动、精准干预以及关注复杂系统互作的发展趋势。

表 25 生物科学领域 Top 10 热点前沿

序号	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	蛋白质乳酸化	35	4865	2022.7
2	<b>网络药理学在中医药现代化研究中的应用</b>	<b>13</b>	<b>1741</b>	<b>2022.4</b>
3	利用高通量单细胞技术构建人类细胞图谱	4	1016	2022.0
4	先导编辑技术和大片段 DNA 的精准整合技术	27	6192	2021.5
5	mRNA-LNP 疫苗的免疫原性机制与免疫应答调控研究	6	1468	2021.5
6	基于 DIA 技术的高通量深度蛋白质组学分析	7	1773	2021.4
7	空间转录组学技术及其在生物组织高分辨率解析中的应用	31	8795	2021.3
8	宿主遗传与肠道菌群的因果机制及其对代谢与免疫疾病的影响研究	6	2557	2021.3
9	<b>肿瘤微生物组</b>	<b>26</b>	<b>6943</b>	<b>2021.0</b>
10	聚苯乙烯微塑料诱导小鼠雄性生殖毒性	9	1838	2021.0

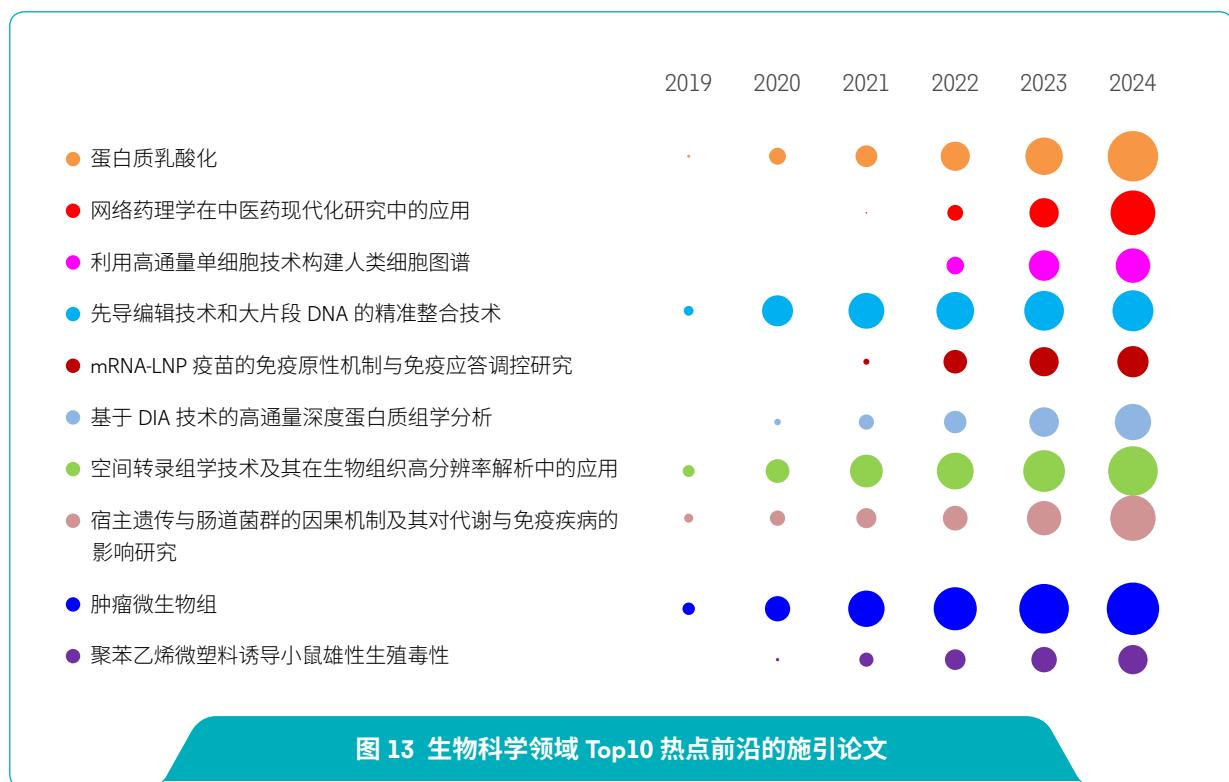


图 13 生物科学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“网络药理学在中医药现代化研究中的应用”

网络药理学是一门融合了系统生物学、多向药理学、计算生物学和网络科学的新兴学科。它通过构建“药物-靶点-疾病”之间的复杂相互作用网络，从系统层面理解药物干预疾病的整体性机制。

中医药的特色在于整体观、辨证论治和方剂用药。以往采用还原、试错的方法研究中医药遇到生物系统复杂、化学成分复杂等难点问题。网络药理学一经提出，即被认为是“下一代的中医药研究模式”。网络药理学在中医药现代化研究中扮演了革命性的角色，因其完美地契合了中医药整体性、系统性的核心哲学思想，为理解中药复方“多成分、多靶点、整体调节”的作用特点提供了强大的理论工具和研究范式。

该热点前沿的13篇核心论文具体可归纳为3个研究主题：

主题1包括5篇综述性论文，系统梳理网络药理学在中药研究中的方法论体系，强调网络药理学的核心价值：网络药理学为中医药的整体观提供了一个现代的、科学的计算框架和表达语言，使其不再是抽象

的哲学概念，而是可以量化和模拟的研究对象。

主题2包括7篇研究性论文，均以“中药复方治疗某类复杂疾病”为切入点，通过网络药理学结合分子对接（及体外验证），解析中药复方治疗特定疾病的药效物质基础与分子机制。传统中医药面临的一个重要质疑是其作用机制不明确，常被称作“黑箱”。网络药理学能够揭示中药复方的机理，通过构建“成分-靶点-通路-疾病”网络实现可视化，进而分析药物如何通过多靶点协同调控多条通路，最终影响疾病表型。这使得中药复方的作用机制变得清晰、可视、可验证。

主题3，包括2篇最新的研究性论文和综述，聚焦“AI+网络药理学+中药”的跨学科融合，推动中药研究从“机制解析”向“精准预测”升级。

总之，网络药理学在中医药领域的广泛应用，正在推动中医药从“经验医学”向“证据医学”和“精准医学”迈进。

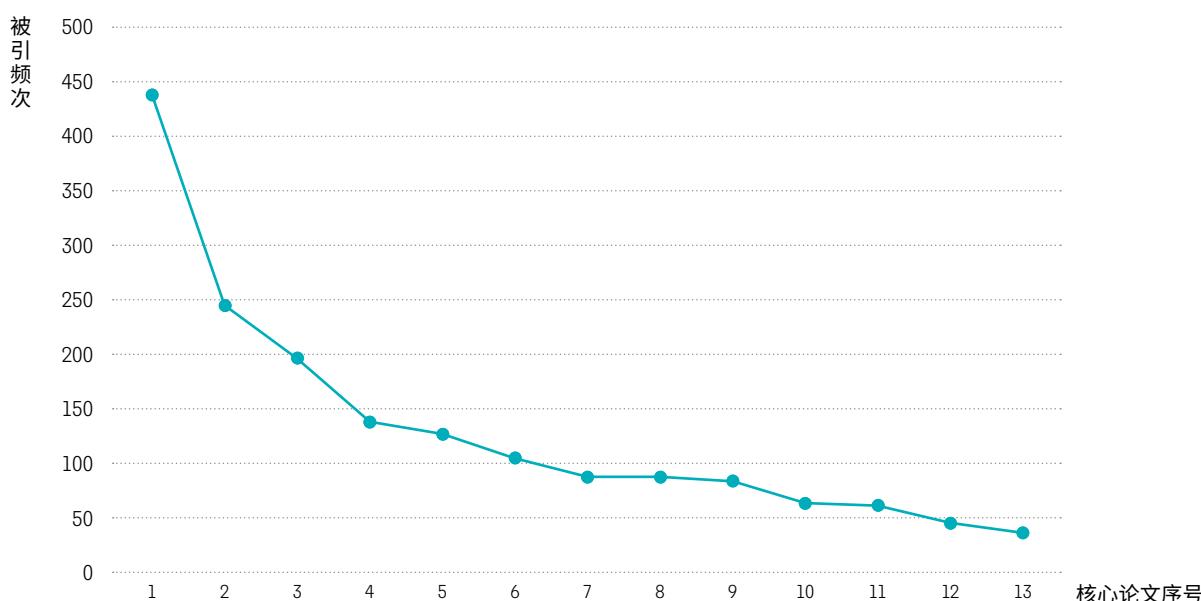


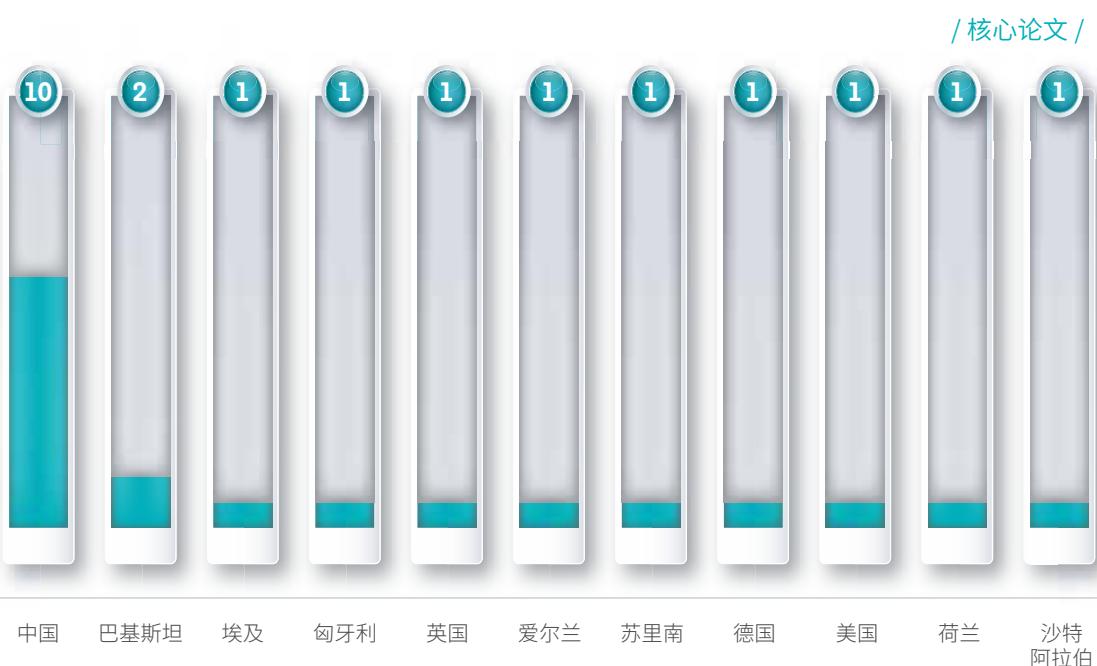
图 14 “网络药理学在中医药现代化研究中的应用”研究前沿核心论文的被引频次分布曲线

从核心论文的产出国家和机构来看，中国贡献了该前沿 76.9% 的核心论文，在该研究方向处于领先地位；其次是巴基斯坦贡献了 2 篇核心论文。Top 产出机构中 3 家来自中国，分别是清华大学、浙江大学、

成都中医药大学，均贡献了 2 篇核心论文。巴基斯坦的费萨拉巴德政府学院也贡献了 2 篇核心论文（表 26）。

表 26 “网络药理学在中医药现代化研究中的应用”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	中国	10	76.9%	1	清华大学	中国	2	15.4%
2	巴基斯坦	2	15.4%	1	浙江大学	中国	2	15.4%
3	埃及	1	7.7%	1	成都中医药大学	中国	2	15.4%
3	匈牙利	1	7.7%	1	费萨拉巴德政府学院	巴基斯坦	2	15.4%
3	英国	1	7.7%					
3	爱尔兰	1	7.7%					
3	苏里南	1	7.7%					
3	德国	1	7.7%					
3	美国	1	7.7%					
3	荷兰	1	7.7%					
3	沙特阿拉伯	1	7.7%					

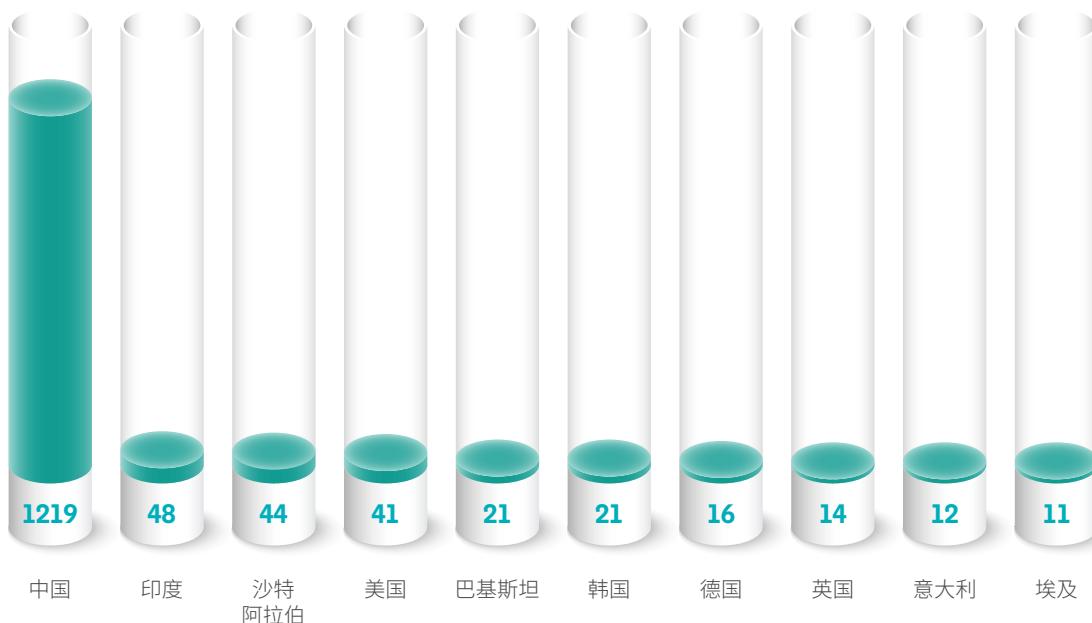


从施引论文的分布来看（表 27），中国发表了 1219 篇施引论文，占比 89.1%，远超其他国家。施引论文的 Top10 产出机构均来自中国，包括 8 所中医药大学以及中国中医科学院和南方医科大学。

表 27 “网络药理学在中医药现代化研究中的应用”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	1219	89.1%	1	南京中医药大学	中国	60	4.4%
2	印度	48	3.5%	2	浙江中医药大学	中国	59	4.3%
3	沙特阿拉伯	44	3.2%	3	成都中医药大学	中国	52	3.8%
4	美国	41	3.0%	4	北京中医药大学	中国	51	3.7%
5	巴基斯坦	21	1.5%	5	上海中医药大学	中国	48	3.5%
6	韩国	21	1.5%	6	广州中医药大学	中国	45	3.3%
7	德国	16	1.2%	7	山东中医药大学	中国	40	2.9%
8	英国	14	1.0%	8	中国中医科学院	中国	34	2.5%
9	意大利	12	0.9%	9	湖南中医药大学	中国	31	2.3%
10	埃及	11	0.8%	10	南方医科大学	中国	30	2.2%

/ 施引论文 /



### 1.3 重点热点前沿——“肿瘤微生物组”

存在于肿瘤组织中并构成肿瘤微环境的微生物群体被称为肿瘤微生物组，包括细菌、真菌、病毒和支原体等。自 20 世纪 20 年代在人类肿瘤组织中首次培养出细菌以来，越来越多的证据表明，肿瘤中存在着微生物群落。由于肿瘤微生物在整个肿瘤总质量中占比较低且研究过程对污染的控制及其严格，对肿瘤微生物组的研究在近几年才进一步规模化、体系化，成为生命科学领域炙手可热的研究方向之一。

2020 年 5 月 29 号，以色列魏茨曼科学研究所的 Ravid Straussman 团队在《科学》(Science)杂志上以封面文章的形式发表了题为 “The human tumor microbiome is composed of tumor type-specific intracellular bacteria” 的论文，是该热点前沿中被引频次最高的核心论文，达到 1037 次。该研究首次全面地分析了肿瘤微生物组，开启了肿瘤微生物组学研究的新篇章。

该研究前沿共包括 26 篇核心论文，这些文献共同揭示了肿瘤微生物组的存在、组成、功能及其临床意义。研究可以分为四个主题：在发现与表征方面，证实多种癌症（胰腺癌、结直肠癌、乳腺癌、肺癌、黑色素瘤等）中存在特定的细菌和真菌群落；在机制探索方面，阐明微生物通过调控宿主免疫（如诱导 IL-33、IL-1 $\beta$ 、Th17、Th2 反应）、分泌毒素（如 BFT、Candidalysin）、激活致癌通路（如 Wnt/ $\beta$ -catenin、Notch）、导致 DNA 损伤等方式促进肿瘤发生、进展和转移；在临床关联方面，发现特定的微生物特征与癌症诊断、预后、分型和对免疫治疗的反应密切相关，具有作为生物标志物和治疗靶点的巨大潜力；在跨界互作方面，强调细菌、真菌、病毒之间的相互作用（多界微生物生态系统互作）共同塑造了肿瘤微环境。

这些研究彻底改变了我们对癌症的认识，将肿瘤视为一个复杂的“多界生态系统”。理解并操纵这一生态系统，为癌症的预防、诊断和治疗开辟了全新的、极具前景的道路。

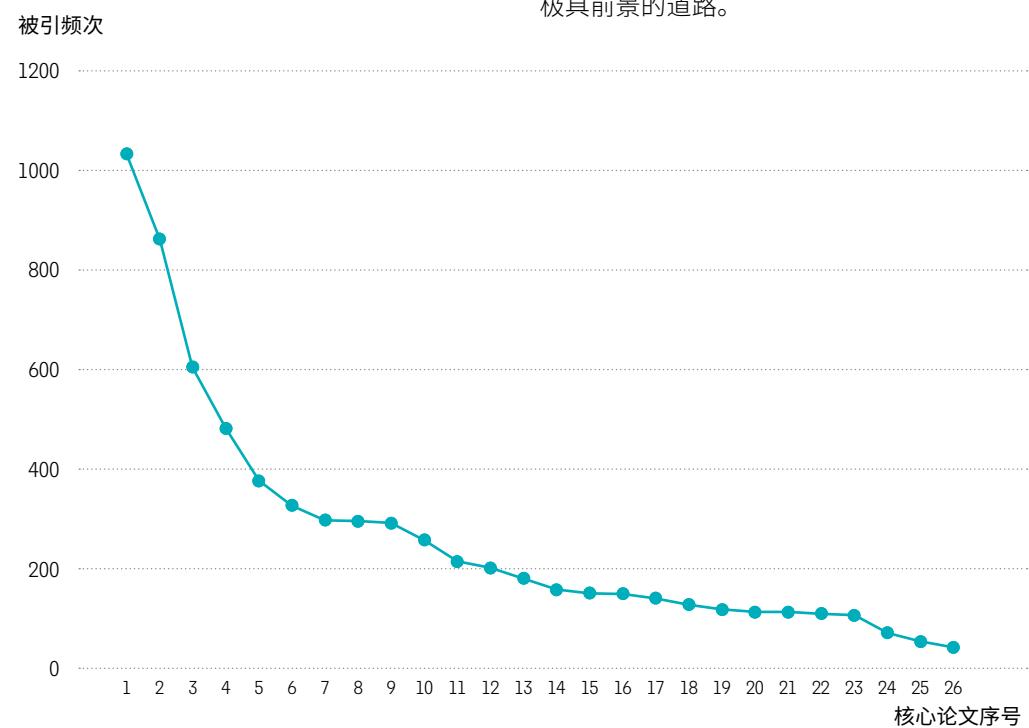


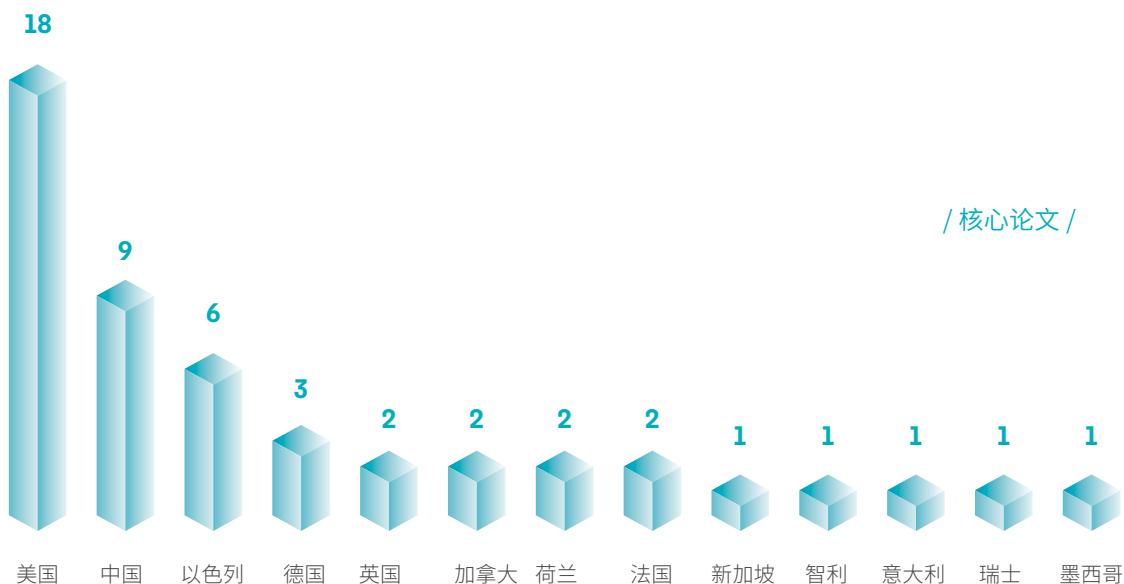
图 15 “肿瘤微生物组”研究前沿核心论文的被引频次分布曲线

从核心论文的分布来看，美国贡献了 69.2% 的核心论文，在该前沿领域占据绝对优势。中国核心论文排名第二，占比为 34.6%，与美国有一定的差距。Top

产出机构（含并列 9 家）中，4 家来自以色列，3 家来自美国，2 家来自中国，其中以色列的魏茨曼科学研究所核心论文产出排名第一。

表 28 “肿瘤微生物组”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	18	69.2%	1	魏茨曼科学研究所	以色列	6	23.1%
2	中国	9	34.6%	2	美国德州大学 MD 安德森癌症中心	美国	5	19.2%
3	以色列	6	23.1%	3	哈伊姆·谢巴医疗中心	以色列	4	15.4%
4	德国	3	11.5%	3	浙江大学	中国	4	15.4%
5	英国	2	7.7%	3	康奈尔大学	美国	4	15.4%
5	加拿大	2	7.7%	3	特拉维夫大学	以色列	4	15.4%
5	荷兰	2	7.7%	7	以色列开放大学	以色列	3	11.5%
5	法国	2	7.7%	7	中山大学	中国	3	11.5%
9	新加坡	1	3.8%	7	约翰·霍普金斯大学	美国	3	11.5%
9	智利	1	3.8%					
9	意大利	1	3.8%					
9	瑞士	1	3.8%					
9	墨西哥	1	3.8%					

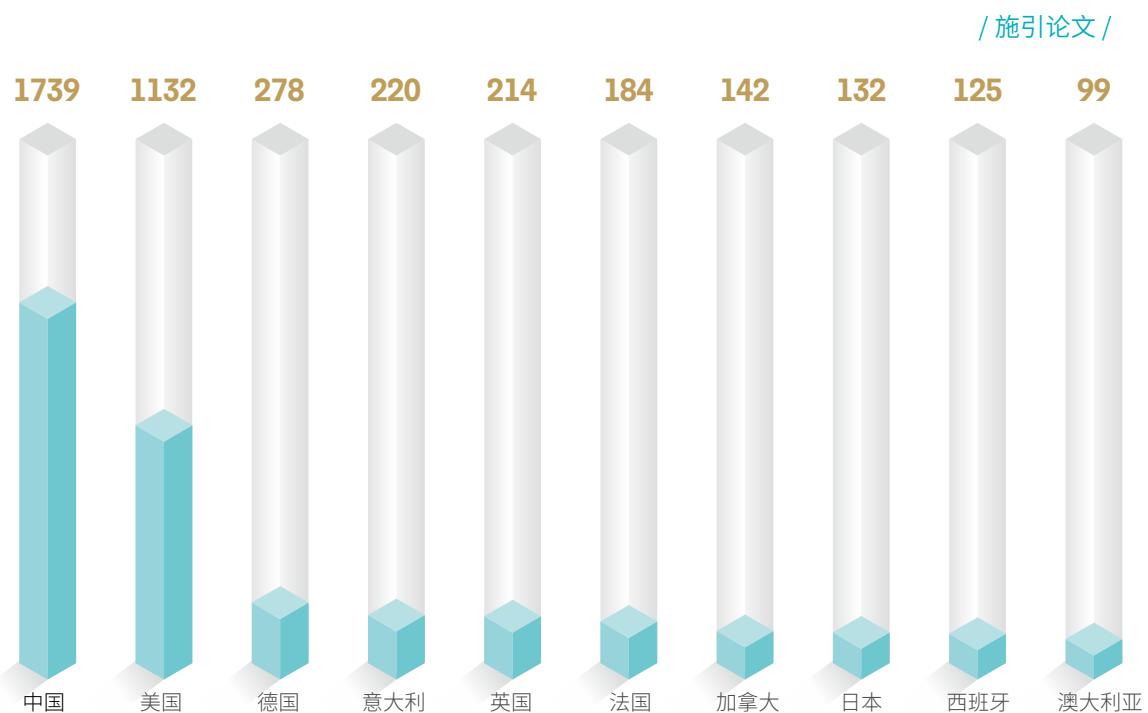


从施引论文的分布来看，中国成为关注和跟踪该前沿最活跃的国家，贡献了 1739 篇；其次是美国，产出了 1132 篇施引论文，显示了两国在该前沿的快速跟进（表 29）。Top10 施引机构中，6 家机构来自中国，

3 家来自美国，另外 1 家来自法国。中国科学院和上海交通大学分别排名第一和第二，美国哈佛大学和德州大学 MD 安德森癌症中心并列第三。

表 29 “肿瘤微生物组”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	1739	43.1%	1	中国科学院	中国	157	3.9%
2	美国	1132	28.0%	2	上海交通大学	中国	128	3.2%
3	德国	278	6.9%	3	哈佛大学	美国	116	2.9%
4	意大利	220	5.4%	3	美国德州大学 MD 安德森癌症中心	美国	116	2.9%
5	英国	214	5.3%	5	法国国家健康与医学研究所	法国	107	2.7%
6	法国	184	4.6%	5	浙江大学	中国	107	2.7%
7	加拿大	142	3.5%	7	中国医学科学院北京协和医学院	中国	104	2.6%
8	日本	132	3.3%	8	中山大学	中国	102	2.5%
9	西班牙	125	3.1%	9	四川大学	中国	81	2.0%
10	澳大利亚	99	2.5%	10	美国国立卫生研究院	美国	77	1.9%



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

生物科学领域有 4 项研究入选新兴前沿，主要研究主题包括“AI 驱动的生物分子复合物结构预测与设计新突破”、“AI 驱动的多维度基因组变异功能预测与致病性评估体系构建”、“7- 脱氢胆固醇在铁死亡中的作用机制”、“代谢与表观遗传协同调控神经元

发育的物种特异性时序机制”。综合 CPT 指标、前沿发展潜力及科技情报研究人员的判断，最终选取“AI 驱动的生物分子复合物结构预测与设计新突破”前沿进行重点解读。

表 30 生物科学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	AI 驱动的生物分子复合物结构预测与设计新突破	3	1006	2024.0
2	AI 驱动的多维度基因组变异功能预测与致病性评估体系构建	2	281	2024.0
3	7- 脱氢胆固醇在铁死亡中的作用机制	4	192	2024.0
4	代谢与表观遗传协同调控神经元发育的物种特异性时序机制	5	226	2023.6



## 2.2 重点新兴前沿——“AI 驱动的生物分子复合物结构预测与设计新突破”

2020 年，谷歌旗下公司 DeepMind 推出了基于人工智能（AI）的蛋白质结构预测工具——AlphaFold；2021 年 7 月，DeepMind 团队推出了 AlphaFold2，能够根据氨基酸序列来准确预测蛋白质的三维结构。AlphaFold2 的出现，引发了蛋白质结构及其相互作用建模领域的一场革命，为蛋白质建模和设计应用提供了广泛的可能，展现了人工智能在结构预测上的巨大潜力。2024 年 10 月 9 日，谷歌 DeepMind 的 Demis Hassabis、John Jumpe 因对蛋白质结构的预测，与华盛顿大学的蛋白质设计先驱 David Baker 分享了 2024 年诺贝尔化学奖，以表彰他们在蛋白质结构预测和蛋白质设计领域作出的贡献。

该研究前沿包括 3 篇核心论文，第一篇是 2024 年谷歌 DeepMind 的 Demis Hassabis、John Jumpe 团队的 AlphaFold2 的全面升级版——AlphaFold3。第二篇是华盛顿大学 David Baker 团队的 2024 年新进展，与 AlphaFold3 功能类似的全原子预测模型 RoseTTAFold All-Atom (RFAA) 以及前所未有的设计工具 (RFdiffusionAA)。AlphaFold 3 和 RoseTTAFold All-Atom (RFAA) 突破了仅针对蛋白质的局限，进一步将能力扩展到蛋白质、核酸、小分子等广泛的生物分子复合物预测和设计，准确性超越了许多专门工具。

