



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™

# 2022 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





2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 目录 Contents

<b>背景和方法论</b>	1. 背景	5
	2. 方法论	6
	2.1 研究前沿的遴选与命名	6
	2.2 研究前沿的分析及重点研究前沿的遴选和解读	7
<b>农业科学、植物学和动物学</b>	1. 热点前沿及重点热点前沿解读	11
	1.1 农业科学、植物学和动物学领域 Top 10 热点前沿发展态势	11
	1.2 重点热点前沿——“新型冠状病毒对家养动物的感染及其传播”	12
	1.3 重点热点前沿——“植物泛基因组研究与应用”	16
	2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	19
	2.1 新兴前沿概述	19
2.2 重点新兴前沿——“缓解作物砷中毒的机理和方法研究”	19	
<b>生态与环境科学</b>	1. 热点前沿及重点热点前沿解读	21
	1.1 生态与环境科学 Top 10 热点前沿发展态势	21
	1.2 重点热点前沿——“COVID-19 疫情带来的固体废物和医疗废物污染及管理”	22
	1.3 重点热点前沿——“废水中新型冠状病毒的检测及基于废水的流行病学监测”	26
	2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	30
	2.1 新兴前沿概述	30
2.2 重点新兴前沿——“2019/2020 年澳大利亚特大森林火灾对生态系统的影响及气候相关驱动因素”	30	
<b>地球科学</b>	1. 热点前沿及重点热点前沿解读	33
	1.1 地球科学 Top 10 热点前沿发展态势	33
	1.2 重点热点前沿——“放射性碳测年校正曲线研究、数据集分析与应用”	34
	1.3 重点热点前沿——“小行星地表特征和成分分析”	38
	2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	42
	2.1 新兴前沿概述	42
2.2 重点新兴前沿——“埃及苏伊士湾油田储层多尺度表征”	42	

## 临床医学

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>45</b>
1.1 临床医学领域 Top 10 热点前沿发展态势	45
1.2 重点热点前沿——“NAFLD 遗传学研究以及疾病更名争议”	46
1.3 重点热点前沿——“COVID-19 患者干扰素应答失衡”	50
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>52</b>
2.1 新兴前沿概述	52
2.2 重点新兴前沿——“COVID-19 疫苗副作用和对突变株有效性”前沿群	53

## 生物科学

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>55</b>
1.1 生物科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	55
1.2 重点热点前沿——“新型冠状病毒中和抗体的发现和药物研发”	56
1.3 重点热点前沿——“新型冠状病毒 PCR 核酸检测”	60
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>61</b>
2.1 新兴前沿概述	61
2.2 重点新兴前沿——“AlphaFold 等人工智能预测蛋白质结构”	62

## 化学与材料科学

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>65</b>
1.1 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	65
1.2 重点热点前沿——“纳米酶”	66
1.3 重点热点前沿——“机器学习辅助的化学合成”	67
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>71</b>
2.1 新兴前沿概述	71
2.2 重点新兴前沿——“钙钛矿太阳能电池关键核心基础问题及其商业化实现技术”	71

## 物理学

<b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>	<b>75</b>
1.1 物理学领域 Top 10 热点前沿发展态势	75
1.2 重点热点前沿——“磁性拓扑绝缘体 $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ”	76
1.3 重点热点前沿——“高效金属卤化物钙钛矿发光二极管”	79
<b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>	<b>83</b>
2.1 新兴前沿概述	83
2.2 重点新兴前沿——“二维 $\text{MoSi}_2\text{N}_4$ 材料的特性研究”	83

---

## 天文学与天体物理学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	85
1.1 天文学与天体物理学 Top 10 热点前沿发展态势	85
1.2 重点热点前沿——“基于‘帕克太阳探测器’和‘太阳轨道器’开展的日球层物理研究”	86
1.3 重点热点前沿——“计算机数字宇宙模型研究恒星、星系及宇宙演化”	90
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	93
2.1 新兴前沿概述	93
2.2 重点新兴前沿——“GW190814 引力波事件中 2.6 倍太阳质量天体的性质研究”	93

---

## 数学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	95
1.1 数学领域 Top 10 热点前沿发展态势	95
1.2 重点热点前沿——“基于深度学习的高维偏微分方程数值算法”	96
1.3 重点热点前沿——“8 维及 24 维空间等体球体最密堆积问题”	100
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	102
2.1 新兴前沿概述	102
2.2 重点新兴前沿——“用于时间序列预测的递归神经网络方法”	102

---

## 信息科学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	105
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——“面向从头药物设计的深度学习研究方法研究”	106
1.3 重点热点前沿——“多智能体强化学习研究”	110
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	113
2.1 新兴前沿概述	113
2.2 重点新兴前沿——“可解释人工智能”	113

---

## 经济学、心理学及其他社会科学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	115
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——“COVID-19 全球大流行下的金融市场波动”	116
1.3 重点热点前沿——“基于文献计量分析的经济管理领域科学图谱研究”	120
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	124
2.1 新兴前沿概述	124
2.2 重点新兴前沿——“COVID-19 疫苗接种的意向研究”	125

---

附录 研究前沿综述：寻找科学的结构	126
-------------------	-----

编纂委员会	135
-------	-----

# 背景与方法论

2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 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。

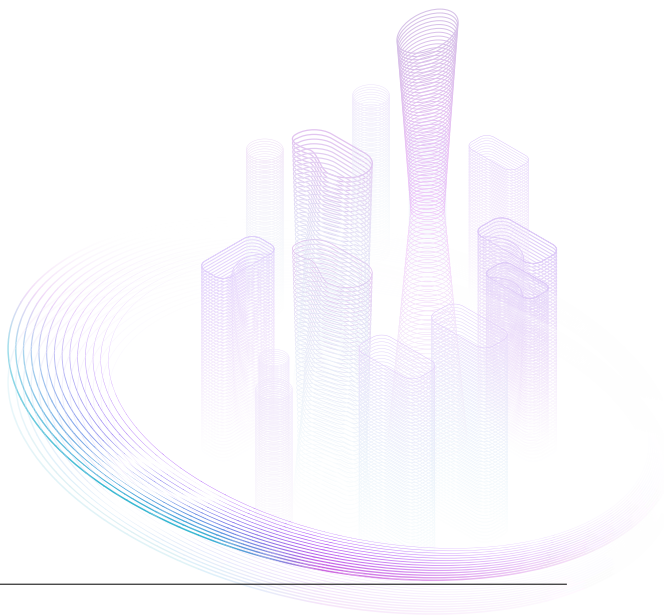
为此，科睿唯安发布了“研究前沿”（Research Fronts）数据和报告。定义一个被称作研究前沿的专业领域的方法，源自于科学研究之间存在的某种特定的共性。这种共性可能来自于实验数据，也可能来自于研究方法，或者概念和假设，并反映在研究人员在论文中引用其他同行的工作这一学术行为之中。

通过持续跟踪全球最重要的科研和学术论文，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研究的脉络。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的发生、汇聚、发展（或者是萎缩、消散），以及分化和自组织成更近的研究活动节点。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。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2021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发布了《2016研究前沿》、《2017研究前沿》、《2018研究前沿》、《2019研究前沿》、《2020研究前沿》和《2021研究前沿》分析报告。这一系列报告引起了全球广泛的关注。2022年，在以往系列研究前沿报告的基础上，推出了《2022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™ (ESI) 数据库中的12610个研究前沿，遴选出了2022年自然科学和社会科学的11大学科领域排名最前的110个热点前沿和55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，165 个研究前沿的核心论文及其施引论文的数据提供由科睿唯安负责；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。此次分析基于 2016-2021 年的论文数据，数据下载时间为 2022 年 3 月。

### 2.1 研究前沿的遴选与命名

《2022 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 165 个研究前沿（包括 110 个热点前沿和 55 个新兴前沿）。我们将 ESI 数据库中 20 个学科的 12610 个研究前沿划分到 11<sup>②</sup> 个高度聚合的学科领域，以此为基础遴选出较为活跃或发展迅速的研究前沿。报告中所列的 165 个研究前沿的具体遴选过程如下：

#### 2.1.1 热点前沿的遴选

对于除数学领域和信息科学领域以外的 9 个大学科领域，将对应的每个 ESI 学科中的研究前沿的核心论文，按照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。再根据核心论文出版年的平均值重新排序，遴选出每个领域中那些“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 and 归并。通过上述几个步骤在 9 个大学科领域分别选出 10 个热点前沿，共计 90 个热点前沿。

由于数学领域和信息科学领域的特点，2022 年我们尝试使用新的方法遴选这两个领域的热点前沿和新

兴前沿。首先按照数学领域和信息科学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，然后根据研究前沿中核心论文在高水平期刊<sup>③</sup>上发表的比例进行排序，选出超过各领域平均水平的研究前沿，再根据核心论文出版年的平均值重新排序，遴选出若干备选前沿，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，最终在数学领域和信息科学领域各遴选出 10 个热点前沿。

11 大学科领域中共遴选出 110 个热点前沿。因为每个领域具有不同的特点和引用行为，有些学科领域中的很多研究前沿在总被引频次和篇均被引频次上会相对较小，所以从 11 大学科领域中分别遴选出的排名前 10 的热点前沿，代表各大学科领域中最具影响力的研究前沿，但并不一定代表跨数据库（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

② 11 个大学科领域分别为：1. 农业、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。

③ 高水平期刊为 Journal Citation Reports™ 数据库各学科分类中期刊影响因子排在前 25% (含 25%) 的 Q1 区期刊。



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间性是优先考虑的因素。这就是为什么我们称其为新兴前沿。

对除数学领域和信息科学领域以外的9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2020年6月之后的研究前沿才被考虑。将9个大学科领域对应的每个ESI学科的研究前沿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9大学科领域中，从而遴选出了9大学科领域的51个新兴前沿，这51个新兴前沿最早的平均出版年是2020.5。

数学领域和信息科学领域的新兴前沿的遴选参考了这两个领域的热点前沿的遴选方法。首先按照研究前沿中核心论文的篇均被引频次排序，然后根据研

究前沿中核心论文在高水平期刊上发表的比例进行排序，遴选出超过各领域平均水平的若干备选前沿，再根据核心论文出版年的平均值重新排序，遴选出每个领域中那些“最年轻”的研究前沿，最终在数学领域和信息科学领域各遴选出2个新兴前沿。

11大学科领域共遴选出55个新兴前沿，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，地球科学领域只有一个新兴前沿，而临床医学领域则选出了17个新兴前沿。

通过以上两种方法，这份报告突出显示了11个高度聚合的大学科领域中的110个热点前沿和55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165个研究前沿逐一进行命名，并征求专家意见调整确定。

## 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165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32个重点研究前沿和1个前沿群进行了详细的解读（见后续各章）。重点研究前沿包括重点热点前沿和重点新兴前沿两部分。

研究前沿由一组高被引的核心论文和一组共同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，并根据文献簇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）总量标志着研究前沿的大小，文献簇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。如最新发表的施引论文的发表时间为 2021 年，最早发表的施引论文的发表时间为 2017 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。

《2022 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出 22 个重点热点前沿。综合这两种方法共遴选出 10 个重点新兴前沿和 1 个新兴前沿群。因此从 165 个研究前沿中共遴选出 32 个重点前沿和 1 个前沿群进行深入解读。

## 2.2.2 研究前沿的分析和解读

在报告遴选的 165 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，研究揭示新兴前沿的研究主题，并对 33 个重点研究前沿（群）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

对于每个学科领域，结合 Top 10 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 Top 10 热点前沿的发展趋势，包括覆盖的重点方向、前沿（群）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前 10 个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 10 个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。气泡大小表示每年施引论文的数量，对于那些施引论文量大、而施引论文所发生的年数少的前沿，也就是CPT值的前两种情况，可以从图中直观地看出哪些是重点热点前沿。但是对于核心论文（P）较少的情况，则需要结合数据来看。大部分研究前沿的施引论文每年均有一定程度的增长，因此气泡图也有助于对研究前沿发展态势的理解。

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，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、机构活跃状况进行了统计分析，有助于揭示出哪些国家、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和机构进行了统计分析，有助于探讨哪些国家、机构在该热点前沿的发展中的研究布局。

## （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。





# 农业科学、植物学 和动物学

2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 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 Top 10 热点前沿发展态势

农业科学、植物学和动物学领域位居前十位的热点前沿（表 1）主要分布在食品科学与工程、植物基因组、植物抗性机理和动物疫病传播研究等四个子领域。其中，食品科学与工程子领域热点前沿数量最多，有 4 个，分别研究油凝胶对食品脂肪的替代、乳酸发酵在新型果蔬功能饮料中的应用、用于肉类新鲜度监测的智能 pH 传感包装膜及 3D 打印食品。植物基因组子领域有 3 个热点前沿，分别是茶树基因组研究、植物泛基因组研究与应用、新一代植物基因组编辑系统研究。植物抗性机理子领域有 2 个热点前沿，分别是硫化氢在调控植物适应非生物胁迫中的作用，以及植

物 NLR（核苷酸结合富含亮氨酸重复序列）免疫受体在免疫调控中的作用。动物疫病传播子领域有 1 个热点前沿，研究新型冠状病毒对家养动物的感染及其传播。

与往年相比，上述四个子领域均有多个研究主题多次入选 Top 10 热点前沿。植物基因组子领域中，植物泛基因组研究在 2021 年入选，2022 年又取得了新进展，更强调其应用。同样地，植物基因组编辑也曾在 2018 年、2021 年入选，每年都有新进展。这表明两项研究主题处于蓬勃发展阶段，突破性成果不断涌现。动物疫病传播子领域近两年也持续出现热点，去年入选的是猪圆环病毒 3 型研究，

2022 年入选的是新型冠状病毒的动物感染与传播。植物抗性机理研究子领域一直以来都是热点研究领域，在不同方向上不断产出新成果，2013 年以来相继入选的热点前沿依次有：植物病原卵菌 RXLR 效应蛋白与植物免疫力的下降（2013 年）、植物天然免疫的分子诱导机制（2015 年）、植物先天免疫机制（2016 年）、调控植物生长和防御的茉莉酸信号传导机制（2019 年）及植物抗胁迫的系统信号传导（2021 年）等。在食品科学与工程子领域，2016 年以来不断有相关热点前沿入选 Top 10，包括食品检测、食品污染防控、食品功能包装膜及果蔬食品加工等。

表 1 农业科学、植物学和动物学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	新型冠状病毒对家养动物的感染及其传播	41	5819	2020.4
2	硫化氢在调控植物适应非生物胁迫中的作用	34	1267	2019.9
3	油凝胶在食品脂肪替代中的应用研究	25	1518	2019.4
4	乳酸发酵在新型果蔬功能饮料开发中的应用	15	1369	2019.3
5	茶树基因组研究及功能基因分析	16	1187	2019.3
6	植物 NLR（核苷酸结合富含亮氨酸重复序列）免疫受体在免疫调控中的作用	41	2975	2019.2
7	新一代植物基因组编辑系统 CRISPR/Cpf1	19	1217	2019.2
8	植物泛基因组研究与应用	18	1925	2019.1
9	用于肉类新鲜度监测的基于植物抗氧化物的智能 pH 传感包装膜	34	2475	2019
10	3D 打印食品研究	24	1837	2019



图 1 农业科学、植物学和动物学领域 Top 10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“新型冠状病毒对家养动物的感染及其传播”

新型冠状病毒肺炎 (COVID-19, 简称新冠肺炎) 疫情自 2019 年底暴发以来, 在全球迅速传播蔓延, 给人类健康、生活和社会经济发展带来严重影响。为有效控制该疾病, 各国科学家做出了大量努力, 有关新型冠状病毒 (SARS-CoV-2, 简称新冠病毒) 的论文数量呈井喷式增长, 并被大量引用, 近两年在生物学领域和临床医学领域都已有多个新型冠状病毒

相关研究方向入选 Top 10 热点研究前沿。在农业科学、植物学和动物学领域的新冠病毒相关研究, 一方面是为了溯源新冠病毒的自然宿主和中间宿主, 以切断传播链, 另一方面是为了追踪病毒毒株的变异, 以研究病毒的致病机理。为此, 研究人员在新冠病毒对家养动物的感染及其传播方向上做了大量研究工作, 推动该方向入选 2022 年的 Top 10 热点研究前沿。

该热点研究前沿有 41 篇核心论文, 均为研究性论文, 其中 9 篇发表在《科学》(Science), 《自然》(Nature), 《细胞》(Cell) 等国际知名期刊。这些论文研究了各国的家养动物受新冠病毒感染的发病机制、病毒检测与分离、病理特征及流行调查等。研究对象包括荷兰、法国、叙利亚、西班牙、瑞士、英国、美国、巴西、克罗地亚、中国等国的家养动物, 包括猫、狗、水

貂、雪貂、猪、鸡、仓鼠等，其中对猫狗感染的研究最多。此外还有一些研究开发了小鼠模型，用于动物感染研究。这41篇核心论文中，

被引频次最高的1篇论文被引用了710次（图2）。该论文于2020年发表在《科学》(Science)期刊上，由来自中国农业科学院哈尔滨兽医

研究所与中国疾病预防控制中心病毒病预防控制所的研究人员合作完成，研究了雪貂、猫、狗等家养动物对新冠病毒的敏感性。

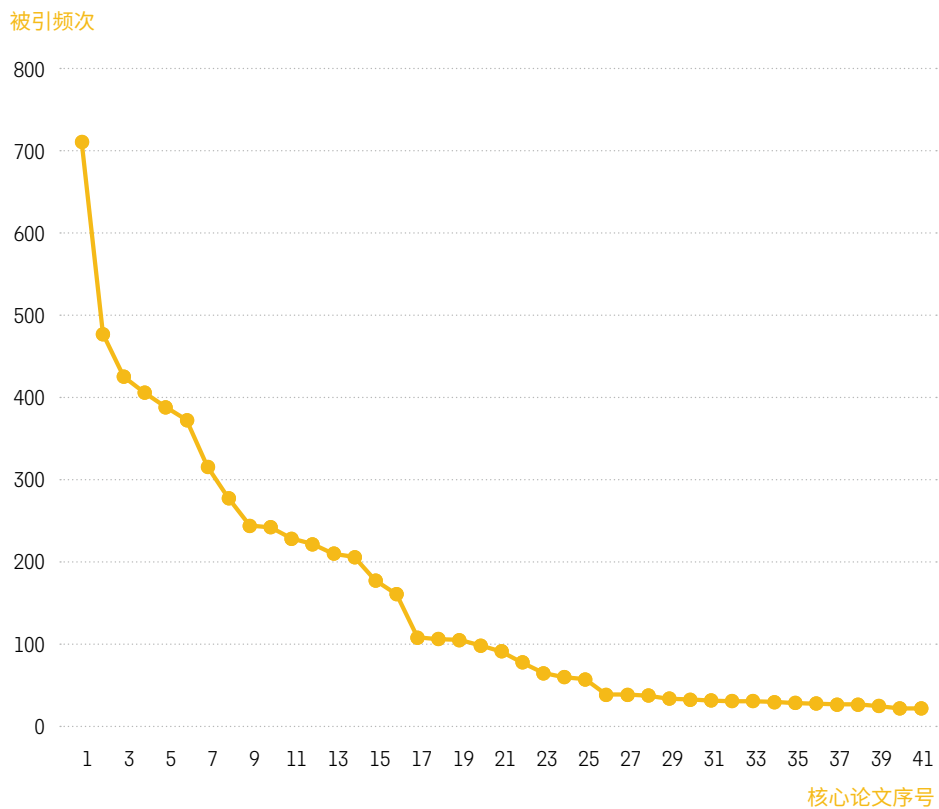


图2 “新型冠状病毒对家养动物的感染及其传播”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

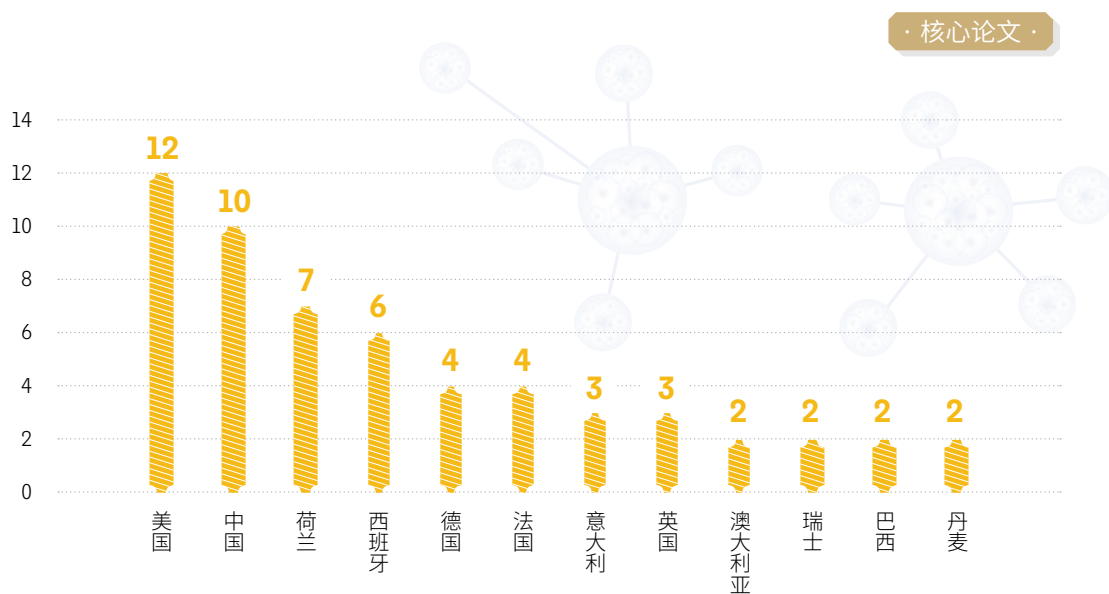
核心论文 Top 产出国家和机构中（表2），美国贡献最大，占比为29.3%。中国也积极参与，贡献了10篇论文，排名第二，贡献了24.4%的核心论文。虽然荷兰整