第三篇是柏林自由大学的研究人员开发了一种新型的蛋白质 - 配体结构预测工具 (Umol)，展示了深度学习方法在不依赖于结构信息的情况下预测蛋白质 - 配体复合物结构准确性，为预测与靶标可能结合的药物和对蛋白质 - 配体相互作用的理解提供了新的视角。

这三篇论文代表了 2024 年生物分子结构预测和设计领域最前沿的突破，它们共同将生物分子研究从单一的蛋白质结构预测推向了“全原子生物分子系统建模”的新纪元。这些研究成果标志着 AI 在生物分子结构预测与设计领域取得了重大进展，这些工具将极大地加速新药研发、合成生物学和材料科学的发展，使得“理性设计”取代“大规模筛选”成为研发的主流范式。未来，AI 将朝着实现动态全原子模拟和精准功能化设计迈进，最终为药物研发、合成生物学等领域带来根本性变革。



**2025 研究前沿**  
**RESEARCH FRONTS**

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 07

## 化学与材料科学



# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿主要分布在合成化学、材料回收与循环利用、锂电池、能源材料等研究方向。合成化学方向有四项，涉及药物化学（“苯环的生物电子等排体合成”）、光化学（“COF 光催化合成过氧化氢”）、电化学（“电化学还原 CO<sub>2</sub> 制多碳产物”）和生物化学（“PET 水解酶的定向进

化与设计”）。材料回收与循环利用方向有两项，分别关注废旧锂离子电池和废旧聚烯烃塑料。锂电池方向有两项，分别为单晶高镍正极材料和卤化物固态电解质。能源材料方向有两项，涉及热电材料和储能材料。

表 31 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿

序号	研究前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	苯环的生物电子等排体合成	40	2738	2023.1
2	高性能热电材料	21	2889	2022.9
3	COF 光催化合成过氧化氢	34	5149	2022.5
4	回收利用废旧锂离子电池正极材料	33	8121	2021.8
5	<b>废旧聚烯烃塑料的化学回收</b>	<b>42</b>	<b>8845</b>	<b>2021.5</b>
6	锂离子电池单晶高镍正极材料	19	4442	2021.4
7	高温储能聚合物电介质	35	6667	2021.3
8	<b>用于全固态电池的卤化物固态电解质</b>	<b>26</b>	<b>5089</b>	<b>2021.3</b>
9	电化学还原 CO <sub>2</sub> 制多碳产物	14	3549	2021.3
10	PET 水解酶的定向进化与设计	24	4862	2021.2

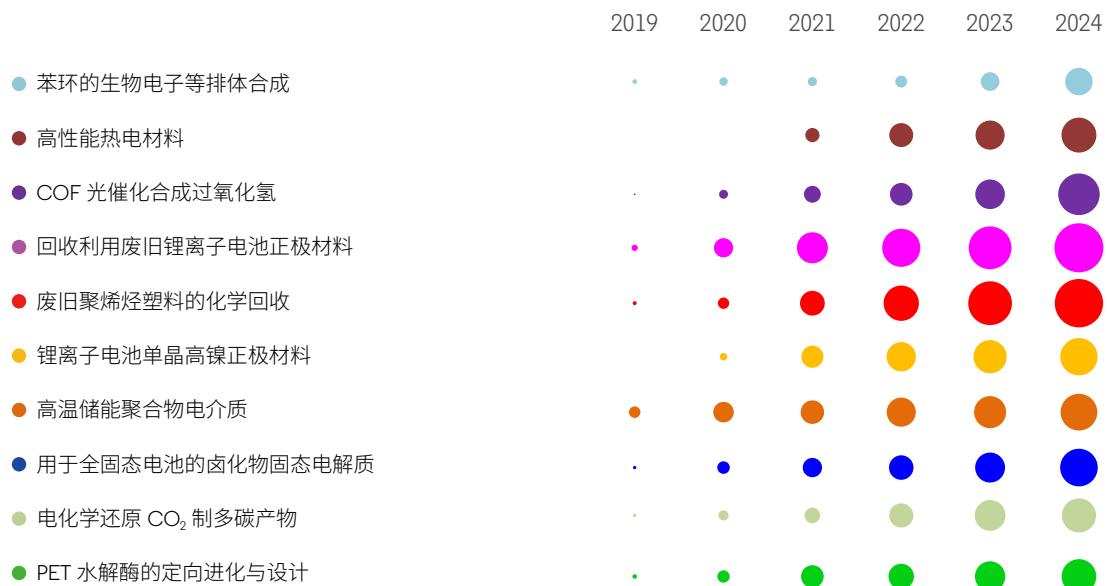


图 16 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“废旧聚烯烃塑料的化学回收”

塑料污染是当今世界面临的最严峻的环境挑战之一，每年造成超过 1.5 万亿美元的健康和环境损失。回收利用是解决塑料污染问题的重要途径，主要包括机械回收、化学回收两种方式。机械回收是使用物理方法（如粉碎、熔融等）把废旧塑料加工成新的塑料产品或材料。这种方法简单易行、成本低，但存在局限性，特别是回收塑料的性能通常较差。相比之下，化学回收是一种复杂但更具潜力的回收方法，包括循环回收和升级回收两条路线。循环回收是把废旧塑料解聚为基本单体，这些单体可以重新用于聚合形成原始塑料或新材料。升级回收则是把废旧塑料作为原料，用于合成更具价值的聚合物、分子或材料。

聚烯烃是产量最大的塑料品种，其中聚乙烯和聚丙烯分别占全球塑料产量的 26% 和 19%（2022 年）。由于 C—C 断裂的热力学条件不利，将聚烯烃转化为各自单体（乙烯或丙烯）需要消耗大量能量，使得化学回收极具挑战。本前沿的 42 篇核心论文围绕聚烯烃的化学回收，开发了催化热解、催化氢解、串联氢解 / 芳构化、串联裂解 / 烷基化等多种方法和相应的催化剂。被引次数最高的四篇文献全部是综述，总结了各种化学回收路线。排名第五的论文来自加州大学圣巴巴拉分校等美国高校，研究人员把放热氢解反应与吸热芳构化反应相结合，在适中的反应温度（280°C）条件下，把聚乙烯升级回收为高价值的长链烷基芳烃和烷基萘。

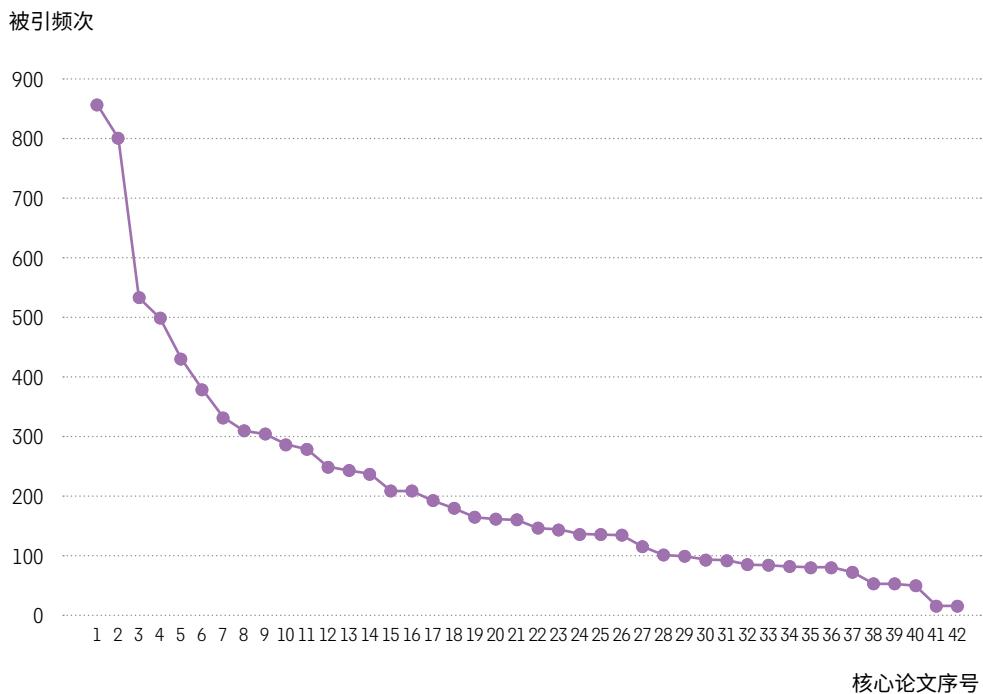


图 17 “废旧聚烯烃塑料的化学回收”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

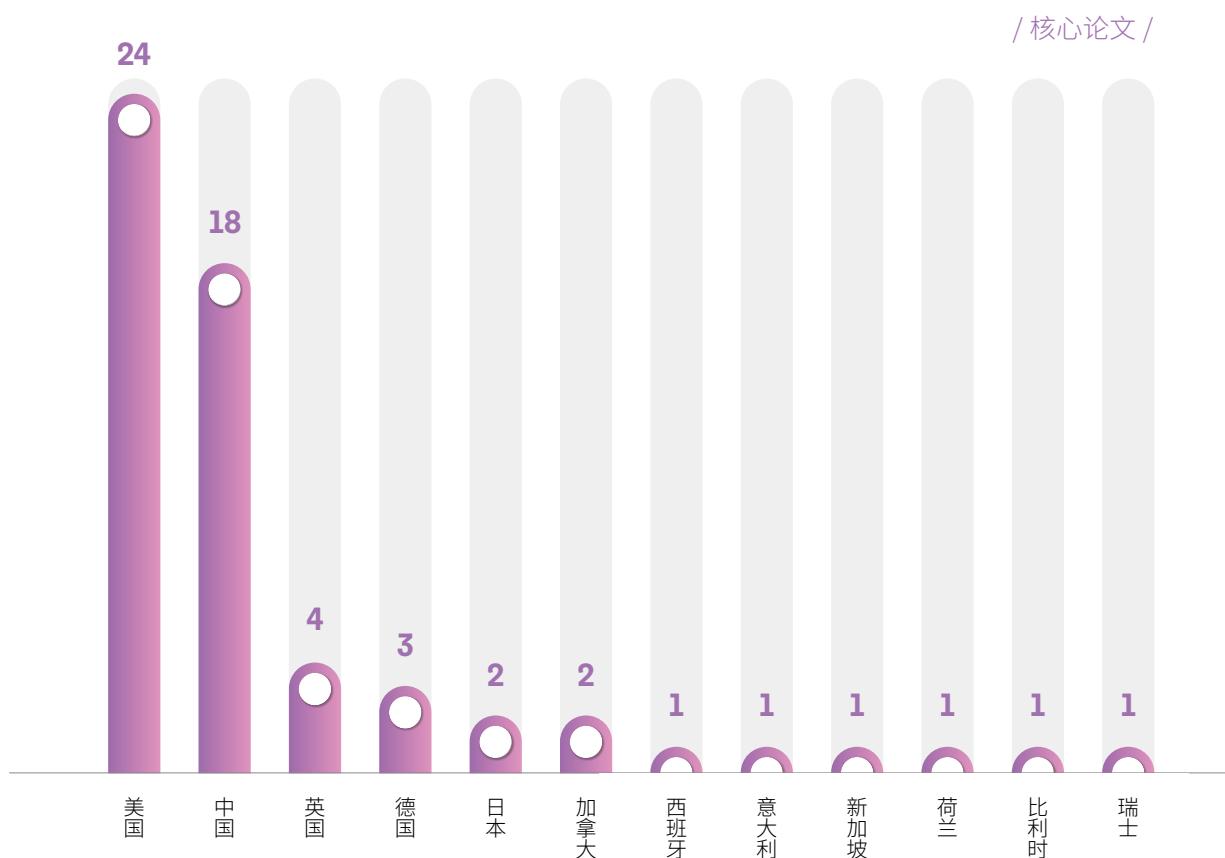
如表 32 所示，该前沿的 42 篇论文来自 12 个国家，其中不乏多国合著，充分反映了国际社会对废旧聚烯烃回收利用的高度关注。美国贡献了 24 篇论文，中国 18 篇，两国产出明显多于榜单上的其他国家。

在机构层面，中国科学院贡献了 7 篇论文，康奈尔大学、阿贡国家实验室、国家可再生能源实验室等多家美国研究机构进入榜单。



表 32 “废旧聚烯烃塑料的化学回收”研究前沿中核心论文的 Top10 产出国家和机构

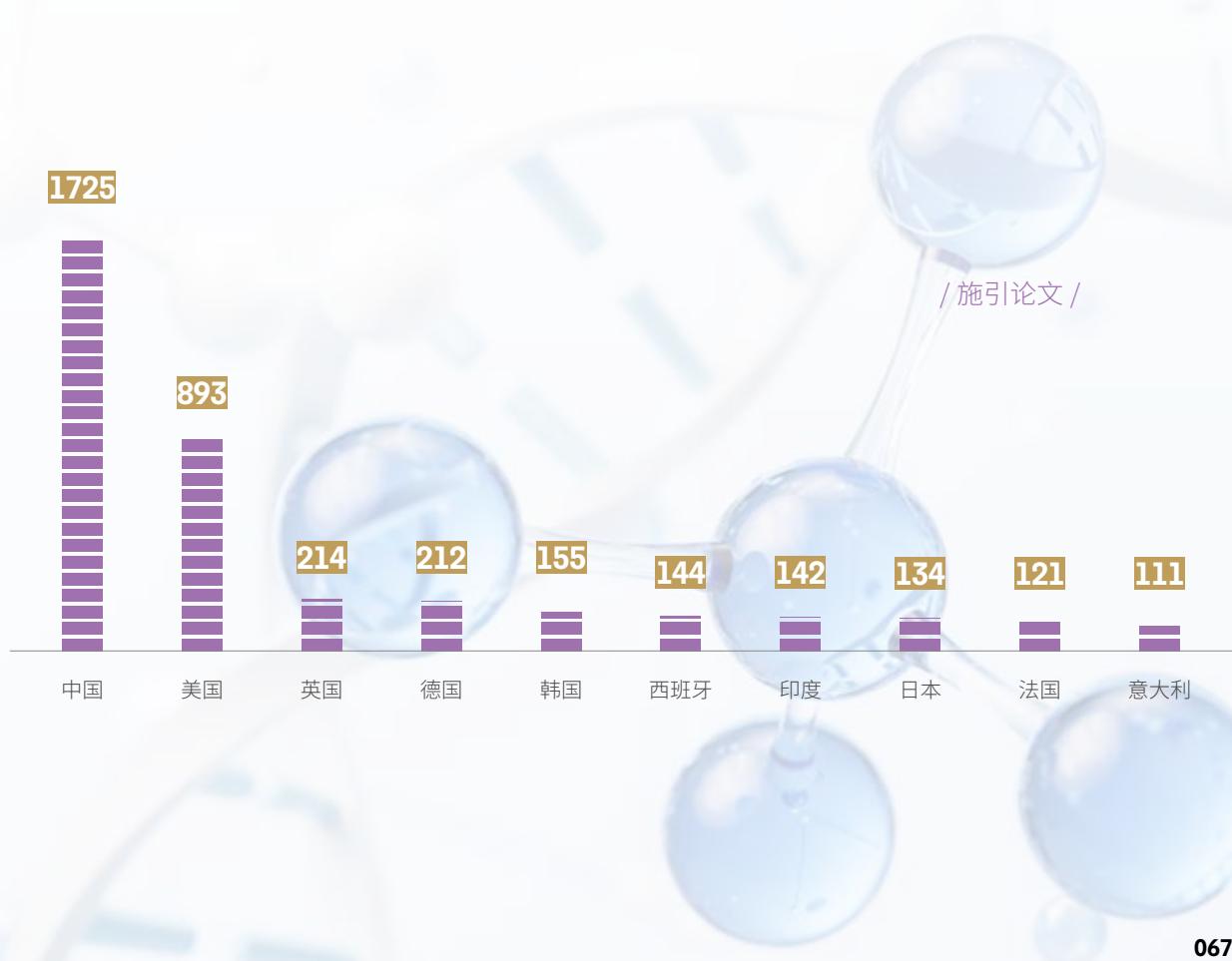
排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	24	57.1%	1	中国科学院	中国	7	16.7%
2	中国	18	42.9%	2	康奈尔大学	美国	5	11.9%
3	英国	4	9.5%	3	阿贡国家实验室	美国	4	9.5%
4	德国	3	7.1%	3	国家可再生能源实验室	美国	4	9.5%
5	日本	2	4.8%	5	加州大学圣巴巴拉分校	美国	3	7.1%
5	加拿大	2	4.8%	5	威斯康星大学麦迪逊分校	美国	3	7.1%
7	西班牙	1	2.4%	5	伊利诺伊大学香槟分校	美国	3	7.1%
7	意大利	1	2.4%	5	特拉华大学	美国	3	7.1%
7	新加坡	1	2.4%	5	麻省理工学院	美国	3	7.1%
7	荷兰	1	2.4%	5	科罗拉多州立大学	美国	3	7.1%
7	比利时	1	2.4%					
7	瑞士	1	2.4%					



在施引论文方面,如表33所示,中国、美国在数量上分列第一、二位,遥遥领先其他国家。中国科学院等八家中国机构进入Top10机构榜单,反映了中国对该研究方向的高度关注与持续跟进。

表33 “废旧聚烯烃塑料的化学回收”研究前沿中施引论文的Top10产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	1725	44.7%	1	中国科学院	中国	395	10.2%
2	美国	893	23.2%	2	浙江大学	中国	111	2.9%
3	英国	214	5.5%	3	四川大学	中国	107	2.8%
4	德国	212	5.5%	3	中国科学技术大学	中国	107	2.8%
5	韩国	155	4.0%	5	法国国家科学研究中心	法国	91	2.4%
6	西班牙	144	3.7%	6	北京大学	中国	72	1.9%
7	印度	142	3.7%	7	清华大学	中国	66	1.7%
8	日本	134	3.5%	8	国家可再生能源实验室	美国	64	1.7%
9	法国	121	3.1%	9	上海交通大学	中国	61	1.6%
10	意大利	111	2.9%	10	华东理工大学	中国	58	1.5%



### 1.3 重点热点前沿——“用于全固态电池的卤化物固态电解质”

全固态电池使用固态电解质具有更高的能量密度和安全性，有望替代当前使用有机电解液的锂离子电池。固态电解质是全固态电池的核心部件，其研发进展直接影响全固态电池的发展进程。固态电解质主要包括聚合物固态电解质、无机固态电解质、复合固态电解质（聚合物+无机物）三种类型，其中，无机固态电解质又可分为氧化物、硫化物、卤化物、硼氢化物等类型。目前最具潜力的类型包括氧化物、硫化物和聚合物，硼氢化物和卤化物类型近年也取得突破性进展。

卤化物型固态电解质具有室温离子电导率较高、

与氧化物正极界面稳定性好等优点。本前沿的 26 篇核心论文研发的固态电解质以氯化物型为主，也有氯氧化物、溴化物等类型。被引频次最高的论文来自加拿大西安大略大学和中国国联汽车动力电池研究院有限责任公司，研究人员报道了一种具有高离子电导率 ( $1.49 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ ) 的固态电解质  $\text{Li}_3\text{InCl}_6$ ，该材料对氧化物正极材料稳定且在空气中高度稳定。被引频次排名第二的论文来自中国北京大学和美国马里兰大学帕克分校，研究人员利用第一性原理计算研究了氯化物和溴化物固态电解质材料的锂离子扩散、电化学稳定性和界面稳定性，阐述了其具有高离子电导率和良好电化学稳定性的原因。

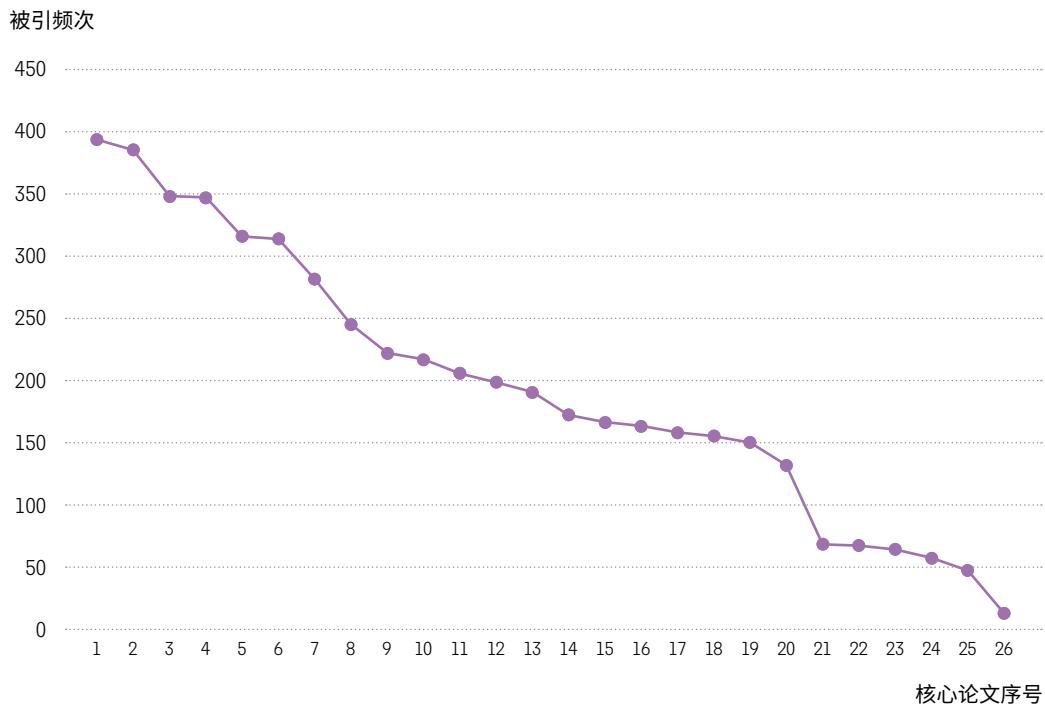


图 18 “用于全固态电池的卤化物固态电解质”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

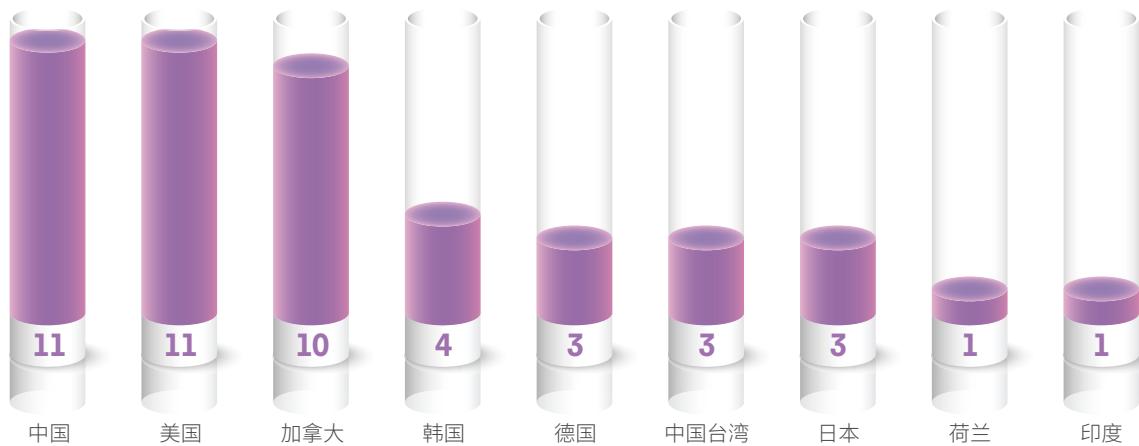
如表 34 所示, 该前沿的 26 篇核心论文来自 9 个国家 / 地区。中国和美国均贡献了 11 篇, 并列第一。加拿大以 10 篇论文紧随其后。在机构层面, 加拿大西安大略大学贡献了 7 篇论文、排在首位, 中国科学院、

美国橡树岭国家实验室、加拿大萨斯喀彻温大学各贡献了 5 篇论文。中国国联汽车动力电池研究院有限责任公司及其在加拿大设立的 Glabat 固态电池公司也榜上有名。

表 34 “用于全固态电池的卤化物固态电解质”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家 / 地区和机构

排名	国家 / 地区	核心论文	比例	排名	机构	所属国家 / 地区	核心论文	比例
1	中国	11	42.3%	1	西安大略大学	加拿大	7	26.9%
1	美国	11	42.3%	2	中国科学院	中国	5	19.2%
3	加拿大	10	38.5%	2	橡树岭国家实验室	美国	5	19.2%
4	韩国	4	15.4%	2	萨斯喀彻温大学	加拿大	5	19.2%
5	德国	3	11.5%	5	延世大学	韩国	4	15.4%
5	中国台湾	3	11.5%	6	中国科学技术大学	中国	3	11.5%
5	日本	3	11.5%	6	滑铁卢大学	加拿大	3	11.5%
8	荷兰	1	3.8%	6	马里兰大学帕克分校	美国	3	11.5%
8	印度	1	3.8%	6	国联汽车动力电池研究院有限责任公司	中国	3	11.5%
				6	Glabat 固态电池公司	加拿大	3	11.5%
				6	台湾同步辐射研究中心	中国台湾	3	11.5%

/ 核心论文 /



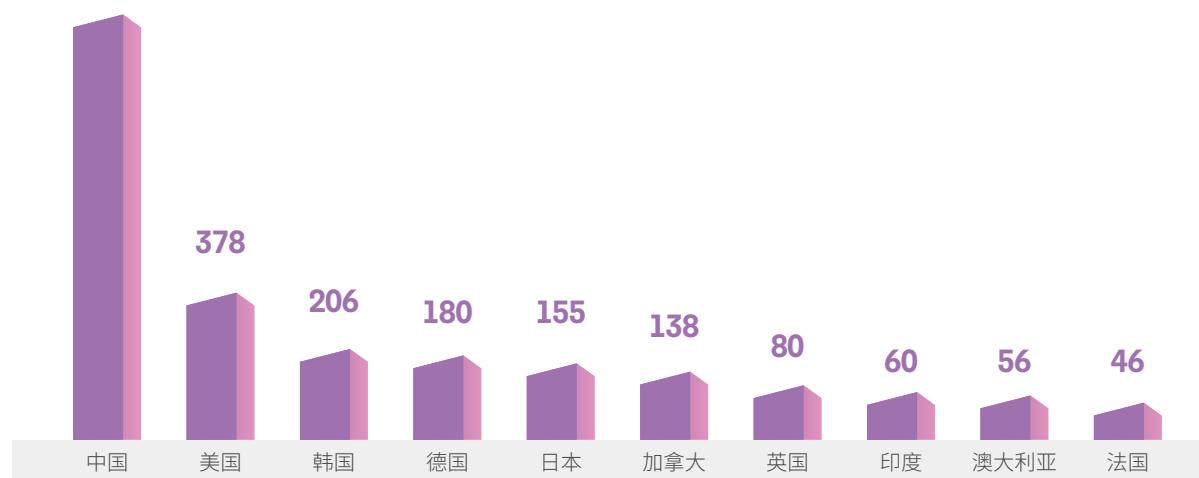
在施引论文方面,如表35所示,中国在总量上遥遥领先,体现出了对该研究方向的高度关注。美国、韩国分列第二、三位。在施引论文Top10机构中,中国、加拿大、德国、美国均有机构上榜,中国科学院发文量位居第一。

表35“用于全固态电池的卤化物固态电解质”研究前沿中施引论文的Top10产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	1262	59.3%	1	中国科学院	中国	226	10.6%
2	美国	378	17.8%	2	清华大学	中国	90	4.2%
3	韩国	206	9.7%	3	西安大略大学	加拿大	88	4.1%
4	德国	180	8.5%	4	亥姆霍兹联合会	德国	82	3.9%
5	日本	155	7.3%	5	上海交通大学	中国	75	3.5%
6	加拿大	138	6.5%	6	华中科技大学	中国	73	3.4%
7	英国	80	3.8%	7	中国科学技术大学	中国	67	3.1%
8	印度	60	2.8%	8	吉森大学	德国	56	2.6%
9	澳大利亚	56	2.6%	9	橡树岭国家实验室	美国	52	2.4%
10	法国	46	2.2%	10	卡尔斯鲁厄理工学院	德国	47	2.2%
				10	北京大学	中国	47	2.2%
				10	浙江大学	中国	47	2.2%

1262

/ 施引论文 /



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

在化学与材料科学领域共有 1 项研究入选新兴前沿，即“倒置钙钛矿太阳能电池稳定性及转换效率提升策略”。

表 36 化学与材料科学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	倒置钙钛矿太阳能电池稳定性及转换效率提升策略	4	461	2024.0

### 2.2 重点新兴前沿——“倒置钙钛矿太阳能电池稳定性及转换效率提升策略”

钙钛矿太阳电池具有出色的光电转换效率及低温溶液可加工优势，被认定为下一代光伏技术的核心发展方向。倒置钙钛矿太阳能电池采用 p-i-n 结构（“空穴传输层 - 钙钛矿吸光层 - 电子传输层”，入射光先经过空穴传输层）的纵向堆叠结构，与正置钙钛矿太阳能电池（n-i-p 结构，“电子传输层 - 钙钛矿吸光层 - 空穴传输层”，入射光先经过电子传输层）相比，在界面稳定性、工艺兼容性与产业化适配性上具备显著优势，为其实现大规模生产和商业化应用提供了有力支持。目前该研究方向主要致力于其稳定性及转换效率的提升。