体排名第三（17.1%），但荷兰的乌得勒支大学和鹿特丹伊拉斯姆斯大学在 Top 机构中表现突出，二者分列前两名，分别贡献了14.6%和12.2%的核心论文。中国科学院名

列第三，贡献了9.8%的核心论文。可以看出，相对其他国家，美国、中国、荷兰对新冠病毒在家养动物中的传播非常重视。

表 2 “新型冠状病毒对家养动物的感染及其传播”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	29.3%	1	乌得勒支大学	荷兰	6	14.6%
2	中国	10	24.4%	2	鹿特丹伊拉斯姆斯大学	荷兰	5	12.2%
3	荷兰	7	17.1%	3	中国科学院	中国	4	9.8%
4	西班牙	6	14.6%	4	瓦格宁根大学	荷兰	3	7.3%
5	德国	4	9.8%	4	巴斯德研究所	法国	3	7.3%
5	法国	4	9.8%	4	GD 动物健康公司	荷兰	3	7.3%
7	意大利	3	7.3%	4	格拉斯哥大学	英国	3	7.3%
7	英国	3	7.3%	4	香港大学	中国	3	7.3%
9	澳大利亚	2	4.9%					
9	瑞士	2	4.9%					
9	巴西	2	4.9%					
9	丹麦	2	4.9%					





施引论文 Top 10 产出国家和机构中 (表 3)，核心论文产出位列第一和第二的美国和中国施引论文依然最多，占比分别为 39.8% 和 23.2%，表明中美两国在该方向上

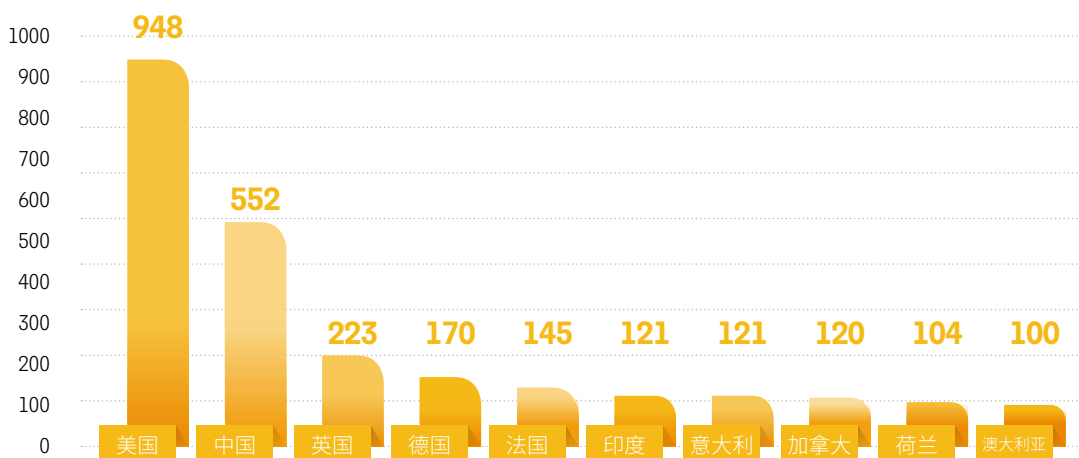
持续保持研究热情。核心论文贡献排名第七的英国积极跟进，施引论文排名上升到第三。机构方面，中国科研机构积极跟进，其中，中国科学院排名上升到第一，贡献了 5%

的施引论文，香港大学排名第二，贡献了 3.9%。美国国立卫生研究院名列第三。

表 3 “新型冠状病毒对家养动物的感染及其传播”研究前沿中施引论文的 Top 10 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	948	39.8%	1	中国科学院	中国	119	5.0%
2	中国	552	23.2%	2	香港大学	中国	94	3.9%
3	英国	223	9.4%	3	美国国立卫生研究院	美国	82	3.4%
4	德国	170	7.1%	4	哈佛大学	美国	80	3.4%
5	法国	145	6.1%	5	中国医学科学院北京协和医学院	中国	75	3.1%
6	印度	121	5.1%	6	法国国家健康与医学研究所	法国	62	2.6%
6	意大利	121	5.1%	7	法国国家科学研究中心	法国	58	2.4%
8	加拿大	120	5.0%	8	美国国家过敏和传染病研究所	美国	50	2.1%
9	荷兰	104	4.4%	9	圣路易斯华盛顿大学	美国	46	1.9%
10	澳大利亚	100	4.2%	10	西奈山伊坎医学院	美国	45	1.9%

· 施引论文 ·



### 1.3 重点热点前沿——“植物泛基因组研究与应用”

植物泛基因组研究在 2021 年即入选 Top 10 热点研究前沿。泛基因组这一概念最初于 2005 年由美国科学家在微生物组学领域提出，之后很快被拓展并应用于动植物基因组学领域，引领基因组研究进入泛基因组学时代。泛基因组研究旨在把整个物种或群体中的每个个体特有的遗传性状及相关基因都挖掘出来，因此，对生物遗传变异资源挖掘、特有性状调控基因鉴定及培育农业动植物优良品种等意义重大。近年来，该研究前沿不断取得新进展。2018 年，中国牵头联合国内外 16 家单位对 3010 份栽培稻进行测序，构建了首个接近完整的亚洲栽培稻泛基因组。2020 年，加拿大主导的国际团队在来自世界各地的 15 个小麦

品种的基础上，绘制出了史上最全的小麦基因组图谱。同年，中国对 2898 份大豆样本进行重测序，首次实现了基于图形结构的植物泛基因组构建。

2022 年，该前沿共有核心论文 18 篇，总体上较 2021 年更进一步，更加强调泛基因组研究在作物改良中的应用。其中有 14 篇与 2021 年的核心论文（16 篇）重叠，主要研究了番茄、水稻、向日葵等作物的泛基因组及基于泛基因组研究的功能基因挖掘，其中的综述则重点阐述了植物泛基因组学的研究方法等。2022 年新增 4 篇核心论文，主要研究泛基因组如何改变作物基因组学和遗传改良，通过整合物种的野生部分来加速作物改良的超级泛

基因组，葡萄驯化中结构变异的群体遗传学研究，以及 1 篇植物全基因组学的综述。没有进入 2022 研究前沿的 2 篇核心论文重点开展测序、组装等方法研究，包括油菜种质资源全基因组测序及其生态型差异的遗传基础，以及两个甘蓝型油菜近缘种基因组的组装与比较。

2022 年被引频次最高的论文与 2021 年是同 1 篇，被引用了 444 次（图 3），远领先于其他论文。该论文 2018 年发表在《自然》(Nature) 期刊上，由来自中国农业科学院、菲律宾国际水稻研究所、上海交通大学、深圳华大基因、美国亚利桑那大学等机构的研究人员合作完成，研究了 3010 个亚洲栽培水稻基因组的遗传变异、群体结构和多样性。

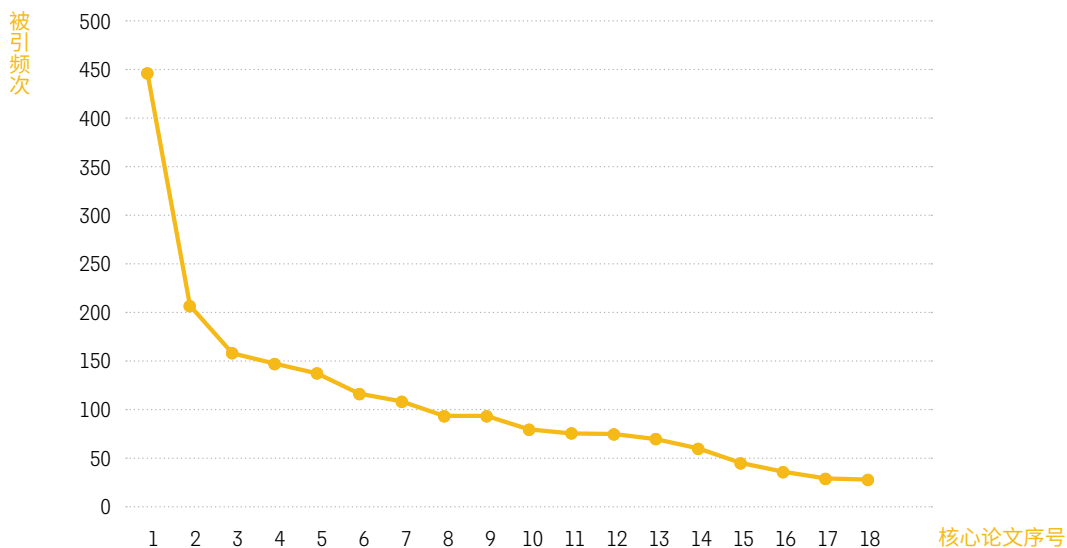
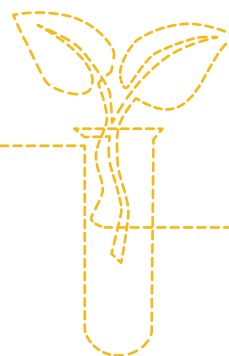


图 3 “植物泛基因组研究与应用” 研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

核心论文 Top 产出国家和机构中 (表 4)，澳大利亚表现最突出，占比超过一半，为 55.6%；排在第二位的美国贡献也较大，为 44.4%；中国排名第三，核心论文数是澳大利亚的一半。澳大利亚的西澳大利亚大学、昆士兰大学和墨尔本大学在 Top 机构中依次名列前三，分别占比 44.4%、22.2% 和 22.2%。其中西澳大利亚大学表现突出，贡献了澳大利亚 10 篇核心论文中的 8 篇。美国乔治亚大学、中国农业科学院、中国科学院、法国国家农业食品与环境研究院 4 家机构并列第四，占比均为 16.7%。

表 4 “植物泛基因组研究与应用”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	澳大利亚	10	55.6%	1	西澳大利亚大学	澳大利亚	8	44.4%
2	美国	8	44.4%	2	昆士兰大学	澳大利亚	4	22.2%
3	中国	5	27.8%	2	墨尔本大学	澳大利亚	4	22.2%
4	法国	4	22.2%	4	乔治亚大学	美国	3	16.7%
5	以色列	3	16.7%	4	中国农业科学院	中国	3	16.7%
6	德国	2	11.1%	4	中国科学院	中国	3	16.7%
6	加拿大	2	11.1%	4	法国国家农业食品与环境研究院	法国	3	16.7%
8	瑞士	1	5.6%	8	巴黎 - 萨克雷大学	法国	2	11.1%
8	印度	1	5.6%	8	佛罗里达大学	美国	2	11.1%
8	南非	1	5.6%	8	冷泉港实验室	美国	2	11.1%
8	菲律宾	1	5.6%	8	上海师范大学	中国	2	11.1%
8	西班牙	1	5.6%	8	康奈尔大学	美国	2	11.1%
8	捷克	1	5.6%	8	法国国家科学研究中心	法国	2	11.1%
8	格鲁吉亚	1	5.6%					





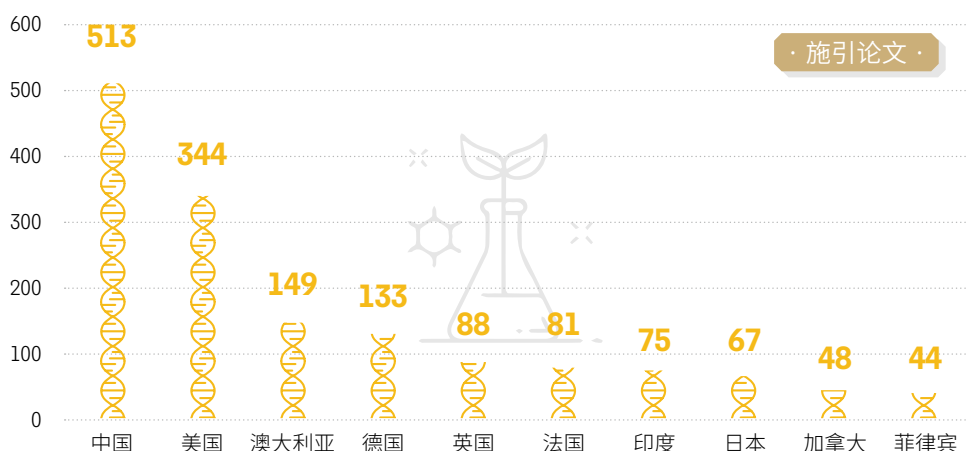
施引论文产出国家分析显示 (表 5), 中美澳在核心论文和施引论文方面均名列前三, 表现突出。核心论文产出排名第三的中国在该

研究方向积极跟进, 施引论文产出最多, 占比为 44.3%。核心论文产出排名第二的美国依然排第二, 占比为 29.7%; 核心论文产出排名第

一的澳大利亚排名第三, 占比为 12.9%。施引论文产出机构方面, 中国农业科学院、中国科学院、华中农业大学依次名列前三。

表 5 “植物泛基因组研究与应用” 研究前沿中施引论文的 Top 10 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	513	44.3%	1	中国农业科学院	中国	153	13.2%
2	美国	344	29.7%	2	中国科学院	中国	114	9.8%
3	澳大利亚	149	12.9%	3	华中农业大学	中国	101	8.7%
4	德国	133	11.5%	4	西澳大利亚大学	澳大利亚	65	5.6%
5	英国	88	7.6%	5	法国国家农业食品与环境研究院	法国	57	4.9%
6	法国	81	7.0%	5	美国农业部	美国	57	4.9%
7	印度	75	6.5%	7	国际水稻研究所	菲律宾	44	3.8%
8	日本	67	5.8%	8	法国国家科学研究中心	法国	39	3.4%
9	加拿大	48	4.1%	9	中国农业大学	中国	37	3.2%
10	菲律宾	44	3.8%	9	康奈尔大学	美国	37	3.2%
				9	马普学会	德国	37	3.2%



## 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 2 个方向入选新兴前沿，分别是“COVID-19 对农业和粮食系统的影响”和“缓解作物砷中毒的机理和方法研究”（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	COVID-19 对农业和粮食系统的影响	17	486	2020.6
2	缓解作物砷中毒的机理和方法研究	7	191	2020.6

### 2.2 重点新兴前沿——“缓解作物砷中毒的机理和方法研究”

砷 (As) 是一种有毒的类金属，会对植物生长产生不利影响，对人类健康构成严重威胁。砷会干扰许多生理和代谢途径，如营养、水分和氧化还原失衡、光合作用和 ATP 合成异常以及膜完整性丧失等。近年来，砷在土壤中的积累日益增加，导致砷元素在各种作物中的毒性增加。因此，研究作物砷耐受力调控

机理，及引入新型改良剂来应对这种情况是当务之急，并成为了农业科学领域的新兴研究前沿。

该新兴前沿共有核心论文 7 篇，主要研究作物砷胁迫耐受力增强的调控机理，以及利用改良剂来缓解砷对作物的毒性。在砷耐受调控机理方面，研究了水杨酸如何诱

导一氧化氮通过上调抗坏血酸 - 谷胱甘肽循环和乙二醛酶系统增强玉米对砷的耐受性，以及褪黑素如何介导花青素生物合成调控和抗氧化防御来增强茶树对砷胁迫的耐受性。在利用改良剂降低毒性方面，主要研究了氧化锌纳米粒子、TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒及褪黑素和钙在降低大豆、水稻砷毒性中的作用。

An aerial photograph of a vast green field, likely a crop field, with distinct purple contour lines curving across the landscape. The field is illuminated by bright sunlight, creating a vibrant green color. In the lower-left foreground, there is a small cluster of trees with yellowish-green foliage. The overall scene is a lush, natural landscape.

# 生态与环境科学

2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 生态与环境科学 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 和图 4），全球性的生态环境问题及新冠肺炎疫情相关的生态环境问题仍是本年度的主要关注点。

表 7 生态与环境科学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	COVID-19 疫情带来的固体废物和医疗废物污染及管理	40	1970	2020.7
2	废水中新型冠状病毒的检测及基于废水的流行病学监测	16	2798	2020.1
3	COVID-19 疫情期间的封锁隔离措施对空气质量的影响	18	3631	2020
4	气候环境因素对 COVID-19 疫情的影响	19	2638	2020
5	催化活化过硫酸盐降解有机污染物	17	1420	2020
6	昆虫衰退现状、灭绝危机与驱动因素	18	3435	2019.7
7	不同材料堆肥过程中腐殖质的形成机制及微生物的作用	22	2186	2018.8
8	水环境中微塑料与微生物的互作及其结合的生态环境风险	16	1849	2018.8
9	森林生境破碎化的全球模式及其对生物多样性的影响	10	1419	2018.8
10	土壤重金属污染的空间分布、来源解析及健康风险评估	38	4518	2018.7

具体来看，环境科学子领域的热点前沿主要涉及新冠肺炎疫情相关环境研究，及有机污染物、微塑料、重金属等污染物的环境特征、风险与控制研究。自 2019 年底起，新冠肺炎疫情在全球持续肆虐，环境学家日益关注新冠肺炎疫情与环境问题相关联的科学问题，该方向的四个热点前沿包括“新冠肺炎疫情带来的固体废物和医疗废物污染

及管理”、“废水中新型冠状病毒的检测及基于废水的流行病学监测”、“新冠肺炎疫情期间的封锁隔离措施对空气质量的影响”、及“气候环境因素对新冠肺炎疫情的影响”。其中，“新冠肺炎疫情期间的封锁隔离措施对空气质量的影响”在 2021 年入选了热点研究前沿，“气候环境因素对新冠肺炎疫情的影响”也在 2021 年入选了新

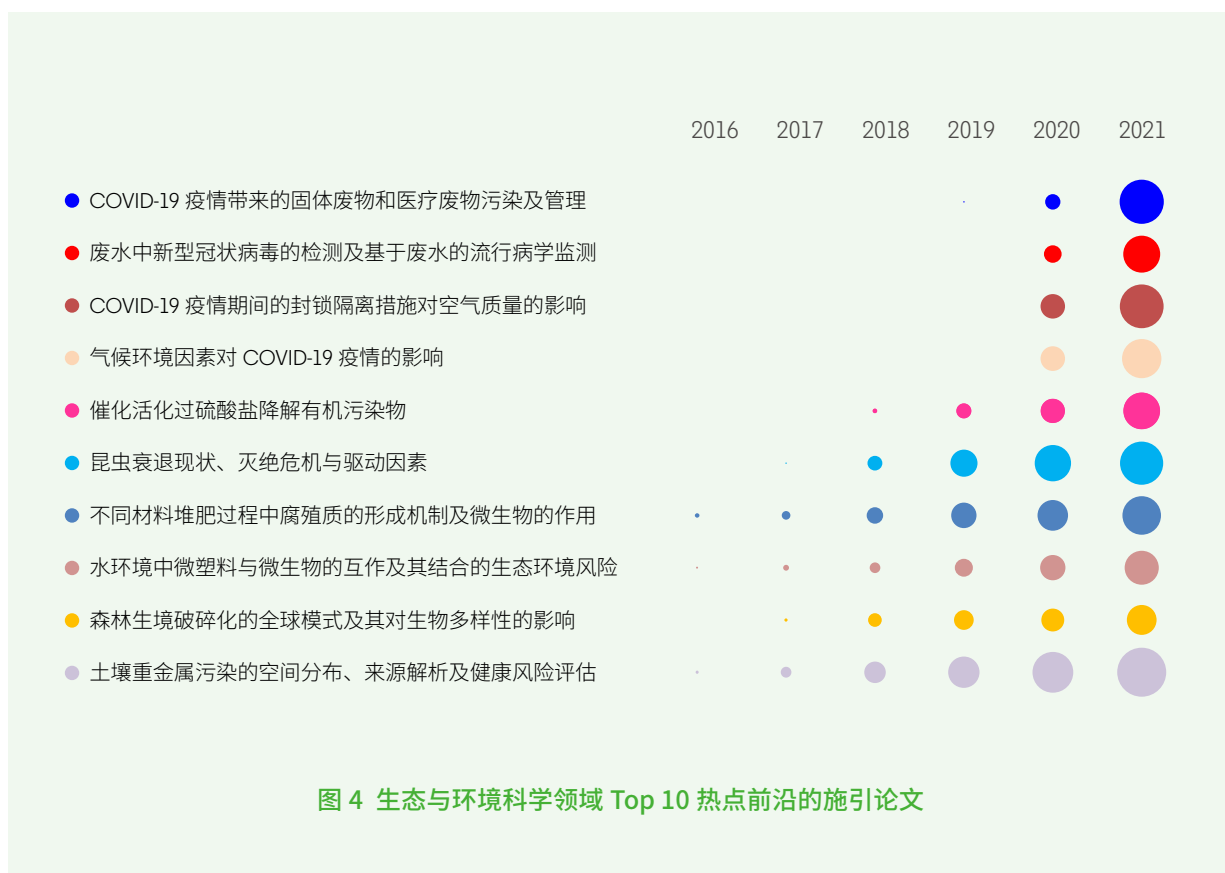
兴研究前沿。环境特征、风险与控制相关研究是环境子领域的另一个重要方向，包括“催化活化过硫酸盐降解有机污染物”、“水环境中微塑料与微生物的互作及其结合的生态环境风险”、“土壤重金属污染的空间分布、来源解析及健康风险评估”三个热点前沿，同时微塑料污染也是“新冠肺炎疫情带来的固体废物和医疗废物污染及管理”

热点前沿中重要的研究内容。这几个前沿也在以往的报告中多次作为热点前沿得以挖掘出来。特别是，微塑料污染相关研究分别在 2015 年至 2017 年、2020 年、2021 年先后多次入选热点前沿，过硫酸盐降解有机污染物相关研究曾在 2017 年和 2018 年分别入选热点前沿，

重金属污染相关研究曾在 2016 年入选热点前沿。

生态科学子领域的热点前沿主要涉及生物多样性、森林生境和土壤生态三个方面，具体包括“昆虫衰退现状、灭绝危机与驱动因素”、“森林生境破碎化的全球模式及其

对生物多样性的影响”和“不同材料堆肥过程中腐殖质的形成机制及微生物的作用”。其中，生物多样性相关研究持续多年成为研究热点，如“昆虫衰退现状、灭绝危机与驱动因素”是连续第二年入选热点前沿。



## 1.2 重点热点前沿——“COVID-19 疫情带来的固体废物和医疗废物污染及管理”

新型冠状病毒肺炎 (COVID-19, 简称新冠肺炎) 疫情大流行引发了诸多社会、经济和环境问题。为应对新冠肺炎疫情, 个人防护用品和

医疗物品使用量激增。据研究统计, 全球每月估计使用 1290 亿口罩和 650 亿手套。由此导致的医疗废物和固体废物的爆炸性增长带来大

范围的环境污染, 并对人类健康产生负面影响。口罩、防护服等个人防护用品的主要成分是塑料, 新冠病毒可在塑料上存活三天, 含有残



留病原体的医疗废弃物带来了疾病传播风险。由于担心塑料作为病毒载体引发疾病传播，当前人们更多地选择使用一次性塑料医疗制品，而不是对其进行重复利用。因此，疫情的爆发也让一次性塑料禁令的实施遭遇困境，这直接导致了塑料污染风险的大幅增加。相关研究在2020年疫情爆发后引起了环境领域研究人员的极大关注。

本研究前沿共40篇核心论文，主要研究方向有两个：一是个人防护用品产生的陆地和海洋生态环境风险和管理挑战。重点是个人防护用品作为微塑料污染的一个新兴来

源的全球环境排放及对废弃物管理的影响和挑战。本前沿被引频次最高的一篇核心论文即强调并展望了新冠肺炎疫情带来的塑料和其他废弃物的环境后果，提出“塑料废物足迹”的概念，从研究和环境政策的角度讨论了新冠肺炎疫情大流行期间和之后废物管理方面新出现的挑战。该文由捷克布尔诺理工大学等机构于2020年发表在《可再生与可持续能源评论》(*Renewable & Sustainable Energy Reviews*)，被引频次达到190次。二是疫情带来的个人防护用品的污染控制技术、无害化处置措施和管理举措。重点是讨论平衡公共卫生、环境安全、及

产业链和供应链的政策，并综合考虑各种技术手段的综合策略和新型解决方案。葡萄牙阿威罗大学等机构的多国研究人员于2021年在《化学工程杂志》(*Chemical Engineering Journal*)上发表了一篇综述论文，讨论了克服新冠肺炎疫情导致的塑料污染挑战的潜在策略，强调未来的措施应反映公共健康和环境安全之间的平衡，转向可持续塑料替代品，继续将塑料污染问题置于全球和地区政治议程的重要位置，并呼吁科学界、产业界和政治家共同行动。该核心论文的被引频次为140次。

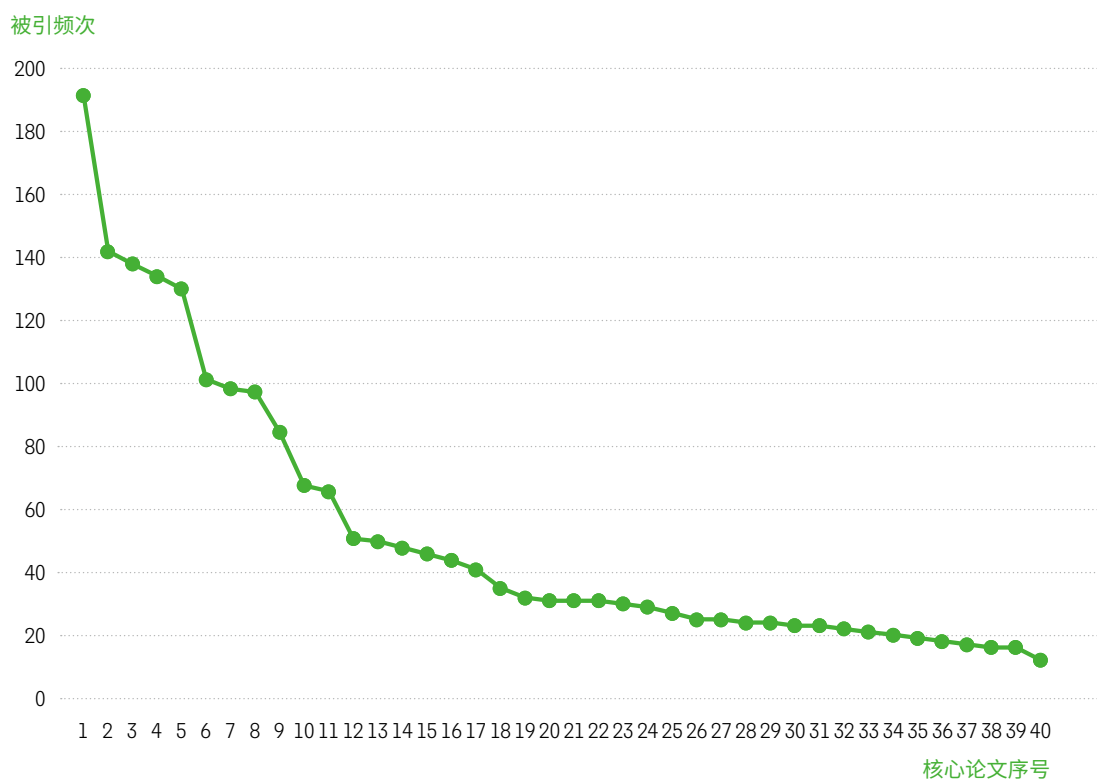


图5 “COVID-19 疫情带来的固体废物和医疗废物污染及管理”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

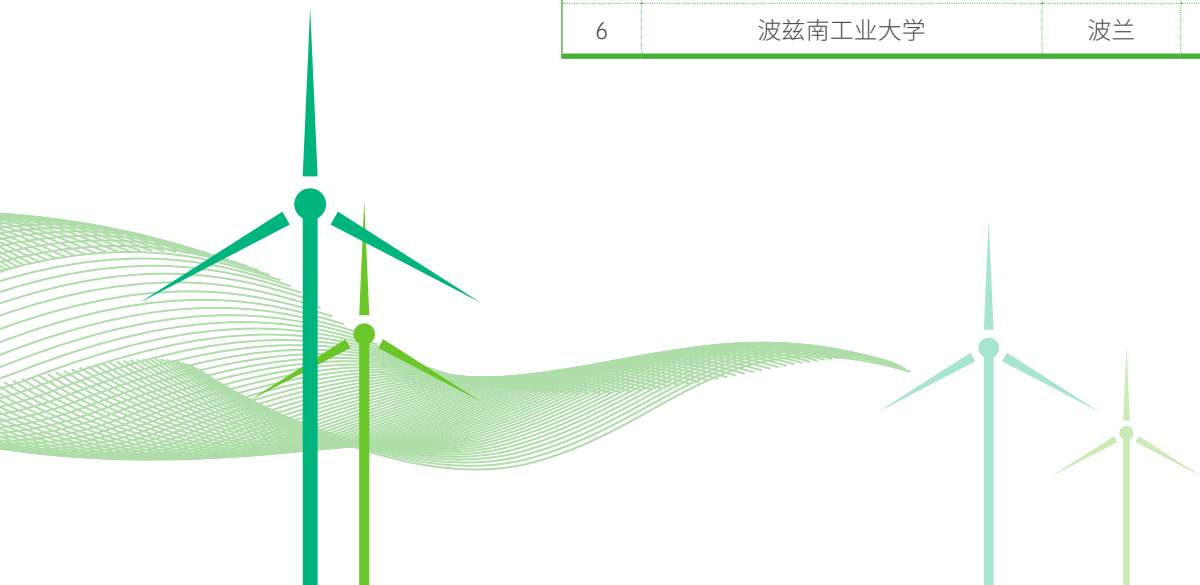
统计分析核心论文的产出国家和机构（表8）。中国、加拿大和印度是核心论文数量最多的3个国家，其中中国共有11篇核心论文，

数量超过总数的四分之一。从机构角度来看，加拿大达尔豪斯大学、葡萄牙阿威罗大学、新加坡科技研究局信息通信研究院、新加坡高性能计算研究所及捷克布尔诺理工大学核心论文数量相对较多，均分别发表了3篇核心论文。

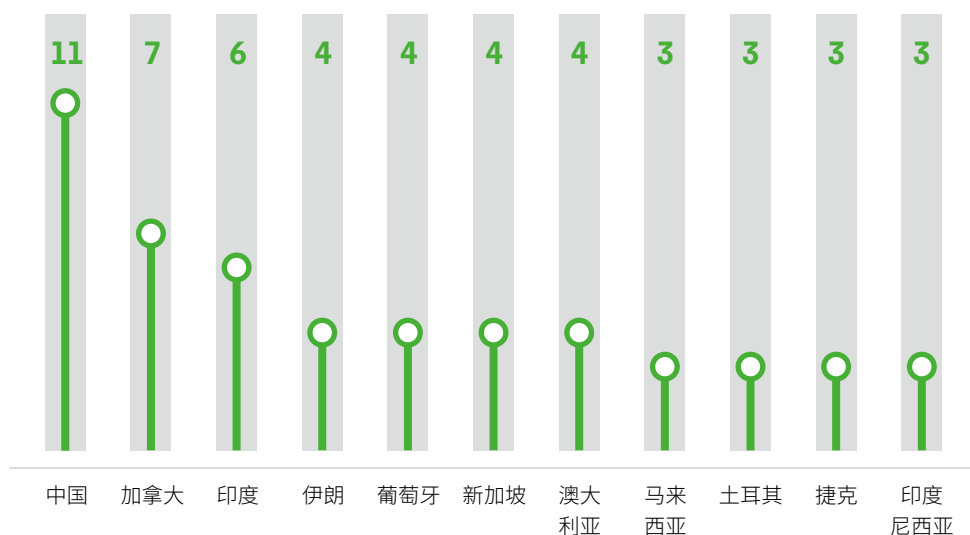
能计算研究所及捷克布尔诺理工大学核心论文数量相对较多，均分别发表了3篇核心论文。

表8 “COVID-19 疫情带来的固体废物和医疗废物污染及管理” 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	11	27.5%	1	达尔豪斯大学	加拿大	3	7.5%
2	加拿大	7	17.5%	1	阿威罗大学	葡萄牙	3	7.5%
3	印度	6	15.0%	1	科技研究局信息通信研究院	新加坡	3	7.5%
4	伊朗	4	10.0%	1	新加坡高性能计算研究所	新加坡	3	7.5%
4	葡萄牙	4	10.0%	1	布尔诺理工大学	捷克	3	7.5%
4	新加坡	4	10.0%	6	中东科技大学	土耳其	2	5.0%
4	澳大利亚	4	10.0%	6	朱拉隆功大学	泰国	2	5.0%
8	马来西亚	3	7.5%	6	伊斯蒂尼大学	土耳其	2	5.0%
8	土耳其	3	7.5%	6	环境研究所	西班牙	2	5.0%
8	捷克	3	7.5%	6	圣伊格纳西奥洛约拉大学	秘鲁	2	5.0%
8	印度尼西亚	3	7.5%	6	加泰罗尼亚研究所	西班牙	2	5.0%
				6	印度理工学院	印度	2	5.0%
				6	赫罗纳大学	西班牙	2	5.0%
				6	纽芬兰纪念大学	加拿大	2	5.0%
				6	西班牙高等科学研究理事会	西班牙	2	5.0%
				6	波兹南工业大学	波兰	2	5.0%



## · 核心论文 ·



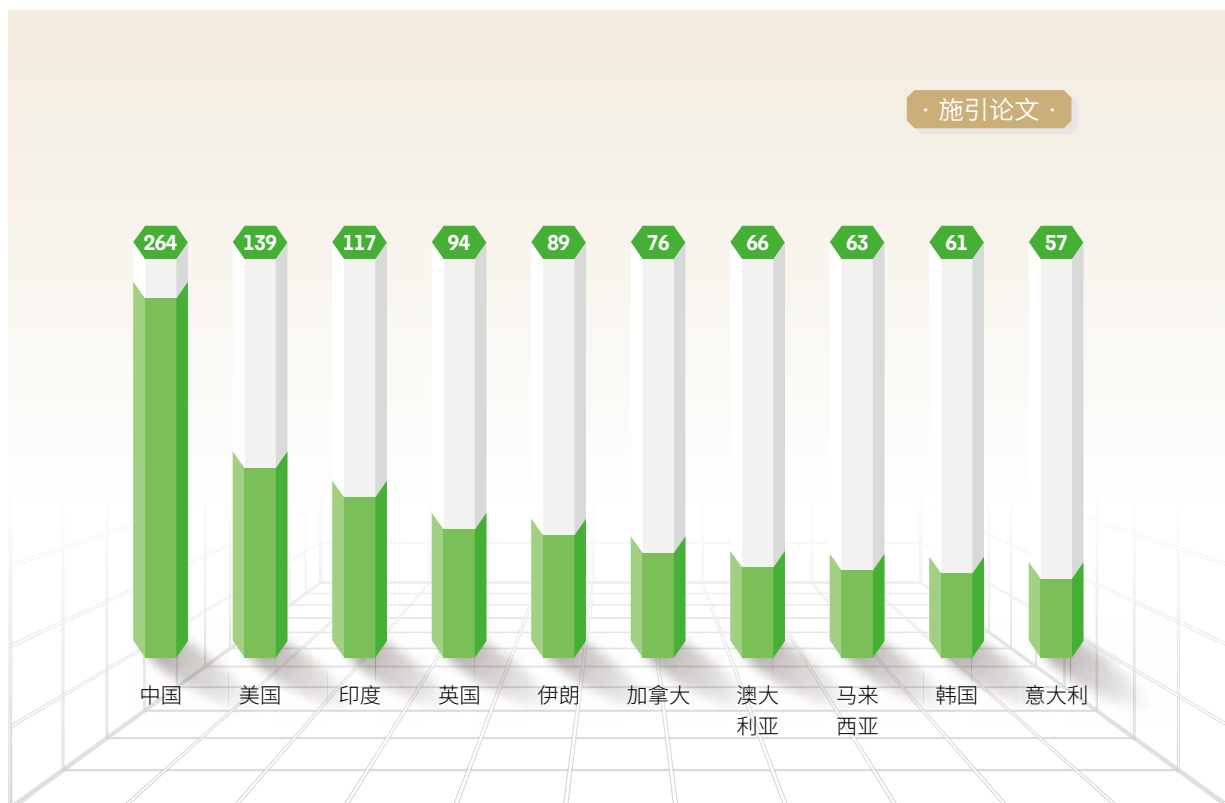
从施引论文产出国家和机构来看（表9），中国仍是该前沿施引论文最多的国家，共有264篇，占比接近四分之一。美国和印度分别

以139篇和117篇施引论文排第二、三位，施引论文数占比超过10%。施引论文的主要产出机构包括捷克布尔诺理工大学、中国科学院、印

度理工学院和伊朗的伊斯兰阿萨德大学。中国科学院以24篇施引论文排名第二。

表9 “COVID-19 疫情带来的固体废物和医疗废物污染及管理”研究前沿中施引论文 Top 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	264	24.1%	1	布尔诺理工大学	捷克	28	2.6%
2	美国	139	12.7%	2	中国科学院	中国	24	2.2%
3	印度	117	10.7%	3	印度理工学院	印度	23	2.1%
4	英国	94	8.6%	3	伊斯兰阿萨德大学	伊朗	23	2.1%
5	伊朗	89	8.1%	5	埃及知识库	埃及	18	1.6%
6	加拿大	76	6.9%	5	新加坡国立大学	新加坡	18	1.6%
7	澳大利亚	66	6.0%	7	科技研究局信息通信研究院	新加坡	16	1.5%
8	马来西亚	63	5.7%	7	达尔豪斯大学	加拿大	16	1.5%
9	韩国	61	5.6%	7	德黑兰大学	伊朗	16	1.5%
10	意大利	57	5.2%	10	法国国家科学研究中心	法国	15	1.4%
				10	清华大学	中国	15	1.4%