该新兴前沿方向的核心论文围绕提升倒置钙钛矿太阳能电池转换效率及稳定性等核心问题提出了创新性策略：美国西北大学和中国上海科技大学等机构合作，通过设计一种可同时钝化两个相邻  $Pb^2$  缺陷的平

面配体的策略有效降低了载流子的非辐射复合，实现了高达 26.15% ( $0.05\text{ cm}^2$ ) 和 24.74% ( $1.04\text{ cm}^2$ ) 的认证准稳态效率，并在持续运行 1200 小时后仍保持 95% 的初始性能；中国华中科技大学与韩国成均馆大学等机构合作，提出自组装分子与多芳香羧酸共组装的杂化策略，大幅优化了界面接触和载流子提取能力，使认证稳态效率达到创纪录的 26.54%，并在  $11.1\text{ cm}^2$  微型组件中实现 22.74% 的效率；中国浙江大学和西湖大学合作，从分子设计层面出发，提出了一种无杂原子取代的并稠多芳香烃核心结构，使器件效率达到 26.1%。

随着界面钝化策略与新型传输材料的持续突破，倒置钙钛矿太阳能电池有望在保持其固有稳定性和工艺优势的基础上，进一步逼近理论效率极限，最终推动下一代光伏技术的大规模商业化应用。

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 08

## 物理学



# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 物理学领域 Top 10 热点前沿发展态势

物理领域排名前 10 的热点前沿主要集中于凝聚态物理、光学、量子物理、理论物理和半导体物理。凝聚态物理方面的热点前沿有 4 个，超导研究依然是研究的热点，富氢化物连续五年入选热点前沿，超导二极管效应成为新的热点前沿，铁电性研究也引发广泛的兴趣，氧化铪薄膜和二维范德华材料的铁电性研究首次入选热点前沿。光学方面的热点前沿有 2 个，

新型非线性光学晶体材料时隔多年再次入选，拍瓦级激光器及其应用是新出现的研究前沿。量子物理方面的热点前沿有 2 个，双场量子密钥分发连续三年入选热点前沿，格点规范理论的量子模拟成为新的热点前沿。理论物理方面，非可逆对称性研究备受关注。半导体物理方面，氧化镓功率器件连续 2 年保持为热点前沿。

表 37 物理学领域 Top 10 热点前沿

序号	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	非可逆对称性研究	48	2815	2022.9
<b>2</b>	<b>超导二极管效应研究</b>	<b>22</b>	<b>2076</b>	<b>2022.5</b>
3	高压下富氢化物的高温超导特性研究	35	5508	2022.0
4	氧化镓功率器件研发	17	2006	2021.8
5	氧化铪薄膜的铁电性研究	12	1979	2021.8
6	新型非线性光学晶体材料	50	6650	2021.7
7	二维范德华材料的铁电性研究	13	2308	2021.7
8	格点规范理论的量子模拟	18	1980	2021.7
<b>9</b>	<b>拍瓦级激光器及其应用</b>	<b>10</b>	<b>2078</b>	<b>2021.4</b>
10	双场量子密钥分发	32	5393	2021.3

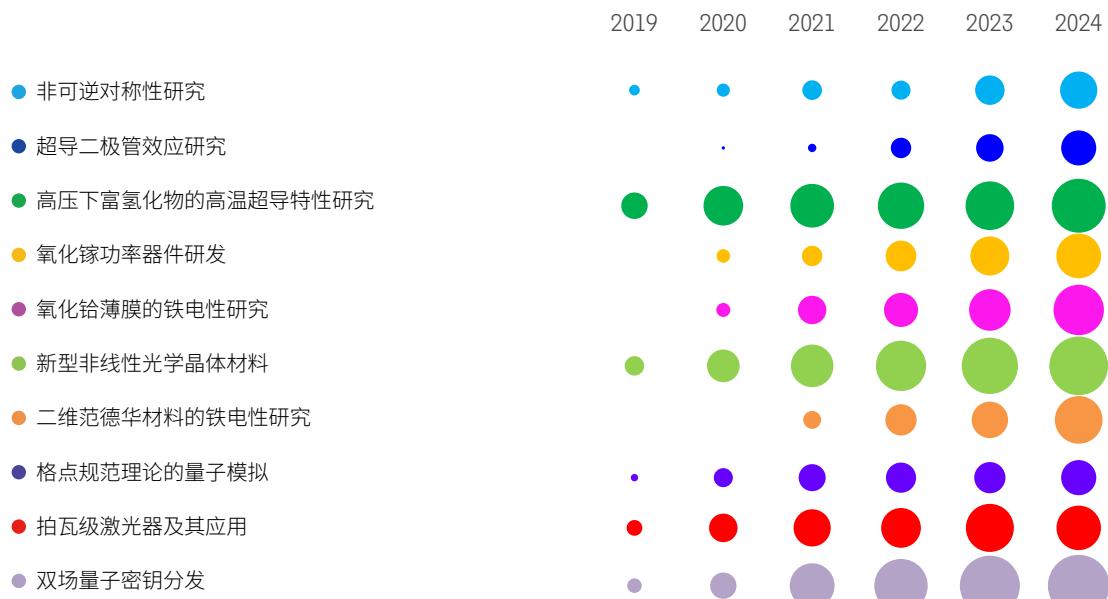


图 19 物理学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“超导二极管效应研究”

超导二极管效应是一种新型的超导输运现象，它允许超导电流仅在一个方向上流动，而在相反的方向上会产生抑制。这一非互易性使得超导二极管具备了类似半导体二极管的整流特性，单向无耗散电流传输，反向呈现有限电阻。超导二极管将为超导电子学、超导自旋电子学以及量子科技提供新型器件应用。

超导二极管效应的理论研究已经开展很多年，然而，超导二极管的实验制备一直面临很大的挑战。2020 年，日本京都大学等报道了在 Nb/V/Ta 超晶格超导体中通过外加磁场首次实现超导二极管现象。这一发现引起了理论和实验科学家的广泛关注。2022 年，荷兰代尔夫特理工大学等在 NbSe<sub>2</sub>/Nb<sub>3</sub>Br<sub>8</sub>/NbSe<sub>2</sub> 约瑟

夫森结中，首次实现了无磁场下的超导二极管效应。近年来，超导二极管效应在各种超导系统里被发现，包括手性超导体、具有强自旋轨道耦合的超导体、约瑟夫森结和超导薄膜等。这些进展推动了超导二极管效应及其材料体系的研究，为开发超低能耗电子设备提供了可行路径。

该前沿的 22 篇核心论文中，被引频次最高的论文是 2020 年日本京都大学等首次实现超导二极管现象的研究，被引频次为 263 次。紧随其后是 2022 年德国雷根斯堡大学等基于约瑟夫森结的超导二极管研究，以及 2022 年荷兰代尔夫特理工大学等首次实现无磁场超导二极管效应的研究，被引频次分别为 191 和 177

次。此外，2022 年美国麻省理工学院等在具有强自旋轨道耦合的二维超导体的超导二极管效应研究、2022 年日本京都大学等对超导二极管效应的机制研究、2022 年德国马普学会微观结构物理研究所等对拓扑半

金属的超导二极管效应研究、2022 年美国布朗大学等对三层转角石墨烯的超导二极管效应研究等，也获得了广泛的引用。

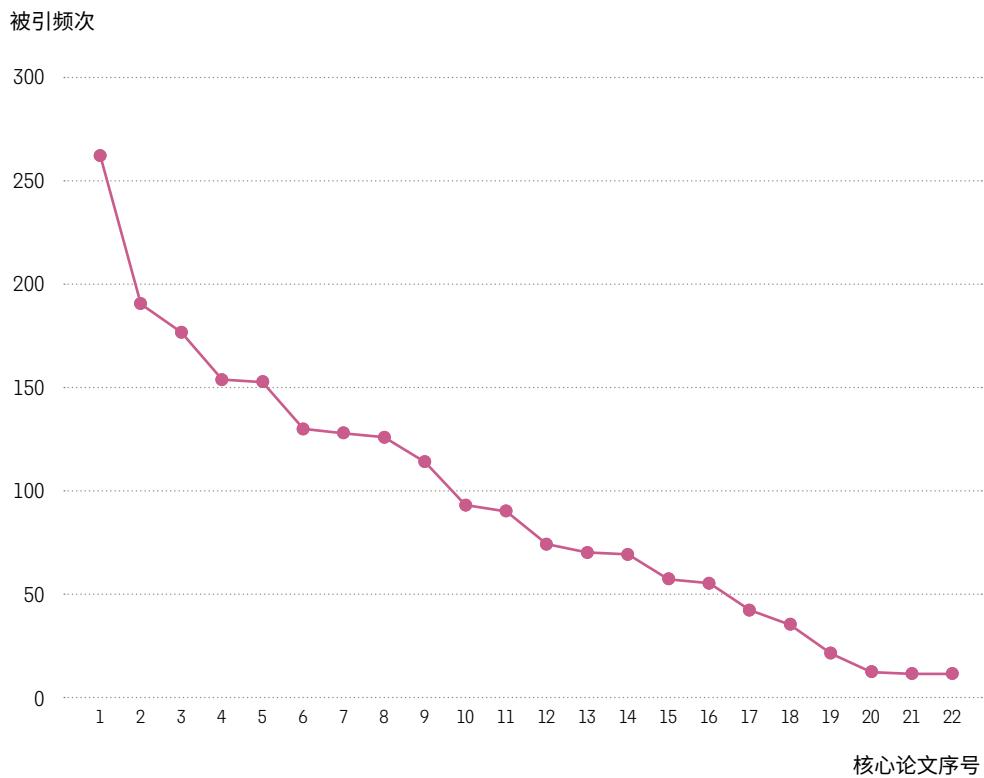


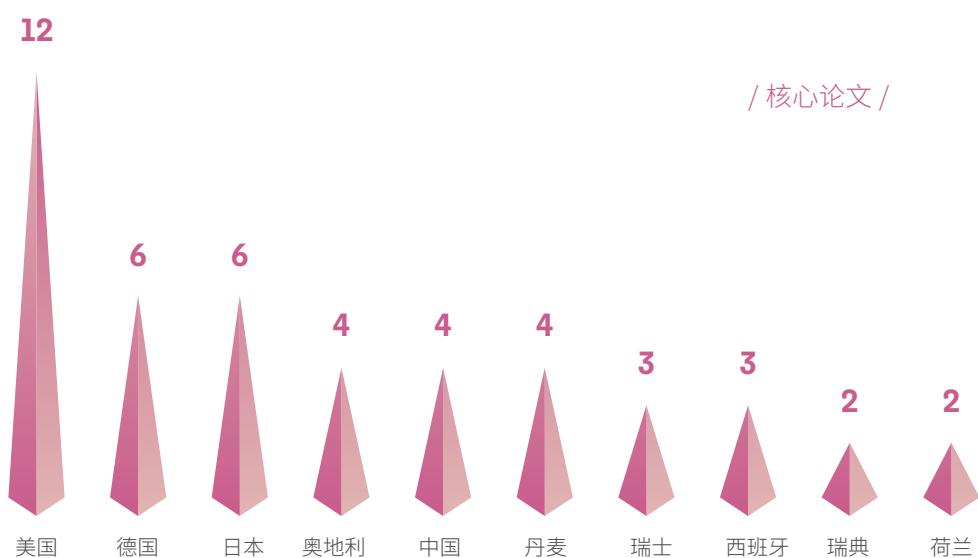
图 20 “超导二极管效应研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

在这个热点前沿中（表 38），美国表现最活跃，是核心论文的主要产出国家。22 篇核心论文中，美国参与的有 12 篇，占核心论文总量的 54.5%；德国和日本参与的各有 6 篇，分别占核心论文总量的 27.3%；奥地利、中国、丹麦等也有不错的表现。参与核心论

文最多的机构是麻省理工学院。核心论文 Top10 产出机构（合并列共 14 家）中，来自美国和西班牙的各有 3 家，日本、德国、奥地利的各有 2 家，丹麦和瑞典的各 1 家。

表 38 “超导二极管效应研究”研究前沿中核心论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	12	54.5%	1	麻省理工学院	美国	4	18.2%
2	德国	6	27.3%	2	普渡大学	美国	3	13.6%
2	日本	6	27.3%	2	哥本哈根大学	丹麦	3	13.6%
4	奥地利	4	18.2%	4	日本国立材料研究所	日本	2	9.1%
4	中国	4	18.2%	4	京都大学	日本	2	9.1%
4	丹麦	4	18.2%	4	马普学会	德国	2	9.1%
7	瑞士	3	13.6%	4	雷根斯堡大学	德国	2	9.1%
7	西班牙	3	13.6%	4	西班牙高等科学研究院	西班牙	2	9.1%
9	瑞典	2	9.1%	4	巴斯克大学	西班牙	2	9.1%
9	荷兰	2	9.1%	4	多诺西娅国际物理中心	西班牙	2	9.1%
				4	奥地利科技学院	奥地利	2	9.1%
				4	因斯布鲁克大学	奥地利	2	9.1%
				4	路易斯安那州立大学	美国	2	9.1%
				4	隆德大学	瑞典	2	9.1%

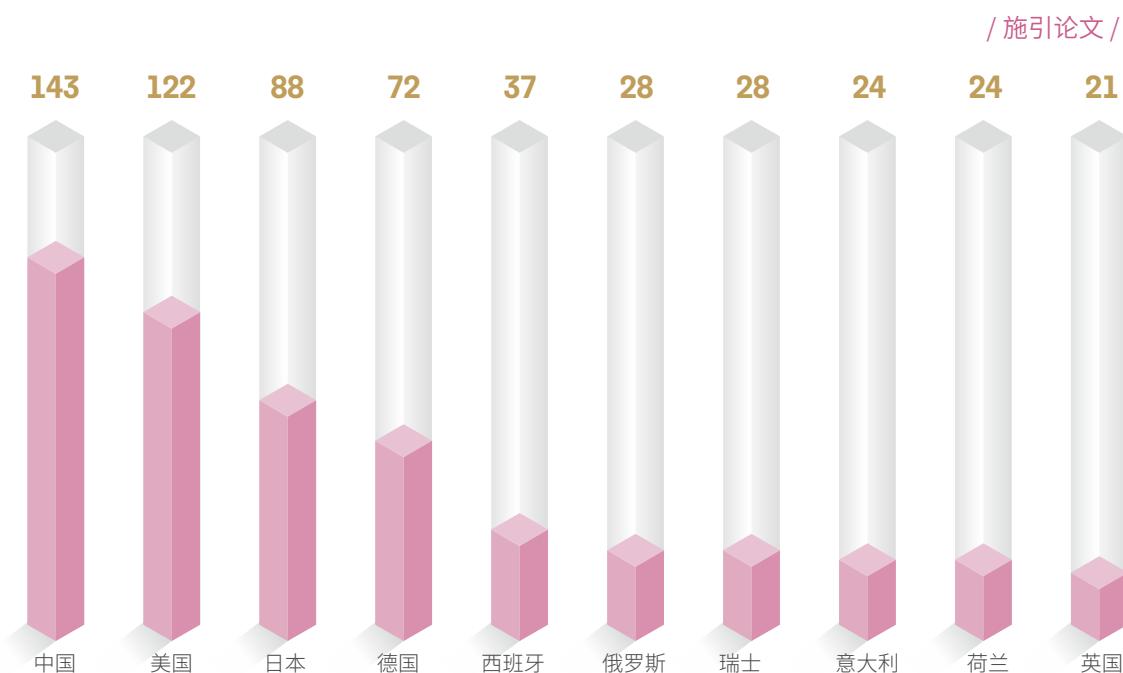


分析该热点前沿施引论文的国家和机构（表 39）可以发现，中国和美国是最活跃的国家。日本和德国紧随其后。施引论文数量排名 Top10 机构中，中国科学院的施引论文最多，随后是日本的理化学研究所、

东京大学和京都大学。这些机构中，来自日本的机构有 3 家，西班牙 2 家，中国、意大利、法国、俄罗斯和德国各有 1 家。

表 39 “超导二极管效应研究”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	143	31.2%	1	中国科学院	中国	49	10.7%
2	美国	122	26.6%	2	理化学研究所	日本	35	7.6%
3	日本	88	19.2%	3	东京大学	日本	27	5.9%
4	德国	72	15.7%	4	京都大学	日本	25	5.4%
5	西班牙	37	8.1%	5	意大利国家研究委员会	意大利	19	4.1%
6	俄罗斯	28	6.1%	6	法国国家科学研究中心	法国	17	3.7%
6	瑞士	28	6.1%	6	俄罗斯科学院	俄罗斯	17	3.7%
8	意大利	24	5.2%	8	多诺西亚国际物理中心	西班牙	16	3.5%
8	荷兰	24	5.2%	9	马普学会	德国	15	3.3%
10	英国	21	4.6%	9	巴斯克大学	西班牙	15	3.3%



### 1.3 重点热点前沿——“拍瓦级激光器及其应用”

拍瓦级激光器，是指输出功率达到 1000 万亿瓦以上的高功率激光系统，可创造出前所未有的极端光场条件。拍瓦级激光器对基础科学、能源、医疗等领域具有重要意义，它为量子电动力学、暗物质探测等提供极端实验平台，驱动惯性约束聚变或激光尾场加速产生高品质带电粒子束，产生高能粒子用于肿瘤治疗和医学成像。

第一台拍瓦级激光器于 1996 年在美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室启用。2004 年，英国中心激光装置 (CLF) 的 Vulcan 激光器启用，成为首台作为用户设施的拍瓦级激光器。随后，世界主要国家纷纷建设和启用其拍瓦级激光器。近年来，多个国家和地区都在建设十拍瓦级激光器以及推动百拍瓦级激光器的建设，如欧盟的极端光基础设施 (ELI)、中国的羲和激光装置 (SULF)、美国的光参量放大束线 (OPAL)、俄罗斯的艾瓦中心极端光研究 (XCELS) 计划等。利用这些更高功率激光技术的发展，科学家取得了一系列的重要进展，如获得 GeV 量级的电子束，产生超高质量剂量率来进行肿瘤治疗等。未来，更先进的拍瓦级激光器的研发，将为科学前沿研究提供更好的极端物理条件。

该前沿的 10 篇核心论文中，被引频次最高的两篇论文是 2019 年英国原子武器机构 (AWE) 等关于拍瓦级和艾瓦级激光器的综述文章，以及 2019 年美国劳伦斯伯克利国家实验室等在 20 厘米长的等离子体内产生能量为 78 亿电子伏特 (7.8GeV) 的电子束的研究，被引频次分别为 578 和 537 次。随后是 2021 年韩国基础科学研究院 (IBS) 等利用韩国相对论激光科学中心 (CoReLS) 的拍瓦级激光器实现超过  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup> 的超高强度激光脉冲的研究、2021 年中国科学院上海光学精密机械研究所等基于激光尾波场加速器实现 27 纳米自由电子激光的研究，以及 2023 年俄罗斯国立核能研究大学 - 莫斯科工程物理学院等关于利用高强度激光设施开展强场中的量子色动力学研究的综述，被引频次分别为 270、159 和 153 次。此外，2022 年德国亥姆霍兹德累斯顿罗森多夫研究中心等成功测试激光加速产生的质子束对小鼠肿瘤的照射以及 2022 年罗马尼亚国家物理与核工程研究所等在极端光基础设施 - 核物理项目 (ELI-NP) 上实现 10.2 拍瓦峰值功率激光脉冲等，也受到了高度的关注。

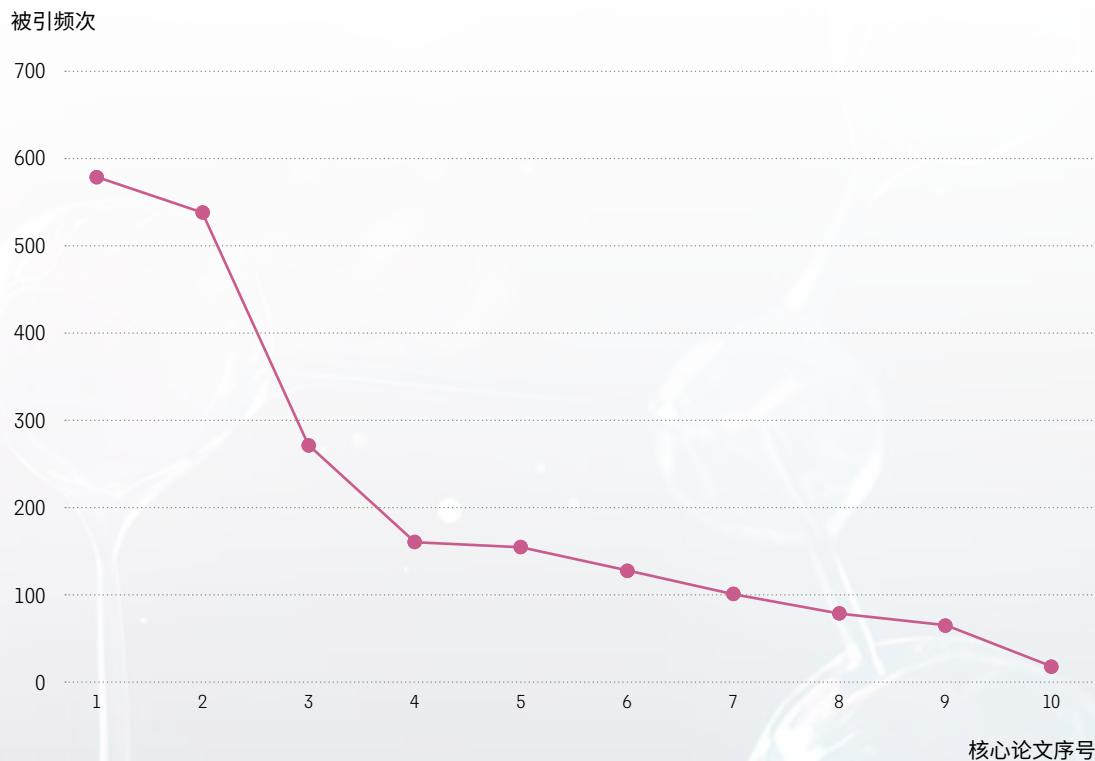


图 21 “拍瓦级激光器及其应用”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

在这个热点前沿中，美国和德国表现最活跃，是核心论文的主要产出国家，各参与了 10 篇核心论文中的 5 篇，占核心论文总量的 50%（表 40）。英国、日本、俄罗斯、法国等的表现也较为突出。中国排名第 7。参与核心论文最多的机构是德国亥姆霍兹联合

会。核心论文 Top10 产出机构（含并列共 22 家）中，来自美国和英国的各有 4 家，德国和法国的各 3 家，韩国和俄罗斯的各 2 家，中国、捷克、意大利和日本各 1 家。

表 40 “拍瓦级激光器及其应用”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	5	50.0%	1	亥姆霍兹联合会	德国	4	40.0%
1	德国	5	50.0%	2	劳伦斯伯克利国家实验室	美国	3	30.0%
3	英国	4	40.0%	2	劳伦斯利物莫国家实验室	美国	3	30.0%
3	日本	4	40.0%	4	中国科学院	中国	2	20.0%
5	俄罗斯	3	30.0%	4	德克萨斯大学奥斯汀分校	美国	2	20.0%
5	法国	3	30.0%	4	密西根大学	美国	2	20.0%
7	中国	2	20.0%	4	卢瑟福·阿普尔顿国家实验室	英国	2	20.0%
7	瑞典	2	20.0%	4	英国国家科研与创新署	英国	2	20.0%
7	意大利	2	20.0%	4	帝国理工学院	英国	2	20.0%
7	韩国	2	20.0%	4	思克莱德大学	英国	2	20.0%
7	捷克	2	20.0%	4	法国国家科学研究中心	法国	2	20.0%
				4	原子能源与替代能源委员会	法国	2	20.0%
				4	索邦大学	法国	2	20.0%
				4	弗里德里希·席勒耶拿大学	德国	2	20.0%
				4	慕尼黑大学	德国	2	20.0%
				4	韩国基础科学研究院	韩国	2	20.0%
				4	光州科学技术院	韩国	2	20.0%
				4	俄罗斯科学院	俄罗斯	2	20.0%
				4	俄罗斯国立核能研究大学 - 莫斯科工程物理学院	俄罗斯	2	20.0%
				4	捷克共和国科学院	捷克	2	20.0%
				4	意大利国家研究委员会	意大利	2	20.0%
				4	大阪大学	日本	2	20.0%

/ 核心论文 /



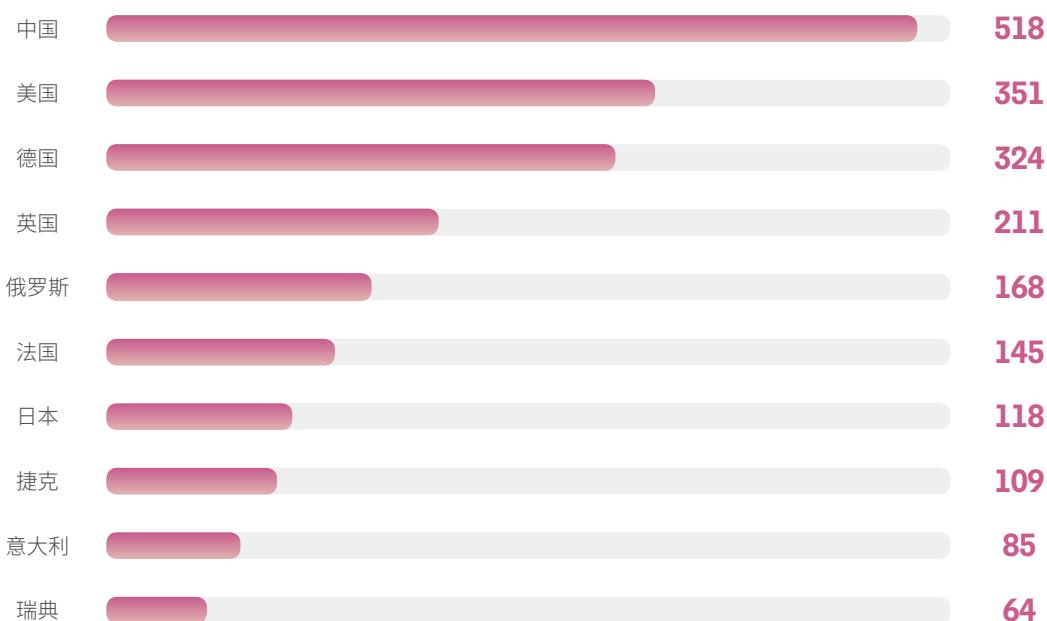
该前沿施引论文 Top10 产出国家（表 41）中，中国是最活跃的国家，表现出对该研究方向的密切关注，美国、德国、英国紧随其后。施引论文排名前 10 的机构中，中国科学院的施引论文最多，随后是德国亥

姆霍兹联合会、俄罗斯科学院和法国国家科学研究中心。这些机构中，来自中国的机构有 3 家，法国有 2 家，德国、俄罗斯、美国、捷克和日本各有 1 家。

表 41 “拍瓦级激光器及其应用”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家 / 地区	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	518	33.8%	1	中国科学院	中国	252	16.4%
2	美国	351	22.9%	2	亥姆霍兹联合会	德国	190	12.4%
3	德国	324	21.1%	3	俄罗斯科学院	俄罗斯	134	8.7%
4	英国	211	13.8%	4	法国国家科学研究中心	法国	119	7.8%
5	俄罗斯	168	11.0%	5	上海交通大学	中国	85	5.5%
6	法国	145	9.5%	6	原子能源与替代能源委员会	法国	83	5.4%
7	日本	118	7.7%	7	劳伦斯伯克利国家实验室	美国	80	5.2%
8	捷克	109	7.1%	7	捷克共和国科学院	捷克	74	4.8%
9	意大利	85	5.5%	9	北京大学	中国	65	4.2%
10	瑞典	64	4.2%	10	日本量子科学技术研究开发机构	日本	61	4.0%

/ 施引论文 /



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

物理领域有 1 个方向入选新兴前沿，是“双层镍氧化物  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  的高温超导特性研究”（表 42）。

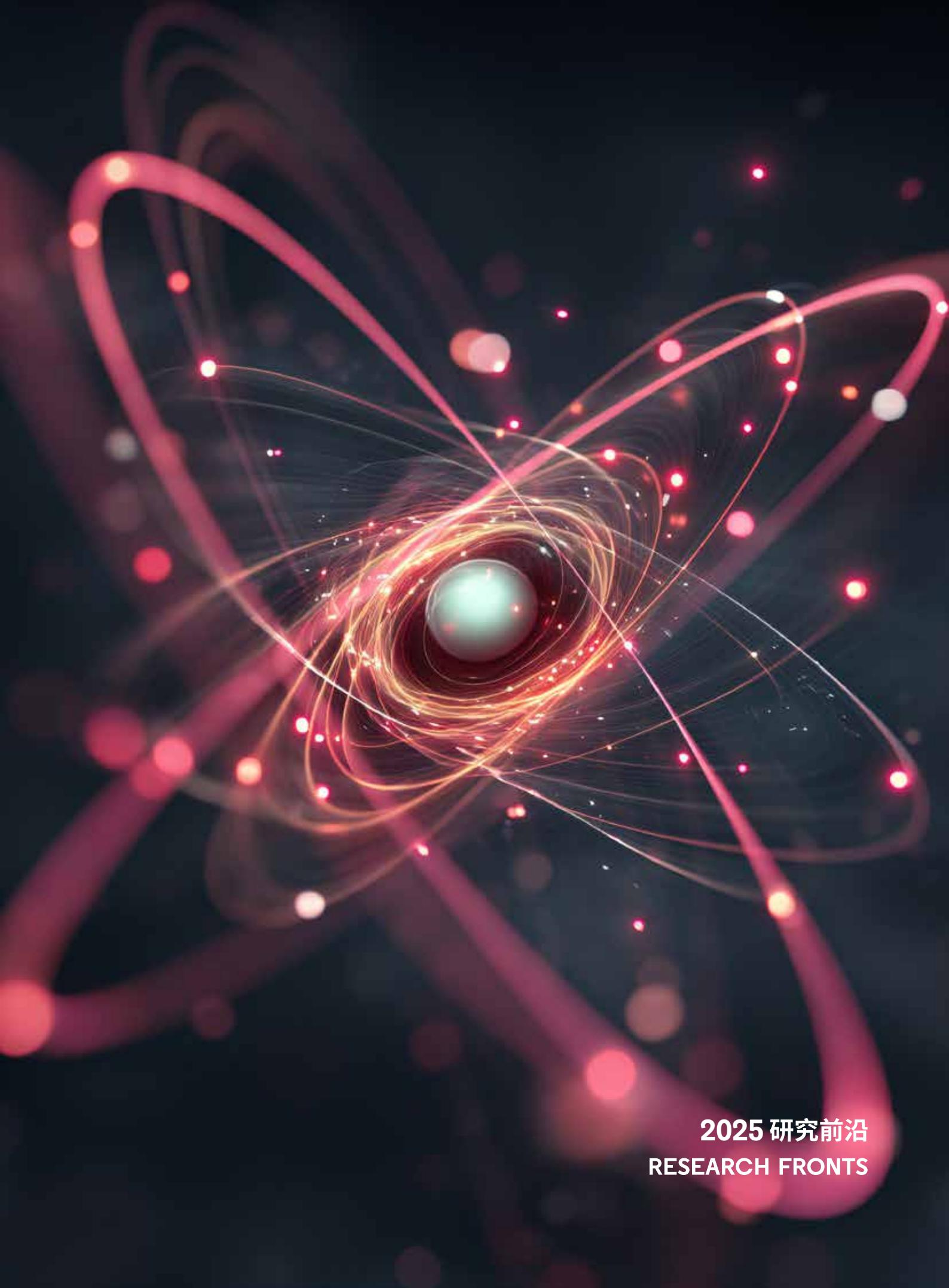
表 42 物理学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	双层镍氧化物 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的高温超导特性研究	43	1757	2023.6

### 2.2 重点新兴前沿——“双层镍氧化物 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的高温超导特性研究”

超导研究一直是凝聚态物理领域的重要前沿方向，科学家持续致力于寻找具有更高超导转变温度的超导体和揭示超导机理。目前，常规超导体常压下的超导转变温度纪录为 39K，非常规超导体的超导转变温度纪录保持者是铜氧化物，常压下为 133K。非常规超导体主要包括铜氧化物高温超导体、铁基超导体和重费米子超导体等，其中，铜氧化物是唯一超导转变温度达到液氮温区（77K）的超导体。2019 年，美国斯坦福大学等首次在镍氧化物 ( $\text{Nd}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{NiO}_2$ ) 中观测到 15K 的超导转变温度，引发了科学家对镍基超导体

的广泛关注。2023 和 2024 年，无限层型镍酸盐的超导电性研究连续入选热点前沿。2023 年，中山大学等在双层镍氧化物  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  中，在约 14GPa 高压下观测到接近 80K 的超导转变温度，这是第二类进入液氮温区的非常规超导材料，镍基超导体系再次引起了研究热潮。在这个新兴前沿中，被引频次最高的论文正是中山大学等发现双层镍氧化物超导电性的研究，被引频次为 197 次。其他论文通过理论与计算研究，探索  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  体系的不同物理特性及其超导机理。

The background of the image is a dark, abstract space filled with glowing particles and lines. A central, bright green sphere is surrounded by a complex network of glowing orange and yellow lines that form concentric, swirling patterns. Numerous small, glowing red and pink dots are scattered throughout the space, some with trails, suggesting motion and energy flow.

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 09

## 天文学与 天体物理学



# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 天文学与天体物理学领域 Top 10 热点前沿发展态势

天文学与天体物理学领域排名前 10 的热点前沿涉及引力波探测与引力理论、中子星性质、宇宙学、“盖亚”和“费米”巡天、快速射电暴、暗物质直接探测等研究主题。引力波探测与引力理论以及相关延伸的致密天体性质研究备受瞩目，相关研究热点包括：脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波、引力理论和宇宙学、对中子星性质的多信使约束。宇宙学研究主题表现依旧突出，涉及多种宇宙学探针，包括基于超新星

光变曲线数据约束宇宙学参数、宇宙切变效应巡天揭示宇宙学、基于重子振荡光谱巡天数据测量宇宙学参数。重大巡天观测项目持续产出前沿成果，包括“盖亚”第三批观测数据及对银河系的观测发现、“费米”大天区望远镜发布伽马射线源和活动星系核目录。此外，快速射电暴的观测和性质研究再次上榜。暗物质探测则聚焦于通过直接探测实验寻找低质量暗物质候选粒子。

表 43 天文学与天体物理学领域 Top 10 热点前沿

序号	研究前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波	37	3927	2023.3
2	<b>基于超新星光变曲线数据约束宇宙学参数</b>	<b>2</b>	<b>640</b>	<b>2022.0</b>
3	引力理论和宇宙学	33	4383	2021.5
4	“盖亚”第三批观测数据及对银河系的观测发现	42	7158	2021.2
5	宇宙切变效应巡天揭示宇宙学	9	2653	2020.9
6	对中子星性质的多信使约束	25	8048	2020.8
7	基于重子振荡光谱巡天数据测量宇宙学参数	5	984	2020.8
8	快速射电暴的观测和性质研究	41	8238	2020.7
9	“费米”大天区望远镜发布伽马射线源和活动星系核目录	3	1217	2020.7
10	<b>通过直接探测实验寻找低质量暗物质候选粒子</b>	<b>19</b>	<b>3632</b>	<b>2020.6</b>

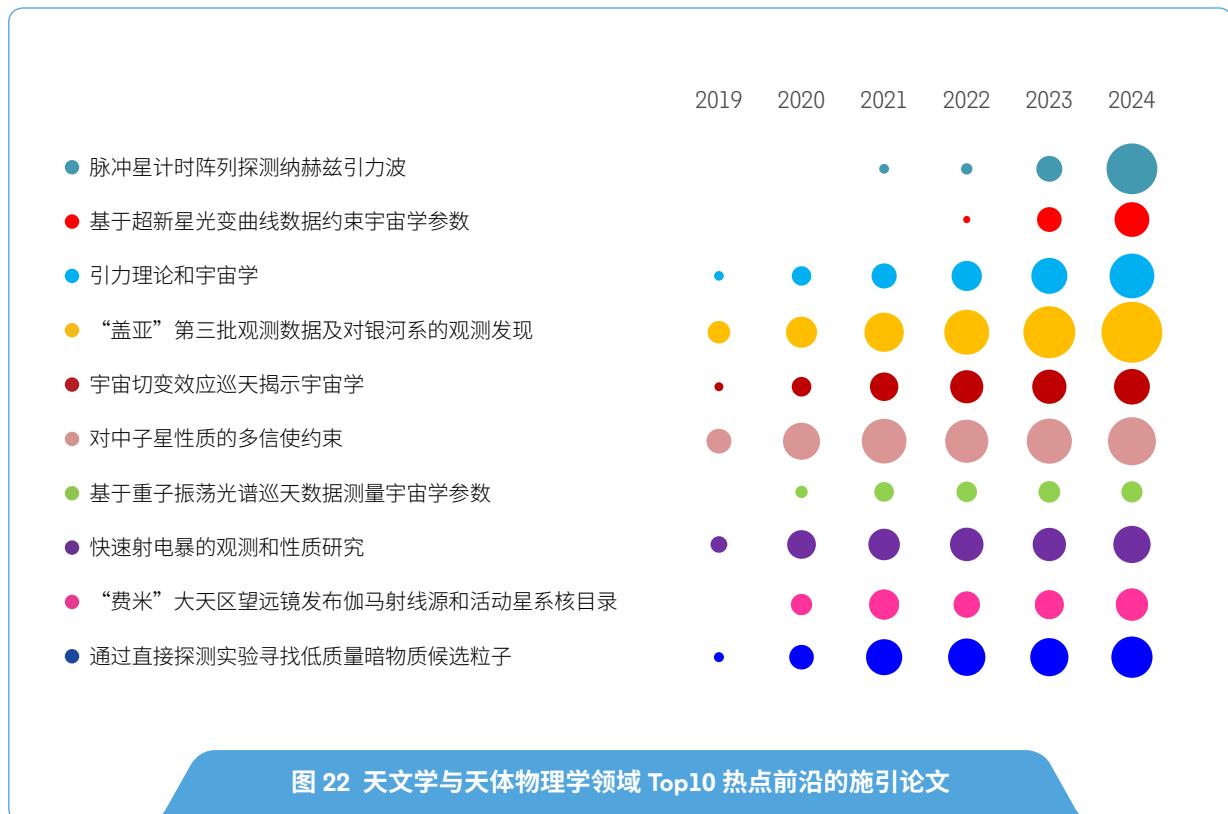


图 22 天文学与天体物理学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“基于超新星光变曲线数据约束宇宙学参数”

超新星是一种高能明亮的恒星爆炸现象。这种短暂的天文事件发生在大质量恒星的最终演化阶段，或者白矮星被触发发生失控的核聚变时，由此产生的爆炸使恒星在衰落之前持续地发光一段时间。在不同类型的超新星中，Ia型超新星具有着特殊地位，被称为测量宇宙距离的“标准烛光”。天文学家可以通过观察Ia型超新星的光变曲线，确定其峰值光度，利用菲利普斯关系进行校正，从而计算出其与地球的距离。这种方法在测量星系距离方面的优势已被证实。利用Ia型超新星可绘制过去约100亿年的宇宙膨胀历史，从而锚定了宇宙学的标准模型。Ia型超新星首次提供了宇宙加速膨胀的观测证据，相关科学家因“通过观测遥远的超新星发现宇宙正在加速膨胀”而获得了

2011年诺贝尔物理学奖。当前，Ia型超新星仍然极具价值，一是其足够明亮，可以在很远的宇宙距离上观测到；二是其足够普遍，可以大量发现；三是其亮度和距离的测量精度可以标准化。近年来，Ia型超新星的样本量不断增加，成为深入理解宇宙学标准模型的关键手段。

热点前沿“基于超新星光变曲线数据约束宇宙学参数”包括两篇核心论文，且是2022年发表于《天文物理期刊》(The Astrophysical Journal)上的四篇系列论文中的两篇。这项工作发布了1550个经光谱证实的Ia型超新星的1701个光变曲线数据，用于推算宇宙学参数。其中一篇发布了全数据集，共汇集了18个巡

天项目的光变曲线数据，涵盖从  $z=0$  到  $z=2.3$  红移范围的 Ia 型超新星，旨在对 Ia 型超新星的红移、异常速度、光度校准以及本征散射模型进行系统审查。另一篇介绍了从拟合超新星光变曲线到约束宇宙学参数的方法，总结了数据样本、校准和红移等分析所需的必要输入，并展示了宇宙学参数推算结果。通过新增多个交叉校准、覆盖更大红移跨度的超新星光度系统，研究显著提升了样本规模，改进了对系统不确定度的处理，实现了更精准的宇宙学参数约束。

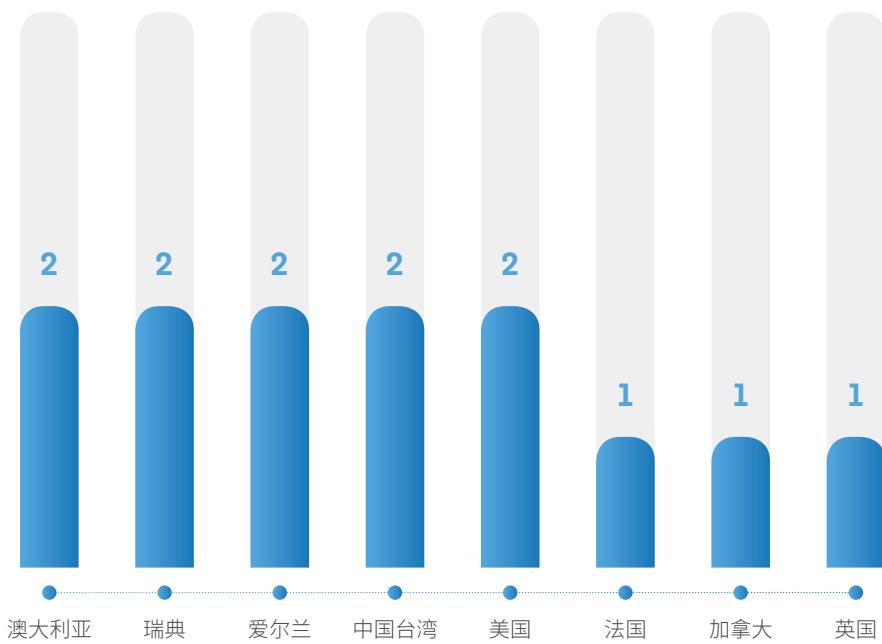
两篇核心论文均由来自全球多个机构的数十名作者合作完成。在核心论文的产出国家 / 地区方面，澳

大利亚、瑞典、爱尔兰、美国和中国台湾地区均参与了两篇核心论文的研究，法国、加拿大和英国则各参与了一篇。产出机构多来自于美国，共有 10 所美国机构参与两篇核心论文，包括加州大学圣克鲁兹分校、约翰·霍普金斯大学、史密森尼学会、杜克大学、加州大学伯克利分校、德州农工大学、新泽西州立罗格斯大学、圣母大学、大学天文研究协会、太空望远镜科学研究所。此外，澳大利亚昆士兰大学、爱尔兰都柏林圣三一学院、中国台湾地区的台湾中央大学也对两篇核心论文有所贡献。整体来看，这一前沿研究体现了高度协同的国际合作模式。

表 44 “基于超新星光变曲线数据约束宇宙学参数”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家 / 地区和机构

排名	国家 / 地区	核心论文	比例	排名	机构	所属国家 / 地区	核心论文	比例
1	澳大利亚	2	100.0%	1	加州大学圣克鲁兹分校	美国	2	100.0%
1	瑞典	2	100.0%	1	约翰·霍普金斯大学	美国	2	100.0%
1	爱尔兰	2	100.0%	1	史密森尼学会	美国	2	100.0%
1	中国台湾	2	100.0%	1	杜克大学	美国	2	100.0%
1	美国	2	100.0%	1	加州大学伯克利分校	美国	2	100.0%
6	法国	1	50.0%	1	德州农工大学	美国	2	100.0%
6	加拿大	1	50.0%	1	新泽西州立罗格斯大学	美国	2	100.0%
6	英国	1	50.0%	1	圣母大学	美国	2	100.0%
				1	大学天文研究协会	美国	2	100.0%
				1	太空望远镜科学研究所	美国	2	100.0%
				1	昆士兰大学	澳大利亚	2	100.0%
				1	都柏林圣三一学院	爱尔兰	2	100.0%
				1	台湾中央大学	中国台湾	2	100.0%

/ 核心论文 /



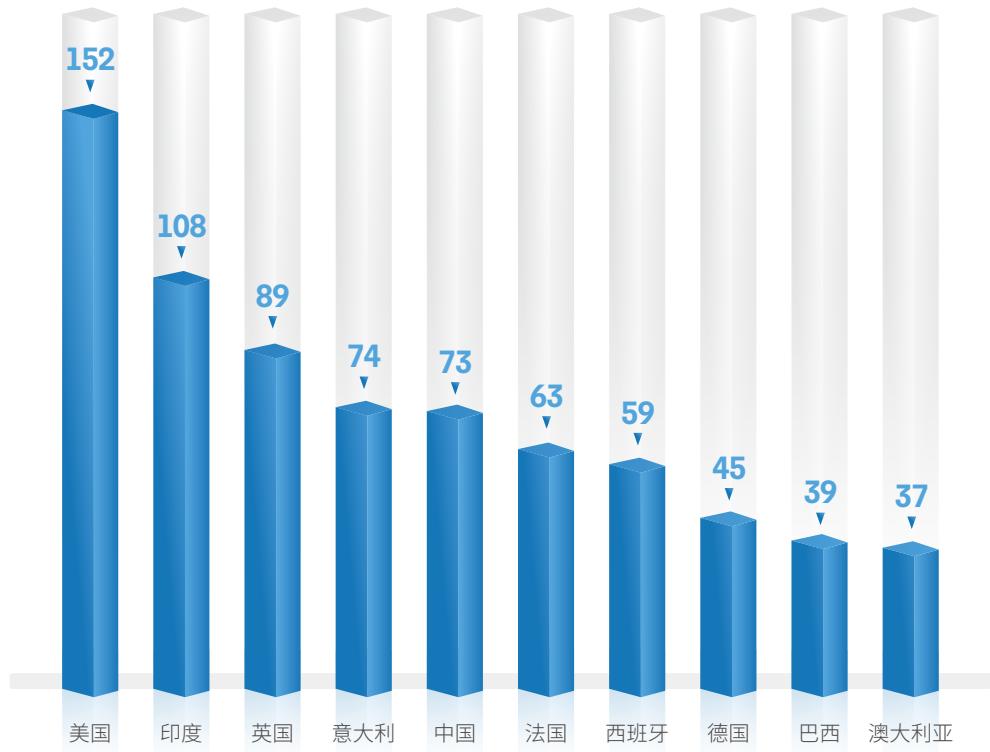
在施引论文方面，美国施引论文数量领先，其次为印度、英国、意大利、中国。在施引论文的产出机构方面，法国国家科学研究中心施引论文数量最多，

意大利国家核物理研究院、美国杜克大学次之。值得一提的是，中国科学院在施引论文产出方面表现突出，位列第八。

表 45 “基于超新星光变曲线数据约束宇宙学参数”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	美国	152	30.5%	1	法国国家科学研究中心	法国	57	11.4%
2	印度	108	21.6%	2	意大利国家核物理研究院	意大利	40	8.0%
3	英国	89	17.8%	3	杜克大学	美国	39	7.8%
4	意大利	74	14.8%	4	芝加哥大学	美国	35	7.0%
5	中国	73	14.6%	5	约翰·霍普金斯大学	美国	32	6.4%
6	法国	63	12.6%	6	史密森尼学会	美国	31	6.2%
7	西班牙	59	11.8%	6	太空望远镜科学研究所	美国	31	6.2%
8	德国	45	9.0%	8	中国科学院	中国	30	6.0%
9	巴西	39	7.8%	9	剑桥大学	英国	28	5.6%
10	澳大利亚	37	7.4%	10	西班牙高等科学研究院理事会	西班牙	27	5.4%

/ 施引论文 /



### 1.3 重点热点前沿——“通过直接探测实验寻找低质量暗物质候选粒子”

现有理论认为，暗物质约占宇宙物质的 27%，但其性质至今成谜。当前，寻找暗物质粒子的实验手段主要分为三类：间接探测、对撞机寻找和直接探测。其中，直接探测通过部署在地球深处、具有极低本底噪声的探测器，直接捕捉暗物质粒子与普通物质原子核或电子发生碰撞时产生的微弱信号，是证实暗物质粒子性的最直接的方法。过去数十年，直接探测实验主要聚焦于寻找理论上广受青睐的“弱相互作用重粒子”（WIMP），其质量通常被认为在  $\text{GeV}/c^2$  以上。然而，即使实验灵敏度不断提升，迄今尚未获得决定性发现。因此，物理学界将目光转向更广阔的理论空间，特别是质量在亚  $\text{GeV}/c^2$  量级的低质量暗物质候选粒子。这类粒子与探测器物质的相互作用信号更为微弱，对探测器的能量阈值和本底控制水平提出了前所

未有的挑战。

热点前沿“通过直接探测实验寻找低质量暗物质候选粒子”包括 19 篇核心论文，内容主要聚焦四大核心研究主题。

在利用吨级液氙 / 液氩探测器刷新传统 WIMP 探测灵敏度方面，国际几大合作组展开激烈竞争，持续将探测极限推向新高。由美国主导的 LUX-ZEPLIN 合作组利用 5.5 吨液氙探测器，为质量为  $36 \text{ GeV}/c^2$  的 WIMP 与核子的自旋无关相互作用截面设置了  $9.2 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$  的上限，研究结果于 2023 年发布。欧洲主导的 XENON 合作组利用 5.9 吨的 XENONnT 探测器，也达到了  $10^{-48} \text{ cm}^2$  级的顶尖灵敏度。由上海交通大学牵头的

中国 PandaX 合作组，依托中国锦屏地下实验室的独特优势，利用 PandaX-4T 实验 3.7 吨液氙探测器，在 2021 年取得了  $3.8 \times 10^{47} \text{ cm}^2$  的探测结果，标志着中国在该领域已迈向第一梯队。

在面向亚 GeV 暗物质的新型固态探测器研发与应用方面，SENSEI 和 DAMIC-M 等合作组利用“滑雪式电荷耦合器件”（Skipper-CCD）技术，在 2020 年和 2023 年相继发布了对亚  $\text{GeV}/c^2$  暗物质与电子相互作用的约束结果，开辟了  $\text{MeV}/c^2$  量级的暗物质探测新窗口。

在利用新物理效应增强探测能力方面，为了探测利用传统方法无法触及的更低质量暗物质，研究人员开始利用“米格代尔效应”（Migdal effect）或“轫致辐射”（Bremsstrahlung）等次级过程。XENON1T 合作组已利用此方法，在 2019 年将对暗物质的探测灵敏度成功延伸至约  $85 \text{ MeV}/c^2$  的质量区间。

在探索新物理过程与拓展探测目标方面，尽管 XENON1T 实验在 2020 年报告的低能区电子反冲“超出现象”（Excess）未被后续实验证实，但其一度高达  $3.4\sigma$  的太阳轴子模型显著性，极大地激发了利用这类探测器发现新物理的研究热情。

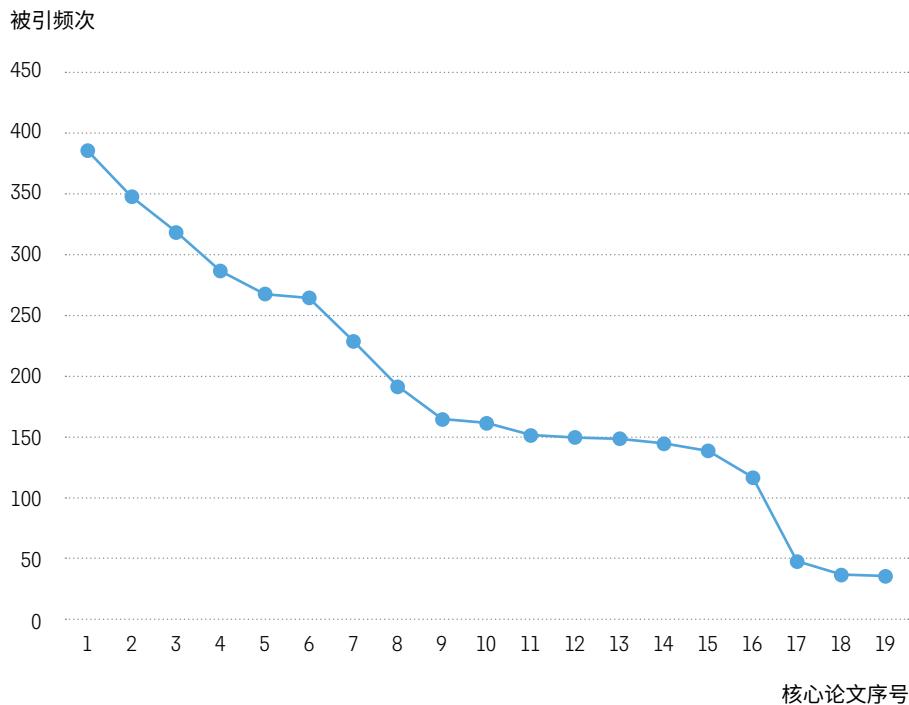


图 23 “通过直接探测实验寻找低质量暗物质候选粒子”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

在该研究领域，全球研究力量呈现欧美国家主导、多国积极参与的格局。美国在核心论文产出方面占据首位，紧随其后的是法国和德国，这三个国家也是 LUX-ZEPLIN、XENON 等顶尖实验的核心力量。葡

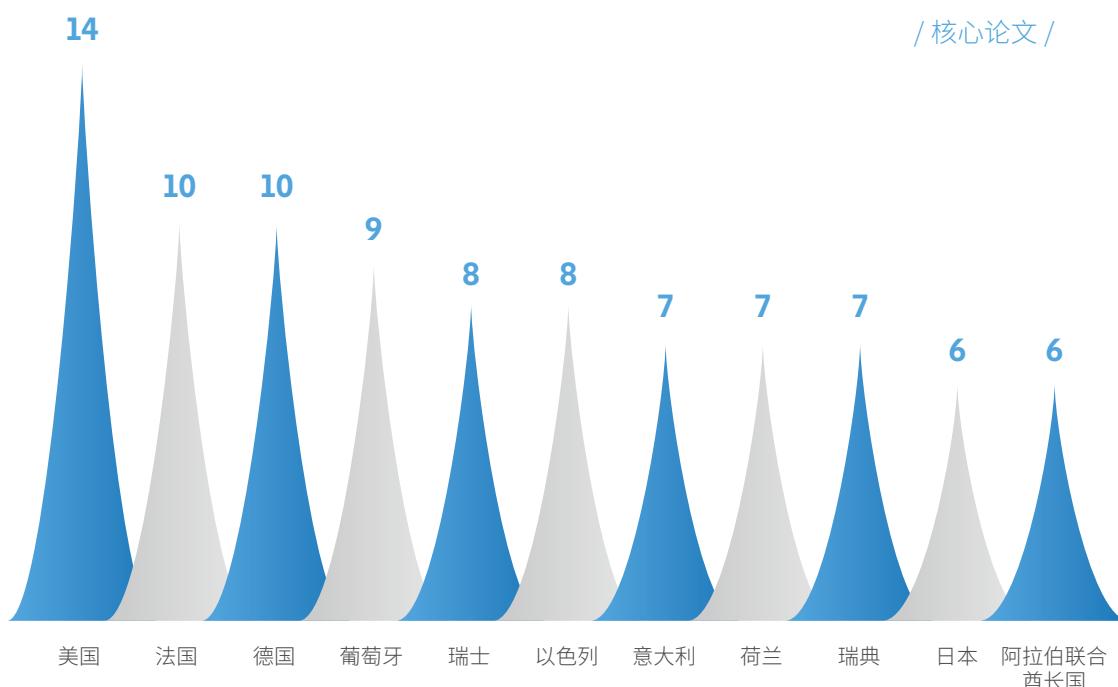
萄牙、瑞士、以色列、意大利等国也深度参与，反映了该领域高度国际化的合作模式。中国的核心论文数量排名第 12，虽未能跻身前十，但 PandaX 合作组的相关研究和贡献亦有目共睹。核心论文 Top10 产出机

构层面，美国芝加哥大学以 11 篇（57.9%）独占鳌头，凸显了其在粒子物理和天体物理领域的领先地位。得益于在 XENON 等欧洲主导合作项目中的深度参与，

法国机构表现也极为亮眼，法国国家科学研究中心以 10 篇核心论文位列第二；法国巴黎西岱大学与葡萄牙科英布拉大学同为 9 篇，并列第三。

表 46 “通过直接探测实验寻找低质量暗物质候选粒子”研究前沿中核心论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	14	73.7%	1	芝加哥大学	美国	11	57.9%
2	法国	10	52.6%	2	法国国家科学研究中心	法国	10	52.6%
2	德国	10	52.6%	3	巴黎西岱大学	法国	9	47.4%
4	葡萄牙	9	47.4%	3	科英布拉大学	葡萄牙	9	47.4%
4	瑞士	8	42.1%	5	南特昂热勒芒大学	法国	8	42.1%
4	以色列	8	42.1%	5	南特大学	法国	8	42.1%
4	意大利	7	36.8%	5	法国国立矿业电信研究院	法国	8	42.1%
4	荷兰	7	36.8%	5	布列塔尼 - 卢瓦尔大学	法国	8	42.1%
4	瑞典	7	36.8%	5	大西洋矿业电信学院	法国	8	42.1%
10	日本	6	31.6%	5	索邦大学	法国	8	42.1%
10	阿拉伯联合酋长国	6	31.6%	5	苏黎世大学	瑞士	8	42.1%