### 1.3 重点热点前沿——“废水中新型冠状病毒的检测及基于废水的流行病学监测”

现有证据表明，新冠肺炎疫情流行期间，社区未经处理的废水中存在病毒 RNA。一方面，相关数据表明废水可能是新型冠状病毒的一个可能的暴露和传染途径，引发了对社区未经处理的废水导致疫情传播的关注和担忧。另一方面，废水中检出的新型冠状病毒也反映了社区中存在新冠肺炎疫情，可以用于监测人群中的感染流行率。基于废水的病毒传播监测，也称为基于废水的流行病学（WBE），已被建议作为流行病学的支持工具。

本研究前沿共 16 篇核心论文，

主要的研究方向包括三个方面：

(1) 废水中新型冠状病毒的环境含量、环境特征和监测方法。(2) 废水中新型冠状病毒的暴露途径、对疫情传播的影响及生态风险和健康风险评估。(3) 在疫情流行程度较低或尚未发现大规模暴发前，通过对废水中新型冠状病毒的检出进行流行病学监测和预警。核心论文中被引频次最高的核心论文来自澳大利亚科工组织等机构，研究人员通过对澳大利亚一个社区废水的新型冠状病毒含量进行的定量估计及模型模拟，估算出与临床观察结果一致的感染病例水平。该文发表

于 2020 年 8 月的《整体环境科学》(Science of the Total Environment) 期刊上，共被引用 441 次。被引频次位列第二位的核心论文来自荷兰 KWR 水资源研究所，研究人员通过对荷兰六个社区的观察，发现废水中新型冠状病毒 RNA 的含量与新冠肺炎流行率的增加呈相同趋势。该论文发表于 2020 年 7 月的《环境科学与技术快报》(Environmental Science & Technology Letters) 期刊上，被引频次为 355 次。这两篇论文都证明了利用废水中新型冠状病毒的定量数据对新冠肺炎疫情进行监测的可行性。

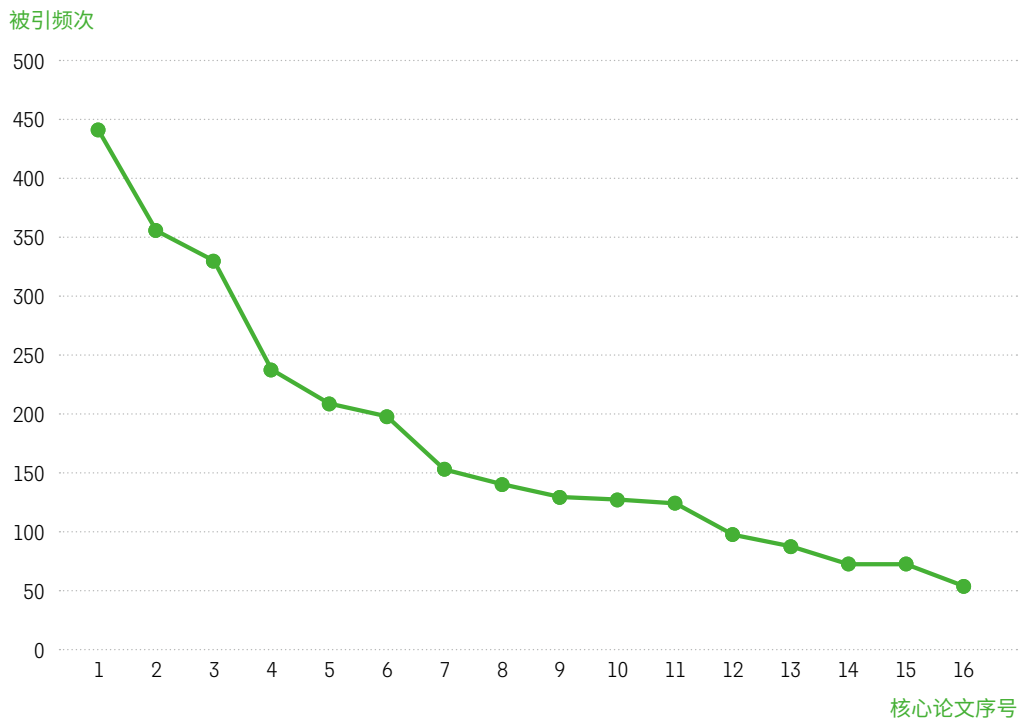


图6 “废水中新冠病毒的检测及流行病学监测”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

统计分析核心论文产出国家和机构（表10）表明，美、日、澳等发达国家及其机构核心论文产出数量较多。其中，美国以7篇核心论文排在首位，核心论文占总论

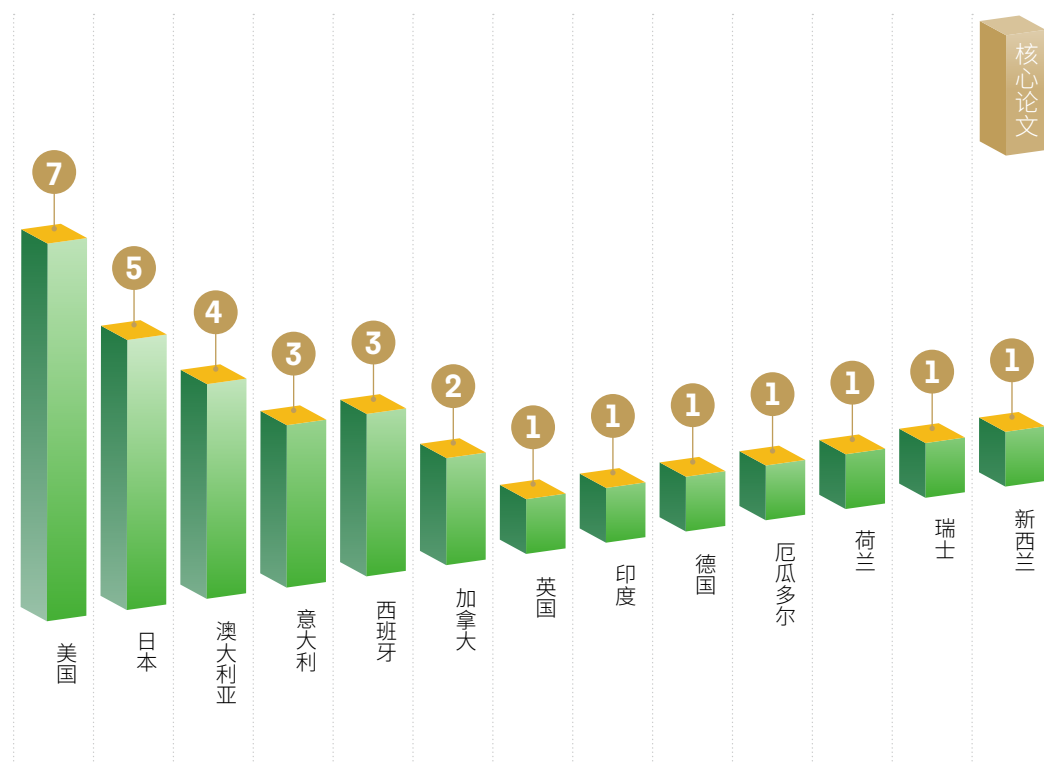
文数的43.8%。日本和澳大利亚分别发表了5篇和4篇核心论文，排第二、三位。核心论文的产出机构以日本北海道大学最多，有5篇，占近三分之一。澳大利亚联邦科工

组织、日本山梨大学、美国圣母大学分别发表4篇核心论文，各占25%。



表 10 “废水中新型冠状病毒的检测及流行病学监测”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	7	43.8%	1	北海道大学	日本	5	31.3%
2	日本	5	31.3%	2	联邦科学与工业研究组织	澳大利亚	4	25.0%
3	澳大利亚	4	25.0%	2	山梨大学	日本	4	25.0%
4	意大利	3	18.8%	2	圣母大学	美国	4	25.0%
4	西班牙	3	18.8%	5	西班牙高等科学研究理事会	西班牙	2	12.5%
6	加拿大	2	12.5%	5	瓦伦西亚大学	西班牙	2	12.5%
7	英国	1	6.3%	5	昆士兰大学	澳大利亚	2	12.5%
7	印度	1	6.3%					
7	德国	1	6.3%					
7	厄瓜多尔	1	6.3%					
7	荷兰	1	6.3%					
7	瑞士	1	6.3%					
7	新西兰	1	6.3%					



从施引论文产出国家和机构来看（表 11），美国仍是施引论文的最大产出国，其 267 篇施引论文约占总施引论文数的三分之一。中国贡献了 98 篇施引论文；印度紧

随其后，有 96 篇施引论文。施引论文产出机构以印度理工学院最突出，有 36 篇施引论文，占 4.3%。美国圣母大学以 27 篇（占 3.2%）施引论文排第二位。法国科研中心

和西班牙高等科学研究理事会分别以 22 篇（占 2.6%）施引论文排并列第三位。中国科学院有 20 篇施引论文，排第六位。

表 11 “废水中新型冠状病毒的检测及流行病学监测”研究前沿中施引论文的 Top 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	267	32.0%	1	印度理工学院	印度	36	4.3%
2	中国	98	11.7%	2	圣母大学	美国	27	3.2%
3	印度	96	11.5%	3	法国国家科学研究中心	法国	22	2.6%
4	澳大利亚	72	8.6%	3	西班牙高等科学研究理事会	西班牙	22	2.6%
4	英国	72	8.6%	5	北卡罗来纳大学	美国	21	2.5%
6	西班牙	66	7.9%	6	中国科学院	中国	20	2.4%
7	加拿大	65	7.8%	7	联邦科学与工业研究组织	澳大利亚	19	2.3%
8	意大利	57	6.8%	8	斯坦福大学	美国	18	2.2%
9	巴西	46	5.5%	8	昆士兰大学	澳大利亚	18	2.2%
10	法国	39	4.7%	10	北海道大学	日本	16	1.9%
				10	杜兰大学	美国	16	1.9%

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 2 个方向入选新兴前沿，即“经济、政策、能源、全球化等社会因素对环境可持续性的影响”和“2019/2020 年澳大利亚特大森林火灾对生态系统的影响及气候相关驱动因素”。

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	经济、政策、能源、全球化等社会因素对环境可持续性的影响	39	1181	2020.9
2	2019/2020 年澳大利亚特大森林火灾对生态系统的影响及气候相关驱动因素	6	173	2020.8

### 2.2 重点新兴前沿——“2019/2020 年澳大利亚特大森林火灾对生态系统的影响及气候相关驱动因素”

澳大利亚特大森林火灾从 2019 年年底开始，一直持续到 2020 年初，是有记载以来最为严重的森林大火之一。大火蔓延到澳大利亚大片地区，烧毁了 11.5 万平方公里的丛林和森林，3500 多所房屋被毁，近 30 亿只动物死亡或者失去栖息地。

该新兴前沿主要包括两方面的研究内容：一方面是评估这场火灾对澳大利亚森林生态系统，包括动

植物栖息地和生物多样性的破坏性影响，及评估动植物种群从火灾中恢复的潜力。研究呼吁加强对物种火灾反应和火灾后种群持续性的研究和管理。

另一方面研究内容是气候变化与澳大利亚特大森林火灾的关系。

2019 年是澳大利亚有记录以来最热和最干燥的一年，持续干旱和创纪录的气温是火灾蔓延的主要驱动力。

数据和模型显示，由于长期变暖趋势，全球极端高温的可能性至少增加了两倍，增加了天气引发的极端火灾风险。澳大利亚特大森林火灾警示人类，持续的干旱和气候变化可能会导致这类森林火灾持续时间更长，发生频率更高，并且在未来成为一个新常态，因此迫切需要人类控制二氧化碳排放，防止灾难性的全球变暖，减少极端天气事件。



An aerial photograph of a lush mangrove forest. The landscape is dominated by dense, vibrant green vegetation. Winding through the forest are numerous narrow, light-colored water channels and larger, irregularly shaped ponds. The water appears slightly turbid, likely due to sediment from the surrounding wetlands. The overall scene is a complex, interconnected network of land and water, characteristic of a coastal wetland ecosystem.

**2022 研究前沿**  
RESEARCH FRONTS

# 地球科学



2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 地球科学 Top 10 热点前沿发展态势

地球科学领域 Top 10 热点前沿中有 6 个属于地质学相关研究, 3 个地理学研究和 1 个大气科学相关研究方向。放射性碳测年技术首次入围, 凸显地球科学研究测试技术的重大进步。利用航天器对地外天体开展原位探测和采样返回分析相

关主题自 2017 年起已经连续 6 年入选, 体现出学术界对行星科学的持续关注和研究热情, 值得注意的是, 2022 年小行星取代火星成为最受关注的探测对象。从地球系统科学视角开展气候变化相关研究持续升温, 基于多种地球系统模型的

气候敏感性评估以及南极洲和格陵兰岛冰量损失对海平面变化的影响研究连年上榜。华北克拉通金矿床时空演化与构造环境研究、天然气水合物成藏机制与开采技术进展等亦多年入选, 再次印证地球科学为人类认知和利用地球作出源头贡献。

表 13 地球科学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	放射性碳测年校正曲线研究、数据集分析与应用	10	1742	2019.3
2	小行星地表特征和成分分析	12	1378	2019.3
3	基于多种地球系统模型的气候敏感性评估	42	6337	2019.1
4	太古代地球地质变化与板块构造研究	13	1239	2019
5	华北克拉通金矿床时空演化与构造环境研究	14	1257	2018.8
6	南极洲和格陵兰岛冰量损失对海平面变化的影响	32	4562	2018.7
7	利用机器学习方法优化地震数据分析	35	3256	2018.7
8	天然气水合物成藏机制与开采技术进展	23	2616	2018.7
9	高亚洲冰川质量变化的水文响应	18	2612	2018.7
10	北半球永久冻土融化对苔原水文和碳储存的影响	15	1972	2018.5



图 7 地球科学领域 Top 10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“放射性碳测年校正曲线研究、数据集分析与应用”

放射性碳测年又称为碳 14 测年、碳 14 年代测定法或放射性碳定年等，是根据自然存在的碳 14 同位素的衰变程度来确定样品的年代的一种测量方法。1940 年代，放射性碳测年法由 Willard Frank Libby 发明，后者因此获得 1960 年诺贝尔化学奖。半个多世纪以来，作为一项强大可靠的科学研究手段，放射性碳测年技术在考古学、地质学、地球物理学以及其他学科等领域得到广泛应用。随着科学家不断获得新的数据以及我们对地球系统的理解不断加深，放射性碳测

年技术持续发展。2020 年公布的最新版放射性碳测年校正曲线引发广泛关注，未来可能对人类精确认知自然和自身的发展历史产生深远影响。

本热点前沿包括 10 篇核心论文，分别聚焦最新的放射性碳测年校正曲线研究，放射性碳测年数据集分析，以及放射性碳测年技术在多个领域的最新应用探索。新一代校正曲线无疑最吸引眼球。2020 年 8 月份的《放射性碳》(Radiocarbon) 特刊公布了备受期待的新一代放射

性碳测年校正曲线，包括适用于北半球的 IntCal20 校正曲线、适用于海洋的 MARINE20 校正曲线、适用于南半球的 SHCal20 校正曲线。围绕三条校正曲线研究的核心论文分别由英国贝尔法斯特女王大学的 Reimer PJ、英国谢菲尔德大学的 Heaton TJ、澳大利亚新南威尔士大学和新西兰怀卡托大学的 Hogg AG 领衔完成，相关研究囊括了大量新数据，曲线可校正的年代上限拓展到迄今约 55000 年，利用贝叶斯样条等新的统计方法显著改进了校正曲线的结构，提高了数据集之间的

一致性，总体不确定性降低。新的校正曲线在科技界引发巨大轰动，后继基于新曲线的研究工作有望取得突破性的新发现。

在近年飞速发展的统计和计算技术的推动下，放射性碳测年数据集的分析方法也得以快速迭代

提升。英国牛津大学的 Ramsey CB 比较了贝叶斯模型中的多种方法，结果发现核密度分析表现突出，适用于广泛的定年应用。英国剑桥大学的 Crema ER 和伦敦大学学院的 Bevan A 开发了一个用于 R 统计计算语言的开放源码软件包，有望优化未来的大型放射性碳测年数据集

的分析。

不断更新的数据集和校正曲线进一步推动了人口与气候变化等前沿研究课题，包括人口动态和气候趋势，海洋储层研究，以及史前人口统计学，农业发展与人口增长等。

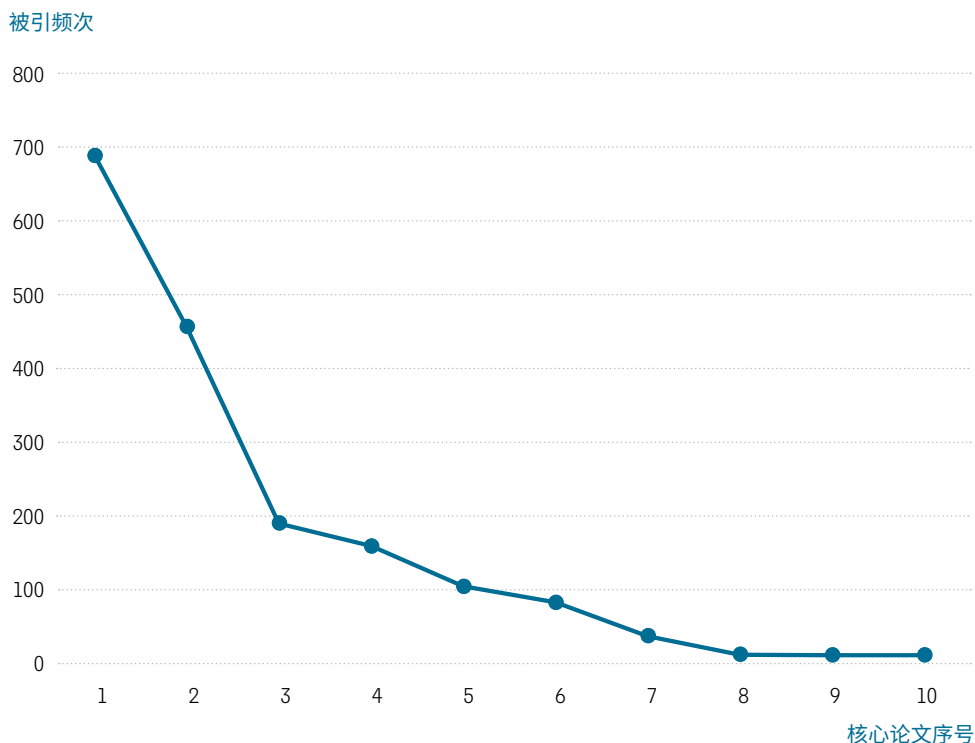


图 8 “放射性碳测年校正曲线研究、数据集分析与应用”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

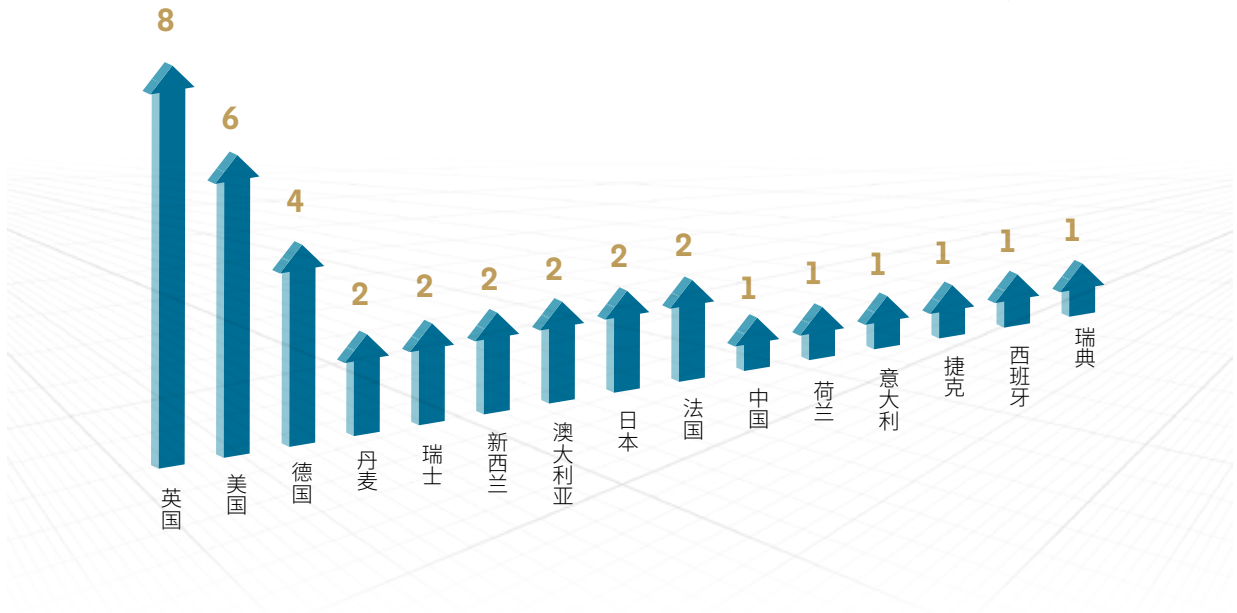
热点前沿“放射性碳测年校正曲线研究、数据集分析与应用”核心论文 Top 产出国家和机构（表 14）中，英、美、德、日、法等科