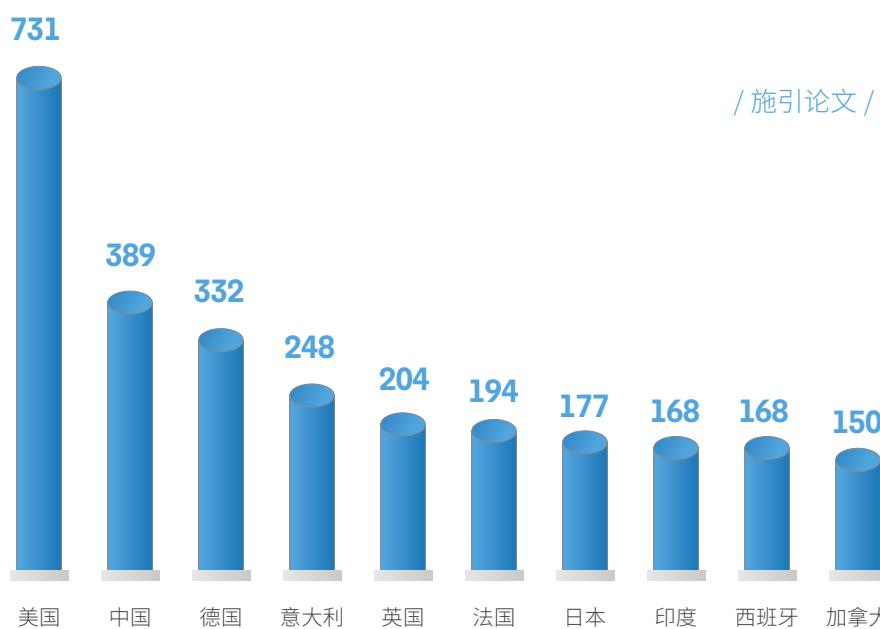


从施引论文角度来看，美国的引领地位更为突出，贡献了 731 篇，占比高达 41.7%，充分体现了美国在该领域的领导地位。中国以 389 篇（22.2%）位居全球第二，显示出中国科研人员在该前沿方向上强劲的追赶势头。德国和意大利位列三、四名。在机构层面，意大利国家核物理研究院（INFN）以 206 篇施引论文位居榜首，这得益于其运营的格兰萨索地下实验室是

XENON 等多个重大实验的所在地。美国的芝加哥大学和法国国家科学研究中心分列第二、三位。中国科学院以 168 篇施引论文位列第四，是中国在该领域最具影响力的研究机构。美国机构在施引论文 Top10 榜单中占据多席，除了芝加哥大学之外，还包括费米国立加速器实验室、斯坦福大学和劳伦斯伯克利国家实验室等，彰显了其在该领域的强大科研实力。

表 47 “通过直接探测实验寻找低质量暗物质候选粒子”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	美国	731	41.7%	1	意大利国家核物理研究院	意大利	206	11.8%
2	中国	389	22.2%	2	芝加哥大学	美国	201	11.5%
3	德国	332	18.9%	3	法国国家科学研究中心	法国	170	9.7%
4	意大利	248	14.2%	4	中国科学院	中国	168	9.6%
5	英国	204	11.6%	5	费米国立加速器实验室	美国	146	8.3%
6	法国	194	11.1%	6	马普学会	德国	134	7.6%
7	日本	177	10.1%	6	斯坦福大学	美国	134	7.6%
8	印度	168	9.6%	8	劳伦斯伯克利国家实验室	美国	118	6.7%
8	西班牙	168	9.6%	9	亥姆霍兹联合会	德国	114	6.5%
10	加拿大	150	8.6%	9	加州大学伯克利分校	美国	114	6.5%



2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS



# 10

## 数学

2025 研究前沿

RESEARCH FRONTS

# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 数学领域 Top 10 热点前沿发展态势

数学领域排名前 10 的研究前沿聚焦机器学习与科学计算的深度融合、对人工智能理论基础的深刻探索，以及优化理论和高维统计等核心领域。

机器学习与科学计算的交叉融合方面涌现出多个热点前沿。其中，“物理引导神经网络在偏微分方程求解中的方法与应用”和“基于物理定律约束的神经网络数值方法”共同致力于将物理先验知识融入深度学习模型。它们与“神经算子理论、方法及其科学计算应用”“基于深度去噪先验的迭代优化计算成像”一起，反映出微分方程作为数学领域的长期热点，正与数据科学发生颠覆性的交叉渗透，催生出全新的科学计算范式。

在人工智能基础研究方面，“现代机器学习中的双降曲线与泛化现象研究”旨在解释大参数模型为何能具备优异的泛化能力，“深度 ReLU 神经网络的最优逼近理论及非参数回归应用”为神经网络的表达能力和极限提供了严格的数学刻画，上述前沿凸显出数学在新兴交叉学科发展中扮演关键角色，为其他领域提供了严谨的理论基础。

此外，优化理论与统计方法等也备受关注，“无导数 / 零阶优化的方法与理论”“稀疏回归 / 最优子集选择的精确与可扩展优化方法”“高维统计中鲁棒统计推断”“非局部模型与分数阶偏微分方程的理论与计算”等前沿均入选本年度 Top 10 热点前沿。

表 48 数学领域 Top 10 热点前沿

序号	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	神经算子理论、方法及其科学计算应用	4	1309	2021.5
2	基于深度去噪先验的迭代优化计算成像	4	686	2021.3
3	基于物理定律约束的神经网络数值方法	12	3159	2020.9
4	<b>现代机器学习中的双降曲线与泛化现象研究</b>	<b>8</b>	<b>1084</b>	<b>2020.5</b>
5	高维统计中鲁棒统计推断	2	166	2020.5
6	<b>物理引导神经网络在偏微分方程求解中的方法与应用</b>	<b>4</b>	<b>9263</b>	<b>2020.3</b>
7	深度 ReLU 神经网络的最优逼近理论及非参数回归应用	15	1346	2020.3
8	非局部模型与分数阶偏微分方程的理论与计算	2	368	2020.0
9	无导数 / 零阶优化的方法与理论	2	224	2020.0
10	稀疏回归 / 最优子集选择的精确与可扩展优化方法	2	196	2020.0

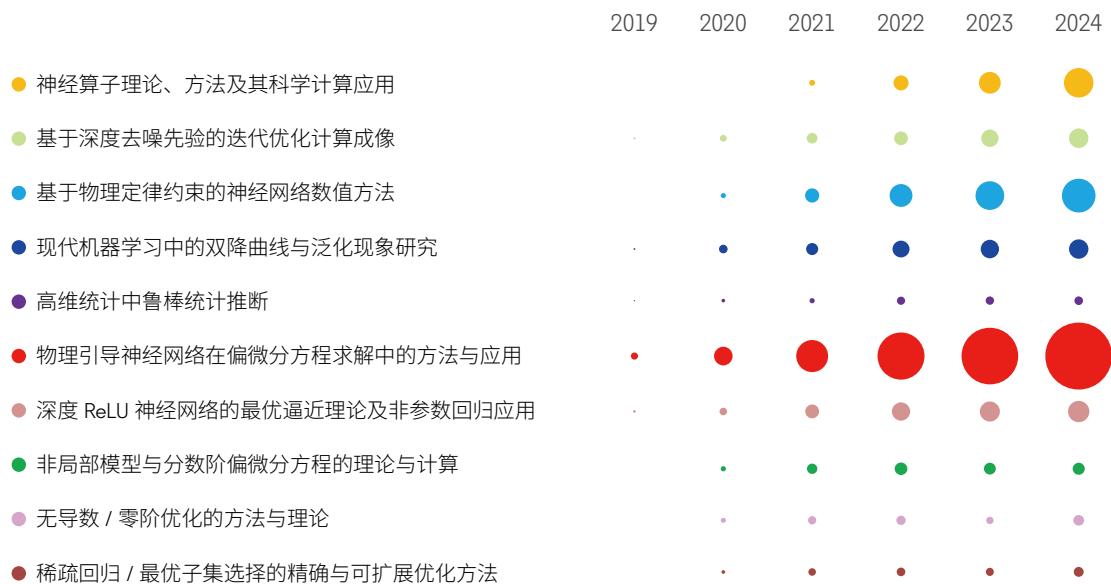


图 24 数学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“现代机器学习中的双降曲线与泛化现象研究”

以深度神经网络为代表的现代机器学习模型，拥有远超训练样本数量的参数（即高度过参数化），能够完美拟合带噪声的训练数据（即插值），同时也能在新数据上展现出卓越的预测性能（即泛化能力）。这一现象与统计学习领域“偏差 - 方差权衡”（bias-variance trade-off）的经典理论背道而驰。该理论认为，模型的复杂度应当适中，过度复杂的模型会因“过拟合”而丧失泛化能力，其测试误差曲线呈 U 型。20 世纪 90 年代末的早期研究已在线性分类器等简单模型中观察到了“过拟合无害”的现象。但直到深度学习在 21 世纪 10 年代取得巨大成功后，这一现象的普遍性和重要性才获得广泛关注。2018 至 2019 年间，加州大学圣迭戈分校 Mikhail Belkin 等发表了一系列开创

性工作，系统性地提出并用实验证据展示了“双降”（double descent）风险曲线的存在，即随着模型复杂度不断增加，测试误差在达到传统 U 型曲线的峰值后，并不会持续上升，反而会进入第二个下降区间，形成一个“双 U”形状。该发现为调和经典理论与现代实践提供了统一框架，一旦该现象背后的数学原理被彻底揭示，将指导下一代 AI 模型的设计与训练，并极大提升 AI 系统的可解释性与可靠性。

热点前沿“现代机器学习中的双降曲线与泛化现象研究”共包含 8 篇核心论文，内容主要聚焦于以下三个紧密关联的研究主题。在“双降”现象的识别、统一与“良性过拟合”概念的提出方面，《美国国家

科学院院刊》(PNAS)2019年刊发的标志性论文首次清晰地描绘了“双降”风险曲线，并指出传统U型曲线仅是“双降”曲线在欠参数化区域的第一部分。该刊2020年发表的另一篇论文提出了“良性过拟合”(benign overfitting)概念，并在线性回归这一最经典的模型中，首次为该现象提供了严格的数学条件刻画，揭示出过参数化是实现“良性过拟合”的必要条件。在可控模型中对“双降”现象进行精确的数学推导与定量刻画方面，2022年斯坦福大学研究团队利用随机矩阵理论等工具，将“双降”分析从简单的线性模

型成功拓展到包含单层随机神经网络的更复杂特征模型，在更广义的设定下定量重现了“双降”曲线；还在随机特征回归模型中，精确计算了泛化误差的渐进表达式，从理论上严格证明了当信噪比足够高时，最优的泛化性能恰恰由极端过参数化的插值解所达到。在阐释“隐式正则化”等实现“良性过拟合”的关键机制方面，2020年芝加哥大学和麻省理工学院研究团队分析了隐式正则化现象，指出高维性、核函数曲率以及数据协方差的谱衰减等几何特性是促成良好泛化能力的关键因素。

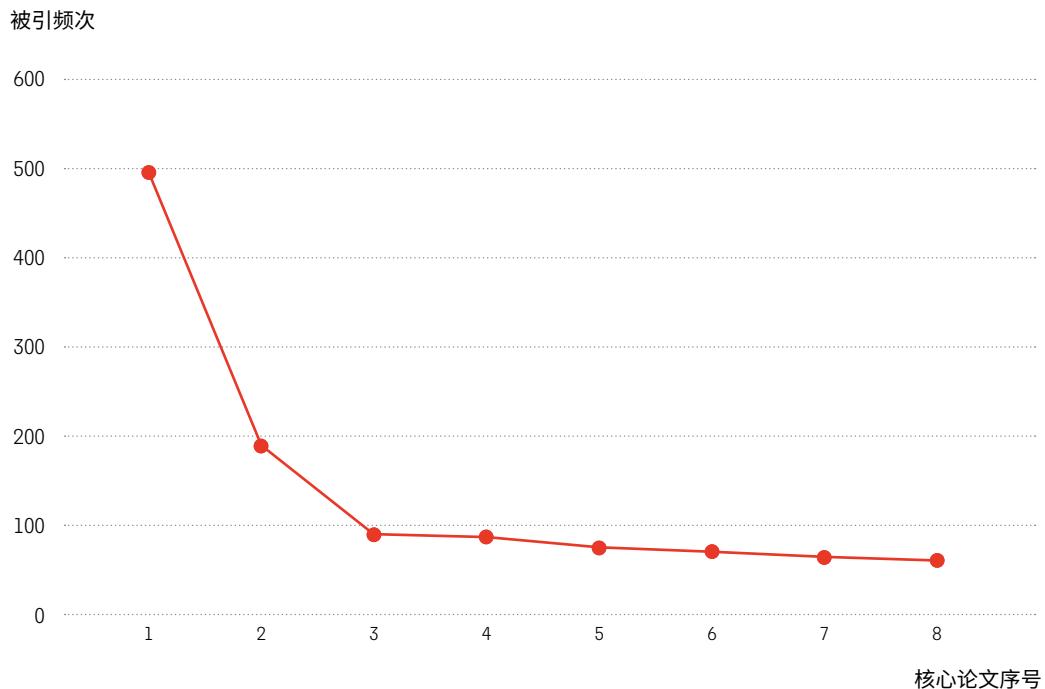


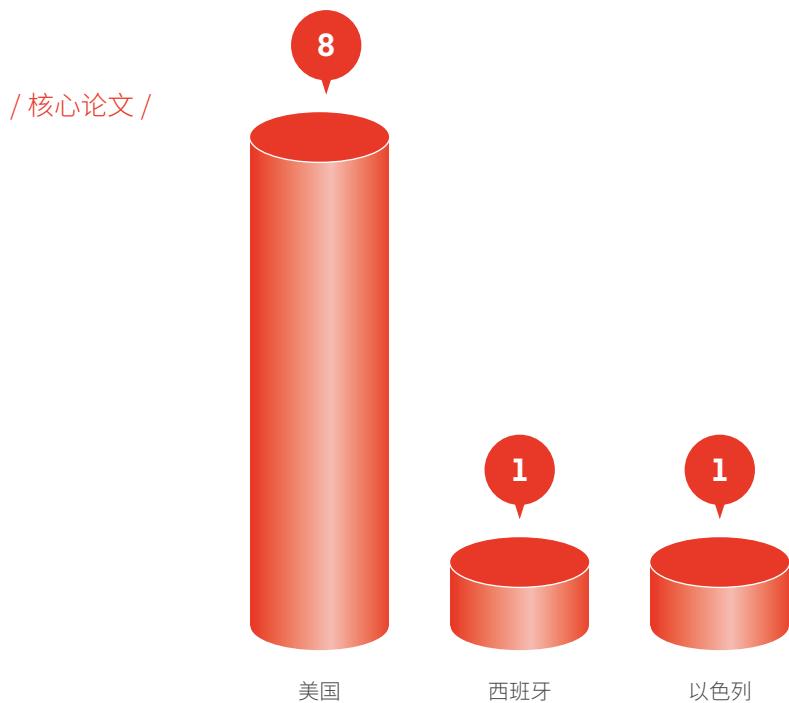
图 25 “现代机器学习中的双降曲线与泛化现象研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

核心论文 Top 产出国家中，美国参与发表了全部 8 篇核心论文，凸显了其在该基础理论研究方向上的绝对领导地位。西班牙和以色列各参与贡献了 1 篇核心论文。在机构层面，加州大学伯克利分校和斯坦福

大学并列第一，均贡献 3 篇核心论文。麻省理工学院、哥伦比亚大学和加州大学圣迭戈分校各以 2 篇核心论文紧随其后（表 49）。

表 49 “现代机器学习中的双降曲线与泛化现象研究”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	8	100.0%	1	加州大学伯克利分校	美国	3	37.5%
2	西班牙	1	12.5%	1	斯坦福大学	美国	3	37.5%
2	以色列	1	12.5%	3	麻省理工学院	美国	2	25.0%
				3	哥伦比亚大学	美国	2	25.0%
				3	加州大学圣迭戈分校	美国	2	25.0%
				6	芝加哥大学	美国	1	12.5%
				6	特拉维夫大学	以色列	1	12.5%
				6	庞培法布拉大学	西班牙	1	12.5%
				6	卡内基梅隆大学	美国	1	12.5%
				6	谷歌公司	美国	1	12.5%
				6	俄亥俄州立大学	美国	1	12.5%

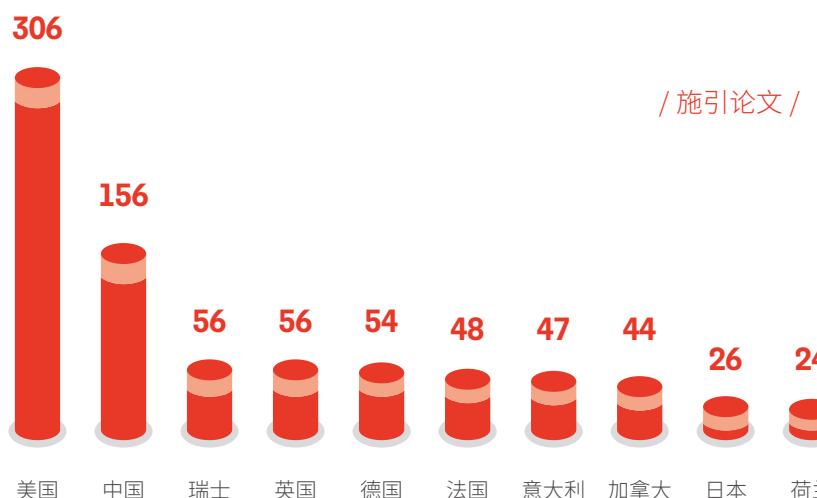


施引论文方面(表50),美国的引领地位依然稳固,贡献了306篇施引论文,占比高达42.3%。中国以156篇(21.5%)位居第二,显示出中国科研人员在这一颠覆性理论前沿积极开展跟进研究。瑞士和英国均产出56篇施引论文,并列第三。施引论文产出机构中,美国高校占据主导地位,Top 10机构(含并列13家)中

有8家机构来自美国,斯坦福大学以34篇的施引论文数量位居第一,延续了其在核心论文产出中的领导地位,加州大学伯克利分校位列第三。法国机构表现较佳,在Top机构中占据两席,法国国家科学研究中心(CNRS)和巴黎文理研究大学分列第二、九位。

表50 “现代机器学习中的双降曲线与泛化现象研究”研究前沿中施引论文的Top10产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	国家	施引论文	比例
1	美国	306	42.3%	1	斯坦福大学	美国	34	4.7%
2	中国	156	21.5%	2	法国国家科学研究中心	法国	32	4.4%
3	瑞士	56	7.7%	3	加州大学伯克利分校	美国	31	4.3%
3	英国	56	7.7%	4	洛桑联邦理工学院	瑞士	29	4.0%
5	德国	54	7.5%	5	哈佛大学	美国	27	3.7%
6	法国	48	6.6%	6	麻省理工学院	美国	23	3.2%
7	意大利	47	6.5%	7	宾夕法尼亚大学	美国	18	2.5%
8	加拿大	44	6.1%	8	哥伦比亚大学	美国	15	2.1%
9	日本	26	3.6%	9	巴黎文理研究大学	法国	14	1.9%
10	荷兰	24	3.3%	10	苏黎世联邦理工学院	瑞士	13	1.8%
				10	普林斯顿大学	美国	13	1.8%
				10	加州大学圣迭戈分校	美国	13	1.8%
				10	牛津大学	英国	13	1.8%



### 1.3 重点热点前沿——“物理引导神经网络在偏微分方程求解中的方法与应用”

物理引导神经网络 (PINN) 是一类将物理规律嵌入神经网络训练过程的深度学习方法，其核心思想是利用已知偏微分方程 (PDE) 描述的物理约束，引导神经网络在预测和拟合数据时自动满足这些约束。自 17 世纪牛顿和莱布尼茨创立微积分以来，偏微分方程作为描述连续介质力学、热传导、量子力学和流体力学等物理系统演化规律的数学工具，已有几百年的发展历史，其数值求解经历了有限差分法、有限元法和谱方法等多个阶段。然而，随着计算能力提升和数据科学的发展，传统基于网格的数值方法在高维复杂系统求解、逆问题求解以及噪声数据整合等方面存在局限。2024 年诺贝尔物理学奖授予 John J. Hopfield 和 Geoffrey E. Hinton，表彰他们在人工神经网络及机器学习领域的基础性贡献，从而为将深度学习技术引入科学计算、特别是 PINN 在偏微分方程求解中的应用价值，提供了理论和方法论基础的证明。PINN 将神经网络与物理方程紧密结合，在连续空间 - 时间域上实现高效函数逼近，并可同时处理高维、多物理场以及复杂边界条件问题，从而开创了传统科学计算的新范式。

“物理引导神经网络在偏微分方程求解中的方法与应用” 热点前沿共包含 4 篇核心论文，其研究重点在于利用 PINN 实现偏微分方程的正问题 (forward problem) 和逆问题 (inverse problem) 求解，尤其在隐藏物理机制 (hidden physics) 识别和数据驱动模型发现方面取得了显著进展。核心突破涵盖两类模型：连续时间模型作为数据高效的时空函数逼近器，离散时间模型则结合高阶隐式 Runge-Kutta 方法，可实现高精度时间积分。研究表明 PINN 在流体力学、反应 - 扩散系统、非线性浅水波传播和量子力学等领域具有广泛适用性；Hidden Fluid Mechanics (HFM) 框架通

过将 Navier-Stokes 方程嵌入神经网络，可从流场图像中提取速度和压力分布，即使在低分辨率和噪声数据下仍保持鲁棒性。与此同时，PINN 结合自适应残差精炼 (RAR) 方法提升训练效率，DeepXDE 库实现了复杂几何域上的前向和逆问题求解，为科研和教育提供了可操作性工具。未来发展方向包括进一步提升高维复杂系统的训练效率、设计可自动满足物理不变量的网络结构、结合多模态实验数据进行隐式物理规律发现，并拓展至多物理场耦合与实时预测的工程应用场景。整体而言，该前沿不仅展示了深度学习与偏微分方程求解的深度融合，也推动了科学机器学习 (SciML) 在理论研究和工程应用中的快速发展。

值得注意的是，美国工程院院士、布朗大学应用数学系教授 George Karniadakis 参与了全部 4 篇核心论文的研究，George Karniadakis 教授凭借在 PINN 和 PDE 等领域的贡献，先后荣获计算流体动力学奖、美国计算力学协会 J. Tinsley Oden 奖章、SIAM/ACM 计算科学与工程奖以及国际工程科学协会 G. I. Taylor 奖章。在 4 篇核心论文中，被引频次最高的文章 (5303 次) 发表于计算力学领域国际顶级期刊之一《计算物理学杂志》 (Journal of Computational Physics) ，该文提出一种通过将偏微分方程直接嵌入神经网络损失函数的物理引导神经网络，实现训练过程中自动满足物理约束。作者设计了连续时间和离散时间两类模型，兼顾数据分布与时间积分精度，前者提供高效的时空函数逼近，后者支持任意精度的隐式 Runge-Kutta 积分，并在流体力学、量子力学、反应 - 扩散系统及非线性浅水波等问题上验证了 PINN 在正问题与逆问题求解、高维多物理场问题处理中的有效性，为科学机器学习在工程与物理应用中的推广提供了关键工具。

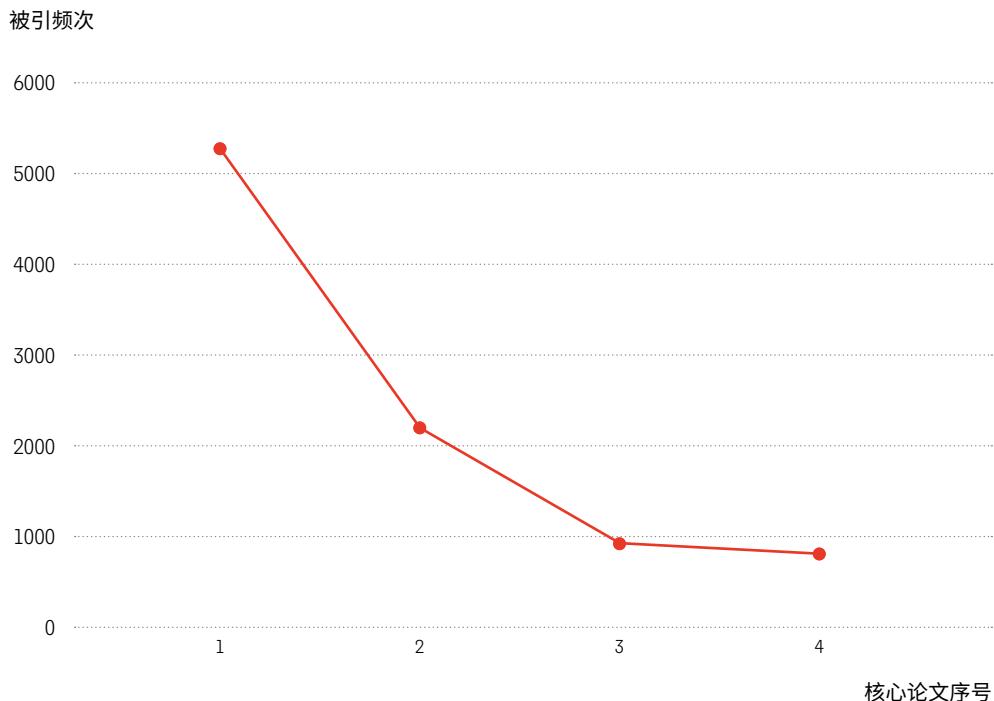


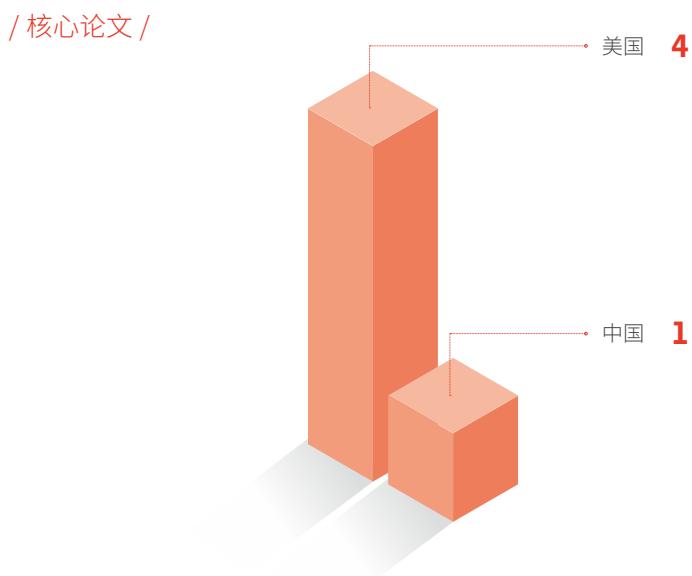
图 26 “物理引导神经网络在偏微分方程求解中的方法与应用”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

从核心论文产出国家和机构来看（表 51），美国占据领先地位，贡献了全部 4 篇核心论文，中国则参与了 1 篇核心论文。在机构层面，美国多个机构表现活跃，尤其是布朗大学产出 4 篇核心论文，宾夕法尼

亚大学和麻省理工学院各产出 2 篇核心论文。此外，美国约翰·霍普金斯大学、西北太平洋国家实验室、英伟达公司、科罗拉多大学博尔德分校，以及中国厦门大学，各贡献 1 篇核心论文。

表 51 “物理引导神经网络在偏微分方程求解中的方法与应用”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	4	100.0%	1	布朗大学	美国	4	100.0%
2	中国	1	25.0%	2	宾夕法尼亚大学	美国	2	50.0%
				2	麻省理工学院	美国	2	50.0%
				4	约翰·霍普金斯大学	美国	1	25.0%
				4	西北太平洋国家实验室	美国	1	25.0%
				4	厦门大学	中国	1	25.0%
				4	英伟达公司	美国	1	25.0%
				4	科罗拉多大学博尔德分校	美国	1	25.0%



施引论文产出方面（表 52），中国是在该前沿领域开展跟踪研究最为活跃的国家，产出施引论文 2643 篇，占比 39.3%。美国以 2338 篇施引论文排名第二，占比 34.8%。其他国家施引论文数量与中国和美国有比较大的差距。在施引论文 Top10 产出机构中，中国是上榜最多的国家，有 5 家机构上榜，中国科学院占

居榜首，是唯一一家施引论文量超过 200 篇的机构，中国的清华大学、北京大学、浙江大学和上海交通大学也表现俱佳。美国有 4 家机构上榜，分别为布朗大学、麻省理工学院、斯坦福大学和普渡大学。法国则有法国国家科学研究中心一家机构上榜，贡献 176 篇施引论文，施引论文数量仅次于中国科学院。

表 52 “物理引导神经网络在偏微分方程求解中的方法与应用”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	2643	39.3%	1	中国科学院	中国	259	3.9%
2	美国	2338	34.8%	2	法国国家科学研究中心	法国	176	2.6%
3	德国	526	7.8%	3	布朗大学	美国	145	2.2%
4	英国	462	6.9%	4	清华大学	中国	143	2.1%
5	法国	294	4.4%	5	麻省理工学院	美国	140	2.1%
6	意大利	241	3.6%	6	北京大学	中国	130	1.9%
7	加拿大	215	3.2%	7	浙江大学	中国	126	1.9%
8	韩国	214	3.2%	8	上海交通大学	中国	120	1.8%
9	印度	168	2.5%	9	斯坦福大学	美国	116	1.7%
10	瑞士	166	2.5%	10	普渡大学	美国	102	1.5%



2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

11

信息科学

# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 信息科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

信息科学领域排名前 10 的热点前沿主要集中于计算机视觉与三维感知、下一代通信与网络、AI 赋能科学研究、医学图像计算和密码学与安全等 5 个方向（表 53）。计算机视觉与三维感知方面的 4 个热点前沿均是首次上榜，包括智能驾驶场景的多模态三维实时目标检测研究、6D 目标姿态估计和跟踪技术、神经渲染和深度伪造的生成与检测、语音驱动的 3D 面部动画和同步技术。下一代通信与网络方面有 2 个热点前沿，其中 6G 语义通信系统首次成为热点前沿；通信感知一体化系统设计与性能优化是去年通信感知一