技强国云集，英国排名第一，贡献了 80% 的核心论文，领衔和参与相关研究的机构包括牛津大学、剑桥大学、谢菲尔德大学、伦敦大学

学院、贝尔法斯特女王大学等。中国的西安交通大学参与一篇核心论文的研究工作。

表 14 “放射性碳测年校正曲线研究、数据集分析与应用”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

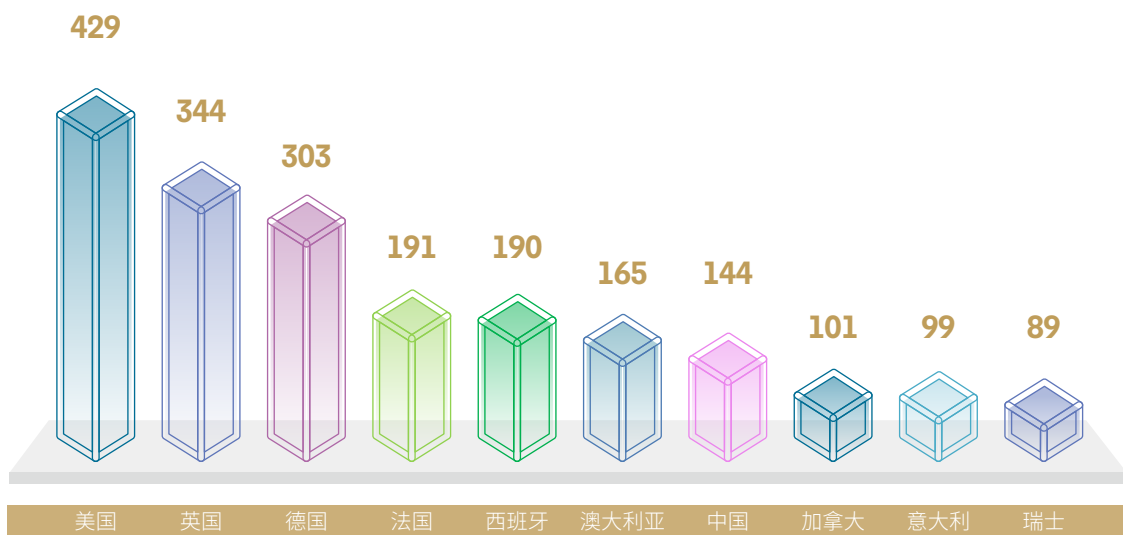
排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	英国	8	80.0%	1	牛津大学	英国	4	40.0%
2	美国	6	60.0%	1	剑桥大学	英国	4	40.0%
3	德国	4	40.0%	3	谢菲尔德大学	英国	3	30.0%
4	丹麦	2	20.0%	3	伦敦大学学院	英国	3	30.0%
4	瑞士	2	20.0%	3	贝尔法斯特女王大学	英国	3	30.0%
4	新西兰	2	20.0%	6	法国国家农业食品与环境研究院	法国	2	20.0%
4	澳大利亚	2	20.0%	6	慕尼黑大学	德国	2	20.0%
4	日本	2	20.0%	6	圣安德鲁斯大学	英国	2	20.0%
4	法国	2	20.0%	6	怀卡托大学	新西兰	2	20.0%
10	中国	1	10.0%	6	英国遗产委员会	英国	2	20.0%
10	荷兰	1	10.0%	6	艾克斯-马赛大学	法国	2	20.0%
10	意大利	1	10.0%	6	基尔大学	德国	2	20.0%
10	捷克	1	10.0%	6	伍兹霍尔海洋研究所	美国	2	20.0%
10	西班牙	1	10.0%	6	法兰西学院	法国	2	20.0%
10	瑞典	1	10.0%	6	法国研究与发展研究所	法国	2	20.0%
				6	苏格兰高地和岛屿大学千禧学院	英国	2	20.0%
				6	新南威尔士大学	澳大利亚	2	20.0%
				6	阿尔弗雷德·魏格纳极地 & 海洋研究所	德国	2	20.0%
				6	加州大学欧文分校	美国	2	20.0%
				6	史密森尼学会	美国	2	20.0%
				6	巴黎文理研究大学	法国	2	20.0%
				6	亥姆霍兹联合会	德国	2	20.0%
				6	法国国家科学研究中心	法国	2	20.0%
				6	达勒姆大学	英国	2	20.0%
				6	海德堡大学	德国	2	20.0%
				6	亚利桑那大学	美国	2	20.0%
				6	奥胡斯大学	丹麦	2	20.0%



从施引论文的角度看（表 15），美国超过英国排名第一，英国、德国次之。在 Top 施引论文产出机构中，法国国家科学研究中心排名第一，俄罗斯科学院、剑桥大学、牛津大学位列其后，中国科学院排名第五。

表 15 “放射性碳测年校正曲线研究、数据集分析与应用”研究前沿中施引论文的 Top 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	429	27.6%	1	法国国家科学研究中心	法国	150	9.6%
2	英国	344	22.1%	2	俄罗斯科学院	俄罗斯	69	4.4%
3	德国	303	19.5%	3	剑桥大学	英国	68	4.4%
4	法国	191	12.3%	4	牛津大学	英国	67	4.3%
5	西班牙	190	12.2%	5	中国科学院	中国	61	3.9%
6	澳大利亚	165	10.6%	6	澳大利亚国立大学	澳大利亚	59	3.8%
7	中国	144	9.3%	6	亥姆霍兹联合会	德国	59	3.8%
8	加拿大	101	6.5%	8	西班牙高等科学研究理事会	西班牙	52	3.3%
9	意大利	99	6.4%	9	马普学会	德国	51	3.3%
10	瑞士	89	5.7%	10	伦敦大学学院	英国	50	3.2%



### 1.3 重点热点前沿——“小行星地表特征和成分分析”

小行星是指围绕太阳运行，体积和质量比行星和矮行星小，且不易释放出气体和尘埃的天体。小行星在太阳系中分布广泛，被认为保存着太阳系形成与演化的关键信息。小行星表面存在最广泛的地貌特征就是撞击坑，由于大多数的小行星都是“碎石堆”结构，通过分析撞击坑的溅射毯，可以获取小行星密度和撞击年代信息。研究小行星地表风化层及表面裸露的石块，可以获取关于小行星内部物质及其母体性质等较为原始的信息，不

同颜色与形态的岩石也能表征小行星表面物质的不同来源或演化过程。

早期的小行星探测主要以飞掠探测为主，随着科技的发展，对小行星的原位观测和采样探测也逐步展开。日本的“隼鸟2号”于2014年发射，2019年成功完成对小行星“龙宫”的触地撞击并进行采样，这是人类首次在小行星上成功完成多次着陆采样，并首次采集到次表层地下样品。2020年12月，

“隼鸟2号”携带样品着陆地球。美国的“起源-光谱分析-资源识别-安全-风化层探测器”于2016年发射，旨在对小行星“贝努”进行采样探测，并计划于2023年返回地球，这也是美国首个小行星采样返回任务。

本热点前沿的12篇核心论文，主要聚焦两个探测器对“龙宫”、“贝努”两颗小行星的初步探测结果，分析其地貌特征、地表成分和热特性，揭示有关两颗小



行星的陨坑和地形的详细信息。2017年8月发表在《空间科学评论》(Space Science Reviews)上的“OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Bennu”综述论文,由“起源-光谱分析-资源识别-安全-风化层探测器”首席研究员、美国亚利桑那大学行星科学家 Dante Lauretta 领衔完成,论文详细描述了任务的科学目标、科学载荷、地面系统和运行原理。2019

年3月, Dante Lauretta 主持完成的另一篇发表在《科学》(Science)上的“The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu”研究论文介绍了“起源-光谱分析-资源识别-安全-风化层探测器”对小行星“贝努”表面的初步探测结果,将为后续着陆点选择提供支持,相关研究也受到了学界的极大关注。日本名古屋大学和宇宙航空研究开发机构主导的发表在《科学》

(Science)上的“Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu-A spinning top-shaped rubble pile”研究论文展示了“隼鸟2号”对小行星“龙宫”形状、质量和地貌的观察结果,通过计算得出其密度较低,拥有“碎石堆”结构,小行星陀螺状的成因可能是经历过2倍于当前自转速度的时期。

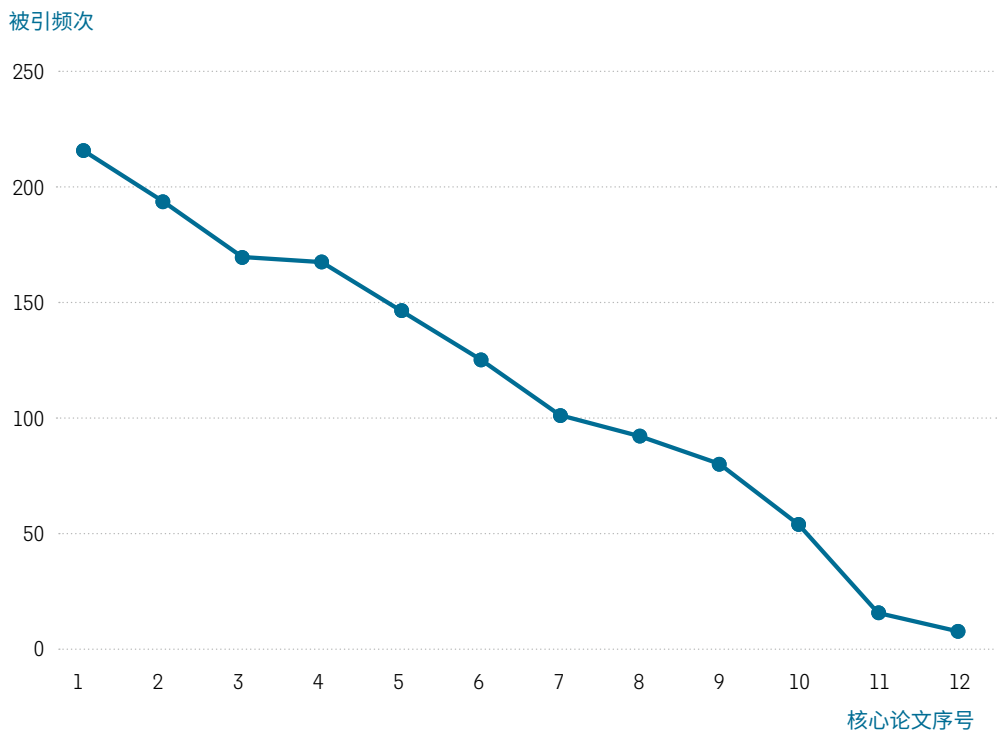


图9 “小行星地表特征和成分分析”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

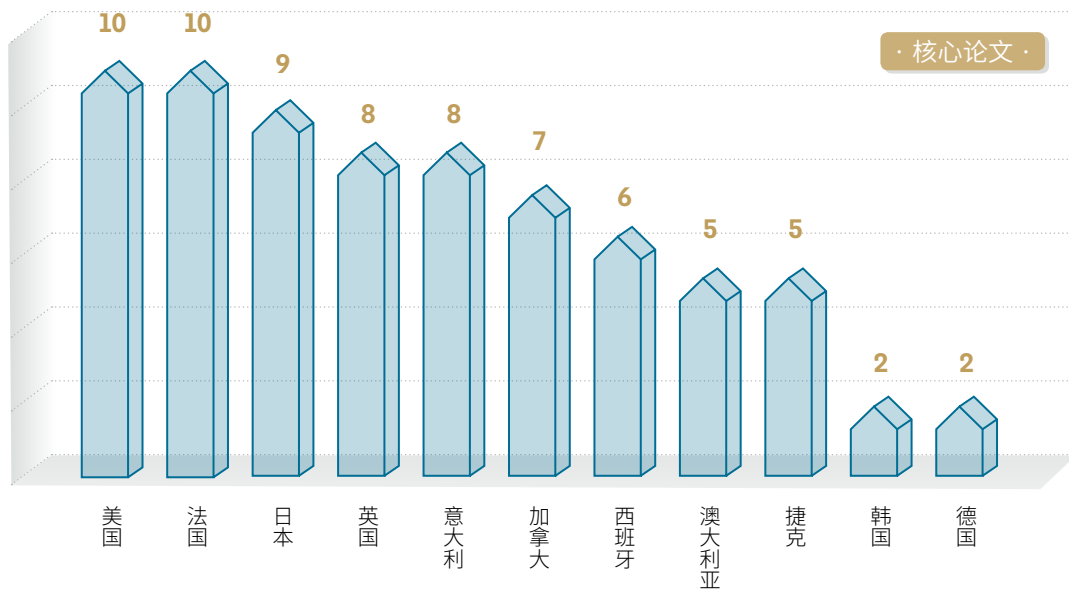
表 16 可以看出, 美国、法国和日本分列核心论文 Top 产出国家前三位, 其中美国和日本分别主导“起源-光谱分析-资源识别-安全-风化层探测器”和“隼鸟 2 号”的研发, 同时根据法国空间局披露,

法国是唯一参与“龙宫”样本分析的合作国。核心论文 Top 产出机构也全部来自这 3 个国家, 包括约翰·霍普金斯大学、法国国家科学研究中心、名古屋大学、美国国家航空航天局和日本宇宙航空研

究开发机构等, 且这些机构彼此之间合作紧密, 凸显任务主导国和核心参与国及相关机构在基础研究中引领概念设计、掌握一手数据、最有希望优先作出原始创新重大成果的优势和可能。

表 16 “小行星地表特征和成分分析”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

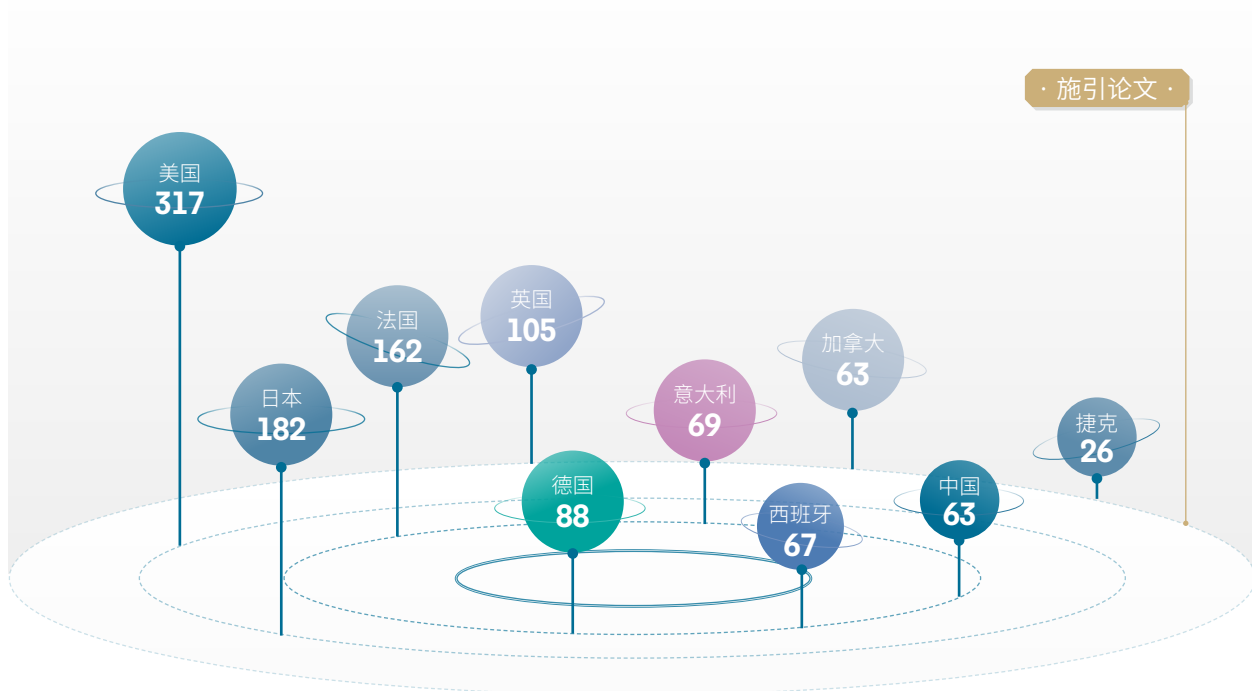
排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	10	83.3%	1	约翰·霍普金斯大学	美国	9	75.0%
1	法国	10	83.3%	1	法国国家科学研究中心	法国	9	75.0%
3	日本	9	75.0%	1	名古屋大学	日本	9	75.0%
4	英国	8	66.7%	1	日本宇宙航空研究开发机构	日本	9	75.0%
4	意大利	8	66.7%	1	美国国家航空航天局	美国	9	75.0%
6	加拿大	7	58.3%	6	亚利桑那大学	美国	8	66.7%
7	西班牙	6	50.0%	6	索邦大学	法国	8	66.7%
8	澳大利亚	5	41.7%	6	蔚蓝海岸大学	法国	8	66.7%
8	捷克	5	41.7%	6	巴黎天文台	法国	8	66.7%
10	韩国	2	16.7%	6	巴黎文理研究大学	法国	8	66.7%
10	德国	2	16.7%					



分析该热点前沿的施引论文（表 17）可以看出，美国的施引论文最多，达 317 篇。日本和法国紧随其后，分列第二、三位。Top 施引论文机构也由美、日、法三国的机构占据。