体化研究主题的深化，研究重点从理论探索转向了实际系统设计与优化。AI 赋能科学研究方面的热点前沿有 2 个，其中，通过图神经网络等技术优化分子表征学习首次上榜；而基于语言模型的蛋白质结构预测与去年机器学习辅助蛋白质定向进化主题相关，技术路径从机器学习转向了语言模型。医学图像计算方面的多模态感知与场景应用，以及密码学与安全方面的零知识证明：隐私、可扩展性和密码学应用，这两个热点前沿均是首次出现。

表 53 信息科学领域 Top 10 热点前沿

序号	研究前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	智能驾驶场景的多模态三维实时目标检测研究	30	3157	2022.3
2	基于深度学习的 6G 语义通信系统研究	26	2343	2022.3
3	通信感知一体化系统设计与性能优化	32	4814	2022.0
4	多模态医学图像分割与特征提取研究	18	4995	2021.9
5	零知识证明：隐私、可扩展性和密码学应用	24	1086	2021.8
6	语音驱动的 3D 面部动画和同步技术	19	2226	2021.7
7	<b>6D 目标姿态估计和跟踪技术</b>	<b>23</b>	<b>1757</b>	<b>2021.7</b>
8	基于语言模型的蛋白质结构预测	31	7424	2021.5
9	<b>神经渲染和深度伪造的生成与检测</b>	<b>20</b>	<b>3764</b>	<b>2021.3</b>
10	通过图神经网络等技术优化分子表征学习	6	1873	2021.2



图 27 信息科学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“6D 目标姿态估计和跟踪技术”

6D 目标姿态估计和跟踪技术旨在精准确定目标物体在三维空间中的位置（3 个平移自由度）和方向（3 个旋转自由度），并在连续的图像帧或视频流中持续跟踪其姿态变化，让计算机像人一样，能在复杂场景里准确知道一个物体“在哪里”以及“怎么摆放”，并且能一直盯着它的位置和摆放角度的变化。6D 目标姿态估计和跟踪技术在诸多领域有着广泛的应用场景。在工业机器人领域，可助力机器人精准抓取和装配零件，提高生产效率与产品质量。在增强现实（AR）领域，能实现虚拟物体与现实场景的精准融合，提升用户沉浸式体验。

随着计算机性能提升和深度学习技术兴起，6D

目标姿态估计和跟踪技术将主要解决遮挡、三维模型与场景融合、动态跟踪与姿态优化、跨模态数据融合等问题，朝着更高精度、更强鲁棒性以及更广泛的应用拓展方向迈进。

热点前沿“6D 目标姿态估计和跟踪技术”包含 23 篇核心论文，主要探讨了从单目 RGB 或 RGBD 图像中精确获取目标 3D 旋转与 3D 平移（即 6D 姿态）的方法、技术突破及实际应用支撑，聚焦解决真实场景中遮挡、光照变化、纹理缺失、类内差异等挑战，以满足机器人操作、自动驾驶、增强现实等领域对目标空间定位的需求。其中，清华大学发表在《IEEE 国际计算机视觉与模式识别会议》（IEEE Conference

on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR) 上的“GDR-Net: Geometry-Guided Direct Regression Network for Monocular 6D Object Pose Estimation”一文被引频次最高, 达 257 次。该文提出了一种名为 GDR-Net (几何引导直接回归网络) 的创新方法, 旨在解决单目 RGB 图像中 6D 物体姿态估计的核心挑战。

针对现有间接方法 (如 PnP/RANSAC) 因非端到端训练、不可微性和计算耗时导致的局限性, 以及直接回归方法在精度上的不足, GDR-Net 通过融合稠密几何特征引导的直接回归策略实现了突破, 为该领域后续研究提供基础。

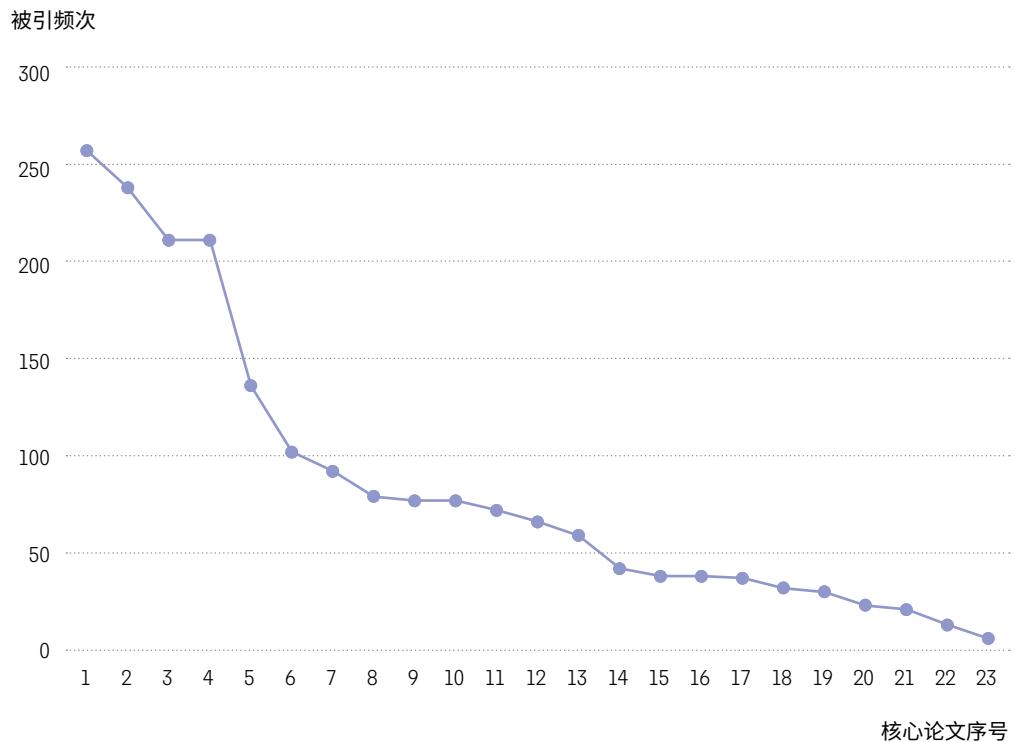


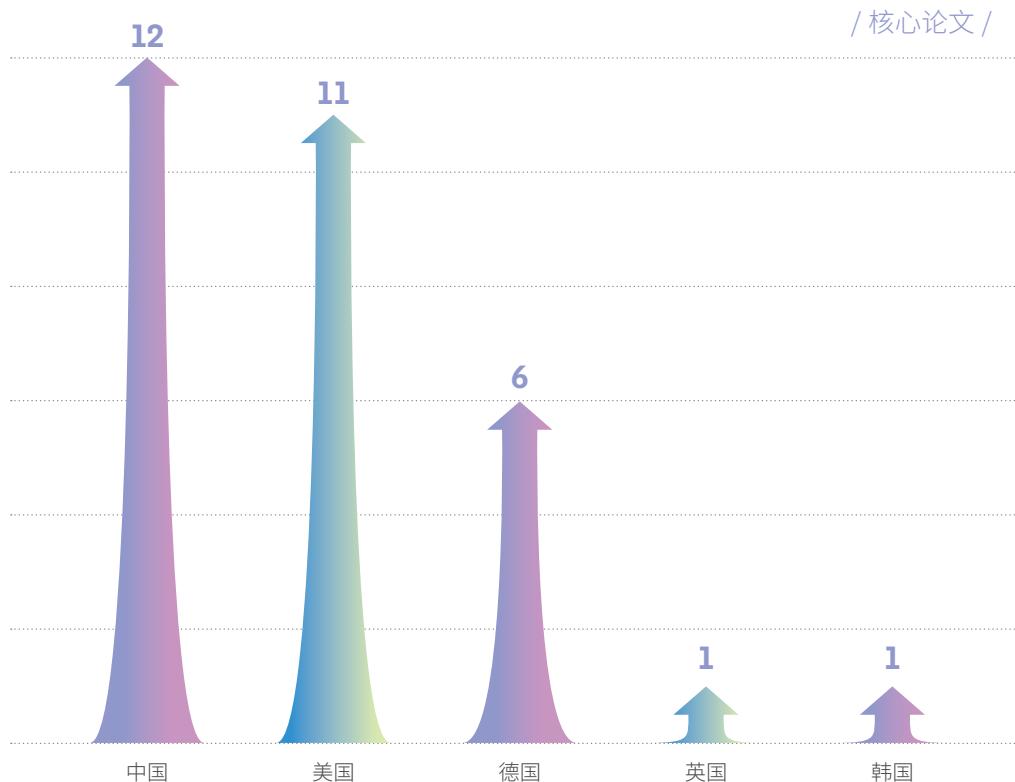
图 28 “6D 目标姿态估计和跟踪技术”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

在该前沿的 23 篇核心论文中, 中国以 12 篇、占比 52.2% 排名第一, 美国以 11 篇、占比 47.8% 紧随其后, 反映了两国在该前沿领域的引领地位。德国排名第三, 贡献了 6 篇核心论文, 也较为活跃。在核心论文产出机构方面, 清华大学表现最为突出, 以 5 篇核心论文、21.7% 的占比排名第一, 快手科技也榜上有名;

美国英伟达公司贡献了 4 篇、排名第二, 体现出企业在该前沿领域的重要作用。美国谷歌公司、新泽西州立罗格斯大学与德国慕尼黑工业大学并列第三, 各贡献 3 篇核心论文。综合可以看出, 中美两国的高校和企业都是该前沿基础研究的重要力量。

表 54 “6D 目标姿态估计和跟踪技术”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	中国	12	52.2%	1	清华大学	中国	5	21.7%
2	美国	11	47.8%	2	英伟达公司	美国	4	17.4%
3	德国	6	26.1%	3	谷歌公司	美国	3	13.0%
4	英国	1	4.3%	3	新泽西州立罗格斯大学	美国	3	13.0%
4	韩国	1	4.3%	3	慕尼黑工业大学	德国	3	13.0%
				6	快手科技公司	中国	2	8.7%
				6	香港科技大学	中国	2	8.7%
				6	香港中文大学	中国	2	8.7%
				6	汉堡大学	德国	2	8.7%



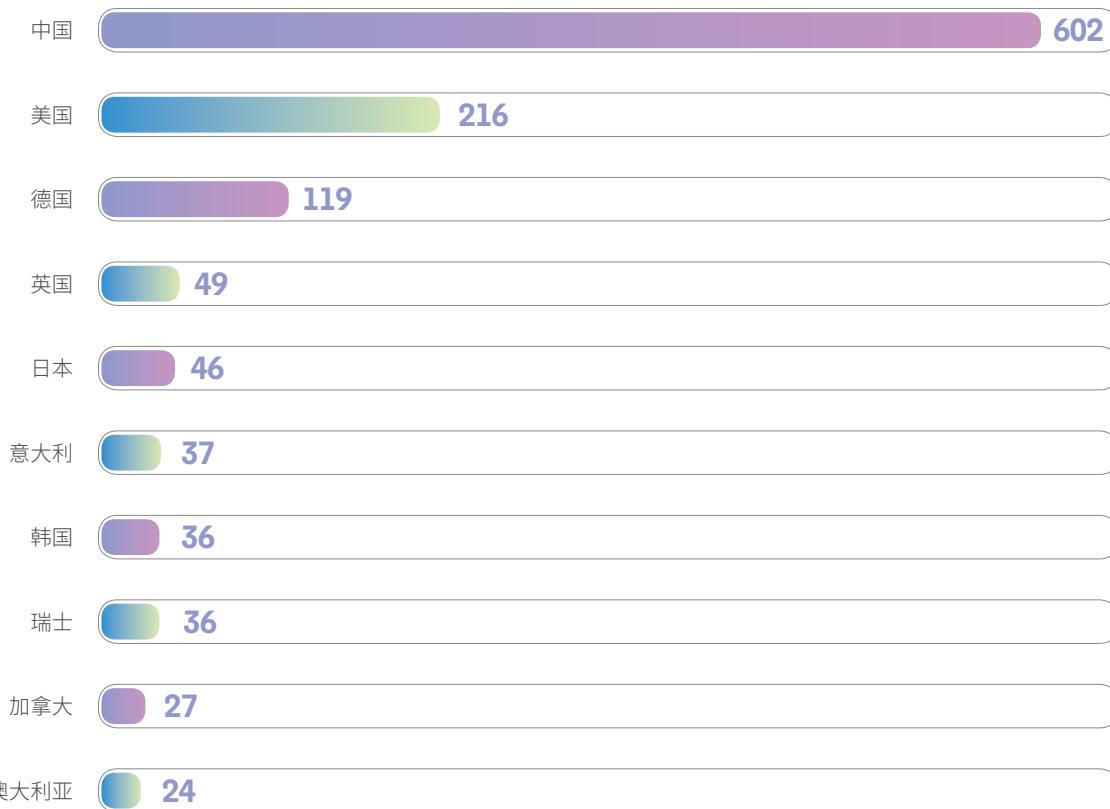
对施引论文的分析显示（表 55），施引论文产出最多的为中国，参与了 602 篇，占比达 55.0%，充分彰显出中国在该技术方向上的研究规模与核心影响力。美国位居其次，贡献了 216 篇施引论文，占比达 19.7%，中美两国有力推动该研究前沿的进一步发展。之后是德国、英国、日本等。从机构上看，德国慕尼

黑工业大学以 63 篇施引论文、5.8% 的占比成为该前沿最活跃的研究机构；中国科学院以 60 篇、5.5% 的占比紧随其后，位列第二，清华大学、浙江大学、上海交通大学分别占据第三至第五名。此外，北京航空航天大学、香港中文大学等中国机构也是该前沿施引论文的主要产出机构。

表 55 “6D 目标姿态估计和跟踪技术”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	602	55.0%	1	慕尼黑工业大学	德国	63	5.8%
2	美国	216	19.7%	2	中国科学院	中国	60	5.5%
3	德国	119	10.9%	3	清华大学	中国	49	4.5%
4	英国	49	4.5%	4	浙江大学	中国	43	3.9%
5	日本	46	4.2%	5	上海交通大学	中国	40	3.7%
6	意大利	37	3.4%	6	北京航空航天大学	中国	32	2.9%
7	韩国	36	3.3%	7	香港中文大学	中国	31	2.8%
7	瑞士	36	3.3%	8	北京理工大学	中国	23	2.1%
9	加拿大	27	2.5%	9	北京大学	中国	21	1.9%
10	澳大利亚	24	2.2%	10	哈尔滨工业大学	中国	20	1.8%
				10	湖南大学	中国	20	1.8%

/ 施引论文 /



### 1.3 重点热点前沿——“神经渲染和深度伪造的生成与检测”

神经渲染和深度伪造的生成与检测是计算机视觉领域一个极具挑战性的前沿方向。一方面，神经渲染技术通过神经网络隐式表征场景，实现了前所未有的逼真视图合成，革新了电影特效、虚拟现实、自动驾驶仿真等领域的数字内容创建方式，具有巨大的正面应用价值。另一方面，这些生成技术一旦被滥用，便会催生出以深度伪造为代表的超逼真伪造内容，对个人隐私、社会信任、新闻真实性和国家安全构成严重威胁。因此，该领域的研究进展呈现出一种“攻防对抗”的态势：在生成侧，研究聚焦于提升渲染的实时性、保真度和效率；在检测侧，则致力于开发更强大的取证算法来识别伪造痕迹。这两方面的并行发展，共同推动了内容生成与安全认证技术的飞速进步。

该热点前沿共有 20 篇核心论文，其中 7 篇论文

关于神经渲染，13 篇论文关于深度伪造及其检测，清晰地展示了该领域“生成”与“检测”的两个核心维度。神经渲染有关论文介绍了神经辐射场（NeRF）、Instant-NGP 的多分辨率哈希编码、3D 高斯溅射等神经场景表示和高效渲染方法，用于创建逼真的视觉内容。深度伪造及其检测相关论文则讨论了这项技术所带来的广泛社会和伦理影响，提出了利用先进深度学习架构（如时空 Transformer、多尺度分析）进行多模态、细粒度伪造检测的技术方案。其中，被引频次最高（1005 次）的是 2022 年发表于 ACM 通讯 (Communications of the Acm) 上的论文 “NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis”，此文首次提出的 NeRF 彻底改变了计算机视觉，允许隐式的、基于神经网络的场景表示和新颖的视图合成。

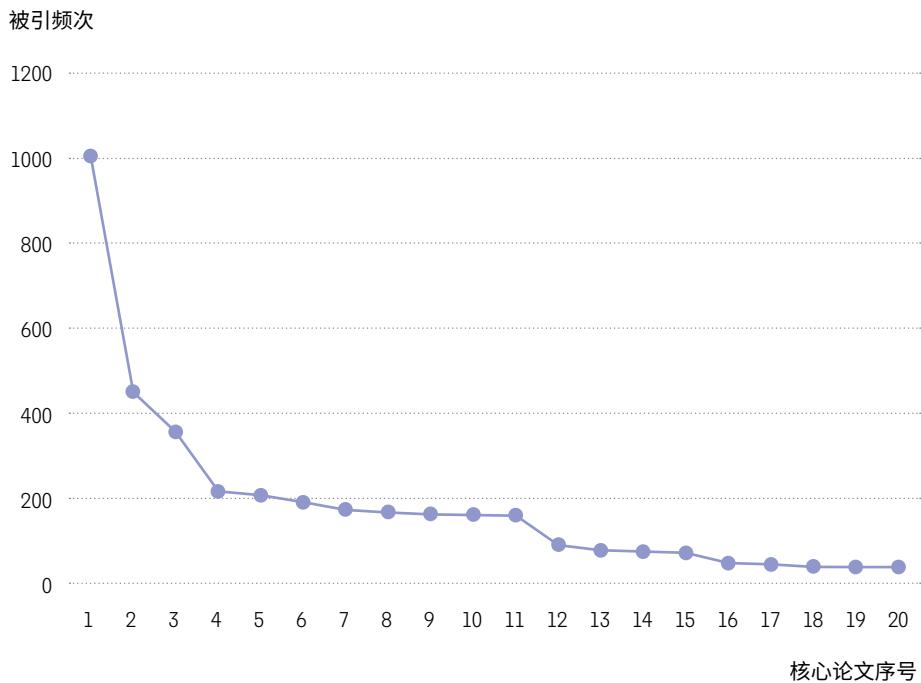


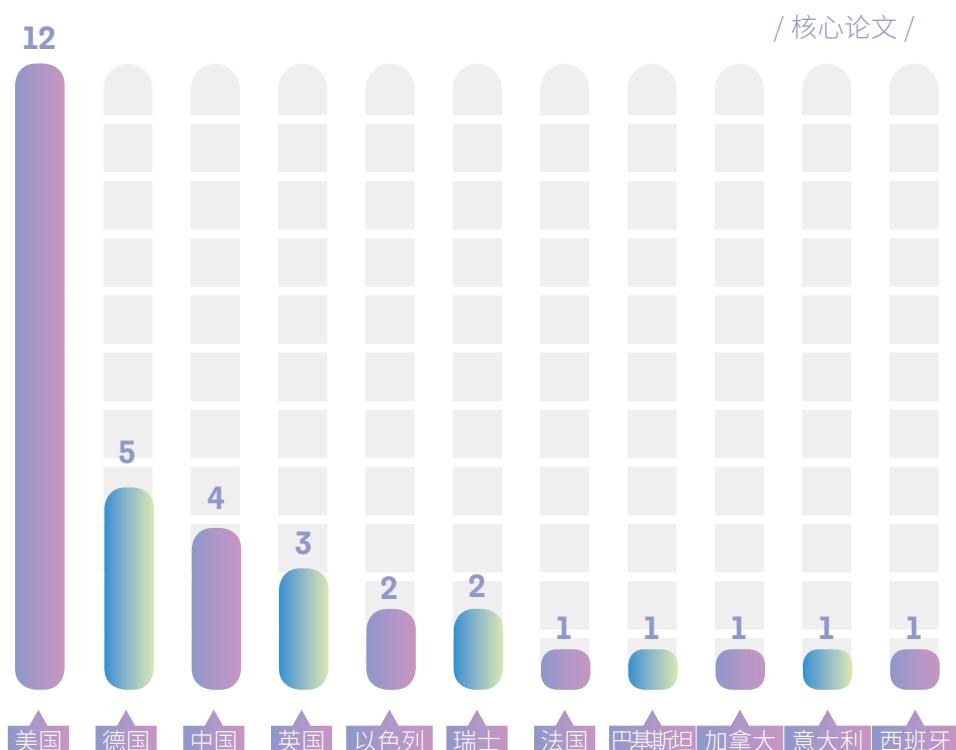
图 29 “神经渲染和深度伪造的生成与检测”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

核心论文 Top 产出国家和机构中（表 56），美国贡献了 60%、共 12 篇论文；德国和中国虽分列第二、三位，但论文数量上与美国还有较大差距。麻省理工学院、中国科学院和慕尼黑大学均贡献 3 篇论文，在

核心论文 Top 机构中并列第一，谷歌公司、斯坦福大学、德国马普学会和加州大学的两所分校也因贡献 2 篇论文上榜。上述机构均是国际知名的研究性大学和科研机构，足见该研究主题的前沿性。

表 56 “神经渲染和深度伪造的生成与检测”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	12	60.0%	1	麻省理工学院	美国	3	15.0%
2	德国	5	25.0%	1	中国科学院	中国	3	15.0%
3	中国	4	20.0%	1	慕尼黑工业大学	德国	3	15.0%
4	英国	3	15.0%	4	谷歌公司	美国	2	10.0%
5	以色列	2	10.0%	4	斯坦福大学	美国	2	10.0%
5	瑞士	2	10.0%	4	马普学会	德国	2	10.0%
7	法国	1	5.0%	4	加州大学伯克利分校	美国	2	10.0%
7	巴基斯坦	1	5.0%	4	加州大学圣迭戈分校	美国	2	10.0%
7	加拿大	1	5.0%					
7	意大利	1	5.0%					
7	西班牙	1	5.0%					

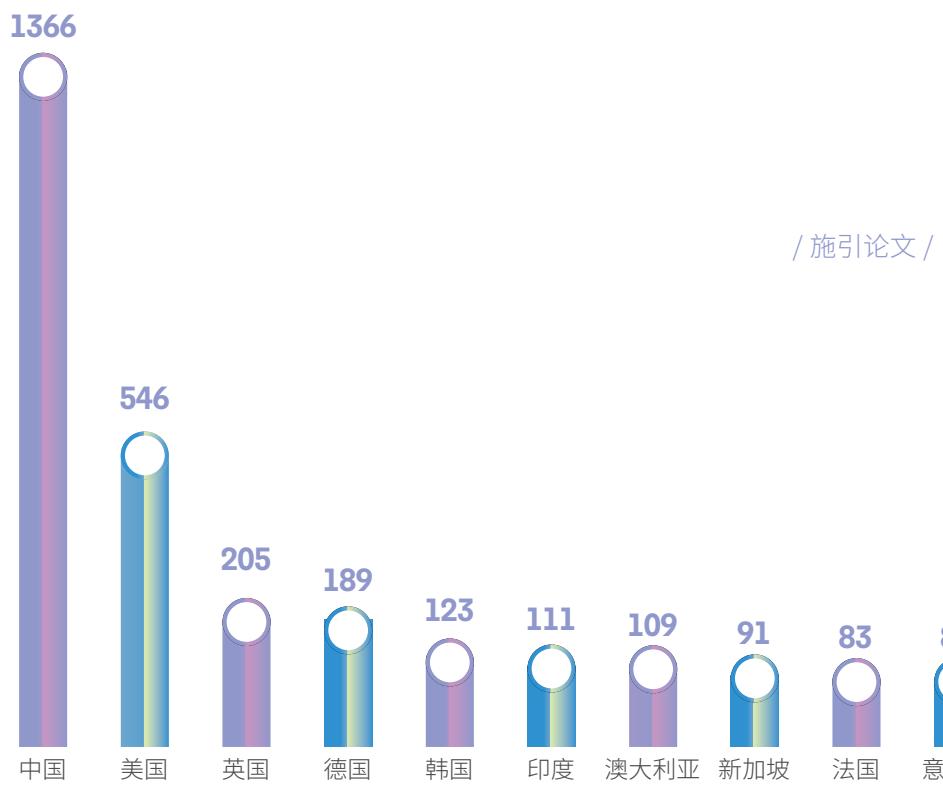


在施引论文的 Top10 产出国家和机构中（表 57），中国遥遥领先于其他国家，表明中国在此研究方向上持续保持热情。美国位列第二，英国和德国在施引论文体量上形成第三梯队。在施引论文产出机构层面，中国有 7 家机构上榜且均为知名科研机构和高

校。中国科学院贡献了 187 篇论文，名列第一；清华大学、上海交通大学和浙江大学在施引论文体量上处于第二梯队。马普学会和斯坦福大学在核心论文和施引论文中均有所表现，表明在此方向有持续的产出。

表 57 “神经渲染技术和深度伪造检测与对抗”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	1366	51.3%	1	中国科学院	中国	187	7.0%
2	美国	546	20.5%	2	清华大学	中国	77	2.9%
3	英国	205	7.7%	3	上海交通大学	中国	70	2.6%
4	德国	189	7.1%	4	浙江大学	中国	69	2.6%
5	韩国	123	4.6%	5	南洋理工大学	新加坡	55	2.1%
6	印度	111	4.2%	6	北京航空航天大学	中国	54	2.0%
7	澳大利亚	109	4.1%	7	马普学会	德国	46	1.7%
8	新加坡	91	3.4%	8	斯坦福大学	美国	43	1.6%
9	法国	83	3.1%	8	中国科学技术大学	中国	43	1.6%
9	意大利	83	3.1%	8	武汉大学	中国	43	1.6%



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

信息科学领域有 1 个方向入选新兴前沿，是“可移动天线在智能无线通信中的性能优化研究”（表 58）。

表 58 信息科学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	可移动天线在智能无线通信中的性能优化研究	9	265	2023.8

### 2.2 重点新兴前沿——“可移动天线在智能无线通信中的性能优化研究”

可移动天线在智能无线通信中的性能优化研究是针对具备位置、角度等可调节能力的天线，通过技术手段优化其在智能无线通信场景中的通信质量、覆盖范围、抗干扰能力等关键性能的研究。其应用场景广泛且具有前瞻性，在智能交通领域，可用于车载天线的动态调整，使高速行驶的车辆始终保持与基站的稳定通信，为自动驾驶的车路协同提供可靠连接；在工业互联网中，通过优化可移动天线的覆盖范围和信号强度，可实现工厂内海量设备的低时延、高可靠数据传输；在应急通信场景下，可快速调整可移动天线姿态以建立临时通信链路，保障灾害现场的信息互通。

美国斯坦福大学的 Andrea Goldsmith 教授团队从理论层面构建了可移动天线的信道容量模型，揭示了天线移动自由度与通信性能的量化关系，为性能优化

算法设计提供了重要理论支撑。华为公司提出了基于智能波束赋形的可移动天线动态调整方案，通过实时感知用户位置和信道状态，驱动天线阵列的机械转动与电磁参数协同优化，在 6G 试验网络中实现了移动场景下通信速率提升 30% 以上的成果。

当前，该研究仍面临诸多挑战：一是天线移动机构的小型化与可靠性难以平衡，频繁调整易导致机械损耗；二是动态场景下的信道预测精度不足，影响优化算法的实时性；三是多天线协同优化的复杂度高，难以适应大规模通信网络。未来，随着新材料、人工智能与通信技术的深度融合，可移动天线的性能优化将朝着更智能、高效、可靠的方向发展，为智能无线通信的升级提供核心技术支撑。

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

12

经济学、心理学  
及其他社会科学

100,000,000

100,000,000



# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 热点前沿呈现三大核心趋势：一是数字技术变革推动社会经济转型，重塑产业形态、就业和消费市场；二是可持续发展相关研究成为核心议题，聚焦绿色创新、气候风险与能源转型；三是人类健康优化与认知管理更趋技术化与个性化。

在数字技术变革与社会经济转型方面共有 3 个热点前沿，均以数字技术赋能社会经济场景为核心，体现数字对产业、消费与就业的多维度重塑：热点前沿“元宇宙背景下文旅数字化转型发展研究”将元宇宙等数字技术应用于文旅产业转型研究；“机器人发展与就业转型”和“直播电商平台对消费者的影响分析”热点前沿，研究工业机器人技术对就业市场结构、劳动者适配性的影响。

在可持续发展与风险管理方面共有 4 个热点前沿，围绕绿色发展与风险管理，形成从绿色技术支持到市场影响、再到风险把控的研究链条：“科技金融与绿色创新”和“能源转型与碳排放”2 个前沿，将金融工具、转型策略与绿色发展目标相结合，为绿色转型提供技术与路径支撑；热点前沿“气候风险与 ESG 因素对市场的影响”，从市场视角研究气候风险与 ESG 因素对金融市场、企业发展的作用机制，衔接绿色发展与市场反馈；“基于分位数连通性分析的风险管理研究”热点前沿，则从方法创新角度，为金融市场极端风险管理提供技术支持。

人类健康优化及认知管理方面共有 3 个热点前沿，关注技术冲击与健康干预，体现社会科学的问题导向与人文关怀：“个性化与数据驱动的心理治疗研究”将大数据技术应用于心理治疗领域，探索个性化干预模式；“大规模神经影像在个体行为差异研究中的应用”和“数字化时代认知负荷理论的应用拓展”2 个热点前沿，则从认知科学视角，分别借助神经影像技术解析个体行为的神经机制、探索认知理论在数字化场景的实践应用，共同推动认知管理的技术化与场景化落地。