表 17 “小行星地表特征和成分分析”研究前沿中施引论文的 Top 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	317	55.1%	1	美国国家航空航天局	美国	151	26.3%
2	日本	182	31.7%	2	法国国家科学研究中心	法国	132	23.0%
3	法国	162	28.2%	3	日本宇宙航空研究开发机构	日本	124	21.6%
4	英国	105	18.3%	4	亚利桑那大学	美国	123	21.4%
5	德国	88	15.3%	5	东京大学	日本	87	15.1%
6	意大利	69	12.0%	6	蔚蓝海岸大学	法国	75	13.0%
7	西班牙	67	11.7%	7	美国行星科学研究所	美国	74	12.9%
8	加拿大	63	11.0%	7	索邦大学	法国	74	12.9%
8	中国	63	11.0%	9	千叶工业大学	日本	59	10.3%
10	捷克	26	4.5%	10	约翰·霍普金斯大学	美国	57	9.9%
				10	巴黎文理研究大学	法国	57	9.9%





## 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 项研究入选新兴前沿，即“埃及苏伊士湾油田储层多尺度表征”。

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	埃及苏伊士湾油田储层多尺度表征	9	127	2021

### 2.2 重点新兴前沿——“埃及苏伊士湾油田储层多尺度表征”

埃及苏伊士湾盆地位于苏伊士湾及其沿岸地区，为裂谷型盆地，属红海裂谷未分裂的分支，呈近西北—东南向长条状分布，东西边界为两条较长断裂带，南部与红海相连，是埃及最重要的采油区。据统计，苏伊士湾盆地有上百个油田，蕴藏量占埃及油气资源的 70%，有摩根、拜拉伊姆等海上油田，以及阿布鲁迪斯等陆上油田。2022 年 2 月，苏伊士湾拉马丹地区东北部发现一处预估储量达 1 亿桶的新油田，这是过去 20 年来埃及发现的最大的新油田。

储层表征研究是量化油藏特性，识别地质信息和空间变化不确定性的过程。通过研究储层岩石学特征、储层物性、优质储层发育的主控因素以及开发潜力等要素，达到寻找油气富集区和落实剩余油分布的目的。

该新兴前沿共有 9 篇核心论文，内容主要聚焦苏伊士湾十月油田和摩根油田的非常规致密储层表征，基于储层孔隙压力和破裂压力模拟等研究，对油田持续开采具有重要价值。波兰雅盖隆大学和苏

伊士湾石油公司合作产出了 8 篇论文，其中 2021 年 2 月发表在《石油科学与工程杂志》(*Journal of Petroleum Science and Engineering*) 上的“*Multi-scale characterization of unconventional tight carbonate reservoir: Insights from October oil field, Gulf of Suez rift basin, Egypt*”一文被引频次最高，达 19 次。团队选取苏伊士湾十月油田 OCT-X 井的 13 个侧壁岩心样品和 60 个薄片，研究其作为储集岩的岩石物理特征、孔隙结构和成藏潜力。



**2022 研究前沿**  
**RESEARCH FRONTS**

# 临床医学



2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 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

临床医学领域位居前十位的热点前沿集中于新型冠状病毒肺炎（COVID-19，简称新冠肺炎）研究前沿群和非酒精性脂肪肝病研究。自 2019 年底确认，新冠肺炎疫情已造成全球超 6 亿人感染、600 多万人死亡，至今仍然是国际公共卫生和现代医学面临的重大挑战。新冠肺炎研究也延续往年热度，占据 2022 年临床医学热点前沿 Top 10 的 9 个席位，主题涉及伴发基础疾病的新冠肺炎患者临床特征、妇幼群体新冠肺炎临床特征、新冠肺炎并发症、疫苗安全性和药物治疗等问题。非酒精性脂肪肝病是全球最常见肝病，其病理机制、病情进展等方面的异质性使其逐步成为争论焦点。

表 19 临床医学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	COVID-19 疫苗安全性和有效性	4	6085	2020.8
2	托珠单抗治疗重症 COVID-19	11	2363	2020.6
3	感染新冠病毒的癌症患者临床特征、结局和新冠疫苗免疫效果	37	5141	2020.3
4	COVID-19 相关急性肾损伤研究	21	4015	2020.3
5	补体系统在 COVID-19 发病机制中作用以及补体抑制剂治疗效果	43	6022	2020.2
6	感染 COVID-19 孕妇的临床特征及产科和新生儿结局	13	3383	2020.1
7	COVID-19 患者静脉血栓栓塞风险	7	8547	2020
8	COVID-19 相关儿童多系统炎症综合征	14	4210	2020
9	NAFLD 遗传学研究以及疾病更名争议	30	3172	2020
10	COVID-19 患者干扰素应答失衡	2	2288	2020



图 10 临床医学领域 Top 10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“NAFLD 遗传学研究以及疾病更名争议”

非酒精性脂肪肝病 (Nonalcoholic fatty liver disease, NAFLD) 是目前最常见慢性肝脏疾病, 影响全球约 25% 人群健康。NAFLD 以肝脏内脂肪累积程度超过肝重 5% 为主要特征, 可进展为肝硬化、肝细胞癌和肝衰竭, 也会增加糖尿病、心血管疾病的发生发展, 造成巨大社会经济负担。NAFLD 致病机制复杂, 临床也缺乏特异性治疗药物。随着肥胖、糖尿病等问题日益严重, NAFLD 发病率迅速增长, 成为全球性公共卫生问题和研究热点。

精准医学理念推动了临床医

学的革命性改变, 也照亮 NAFLD 诊疗实践。PNPLA3、TM6SF2、MBOAT7、GCKR、ApoC3 和 HSD17B13 等基因已被发现与 NAFLD 风险存在较大关联, 而以 m6A 为代表的 RNA 甲基化修饰等表观遗传也被证实 NAFLD 发病过程中起着重要促进作用。这些研究为 NAFLD 潜在药物靶点和生物诊断标志物的发现奠定了基础, 也为个体化精准诊疗提供了发展方向。此外, 为了更准确地反映代谢紊乱在 NAFLD 发病进展的关键病理表现, 改变该疾病确诊缺乏“肯定性”诊断标准的问题从而推动

诊疗模式改变, 国际专家小组于 2020 年提出采用 MAFLD (Metabolic associated fatty liver disease, 代谢相关脂肪性肝病) 取代已沿用了 40 年的 NAFLD 命名, 此举引发巨大争议, 相关争议探讨和研究进展, 还获得《自然综述-内分泌学》(Nature Reviews Endocrinology) 的“年度回顾”栏目报道。

“NAFLD 遗传学研究以及疾病更名争议”热点前沿的 30 篇核心论文主要集中在 NAFLD 易感基因研究和疾病更名两方面。其中, NAFLD 易感基因研究主要涉



及 HSD17B13、MBOAT7/TMC4、PNPLA3 等基因与 NAFLD 易感性，如瑞典哥德堡大学等团队于 2016 年 5 月发表在胃肠病学顶级期刊《胃肠病学》(Gastroenterology) 上的研究被引 337 次，指出 MBOAT7/TMC4 是 NAFLD 易感基因，该位点 rs641738 突变会增加欧洲血统人群 NAFLD 患病风险，肝磷脂酰肌醇酰基链重塑是可能介导机制。而 NAFLD 新命名的相关研究探讨更具

热度。其中，2020 年 5 月，全球 10 余个国家和地区 30 多位相关领域专家在《胃肠病学》(Gastroenterology) 上发表有关更改 NAFLD 命名的专家共识声明，72.4% 的专家支持 NAFLD 改名为 MAFLD，该文获得 496 次引用。随后，2020 年 7 月，另一顶级期刊《肝病学杂志》(Journal of Hepatology) 发表了国际专家组对 MAFLD 的新诊断定义共识，被引 511 次。共识明确了 MAFLD 的诊断

主要基于代谢紊乱而无需排除其他疾病，并建立了新的诊断标准。新命名掀起了系列研究热潮与辩驳，而有关新命名带来的诊疗模式证据充分度、既往脂肪型肝炎的分级分期、新命名遗漏的合并纤维化患者是否需干预等困惑和不足，在不可避免地造成了该疾病研究的混乱的同时，也将有利于其完善和深入。

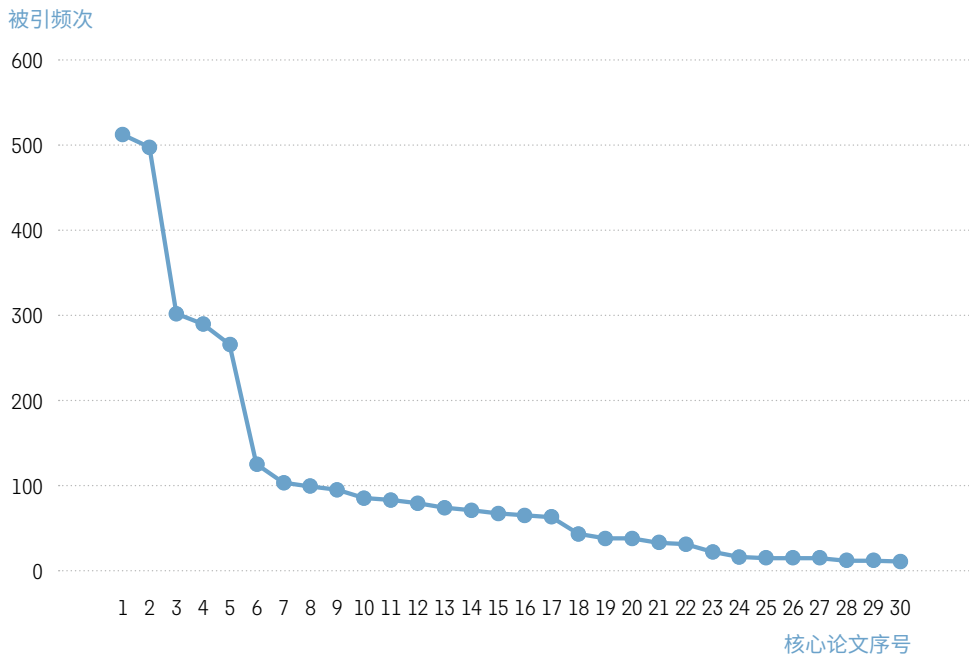


图 11 “NAFLD 遗传学研究以及疾病更名争议”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

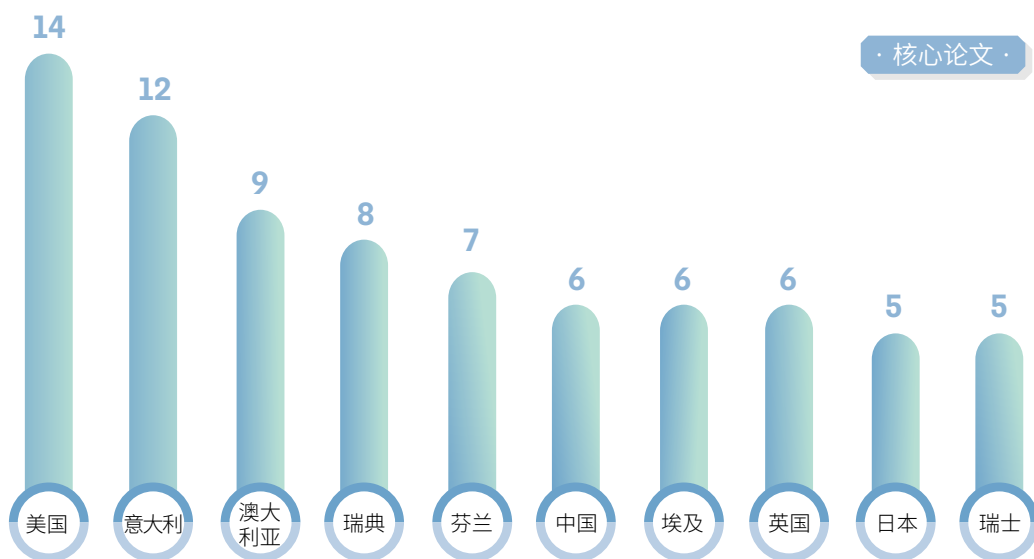
该热点前沿的 Top 产出国家中，美国、意大利、澳大利亚处于领先，尤其是美国，贡献了 46.7% 的核心论文，反映出美国在 NAFLD

遗传学研究和疾病诊疗规范制定方面的高影响力。Top 产出机构中，意大利马焦雷医院、米兰大学最为突出，均贡献 1/3 的核心论文；瑞

典哥德堡大学、澳大利亚悉尼大学、意大利麦格纳格拉西亚大学、埃及知识库和美国德州大学达拉斯西南医学中心等机构也有不俗贡献。

表 20 “NAFLD 遗传学研究以及疾病更名争议” 研究前沿中核心论文 Top 产出国家和机构

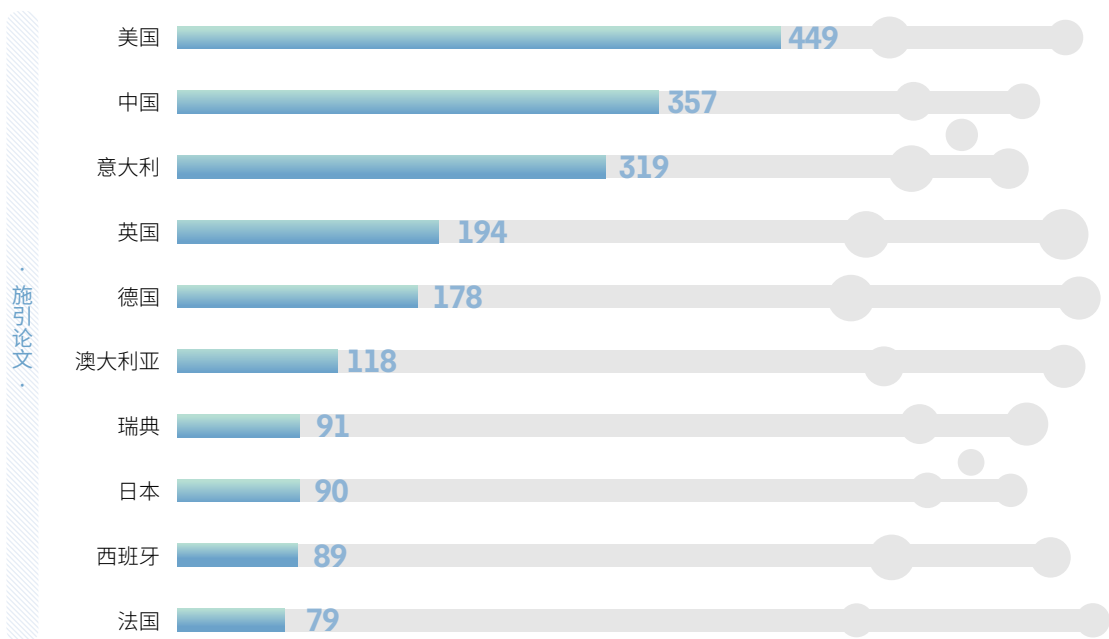
排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	14	46.7%	1	米兰马焦雷医院	意大利	10	33.3%
2	意大利	12	40.0%	1	米兰大学	意大利	10	33.3%
3	澳大利亚	9	30.0%	3	哥德堡大学	瑞典	8	26.7%
4	瑞典	8	26.7%	4	悉尼大学	澳大利亚	7	23.3%
5	芬兰	7	23.3%	4	麦格纳格拉西亚大学	意大利	7	23.3%
6	中国	6	20.0%	6	埃及知识库	埃及	6	20.0%
6	埃及	6	20.0%	6	德州大学达拉斯西南医学中心	美国	6	20.0%
6	英国	6	20.0%	8	巴勒莫大学	意大利	4	13.3%
9	日本	5	16.7%	8	赫尔辛基大学	芬兰	4	13.3%
9	瑞士	5	16.7%	8	梅尼亚大学	埃及	4	13.3%
				8	库皮奥大学	芬兰	4	13.3%
				8	Minerva 基金会	芬兰	4	13.3%
				8	曼苏拉大学	埃及	4	13.3%
				8	东芬兰大学	芬兰	4	13.3%



施引论文方面，美国以较大优势领先，反映其在该领域的研究已形成一定规模，这与其国内不断增加的 NAFLD 患病率息息相关。中国、意大利、英国和德国等 NAFLD 高发国家也呈现跟进态势。施引论文 Top 产出机构中意大利米兰大学、米兰马焦雷医院、澳大利亚悉尼大学排名前三。

表 21 “NAFLD 遗传学研究以及疾病更名争议”研究前沿中施引论文 Top 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	449	26.7%	1	米兰大学	意大利	95	5.7%
2	中国	357	21.2%	2	米兰马焦雷医院	意大利	86	5.1%
3	意大利	319	19.0%	3	悉尼大学	澳大利亚	79	4.7%
4	英国	194	11.5%	4	哈佛大学	美国	56	3.3%
5	德国	178	10.6%	5	哥德堡大学	瑞典	53	3.2%
6	澳大利亚	118	7.0%	6	CIBER 公司	西班牙	51	3.0%
7	瑞典	91	5.4%	7	法国国家健康与医学研究所	法国	48	2.9%
8	日本	90	5.4%	8	维罗纳大学	意大利	47	2.8%
9	西班牙	89	5.3%	9	麦格纳格拉西亚大学	意大利	45	2.7%
10	法国	79	4.7%	10	上海交通大学	中国	44	2.6%



### 1.3 重点热点前沿——“COVID-19 患者干扰素应答失衡”

新冠肺炎 (COVID-19) 目前尚没有特效药。干扰素 (interferon, IFN) 是临床常用广谱抗病毒药, 可快速诱导激活多种抗病毒蛋白, 抑制病毒复制, 并激活免疫细胞清除病毒。有研究发现, 新型冠状病毒 (SARS-CoV-2) 感染人体后, 可抑制干扰素产生、信号转导和刺激蛋白生成, 抑制干扰素应答, 进而造成病毒大量繁殖, 引起过度炎症反应等, 导致多器官衰竭。早期有研究指出, 外源性干扰素可以控制新冠肺炎患者病情进展, 干扰素也曾被部分国家或地区纳入新冠肺炎治疗方案。然而, 多项临床试验发现, 干扰素并不能明显缓解病情, 使用不当甚至会促进炎症细胞因子分泌和免疫细胞浸润而加剧疾病进展。干扰素适用人群、治疗效果、给药时机、最佳给药剂量等争议的存在, 使得相关研究一度成为研究热点。

构成“COVID-19 患者干扰素应答失衡”热点前沿的 2 篇核心论文, 分别发表在顶级期刊《细胞》(Cell) 及《科学》(Science) 上,

自 2020 年发表以来分别被引 1394 次和 894 次。两篇论文均研究了新型冠状病毒对宿主转录反应的表征、病毒复制与免疫表达方面的不平衡关系, 即 IFN- I 型和 IFN- III 型干扰素的表达以及趋化因子升高、IL-6 的高表达。其中, 美国西奈山伊坎医学院 Daniel Blanco-Melo 等人于 2020 年 5 月 28 日发表在《细胞》(Cell) 上的研究, 通过新型冠状病毒与其他呼吸道病毒转录反应的比较, 发现宿主对新型冠状病毒的反应未能启动 IFN- I 和 IFN- III 应答, 同时诱导了募集效应细胞所需的高水平趋化因子, 使免疫反应减弱、炎症加重, 未来工作应集中在具有免疫调节特性的药物上。而法国巴黎大学 Jérôme Hadjadj 等人 2020 年 7 月 13 日在线发表在《科学》(Science) 上的论文则发现, 干扰素反应缺乏和炎症加重的结合可能是重症新冠肺炎患者的标志之一, 推测可通过给予干扰素药物缓解干扰素缺乏, 而干扰素药物接触病毒的持续时间、时机和位置似乎是治疗成功的关

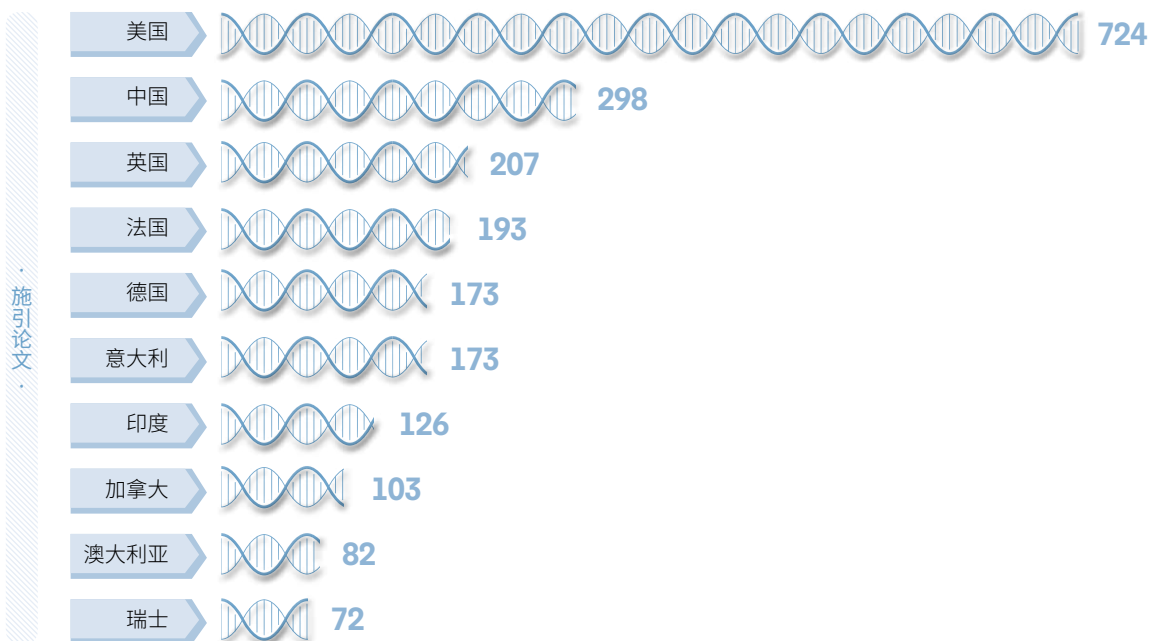
键。两项研究均认为, 新冠肺炎治疗中应用干扰素似乎是行之有效的治疗方案, 但如何应用需进一步确认。进一步的研究发现, 干扰素用于新冠肺炎治疗应当越早越好, 而且太晚给予可能会给失控的炎症火上浇油。也有多项研究认为, 干扰素治疗新冠肺炎可能弊大于利, 甚至有研究者质疑低干扰素水平究竟是病情恶化的原因还是后果。由于临床证据不足, 干扰素也被从部分国家或地区的新冠肺炎诊疗方案中剔除。干扰素在新型冠状病毒感染中的作用机制以及干扰素药物是否能够或如何在新冠肺炎防治中发挥重大作用, 仍然存疑。

施引论文方面, 美国以较大优势领先, 在该热点前沿研究中形成一定规模。中国、英国、法国、德国、意大利、印度、加拿大等国家也有活跃表现。施引论文 Top 产出机构半数来自法国, 法国国家健康与医学研究所、巴黎大学、巴黎公共援助医院和美国哈佛大学等踊跃参与该热点前沿的跟进研究。



表 22 “COVID-19 患者干扰素应答失衡”研究前沿中施引论文的 Top 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	724	36.9%	1	法国国家健康与医学研究所	法国	127	6.5%
2	中国	298	15.2%	2	巴黎大学	法国	87	4.4%
3	英国	207	10.5%	3	巴黎公共援助医院	法国	84	4.3%
4	法国	193	9.8%	4	哈佛大学	美国	82	4.2%
5	德国	173	8.8%	5	法国国家科学研究中心	法国	77	3.9%
6	意大利	173	8.8%	6	中国科学院	中国	57	2.9%
7	印度	126	6.4%	7	美国国立卫生研究院	美国	52	2.6%
8	加拿大	103	5.2%	8	西奈山伊坎医学院	美国	50	2.5%
9	澳大利亚	82	4.2%	9	索邦大学	法国	46	2.3%
10	瑞士	72	3.7%	10	耶鲁大学	美国	45	2.3%



## 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 2022 年入选的 17 个新兴前沿，除新冠肺炎相关的疫苗有效性、疫苗副作用、后遗症及并发症、药物治疗和病毒快速检测等 15 个研究主题外，还包含肥胖和糖尿病肾病两大常见慢性病药物治疗研究主题。综合 CPT 指标、前沿发展潜力及科技情报研究人员的判断，选取“COVID-19 疫苗副作用和对突变株有效性”前沿群作为重点分析对象，该前沿群也是 2021 年重点前沿群“COVID-19 肺炎疫苗研发”的延续。

表 23 临床医学领域新兴前沿

排名	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	中和抗体药物 LY-CoV555 治疗 COVID-19	4	1001	2021
2	COVID-19 疫苗对德尔塔突变株的有效性	4	639	2021
3	新型冠状病毒再感染研究	4	604	2021
4	ChAdOx1 疫苗抵抗新型冠状病毒 B.1.1.7 和 B.1.351 突变株有效性	3	541	2021
5	COVID-19 后遗症	7	299	2021
6	COVID-19 抗血栓治疗策略	5	289	2021
7	索马鲁肽治疗成人超重或肥胖效果	9	437	2020.9
8	抗抑郁药再利用治疗 COVID-19	12	313	2020.9
9	COVID-19 疫苗诱导血栓性血小板减少症	24	1896	2020.8
10	新型冠状病毒快速抗原检测	33	1732	2020.8
11	COVID-19 mRNA 疫苗接种过敏反应	8	661	2020.8
12	COVID-19 相关心肌损伤病理及机制	13	532	2020.8
13	非奈利酮对 2 型糖尿病合并慢性肾病患者心肾结局影响	3	256	2020.7
14	唾液用于新型冠状病毒检测	11	1570	2020.6
15	COVID-19/ 新型冠状病毒对男性生殖功能影响	21	1146	2020.6
16	COVID-19 患者康复疗法效益	11	443	2020.6
17	雄激素剥夺疗法与新型冠状病毒感染风险以及雄激素调节 TMPRSS2 与 ACE2 在 COVID-19 治疗中的意义	5	356	2020.6

## 2.2 重点新兴前沿——“COVID-19 疫苗副作用和对突变株有效性”前沿群

疫苗仍然是应对新冠肺炎疫情最有效的举措之一，为身处新冠肺炎大流行中的人们带来了希望。多款不同技术路线的新冠疫苗接种在临床试验中显示出良好的安全性和有效性，已获批上市使用。截止 2022 年 9 月 26 日，全球已完成 127 亿剂次疫苗接种，67.9% 的人口至少接种一剂次。但是，随着真实世界中接种人群的扩大和接种剂次增加，疫苗的副作用引起了广泛关注。与此同时，新型冠状病毒突变株的不断出现，也对疫苗研发和现有疫苗有效性提出严峻挑战。

“COVID-19 疫苗副作用和对突变株有效性”前沿群包括 4 个新兴前沿，即“COVID-19 疫苗诱导血栓性血小板减少症”、“COVID-19 mRNA 疫苗接种过敏反应”、“COVID-19 疫苗对德尔塔突变株的有效性”和“ChAdOx1 疫苗抵

抗 SARS-CoV-2 B.1.1.7 和 B.1.351 突变株有效性”。其中，2 个有关新冠肺炎疫苗副作用的新兴前沿，主要涉及疫苗诱导血栓性血小板减少症（Vaccine-induced immune thrombotic thrombocytopenia, VITT）以及严重过敏反应研究。VITT 是新冠疫苗不良反应中最为严重的一种，主要在接种重组腺病毒疫苗人群中发现，可表现为严重的脑静脉窦血栓、肺栓塞、动脉血栓形成等多发血栓事件，并伴血小板减少、D 二聚体升高等。VITT 发生率低，但进展快，死亡率高达 20%-50%，需要引起高度重视。而疫苗接种后引发的严重过敏反应虽然极为罕见，但也引起了人们对疫苗风险的担忧。严重过敏反应多发生在 mRNA 疫苗接种后，主要由疫苗中的脂质纳米颗粒等引起，相关机构建议对任何疫苗成分（包括聚乙二

醇和聚山梨酯等）有严重过敏反应的人不可接种此类疫苗，但对没有发生过严重过敏反应的人群则不是禁忌。

另外 2 个有关新冠肺炎疫苗对新突变株有效性的新兴前沿，共 7 篇核心论文，全部发表在顶级期刊《自然》（*Nature*）、《柳叶刀》（*Lancet*）和《新英格兰医学杂志》（*New England Journal of Medicine*）上。这些研究公布了腺病毒载体疫苗 ChAdOx1 或重组蛋白疫苗 NVX-CoV2373 对新型冠状病毒突变株 Alpha（B.1.1.7）、Beta（B.1.351）、Delta（B.1.617.2）、Kappa（B.1.617.1）或 Gamma（P.1）的安全性及有效性实验结果，发现疫苗对部分突变株的保护效力降低甚至失效。这些发现为推动疫苗研究及改善免疫接种策略提供了有力的数据支撑。

# 生物科学

2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS



# 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

生物科学领域位居前十位的热点前沿集中于新型冠状病毒（SARS-CoV-2）相关研究，主题涉及新型冠状病毒致病机理、关键靶点、免疫反应、中和抗体、进化起源和中间宿主、新型冠状病毒 PCR 核酸检测、新冠肺炎疫情的预测模型、以及新型冠状病毒疫苗研究等。

“新型冠状病毒刺突糖蛋白的结构、功能和抗原性”在 2021 年就已经成为热点前沿，2022 年又有了新的研究进展，并继续作为本领域的热点前沿。“新型冠状病毒主蛋白酶的结构解析和抑制剂发现”、“新型冠状病毒引发的 T 细胞免疫”是 2021 年的新兴前沿，2022 年发展

成为热点前沿。“新型冠状病毒中和抗体的发现和药物研发”和“新型冠状病毒 PCR 核酸检测”成为生物科学领域新的热点前沿。此外还有两个与新型冠状病毒疫苗相关的研究热点：“多种新型冠状病毒疫苗的研制”和“新型冠状病毒表位肽疫苗的研制”。

表 24 生物科学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	ACE2 以外的多个新型冠状病毒受体研究	7	1316	2020.3
2	多种新型冠状病毒疫苗的研制	22	8520	2020.2
3	新型冠状病毒刺突糖蛋白的结构、功能和抗原性	6	17127	2020
4	新型冠状病毒中和抗体的发现和药物研发	21	6555	2020
5	新型冠状病毒引发的 T 细胞免疫	7	3788	2020
6	新型冠状病毒主蛋白酶的结构解析和抑制剂发现	7	3290	2020
7	新型冠状病毒 PCR 核酸检测	2	3202	2020
8	COVID-19 疫情的预测模型	4	2765	2020
9	新型冠状病毒的进化起源和中间宿主	6	2025	2020
10	新型冠状病毒表位肽疫苗的研制	9	1479	2020



## 1.2 重点热点前沿——“新型冠状病毒中和抗体的发现和药物研发”

新型冠状病毒中和抗体作为一种治疗性抗体，可以通过中和或抑制病原体的生物学活性来保护细胞免受侵害。凭借特异性和高亲和力特点，中和抗体能够抢先与新型冠状病毒刺突蛋白(S 蛋白)结合，从而阻断病毒与宿主细胞结合。新型冠状病毒中和抗体是新型冠状病毒疫苗的有力补充，可以有效保护不能接种疫苗或疫苗效果欠佳的人群。而对于已经感染的高风险人群，应用中和抗体后亦有潜力提供长期保护，避免再次感染。

2021 年，“强效新型冠状病毒

病毒中和抗体”入选生物领域新兴前沿。2022 年，“新型冠状病毒中和抗体的发现和药物研发”入选 Top 10 热点前沿。

本热点前沿的 21 篇核心论文及其施引论文主要涉及三个方面。新型冠状病毒中和抗体的发现和机制探索方面，在新冠肺炎流行早期，多数研究是从康复者体内直接分离全人源的单克隆中和抗体，或者通过免疫动物来快速获得候选抗体。新型冠状病毒中和抗体的识别位点和特征分类方面，随着越来越多的抗体结构得到解析，很多学者

提出依据不同识别表位可进行抗体分类，对于理解抗体中和活性和作用机制具有重要的意义。新型冠状病毒的逃逸突变及中和抗体面临的挑战方面，迄今国内外已经有多款单克隆中和抗体获批用于新冠肺炎的治疗和预防，但是新型冠状病毒依旧在持续变异，在全世界广泛流行的奥密克戎(Omicron)变异株已经衍生出多种亚类，大幅度逃逸了当前报道的中和抗体。科学家开始将精力集中于开发新一代单克隆广谱中和抗体。

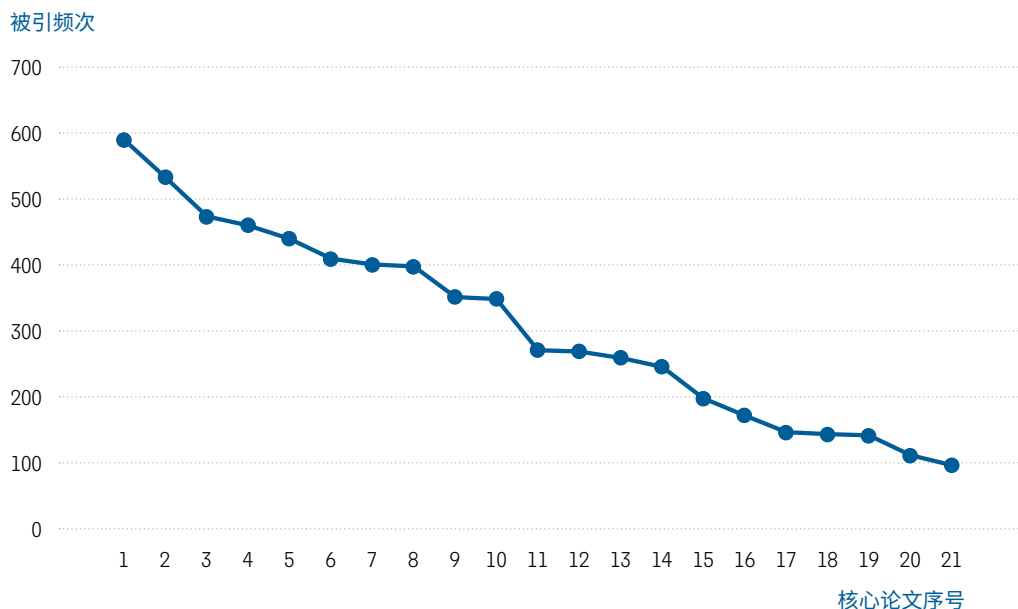


图 13 “新型冠状病毒中和抗体的发现和药物研发”研究前沿核心论文的被引频次分布曲线

美国贡献了该前沿 61.9% 的核心论文，在该领域处于领先地位。中国和瑞士并列第二、三位。机构层面，卢加诺大学、华盛顿大学西雅图分校和斯克里普斯研究所排名前三名（表 25）。核心论文中最高被引的是清华大学和深圳第三人民

医院等团队发表在《自然》(Nature) 上的论文，被引 600 次，该论文报告了 206 个 RBD 特异性单克隆抗体的分离和表征，对中和抗体的中和机制进行的深入研究。其次是来自华盛顿大学西雅图分校的 David Veesler 等在《自然》(Nature) 上

发表的论文，被引 542 次，该论文报道了从 SARS 治愈者体内分离出的抗体可以有效阻断 SARS-CoV-2 的传染性。人类 SARS-CoV 单克隆抗体对 SARS-CoV-2 存在交叉中和作用。

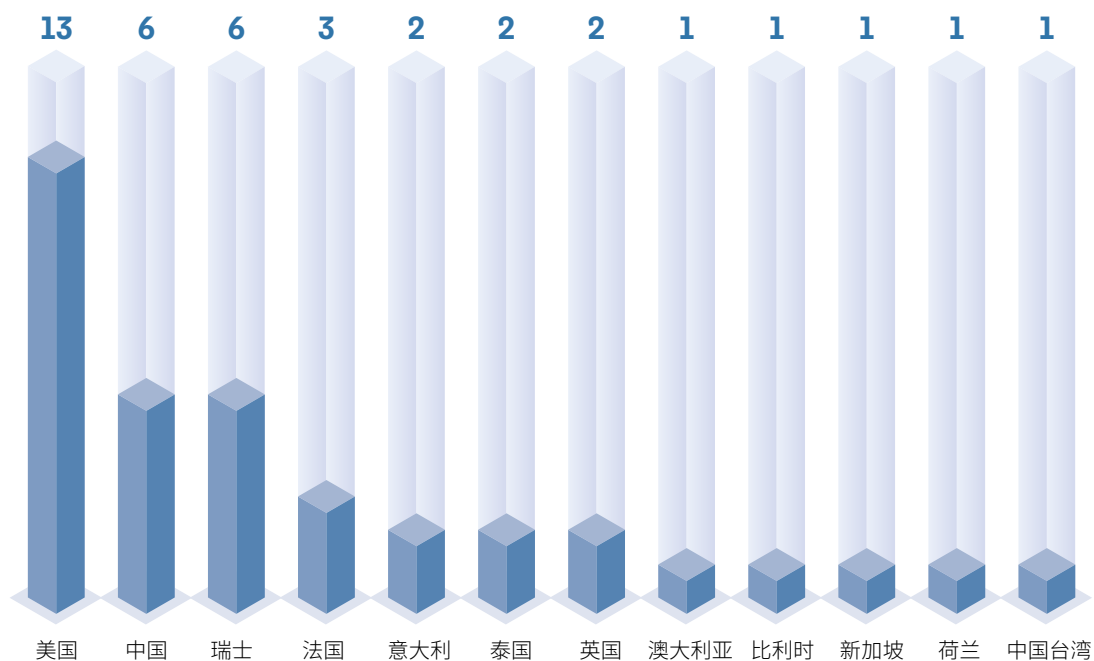
表 25 “新型冠状病毒中和抗体的发现和药物研发”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家 / 地区和机构

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	美国	13	61.9%	1	卢加诺大学	瑞士	5	23.8%
2	中国	6	28.6%	2	华盛顿大学西雅图分校	美国	4	19.0%
2	瑞士	6	28.6%	2	斯克里普斯研究所	美国	4	19.0%
4	法国	3	14.3%	4	拉贡研究所	美国	3	14.3%



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
5	意大利	2	9.5%	4	哈佛大学	美国	3	14.3%
5	泰国	2	9.5%	4	Humabs 生物医学公司	瑞士	3	14.3%
5	英国	2	9.5%	4	加州理工学院	美国	3	14.3%
8	澳大利亚	1	4.8%	4	麻省理工学院	美国	3	14.3%
8	比利时	1	4.8%	4	中国科学院	中国	3	14.3%
8	新加坡	1	4.8%	4	中国食品药品检定研究院	中国	3	14.3%
8	荷兰	1	4.8%	4	巴斯德研究所	法国	3	14.3%
8	中国台湾	1	4.8%	4	霍华休斯医学研究所	美国	3	14.3%
				4	马萨诸塞州综合医院	美国	3	14.3%
				4	法国国家科学研究中心	法国	3	14.3%
				4	洛克菲勒大学	美国	3	14.3%
				4	首都医科大学	中国	3	14.3%
				4	Vir Biotechnology 公司	美国	3	14.3%