表 56 经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 热点前沿

序号	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	元宇宙背景下文旅数字化转型发展研究	12	1950	2022.4
2	科技金融与绿色创新	19	2953	2021.8
3	机器人发展与就业转型	26	4250	2021.7
4	个性化与数据驱动的心理治疗研究	19	2018	2021.7
5	大规模神经影像在个体行为差异研究中的应用	7	1673	2021.7
6	能源转型与碳排放	25	6198	2021.6
7	基于分位数连通性分析的风险管理研究	5	1035	2021.6
8	气候风险与 ESG 因素对市场的影响	34	7349	2021.4
9	数字化时代认知负荷理论的应用拓展	6	991	2021.3
10	直播电商平台对消费者的影响分析	22	3940	2021.1

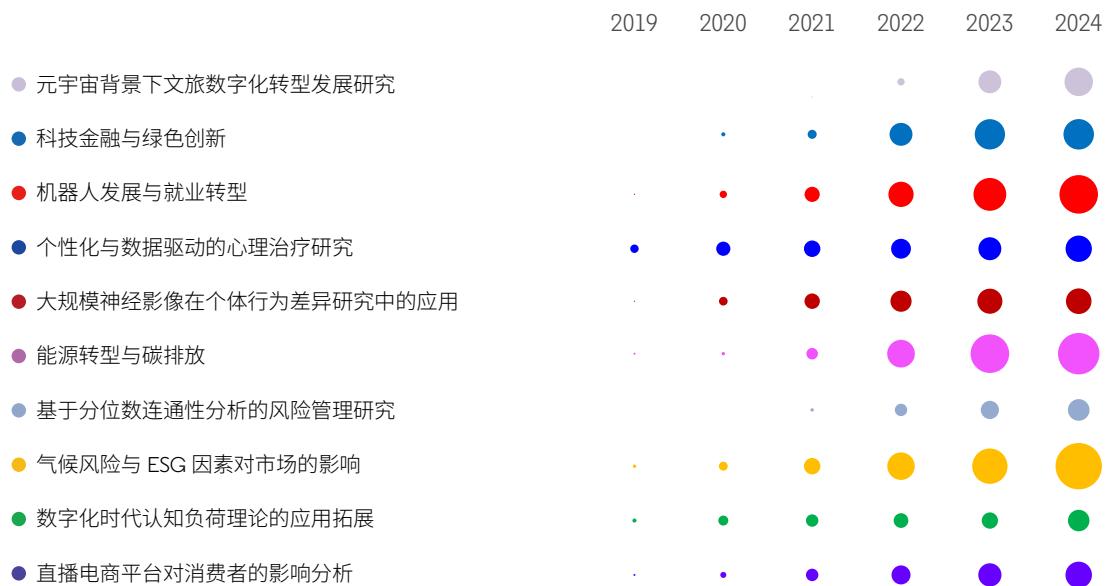


图 29 经济学、心理学及其他社会科学领域 Top10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“机器人发展与就业转型”

自凯恩斯在 20 世纪初提出“技术性失业”的担忧以来，自动化是否会大规模取代人类劳动一直是经济学中的重要议题。一方面，机器人通过自动化任务，直接替代了原本由工人从事的岗位（替代效应）；另一方面，生产成本的降低和效率的提升，也可能催生新的劳动力需求（生产率效应）。伴随新一轮科技革命与产业变革浪潮，机器人作为先进制造技术的典型代表，正以前所未有的速度在全球制造业领域广泛渗透。为此，“机器人发展与就业转型”再度吸引众多学者从技术演进、就业结构变动、劳动者技能适配、社会经济发展变革等多维度进行深入剖析。

该热点前沿共计 26 篇核心论文，其中 18 篇围绕就业市场结构影响展开研究，涵盖行业岗位增减、不同技能劳动力就业变化等；8 篇聚焦工业机器人应用与产业绿色发展问题，从生产效率、能源消耗、优化生产流程等维度进行了相关研究。被引频次最高的论文由麻省理工学院的诺贝尔经济学奖获得者 Daron Acemoglu 教授与波士顿大学的 Pascual Restrepo 教授共同完成，发表于《政治经济学杂志》（Journal of Political Economy），被引频次 962 次。作者利用“通勤区”（Commuting Zones）层面的数据，将行业机器人渗透率与本地就业分布结合，构建 Bartik-style 暴露度指标，实证检验了机器人对就业和工资的负面影响。

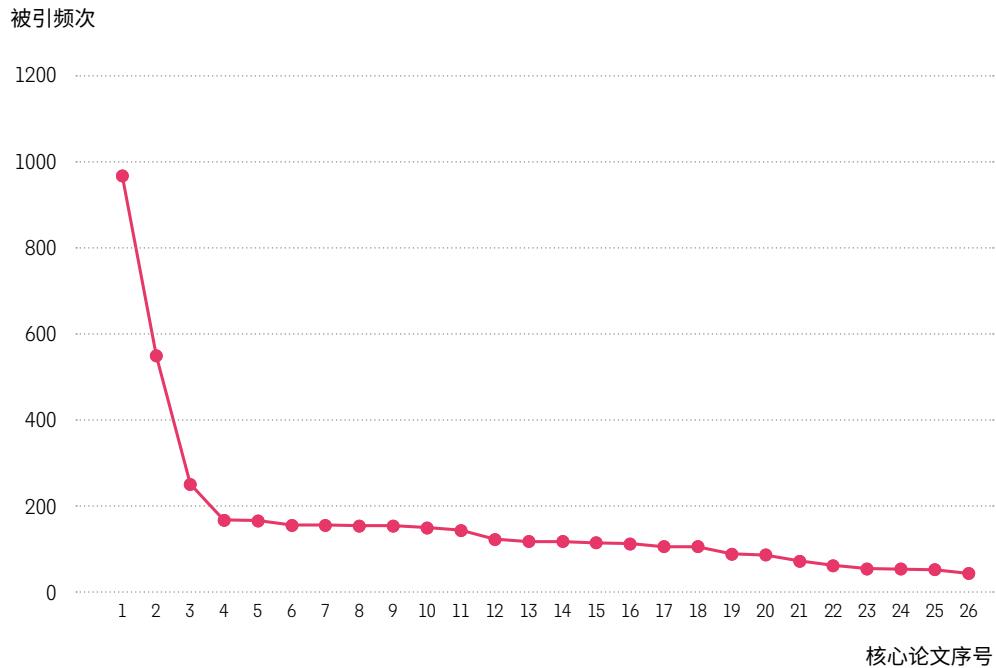


图 30 “机器人发展与就业转型”研究前沿核心论文被引频次分布曲线

从核心论文的国家 / 地区与机构分布来看，中国以 20 篇核心论文占比 76.9%，位居首位，美国表现也较为活跃。从机构层面看，南昌大学表现最为突出，

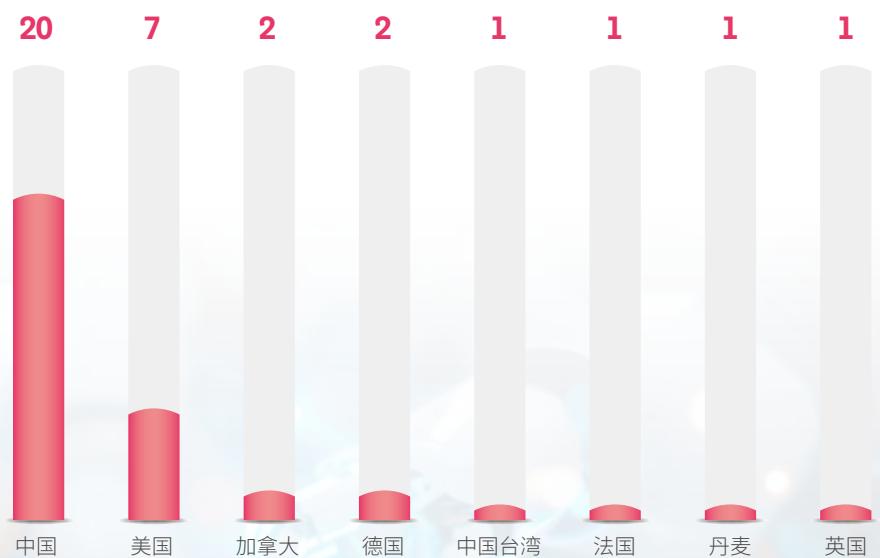
贡献了 9 篇核心论文，占比 34.6%。此外，麻省理工学院、波士顿大学、江苏大学各发表 3 篇核心论文。



表 57 “机器人发展与就业转型”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家 / 地区和机构

排名	国家 / 地区	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	中国	20	76.9%	1	南昌大学	中国	9	34.6%
2	美国	7	26.9%	2	麻省理工学院	美国	3	11.5%
3	加拿大	2	7.7%	2	波士顿大学	美国	3	11.5%
3	德国	2	7.7%	2	江苏大学	中国	3	11.5%
5	中国台湾	1	3.8%	2	合肥工业大学	中国	2	7.7%
5	法国	1	3.8%	2	西南财经大学	中国	2	7.7%
5	丹麦	1	3.8%	2	南京信息工程大学	中国	2	7.7%
5	英国	1	3.8%	8	南京审计大学	中国	2	7.7%
				8	南昌理工学院	中国	2	7.7%
				8	武汉大学	中国	2	7.7%

/ 核心论文 /

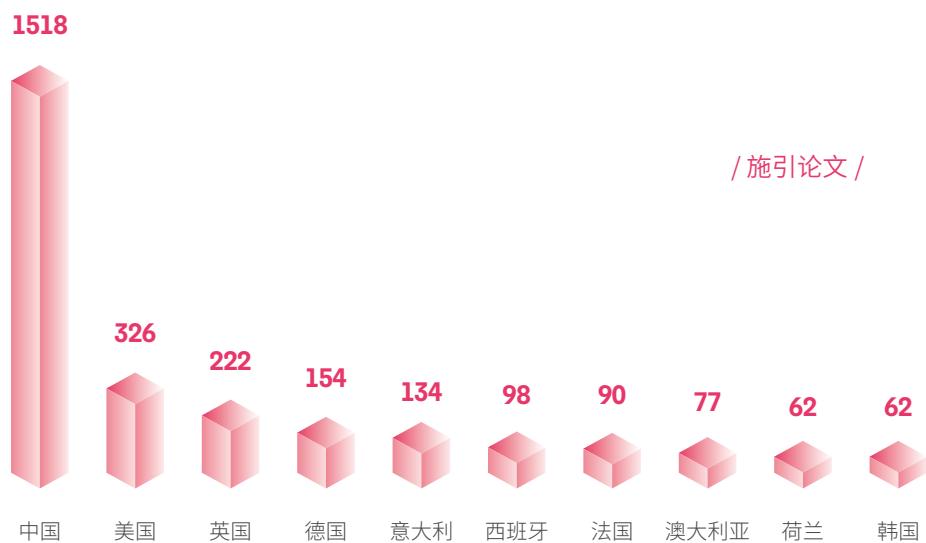


从施引论文来看，中国以 1518 篇施引论文、60.3% 的占比远超其他国家，反映了对该研究方向的高度关注；美国以 326 篇施引论文、13.0% 的占比位列第二，英国、德国分别位列第三、第四位，意大利、西班牙、法国等国家也有一定数量的施引论文产出，

体现出该热点前沿在全球范围内的广泛学术关注度。在施引论文 Top10 产出机构中，中国有 8 家机构入选，其中核心论文贡献第一的南昌大学仍是施引论文产出最多的机构。德国劳动经济研究所和黎巴嫩美国大学分别排在第六和并列第八。

表 58 “机器人发展与就业转型”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	1518	60.3%	1	南昌大学	中国	150	6.0%
2	美国	326	13.0%	2	西南财经大学	中国	52	2.1%
3	英国	222	8.8%	3	厦门大学	中国	46	1.8%
4	德国	154	6.1%	4	西安交通大学	中国	43	1.7%
5	意大利	134	5.3%	5	四川大学	中国	40	1.6%
6	西班牙	98	3.9%	6	劳动经济研究所	德国	39	1.6%
7	法国	90	3.6%	7	北京大学	中国	38	1.5%
8	澳大利亚	77	3.1%	8	中央财经大学	中国	37	1.5%
9	荷兰	62	2.5%	8	湖南大学	中国	37	1.5%
9	韩国	62	2.5%	8	黎巴嫩美国大学	黎巴嫩	37	1.5%



### 1.3 重点热点前沿——“个性化与数据驱动的心理治疗研究”

随着社会的发展和人们生活水平的提高，个体对个性化服务的需求日益强烈。在心理治疗领域，越来越多的人希望获得符合自身特点的定制化心理支持，以更好地解决自己的心理问题，这推动了个性化心理治疗研究的发展。同时，大数据、人工智能、机器学习等数据驱动技术的快速发展，为心理治疗研究提供了强大的工具和手段，助力更高效地收集、处理和分析海量的心理数据，挖掘出人类行为和心理的潜在规律，从而实现更精准的个性化治疗。为此，“个性化与数据驱动的心理治疗”受到越来越多的关注与研究。

该热点前沿共计 19 篇核心论文，聚焦心理治疗领域的理论创新、方法优化与实践应用，体现了当前心理治疗向个性化、数据化、循证化发展的核心趋

势。其中，基于过程的治疗（Process-Based Therapy）以及接纳与承诺疗法（ACT）的理论与实践研究共计 12 篇，包括本热点被引频次最高的论文 “The future of intervention science: Process-based therapy”（被引 436 次），该论文由美国行为认知治疗协会（ABCT）前任主席霍夫曼（S.G. Hofmann）和美国认知治疗学院（ACT）联合创始人海斯（S.C. Hayes）合作发表于《临床心理科学》（Clinical Psychological Science），揭示了未来心理干预科学将聚焦“过程导向”的核心趋势，研究强调治疗需结合个体心理机制与动态变化过程，而非单纯依赖固定治疗模式。此外，关于数据驱动与测量的治疗优化研究共 7 篇核心论文，聚焦测量的治疗（Measurement-Based Care）、常规结局监测（ROM）及进展反馈的应用价值。

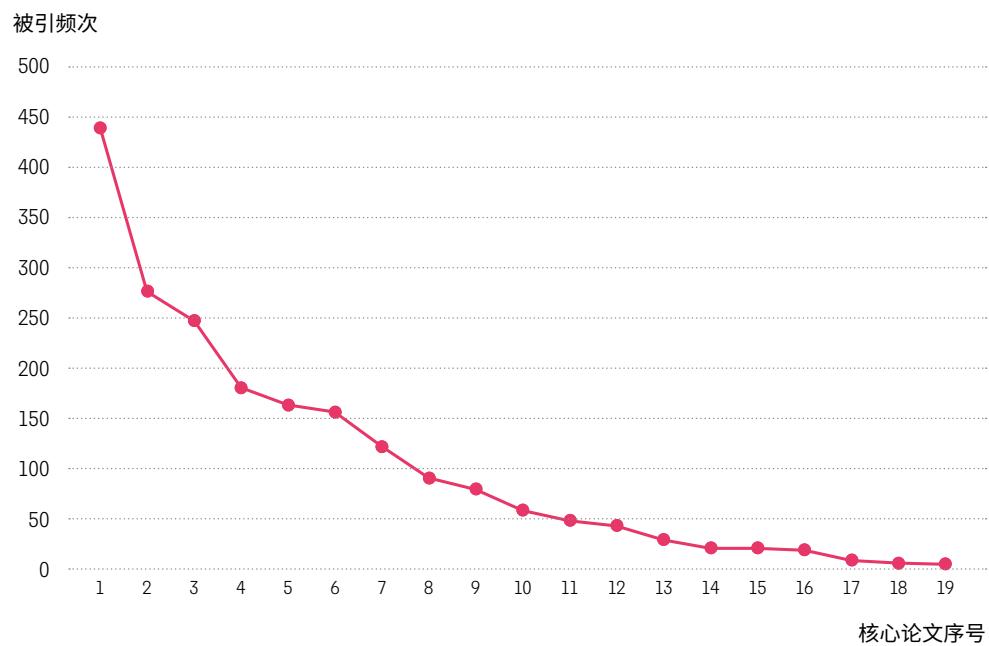


图 31 “个性化与数据驱动的心理治疗研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

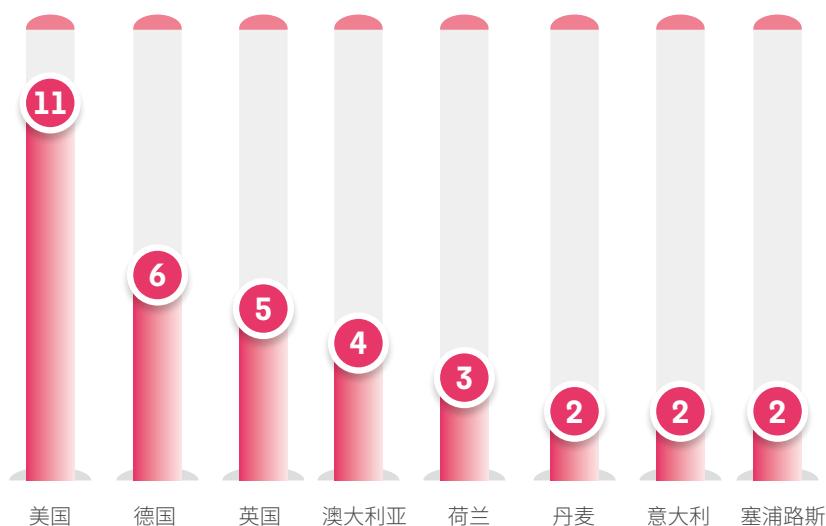
该热点前沿核心论文中有 11 篇来源于美国，占比 57.9%，位居各国首位；德国（6 篇，31.6%）、英国（5 篇，26.3%）、澳大利亚（4 篇，21.1%）紧随其后，构成核心研究力量。荷兰、丹麦、意大利、塞浦路斯等国家也有重要成果产出，体现了研究的国际化分布。

在核心论文机构列表中（表 59），来自美国的机构共计 4 所，其中美国内华达大学雷诺分校表现最为突出，贡献 6 篇核心论文；澳大利亚、英国、德国、荷兰、塞浦路斯等国的机构也有相应的贡献。

表 59 “个性化与数据驱动的心理治疗研究”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	11	57.9%	1	内华达大学雷诺分校	美国	6	31.6%
2	德国	6	31.6%	2	澳大利亚凯斯林大学	澳大利亚	4	21.1%
3	英国	5	26.3%	2	谢菲尔德大学	英国	4	21.1%
4	澳大利亚	4	21.1%	2	波士顿大学	美国	4	21.1%
5	荷兰	3	15.8%	5	马尔堡 - 菲利普大学	德国	3	15.8%
6	丹麦	2	10.5%	5	犹他州立大学	美国	3	15.8%
6	意大利	2	10.5%	5	特里尔大学	德国	3	15.8%
6	塞浦路斯	2	10.5%	5	莱顿大学	荷兰	3	15.8%
				9	范德比尔特大学	美国	2	10.5%
				9	塞浦路斯大学	塞浦路斯	2	10.5%

/ 核心论文 /

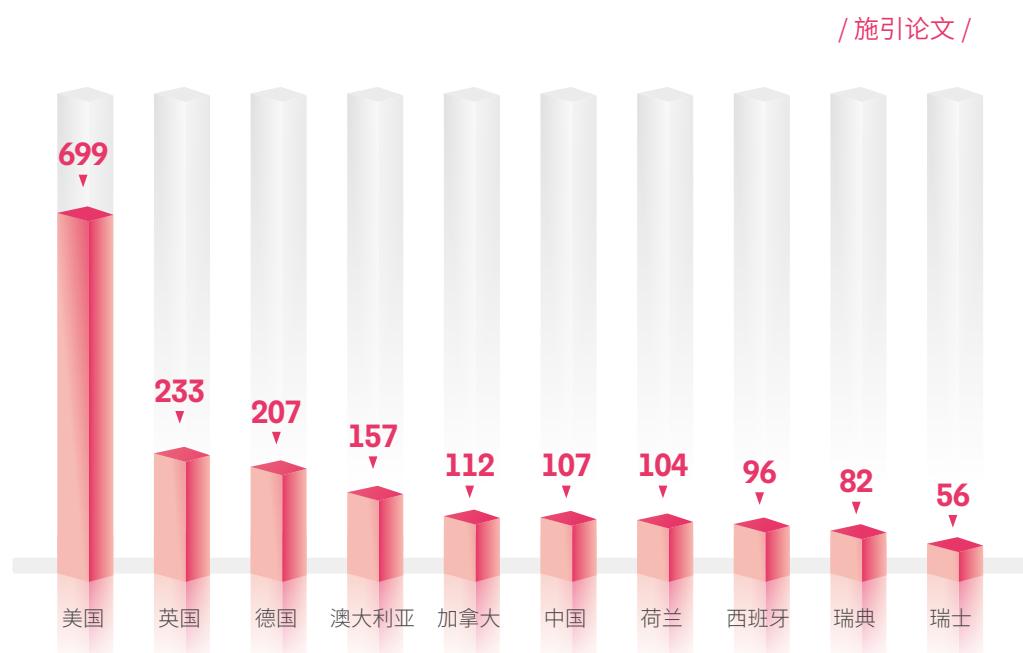


从施引论文来看，美国以 699 篇施引论文位居首位；英国（233 篇，15.0%）、德国（207 篇，13.3%）、澳大利亚（157 篇，10.1%）位列第二至四位；中国以 107 篇施引论文、6.9% 的占比排名第六。在施

引论文 Top10 机构中，美国有 6 家机构入选，其中美国哈佛大学以 74 篇施引论文位列第一；其次是德国特里尔大学；德国马尔堡 - 菲利普大学、美国内华达大学雷诺分校、美国犹他州立大学并列第三。

表 60 “个性化与数据驱动的心理治疗研究”研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	美国	699	45.0%	1	哈佛大学	美国	74	4.8%
2	英国	233	15.0%	2	特里尔大学	德国	51	3.3%
3	德国	207	13.3%	3	马尔堡 - 菲利普大学	德国	46	3.0%
4	澳大利亚	157	10.1%	3	内华达大学雷诺分校	美国	46	3.0%
5	加拿大	112	7.2%	3	犹他州立大学	美国	46	3.0%
6	中国	107	6.9%	6	乌普萨拉大学	瑞典	45	2.9%
7	荷兰	104	6.7%	7	耶鲁大学	美国	44	2.8%
8	西班牙	96	6.2%	8	波士顿大学	美国	40	2.6%
9	瑞典	82	5.3%	9	伦敦大学国王学院	英国	37	2.4%
10	瑞士	56	3.6%	10	华盛顿大学	美国	35	2.3%



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

经济学、心理学及其他社会科学领域有1项研究入选新兴前沿，即“生成式人工智能在商业领域的应用实践与风险治理”，重点解读如下。

表 61 经济学、心理学及其他社会科学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	生成式人工智能在商业领域的应用实践与风险治理	8	166	2023.8

### 2.2 重点新兴前沿——“生成式人工智能在商业领域的应用实践与风险治理”

随着人工智能技术的飞速迭代，生成式人工智能在商业领域的渗透正成为驱动产业变革的核心力量。这项技术凭借其高效的内容生成、智能交互与知识整合能力，已在品牌建设、客户服务、创新研发等场景中掀起变革，以基于大规模语言模型与深度学习算法的生成式聊天机器人为例，不仅能快速响应用户需求、优化服务流程，还能打造差异化竞争优势，推动传统商业模式向智能化转型。在此背景下，研究者们正积极挖掘生成式AI在提高运营效率、促进人机协作方面的潜能，同时对技术应用可能引发的认知风险、伦理问题保持高度关注。

相关研究主要可概括为两大方面：一是从技术应用维度探索AI在不同场景中的实践路径，包括利用生成式AI构建品牌竞争优势、优化客户服务体系、制定高效创新策略等，例如通过改进AI提示词提高人机知识共建效率，借助对话式AI革新知识产业运作模式，

或是以生成式AI为辅助工具，为需求方提供多样化的解决方案。

二是从风险管理维度审视技术应用的潜在挑战，包括如何应对生成式AI带来的认知风险与悖论问题，如生成式人工智能可能产生的“机器废话”导致的认知偏差风险、AI赋能客户服务时面临的效率与体验失衡悖论、技术应用过程中的信息真实性核查难题，以及人机协作中知识所有权与责任界定的模糊性等。

生成式AI技术在商业领域的应用及影响是一个兼具潜力与挑战的研究主题。尽管生成式AI是提升商业效率、推动产业创新的强大工具，在品牌建设、客户服务、知识管理等领域的应用前景广阔，但不可否认的是，当前其在认知风险管控、伦理边界界定、技术应用规范等方面仍存在局限性，相关问题需要学界与业界继续共同探索。

# 13

## 附录

研究前沿综述：寻找科学的结构

◎ 作者：David Pendlebury

Eugene Garfield 1955 年第一次提出科学引文索引概念之际，即强调了引文索引区别于传统学科分类索引的几点优势<sup>[1]</sup>。因为引文索引会对每一篇文章的参考文献进行标引，检索者就可以从一些已知的论文出发，去跟踪新近出版的引用了这些已知论文的论文。此外，无论是向前检索施引论文还是向后回溯检索被引参考文献，引文索引都是高产与高效的。因为引文索引是基于研究人员自身的明智的判断，并反映在他们文章的参考文献中，而编目人员对出版物的内容并不如作者熟悉只靠选择标引词来做索引。Garfield 将这些作者称作“引文索引部队”，同时他认为这种索引是一张“创意联盟索引”。他认为引文是各种思想、概念、主题、方法的标志：“引文索引可以精确地、毫不模糊地呈现主题，不需要过多的解释，并对术语的变化具备免疫力<sup>[2]</sup>。”除此之外，引文索引具有跨学科属性，打破了来源文献覆盖范围的局限性。引文所呈现出的联系不局限于一个或几个领域——这种联系遍布整个研究世界。对科学而言，自从学科交叉被公认为研究发现的沃土，引文索引便呈现出独特的优势。诺贝尔奖得主 Joshua Lederberg 是 Garfield 这一思想较早的支持者，他在自己的遗传学研究领域与生物化学、统计学、农业、医学的交叉互动中受益匪浅。

虽然 Science Citation Index（现在的 Web of Science）经过很多年才被图书情报人员以及学术圈完全认可，但是引文索引理念的影响力以及它在操作过程中产生的实质作用是无法被否认的。今年是 Genetics Citation Index 问世 50 周年，是于次年实现商业化的 Science Citation Index 的原型<sup>[3]</sup>。

虽然 Science Citation Index 的主要用途是信息检索，但是从其诞生之初，Garfield 就很清楚他的数据可以被利用来分析科学研究本身。首先，他意识到论文的被引频次可以界定“影响力”显著的论文，而这些高被引论文的聚类分析结果可以指向具体的专业领域。不仅如此，他还深刻理解到大量的论文之间的引用与被引用揭示了科学的结构，虽然它极其复杂。他发表于 1963 年的一篇论文“Citation Indexes for Sociological and Historical Research”，论述了利用引文分析客观定义一个研究领域的方法<sup>[4]</sup>。这篇文章背后的逻辑与利用引文索引进行信息检索的逻辑如出一辙：引文不仅仅体现了智力活动之间的相互连接，还体现了研究者社会属性的相互联系，它是研究人员做出的明智判断，反映了学术界学者行为的高度自治与自律。Garfield 在 1964 年与同事 Irving H. Sher 及 Richard J. Torpie 第一次将引文关系佐证下指向的具备

影响力的相关理论按时期进行线性描述，制作出 DNA 的发现过程及其结构研究的一幅科学历史脉络图<sup>[5]</sup>。Garfield 清楚地看到引文数据是呈现科学结构的最好素材。到目前为止，除了利用引文数据绘制了特定研究领域的历史图谱外，尚未出现一幅展示更为宏大的科学结构的图谱。

在这个领域 Garfield 并不孤单。同期，物理学、科学史学家 Derek J. de Solla Price 也在试图探寻科学的研究的本质与结构。作为耶鲁大学的教授，他首先使用科学计量方法对科学研究活动进行了测量，并且分别于 1961 年与 1963 年出版了两本颇具影响的书，证明了为什么 17 世纪以来无论是研究人员数量还是学术出版数量都呈现指数增长态势<sup>[6,7]</sup>。但是在他的工作中鲜有对科学研究活动本身的统计分析，因为在不知疲倦的探究之路上，获取、质询、解读研究活动的想法还没有提上日程。Price 与 Garfield 正是在此时相识了。Price，这位裁缝的儿子，收到了来自 Garfield 的数据，他这样描述当时的情景：“我从 ISI 计算机房的剪裁板上取得了这些数据”<sup>[8]</sup>。1965 年，Price 发表了“科学论文网络”一文，文中利用了大量的引文分析数据描述他所定义的“科学研究前沿”的本质<sup>[9]</sup>。之前，他使用“研究前沿”这个词语时采

用的是其字面意思，即包括那些卓越科学家在科学的最前沿所进行的领先研究。但是在这篇论文中，他以 N- 射线研究为例（该研究领域的生命周期很短），基于按时间顺序排列的论文及其互引模式构成的网络，从出版物的密度以及不同时期活跃度的角度对研究前沿进行了描述。Price 观察到研究前沿是建立在新近发表的“高密度”论文上，这些论文之间呈现出联系紧密的网状关系图。

“研究前沿从来都不是像编织那样一行一行编出来的。相反，它常常被漏针编织成小块儿或者小条儿。这些‘条’被客观描述成‘主题’，对‘主题’的描述虽然随着时间推移会发生巨大变化，但是作为智力活动的内在含义保持了相对稳定性。如果有人想探寻这些‘条’的本质，也许就会指向一种勾勒当前科学论文‘地形图’的方法。这种‘地形图’形成过程中，人们可以通过期刊、乃至国家、作者或单篇论文在地图中所占据的位置以及在‘条’中的战略中心地位来识别它们的共同及各自相对的重要性”<sup>[10]</sup>。

时间到了 1972 年，年轻的科学史学者 Henry Small 离开位于纽约的美国物理学会，加入费城的美国科学信息研究所，他加入的最初动机是希望可以利用 Science Citation

Index 的数据以及题名和关键词的价值。但是很快他就调整了方向，把注意力从“词”转向了“引文”，这种转变背后的动机与 Garfield 和 Price 不谋而合：引文的力量及其发展潜力。1973 年，Small 发表了一篇论文，其开创性程度可与 Garfield 1955 年提出科学引文索引的论文相媲美。这篇题为“*Cocitation in the scientific literature: A new measure of relationship between two documents*”的论文介绍了一种新的研究方法——“共被引分析”，将描述科学学科结构的研究带入了一个新纪元<sup>[11]</sup>。Small 利用两篇论文被共同引用的次数来描述这两篇论文的相似程度，换句话说就是统计“共被引频率”来确认相似度。他利用当时新发表的粒子物理领域的论文分析来阐述自己的方法。Small 发现，这些通过“共被引”联系在一起的论文常常在研究主题上有高度的相似度，是相互关联的思想集合。他提出，频繁被引用的论文反映了关键概念、方法或实验，可以作为共引分析的起点，以一种客观的方式揭示某一专业领域的社会和智识的，或社会认知的结构。如 Price 描述的研究前沿，Small 将最近发表的通过引用关系紧密编织在一起的论文聚成组，接着通过“共被引”分析，发现分析结果指向了自然关联在一起的“研究单元”，而不是传统定义的、更

大范围的领域。Small 还看到了“共被引分析”的潜力，将其比作一部完整的电影，而不是一张孤立的图片，以表达他对该方法潜力的极大信任。他认为，通过重要论文间的相互引用模式分析，可以呈现某个专业领域的结构图，这幅结构图会随着时间的推移而发生变化，通过研究这种不断变化的结构，“共被引分析”可以帮助我们跟踪科学的研究的进展，以及评估不同专业领域的相互影响程度。

还有一位值得注意的科学家是俄罗斯研究信息科学的 Irina V. Marshakova-Shaikovich。她也在 1973 年提出了“共被引分析”的思想<sup>[12]</sup>。但是 Small 与 Marshakova-Shaikovich 并不了解彼此的工作，因此他们的工作可以被看作是相互独立、不谋而合的研究。科学社会学家 Robert K. Merton 将这种现象称作“共同发现”，这在科学史上是非常常见的现象，而很多人却没有意识到这种常见现象的存在<sup>[13,14]</sup>。Small 与 Marshakova-Shaikovich 都将“共被引分析”与“文献耦合”现象进行了对比，后者是 Myer Kessler 于 1963 年阐释的思想<sup>[15]</sup>。“文献耦合”也是用来度量两篇论文研究内容相似程度的方法，该方法基于两篇论文中出现相同参考文献的频次来度量它们的相似程度，即如果两篇论文共同引用了同一篇参考文献，他们的研究内容就

可能存在相似关系，相同的参考文献越多，相似度越大。“共被引分析”则是“文献耦合”分析的“逆”方向：相似关系不再由文献引用了什么参考文献来确定，而是通过共同被哪些文献引用将它们联系在一起。“文献耦合”方法所判断两篇文章之间的相似度是“静态”的，因为当文章发表后，其文后的参考文献不会再发生变化，也就是说两篇论文之间的相似关系被固定下来了；但是“共被引”分析是一个逆过程，你永远无法预知哪些论文会被未来发表的论文“共同被引用”，它会随着研究的发展发生动态的变化。Small 更倾向于使用“共被引分析”，因为他“寻求一种能够反映科学家积极且不断变化认知的度量方式<sup>[16]</sup>。

接下来的一年，即 1974 年，Small 与位于费城 Drexel University 的 Belver C. Griffith 共同发表了两篇具有里程碑意义的论文，为利用共被引分析来界定学科专业领域并根据其相似性进行映射奠定了基础<sup>[17,18]</sup>。虽然此后该方法有过一些重大的调整，但是它的基本原理与实施方式从来没有改变过。首先遴选高被引论文合集作为“共被引分析”的种子。将研究范围限定在少量论文之内是合理的，这些论文被假定可以作为其相关研究领域关键概念的代表论文，对该领域起着重要的影响作用，作为寻找这些论文的线

索，“被引用历史”成为关键点。（论文按被引频次分布所呈现的典型“长尾”特征也表明，这种选择方式具有稳健性和代表性。）一旦这些高被引论文被收集起来，就要对该合集做“共被引”扫描。合集中，同时被同一篇论文引用的论文被结成对，称作“共被引论文对”，当然会出现很多结不成对的“0”结果。当很多“共被引论文对”被找到时，接下来会检查这些“共被引论文对”之间是否存在“手拉手”的关系，举例来说：如果通过“共被引扫描”发现了“共被引论文对 A 和 B”、“共被引论文对 C 和 D”、“共被引论文对 B 和 C”，那么由于论文 B 和 C 的共被引出现，“共被引论文对 A 和 B”与“共被引论文对 C 和 D”就被联系到一起了。我们认为两个“共被引论文对”出现了一次交叉或者“拉手”。因为这一次交叉，就将这两个“共被引论文对”合并聚成簇，也就是说两个“共被引论文对”间只需要一次“拉手”就能形成联系。通过调高或调低共被引强度阈值可以得到规模大小不同的“聚类”或者“群”。阈值越低，越多的论文得以聚类，形成的“群”越大，阈值过高则会形成不间断的“论文链”。如果调高阈值，就可以形成离散的专业领域，但是如果相似度阈值设得太高，就会形成太多分裂的“孤岛”。在构建研究前沿方法中采用的“共被引相似度”

计量方法以及共被引强度阈值随着时间的推移有所不同。今天我们采用余弦相似性 (cosine similarity) 方法计量“共被引相似度”，即用共被引频次除以两篇论文的引用次数的平方根。而“共被引强度”最小阈值是余弦相似度 0.1，不过这个值是可以逐渐调高的，一旦调高就会将大的“聚类”变小。通常如果研究前沿聚类核心论文超过最大值 50 时，我们就会这样做。反复试验表明这种做法能产生有意义的研究前沿。

现在我们做个总结，研究前沿是由一组高被引论文和引用这些论文的相关论文组成的，这些高被引论文的共被引相似度强度位于设定的阈值之上。事实上，研究前沿聚类应该同时包含两个组成部分，一部分是通过共被引找到的核心论文，这些论文代表了该领域的奠基工作；另外一部分就是对这些核心论文进行引用的施引论文，它们中最新发表的论文反映了该领域的最新进展。研究前沿的名称则是从这些核心论文或施引论文的题名总结来的。ESI 数据库中研究前沿的命名主要是基于核心论文的题名。有些前沿的命名也参考了施引论文。因为正是这些施引论文的作者通过共被引决定了重要论文的对应关系，也是这些施引论文作者赋予研究前沿以意义。研究前沿的命名并不是通过算法来进行的，仔细地、一篇

一篇通过人工探寻这些核心论文和施引论文，无疑会对研究前沿工作本质的描述更加精确。

Small 与 Griffith 1974 年共同发表的第二篇论文中，可以看到对不同研究前沿之间相似度的度量<sup>[19]</sup>。通过共被引分析构建的研究前沿及其核心论文，是建立在这些论文本身相似度基础上的。同样，用这种方法形成的不同研究前沿之间的相似度也是可以描述的，从而发现那些彼此联系紧密的研究前沿。在他们的研究前沿图谱中，Small 与 Griffith 通过不同角度剖析、缩放数据以期接近这两个维度的研究方向。

Price 高度评价了 Small 与 Griffith 的工作，尤其是从以上两个维度解析通过共被引分析聚类论文图谱的工作，Price 认为“看上去这是非常深奥的工作，也是革命性的突破。”。他强调“他们的发现似乎预示着科学研究存在内在的结构与秩序，需要我们进一步去发现、辨识、诊断。我们惯常用分类、主题词的方式去描述它，看上去与它自然内在的结构是背道而驰的。如果我们真想发现科学研究结构的话，无疑需要分析海量的科学论文，创建一种类似于巨型科学论文图谱的体系，可以实时维护，用于对学术成果进行分类并跟踪其发展动态。”<sup>[20]</sup>Garfield 这样评价 Small

与 Griffith 的工作，“他们的工作是我们的飞行器得以起飞的最后一块理论基石”<sup>[21]</sup>。Garfield——一位实干家，他将自己的理论研究工作转化成了数据库产品，无论是信息检索还是分析领域都受益良多。这个飞行器以 1981 年出版的 ISI 科学地图：生物化学和分子生物学 (ISI Atlas of Science: Biochemistry and Molecular Biology, 1978/80) 而宣告起飞<sup>[22]</sup>，可以说这本书所呈现的工作与 Small 的工作有着内在的联系。这本书分析了 102 个研究前沿，每一个前沿都包括一张图谱，包含了前沿背后的核心论文，以及多角度展示这些论文间的相互关系。每一组核心论文被详细列出，并且给出它们的被引用次数，那些重要的施引论文也会在清单中，还会基于核心论文的被引用次数给出每个前沿的相关权重。伴随这些分析数据的还有来自各前沿专业领域的专家撰写的综述。书的最后，是这 102 个研究前沿汇总在一起的巨大图谱，显示出他们之间的相似关系。这绝对是跨时代的工作，但对于市场来说无异于一场赌博，这就是 Garfield 的个性写真。

在出版了另一本书和一系列综述性期刊之后<sup>[23,24]</sup>，ISI Atlas of Science 作为系列出版物终止于上世纪 80 年代。出于商业考虑，那时还有更优先的事情需要做。但是 Garfield 与 Small 继续执着地行

走在科学图谱这条道路上，他们几十年来做了各种研究与实验。1985 年，Small 发表了两篇论文介绍他关于研究前沿定义方法的重要修正：分数共被引聚类法 (Fractional Co-Citation Clustering)<sup>[25]</sup>。通过根据被引论文参考文献列表的长度对引用频次进行分数化计算，他能够对各领域平均引用率的差异进行调整，籍此消除整体计数给高引用领域（如生物医药领域）带来的系统偏差。因此，例如数学领域的影响力得到了更充分的体现，因为整数计数法曾低估了该领域。他还提出研究前沿不仅可以按单个前沿进行聚类，还可以在更高层次上根据相似性进行聚类<sup>[26]</sup>。同年，Garfield 与 Small 发表了“*The geography of science: disciplinary and national mappings*”，阐述了他们研究的新进展。该论文汇集了 Science Citation Index 与 Social Sciences Citation Index 数据，勾勒出全球的研究状况，从全球的整体图出发，他们还进一步探索了更小分割单位的研究图谱<sup>[27]</sup>。这些宏 - 聚类间的关系与具体研究内容同样重要。这些关联如同丝线，是维系科学整体结构的纽带，织出了科学之网。

接下来的几年里，Garfield 致力于发展他的科学历史图谱，并在 Alexander I. Pudovkin 与 Vladimir S. Istomin 的协助下，开发了 HistCite 这一软件工具。HistCite 不仅能够

基于引用关系自动生成一组论文的历史图谱，提供某一特定研究领域论文发展演化的缩略图，还可以帮助识别相关论文，这些相关论文有可能在最初检索时没有被检索到，或者没有被识别出来。因此，HistCite 不仅是一个科学历史图谱的分析软件，也是帮助论文检索的工具<sup>[28,29]</sup>。

Small 继续完善着他的共被引分析聚类方法，并且试图基于某个学科领域前沿之间呈示的认知关系图谱探索更多的细节内容<sup>[30,31]</sup>。背后的驱动力是对科学统一性的强烈兴趣。为了显示这种统一性，Small 展示了通过强大的共被引关系，如何从一个研究主题漫游到另一个主题，并且跨越了学科界限，甚至从经济学跨越到天体物理学<sup>[32,33]</sup>。对此 Small 与 E.O.Wilson 有类似的看法，后者在 1998 年出版的名为 *Consilience: The Unity of Knowledge* 的一书中表达了类似的思想<sup>[34]</sup>。上个世纪 90 年代早期，Small 发展了 Sci-Map，这是一个基于个人电脑的交互式文献映射系统<sup>[35]</sup>。后来的数年中，他将研究前沿的研究数据放到了 Essential Science Indicators (ESI) 数据库中。ESI 主要用来做研究绩效分析。ESI 中的研究前沿，以及有关排名的数据每两个月更新一次。这时候，Small 对虚拟现实软件产生了极大的兴趣，因为这类软件可以产生模

拟真实情况的三维可视化，可以实时处理海量数据<sup>[36,37]</sup>。例如，上世纪 90 年代末期，Small 领导了一个通过共被引分析来可视化和探索科学文献的项目，在桑迪亚国家实验室成功开发了共被引分析虚拟现实软件 VxInsight<sup>[38,39]</sup>。由于桑迪亚国家实验室高级研究经理 Charles E. Meyers 富有远见的支持，这是利用快速发展的技术迈出的重要一步，该技术能够将文献作为地理空间进行详细且动态的可视化，例如，将密集且突出的特征呈现为山脉。可以放大、缩小图形的比例尺，允许用户通过这样的比例尺缩放游走在不同层级学科领域。基础数据的查询结果被突出显示，一目了然。

事实上，上世纪 90 年代末期对于科学图谱研究来说是一个转折点，之后，有关如何界定研究领域，以及领域间关系的可视化研究都得到了迅猛发展。全球现在有很多学术中心致力于科学图谱的研究，他们使用的方法与工具不尽相同。印第安纳大学的 Katy Borner 教授在其 2010 年出版的一本书：*Atlas of Science —— Visualizing What We Know* 中对该领域过去 10 年取得的进展做了总结，当然这本书的名字听上去似曾相识<sup>[40]</sup>。

从共被引聚类生成科学图谱诞生，到今天这个领域如此繁荣，大约经历了 25 年的时间。很有意思

的是，引文思想从产生到 Science Citation Index 的商业成功也大约经历了 25 年。当我们回顾这个进程时，这两者显然都是超前于时代的想法。如果说 Science Citation Index 面临的挑战来自于图书馆界根深蒂固的传统思想与模式（进一步说就是来自研究人员检索论文的习惯性行为），那么，科学图谱，作为一个全新的领域，之所以迟迟未被采纳，其原因应归为，在当时的条件下，缺乏获取研究所需的数据存储、运算、分析技术的限制。直到上世纪 90 年代，这些问题才得到根本解决。目前正以前所未有的速度为分析工作提供海量的分析数据，个人计算机与软件的发展也使个人计算机可以胜任这些分析工作。今天，我们利用 Web of Science 进行信息检索、结果分析、研究前沿分析、图谱生成，以及科学活动分析，它不仅拥有了用户，还拥有了忠诚的拥趸与宣传者。

Garfield 与 Small 辛勤播种，很多年后这些种子得以生根、发芽，在很多领域迸发出勃勃生机。有人这样定义什么是了不起的人生——“在人生随后的岁月中，将年轻时萌发的梦想变成现实”。从这个角度说，他们两人不仅开创了信息科学的先锋领域，而且成就了他们富有传奇的人生。科睿唯安将继续支持并推进这个传奇的持续发展。

## 参考文献

- [1] Eugene Garfield. Citation indexes for science: a new dimension in documentation through association of ideas. *Science*, 122 (3159): 108-111, 1955.
- [2] Eugene Garfield. *Citation Indexing: its Theory and Application in Science, Technology, and Humanities*. NewYork: John Wiley & Sons, 1979, 3.
- [3] Genetics Citation Index. Philadelphia: Institute for Scientific Information, 1963.
- [4] Eugene Garfield. Citation indexes in sociological and historic research. *American Documentation*, 14 (4): 289-291, 1963.
- [5] Eugene Garfield, Irving H. Sher, Richard J. Torpie. *The Use of Citation Data in Writing the History of Science*. Philadelphia: Institute for Scientific Information, 1964.
- [6] Derek J. de Solla Price. *Science Since Babylon*. New Haven: Yale University Press, 1961. [See also the enlarged edition of 1975]
- [7] Derek J. de Solla Price. *Little Science, Big Science*. NewYork: Columbia University Press, 1963. [See also the edition *Little Science, Big Science...and Beyond*, 1986, including nine influential papers by Price in addition to the original book]
- [8] Derek J. de Solla Price. Foreword. in Eugene Garfield, *Essays of an Information Scientist, Volume 3, 1977-1978*, Philadelphia: Institute For Scientific Information, 1979, v-ix.
- [9] Derek J. de Solla Price. Networks of scientific papers: the pattern of bibliographic references indicates the nature of the scientific research front. *Science*, 149 (3683): 510-515, 1965.
- [10] ibid.
- [11] Henry Small. Co-citation in scientific literature: a new measure of the relationship between two documents. *Journal of the American Society for Information Science*, 24 (4): 265-269, 1973.
- [12] Irena V. Marshakova-Shaikovich. System of document connections based on references. *Nauchno Tekhnicheskaya, Informatsiya* Seriya 2, SSR, [Scientific and Technical Information Serial of VINITI], 6: 3-8, 1973.
- [13] Robert K. Merton. Singletons and multiples in scientific discovery: a chapter in the sociology of science. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 105 (5): 470-486, 1961.

[14] Robert K. Merton. Resistance to the systematic study of multiple discoveries in science. *Archives Européennes de Sociologie*, 4 (2): 237-282, 1963.

[15] Myer M. Kessler. Bibliographic coupling between scientific papers. *American Documentation*, 14 (1): 10-25, 1963.

[16] Henry Small. Cogitations on co-citations. *Current Contents*, 10: 20, march 9, 1992.

[17] Henry Small, Belver C. Griffith. The structure of scientific literatures i: Identifying and graphing specialties. *Science Studies*, 4 (1):17-40, 1974.

[18] Belver C. Griffith, Henry g. Small, Judith A. stonehill, sandra Dey. The structure of scientific literatures II: Toward a macro- and microstructure for science. *Science Studies*, 4 (4):339-365, 1974.

[19] ibid.

[20] See note 8 above.

[21] Eugene Garfield. Introducing the ISI Atlas of Science: Biochemistry and Molecular Biology, 1978/80. *Current Contents*, 42, 5-13, October 19, 1981 [reprinted in Eugene Garfield, *Essays of an Information Scientist*, Vol. 5, 1981-1982, Philadelphia: Institute for Scientific Information, 1983,279-287]

[22] ISI Atlas of Science: Biochemistry and Molecular Biology,1978/80, Philadelphia: Institute for Scientific Information,1981.

[23] ISI Atlas of Science: Biotechnology and Molecular Genetics, 1981/82, Philadelphia: Institute for Scientific Information, 1984.

[24] Eugene Garfield. Launching the ISI Atlas of Science: for the new year, a new generation of reviews. *Current Contents*, 1: 3-8, January 5, 1987. [reprinted in Eugene Garfield, *Essays of an Information Scientist*, vol. 10,1987, Philadelphia: Institute for Scientific Information,1988, 1-6]

[25] Henry Small, ED Sweeney. Clustering the Science Citation Index using co-citations. I. A comparison of methods. *Scientometrics*, 7 (3-6): 391-409, 1985.

[26] Henry Small, ED Sweeney, Edward Greenlee. Clustering the Science Citation Index using co-citations. II. Mapping science. *Scientometrics*, 8 (5-6): 321-340, 1985.

[27] Henry Small, Eugene Garfield. The geography of science: disciplinary and national mappings. *Journal of Information Science*, 11 (4): 147-159, 1985.

[28] Eugene Garfield, Alexander I. Pudovkin, Vladimir S. Istomin. Why do we need algorithmic historiography?. *Journal*

of the American Society for Information Science and Technology, 54(5): 400-412, 2003.

[29] Eugene Garfield. Historiographic mapping of knowledge domains literature. *Journal of Information Science*, 30(2):119-145, 2004.

[30] Henry Small. The synthesis of specialty narratives from co-citation clusters. *Journal of the American Society for Information Science*, 37 (3): 97-110, 1986.

[31] Henry Small. Macro-level changes in the structure of cocitation clusters: 1983-1989. *Scientometrics*, 26 (1): 5-20, 1993.

[32] Henry Small. A passage through science: crossing disciplinary boundaries. *Library Trends*, 48 (1): 72-108, 1999.

[33] Henry Small. Charting pathways through science: exploring Garfield's vision of a unified index to science. In Blaise Cronin and Helen Barsky Atkins, editors, *The Web of Knowledge: A Festschrift in Honor of Eugene Garfield*, Medford, NJ: American Society for Information Science, 2000, 449-473.

[34] Edward O. Wilson. *Consilience: The Unity of Knowledge*, New York: Alfred A. Knopf, 1998.

[35] Henry small. A Sci-MAP case study: building a map of AIDS Research. *Scientometrics*, 30 (1): 229-241, 1994.

[36] Henry Small. Update on science mapping: creating large document spaces. *Scientometrics*, 38 (2): 275-293, 1997.

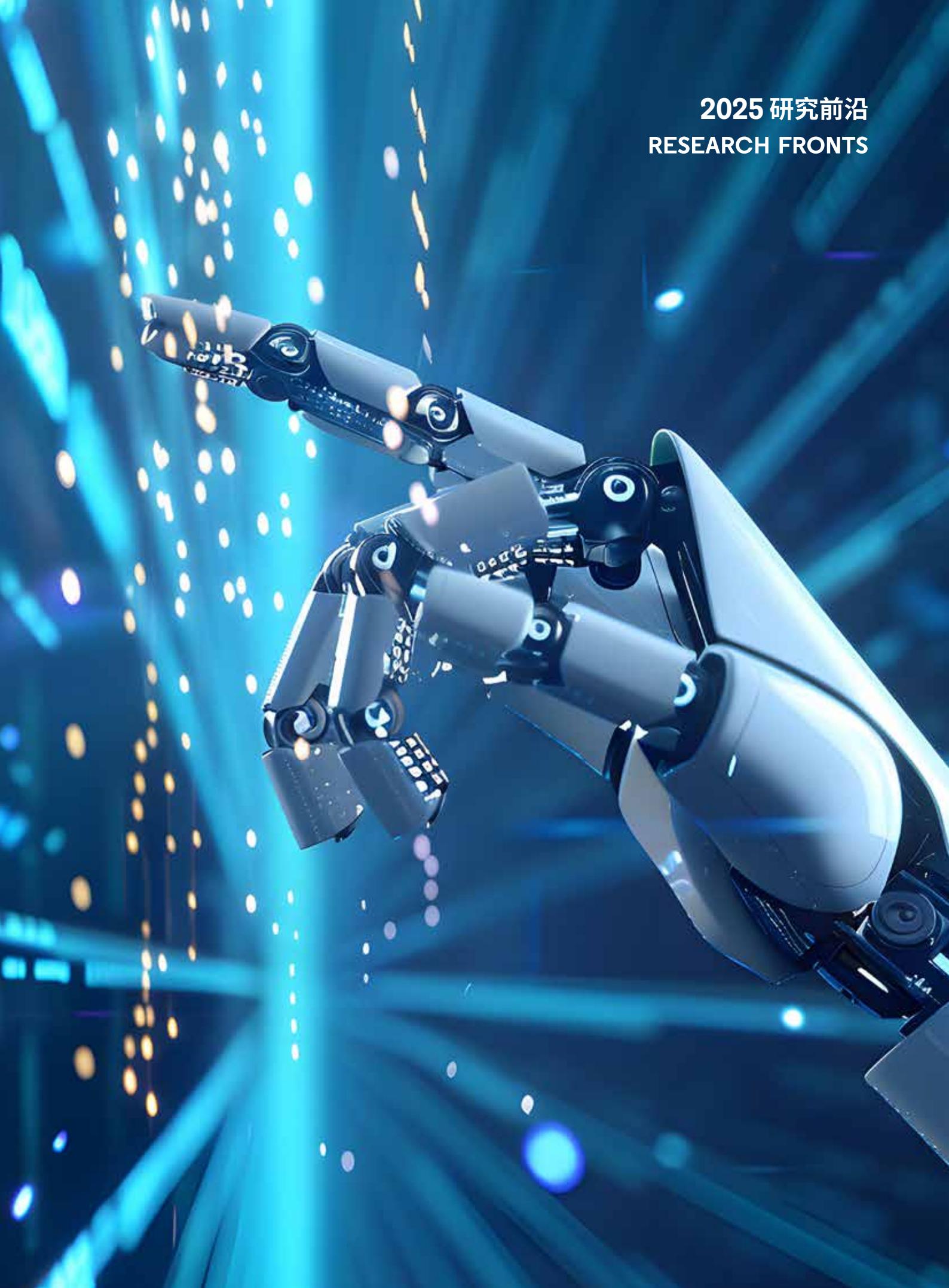
[37] Henry Small. Visualizing science by citation mapping. *Journal of the American Society for Information Science*, 50 (9):799-813, 1999.

[38] George S. Davidson, Bruce Hendrickson, David K. Johnson, Charles E. Meyers, Brian N. Wylie. Knowledge mining with Vxinsight®: discovery through interaction. *Journal of Intelligent Information Systems*, 11 (3): 259-285, 1998.

[39] Kevin W. Boyack, Brian N. Wylie, George S. Davidson. Domain visualization using Vxinsight for science and technology Management. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 53 (9): 764-774, 2002.

[40] Katy Börner. *Atlas of Science: Visualizing What We Know*, Cambridge, MA: MIT Press, 2010.

2025 研究前沿  
RESEARCH FRONTS



# 报告研究团队

## 指导专家：

潘教峰 刘细文 王利

## 总体组：

科睿唯安	David Pendlebury	岳卫平	王娜	黄庭颖	马亚鹏	
	王振	王思茗	危期	熊洋	袁庆文	刘金涛
中国科学院科技战略咨询研究院	杨帆	周秋菊	冷伏海			

## 前沿解读组（前沿命名与重点前沿解读分析）：

农业科学、植物学和动物学	袁建霞
生态与环境科学	邢颖
地球科学	范唯唯 杨帆
临床医学	冀玉静 李军莲 李阳
生物科学	周秋菊
化学与材料科学	边文越 张超星
物理学	黄龙光
天文学与天体物理学	王海名 韩淋
数学	王海名 孙震
信息科学	王海霞 白如江
经济学、心理学及其他社会科学	王文君

## 英文翻译组：

袁建霞 邢颖 周秋菊 范唯唯 王海名 杨帆 李军莲 冀玉静  
边文越 黄龙光 韩淋 王海霞 孙震 白如江 李阳 王文君  
ChristopherM.King 岳卫平 王娜 黄庭颖 马亚鹏 王振 王思茗  
危期 熊洋 袁庆文 刘金涛

## 数据支持组：

科睿唯安

## 中国科学院科技战略咨询研究院简介

2015年11月，中国科学院被确定为党中央、国务院、中央军委直属的首批10家第一类高端智库建设试点单位之一，并明确试点的重点任务是建设中国科学院科技战略咨询研究院（以下简称战略咨询院）。2016年1月，战略咨询院开始组建，其定位是中国科学院学部发挥国家科学技术方面最高咨询机构作用的研究和支撑机构，是中国科学院率先建成国家高水平科技智库的重要载体和综合集成平台，并集成中国科学院院内外以及国内外优势力量建设智库型研究院。战略咨询院的主要任务是发挥中国科学院集科研院所、学部、教育机构为一体的优势，从科技规律出发研判科技发展的趋势和突破方向，从科技影响的角度研究经济社会发展和国家安全重大问题，聚焦科技和学科发展战略、科技和创新政策、生态文明和可持续发展战略、系统分析与管理、科技战略情报、智库科学与工程、综合交叉研究等领域，汇聚国内外优秀人才，建设开放合作的战略与政策国际研究网络，为国家宏观决策提供科学依据和咨询建议。

## 中国科学院文献情报中心简介

中国科学院文献情报中心是中国科学院直属事业法人单位。该中心立足中国科学院，面向全国，负责全院文献情报服务的组织、管理和协调，全院科技文献资源保障体系建设，公共文献信息服务的建设和管理，为科研人员提供自然科学的高技术领域的科技文献信息资源保障和战略情报研究服务，并开展科学交流与科学文化传播服务。该中心是国际图书馆协会联合会（IFLA）的重要成员，同时也是图书馆电子信息联盟（EIFL）和开放获取知识库联盟（COAR）的重要成员。

## 科睿唯安简介

科睿唯安是全球领先的信息服务提供商。我们为全球用户提供信息与洞见，帮助他们改变观点、改善工作，让世界变得更加美好。我们的解决方案基于先进的技术与深厚的行业积淀，涵盖学术研究和政府机构，生命科学与健康，知识产权各个领域。如需了解更多信息，请访问 <https://clarivate.com.cn/>。

### **中国科学院科技战略咨询研究院**

地址：北京市海淀区中关村北一条 15 号  
邮编：100190  
网址：<http://www.casisd.cn/>

### **中国科学院文献情报中心**

地址：北京市中关村北四环西路 33 号  
邮编：100190  
网址：<http://www.las.ac.cn/>

### **科睿唯安 中国办公室**

地址：北京市海淀区科学院南路 2 号融科资讯中心 C 座北楼 610 单元  
邮编：100190  
电话：+86 10 57601200  
传真：+86 10 82862008  
邮箱：[info.china@clarivate.com](mailto:info.china@clarivate.com)  
网址：<http://clarivate.com.cn/>