## · 核心论文 ·

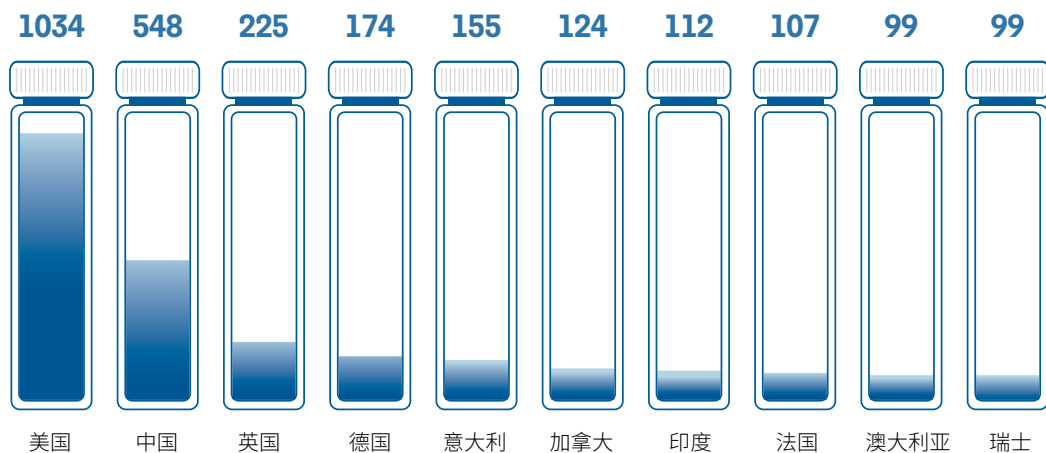


从施引论文的国家分布来看，美国参与了1034篇施引论文，是施引论文数量最多的国家。中国以548篇施引论文排名第二，表明中国和美国在该前沿展开了较多的跟进研究，但从数量上来看中国施引论文仅仅为美国的一半。施引论文的前十名产出机构（含并列11家）中，美国机构占7家，占绝对优势，中国3家，英国1家。中国科学院和哈佛大学以领先优势分布占据Top产出机构第一名和第二名。

表 26 “新型冠状病毒中和抗体的发现和药物研发”研究前沿中施引论文的 Top 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	1034	40.3%	1	中国科学院	中国	148	5.8%
2	中国	548	21.4%	2	哈佛大学	美国	131	5.1%
3	英国	225	8.8%	3	美国国立卫生研究院	美国	87	3.4%
4	德国	174	6.8%	4	华盛顿大学西雅图分校	美国	85	3.3%
5	意大利	155	6.0%	5	霍华休斯医学研究所	美国	80	3.1%
6	加拿大	124	4.8%	6	麻省理工学院	美国	68	2.7%
7	印度	112	4.4%	7	牛津大学	英国	67	2.6%
8	法国	107	4.2%	8	美国国家过敏和传染病研究所	美国	63	2.5%
9	澳大利亚	99	3.9%	9	复旦大学	中国	61	2.4%
10	瑞士	99	3.9%	10	中国医学科学院北京协和医学院	中国	60	2.3%
				10	斯克里普斯研究所	美国	60	2.3%

· 施引论文 ·





### 1.3 重点热点前沿——“新型冠状病毒 PCR 核酸检测”

新型冠状病毒 PCR 核酸检测主要通过检测采集的样本中是否含有新型冠状病毒的核酸，以此来判断被检测者是否感染新型冠状病毒。比起基因测序，病毒 PCR 核酸检测简便、快速且成本相对较低，是目前筛查新型冠状病毒感染者最主要的方法。

该热点前沿由 2 篇核心论文组成。被引频次最高（2716）的一篇核心论文首次发布了新型冠状病毒

的 RT-PCR 诊断测试方法。2020 年 1 月 23 日，来自德国柏林大学医学院的 Christian Drosten 教授在《欧洲监控》(Eurosurveillance) 期刊上发表题为“Detection of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) by real-time RT-PCR”的研究论文，作者发现可以通过 RT-PCR 的方法来检测新型冠状病毒，并且给出了检测引物序列和判定方法，这为新型冠状病毒的检测提供了理论基础和

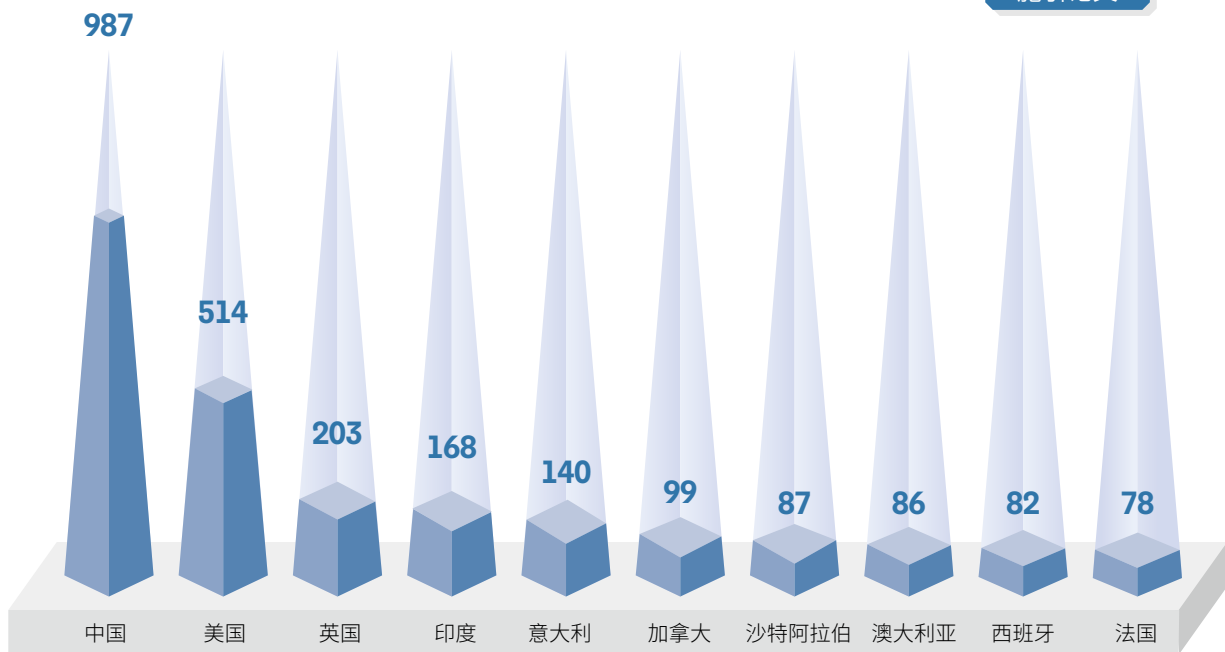
依据。

从施引论文的分布来看，中国和美国是最活跃的国家，分别贡献了 987 篇和 514 篇施引论文。英国以 203 篇施引论文排在第三位（表 27）。Top 10 机构中，9 家机构来自中国，再次证明中国机构在该研究方向的积极参与其中，香港大学、中国科学院和香港中文大学排名前三。进入 Top 10 的另外 1 家机构是美国哈佛大学。

表 27 “新型冠状病毒 PCR 核酸检测”研究前沿中施引论文 Top 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	987	42.3%	1	香港大学	中国	72	3.1%
2	美国	514	22.0%	2	中国科学院	中国	71	3.0%
3	英国	203	8.7%	3	香港中文大学	中国	65	2.8%
4	印度	168	7.2%	4	复旦大学	中国	61	2.6%
5	意大利	140	6.0%	5	华中科技大学	中国	55	2.4%
6	加拿大	99	4.2%	6	哈佛大学	美国	48	2.1%
7	沙特阿拉伯	87	3.7%	6	香港理工大学	中国	48	2.1%
8	澳大利亚	86	3.7%	8	武汉大学	中国	47	2.0%
9	西班牙	82	3.5%	9	上海交通大学	中国	46	2.0%
10	法国	78	3.3%	10	浙江大学	中国	45	1.9%

· 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

生物科学领域有 11 个研究方向入选新兴前沿，主要研究主题包括新型冠状病毒相关研究、AlphaFold 等人工智能预测蛋白质结构、Pfam 等蛋白质家族数据库、小分子蛋白激酶抑制剂的理化性

质、内耳毛细胞和听觉神经元的再生和保护。其中，7 个新兴前沿从不同角度涉及新型冠状病毒相关主题，包括：新型冠状病毒南非和巴西两个变异体相关研究，7 种新型冠状病毒疫苗以及纳米颗

粒疫苗诱导的中和抗体应答，新型冠状病毒主蛋白酶 (Mpro)，核衣壳蛋白以及宿主因子等病毒入侵机制及药物靶点研究。

表 28 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	新型冠状病毒南非变异体 B.1.351 的抗体耐药性	2	927	2021
2	新型冠状病毒巴西变异株 P.1 的基因组学和流行病学	2	615	2021
3	AlphaFold 等人工智能预测蛋白质结构	4	587	2021



序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
4	Pfam 等蛋白质家族数据库	3	426	2021
5	7 种新型冠状病毒疫苗接种诱导的中和抗体应答	2	327	2021
6	新型冠状病毒纳米颗粒疫苗诱导的中和抗体应答	7	230	2020.9
7	小分子蛋白激酶抑制剂的理化性质	4	301	2020.8
8	槲皮素抑制剂对新型冠状病毒主蛋白酶 (Mpro) 的抗病毒作用	13	299	2020.8
9	内耳毛细胞和听觉神经元的再生和保护	8	230	2020.8
10	新型冠状病毒感染所需宿主因子的鉴定	32	1785	2020.6
11	新型冠状病毒核衣壳蛋白的结构和功能	7	557	2020.6

## 2.2 重点新兴前沿解读——“AlphaFold 等人工智能预测蛋白质结构”

人体内有成千上万的蛋白质，蛋白质的结构预测将有助于为基础生物学提供新的见解，并揭示出具有临床意义的新药靶点，对基础科学和药物研发具有重大意义。以往蛋白质结构只能通过繁重的实验室分析来确定。在蛋白质结构解析的几十年历史中，X 射线晶体学、核磁共振波谱学 (NMR)、冷冻电镜 (Cryo-SEM) 技术发挥了巨大的贡献，但这些技术通常耗时长、成本高。1972 年诺贝尔奖获得者、美国生物化学家 Christian Anfinsen 曾经提出一个设想：基于蛋白质的一维氨基酸序列可计算并预测蛋白质的三维结构。然而，三维结构在形成之前会有数以亿计的折叠方式。有数据显示，一个典型的蛋白质大

约有 10 种可能的构型，如果用蛮力来计算所有可能的构型可能花费的时间比宇宙的年龄都要长。在这种设想提出的 50 多年后，谷歌旗下人工智能公司 DeepMind 在 2020 年 12 月的国际蛋白质结构预测竞赛 CASP14 上以 AlphaFold2 击败了其他选手，在预测准确性方面达到接近人类实验结果。

该新兴前沿的核心论文包括下面几篇论文。2021 年 7 月 16 日和 22 日，DeepMind 团队在《自然》(Nature) 发表 2 篇论文，描述了 AlphaFold2 对人类蛋白质组的准确结构预测，并首次对外分享了源代码，预测信息也免费向公众开放。2021 年 7 月 16 日，David Baker 领导的来自华盛顿大学、哈佛大学、

德克萨斯大学西南医学中心等团队在《科学》(Science) 上公开一款新的深度学习工具 RoseTTAFold 的工具，基于一个“三轨”神经网络根据有限的信息快速准确地预测出目标蛋白质的结构。其拥有媲美 AlphaFold2 蛋白质结构预测的超高准确度，而且更快、所需计算机处理能力更低。同样，研究团队也对外分享了源代码。这些成果意味着 AI 已进入生命科学的微观分子领域，并且向生命科学研究人员开放，其意义类似于 AlphaGo 进入人们生活（围棋领域），它的广泛使用可能对结构生物学产生重大影响。这是生物学发展的里程碑。人工智能预测蛋白质结构也入选了《科学》(Science)2021 年度十大

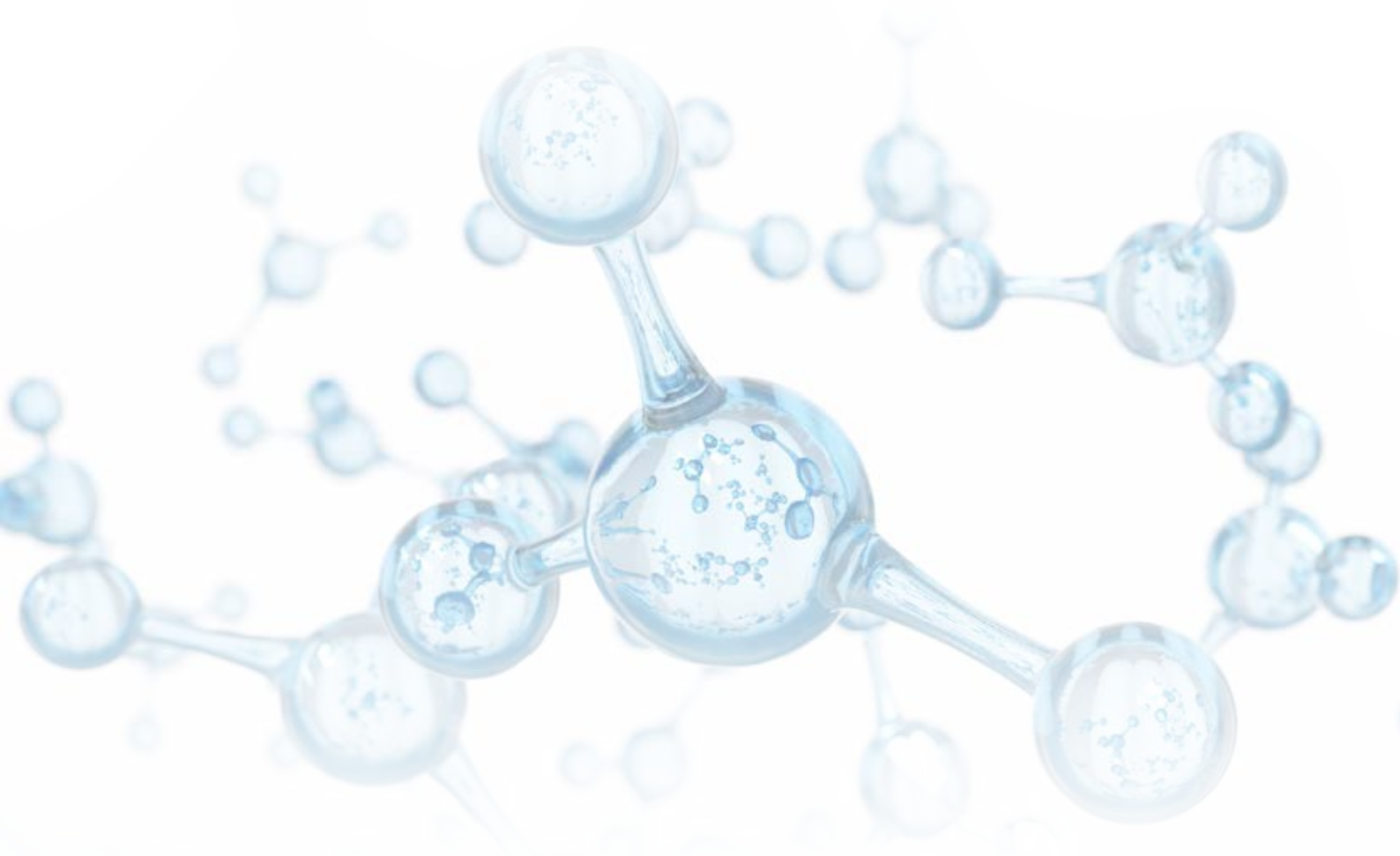


突破。

蛋白质结构曾经只能通过艰苦的实验室分析来确定，但现在可以实现对成千上万的蛋白质和相互作用蛋白质的复合物进行快速预测。

在后继研究中，来自世界各地的科学家团队开始使用开源的工具对未知蛋白进行探索，同时不断验证新工具的稳健性。更有团队以开源的蛋白质结构预测工具为基准，开发了蛋白互作预测工具，解析蛋白-

蛋白互作关系，助力细胞代谢途径研究。更令人振奋的是，科学家们已经利用开源的蛋白质结构预测工具设计创造出有希望用于工业反应、癌症治疗、候选疫苗的原始化合物。



# 化学与材料科学

A laboratory scene with a pipette dropping liquid into a vial and a flask containing yellow liquid.

2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

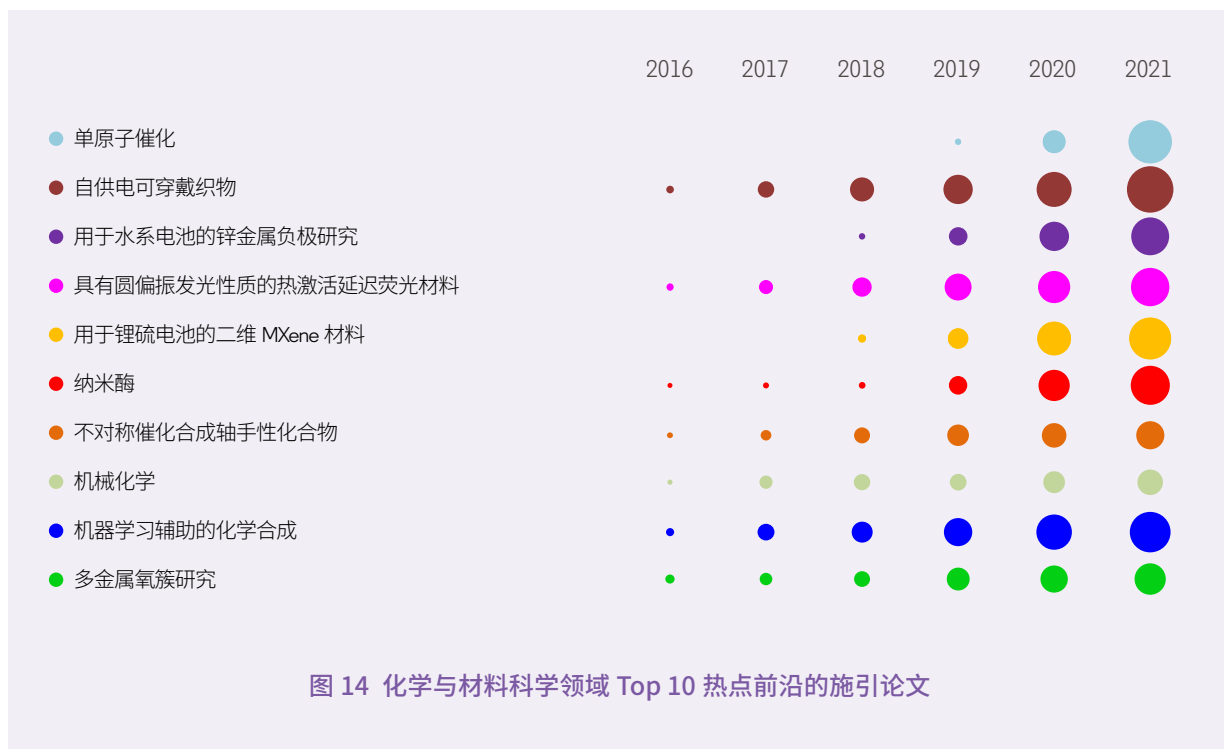
# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 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催化、电池、材料、新兴交叉等研究方向。催化方向有 3 项，“不对称催化合成轴手性化合物”连续第二次入选，“单原子催化”和“纳米酶”都是中国学者率先提出并做出重要贡献的前沿方向。电池方向有 2 项，分别是水系锌离子电池和锂硫电池。水系锌离子电池第二次入选，2020 年正极材料入选，2022 年负极材料。材料方向有 3 项，分别是“自供电可穿戴织物”“具有圆偏振发光性质的热激活延迟荧光材料”“多金属氧簇研究”。新兴交叉方向有 2 项。数据科学与化学的交叉第二次进入 Top 10 热点前沿，另一项是“机械化学”。

表 29 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	单原子催化	31	2439	2020.3
2	自供电可穿戴织物	35	5457	2019.4
3	用于水系电池的锌金属负极研究	22	4462	2019.3
4	具有圆偏振发光性质的热激活延迟荧光材料	29	4304	2019.2
5	用于锂硫电池的二维 MXene 材料	17	2909	2019.1
6	纳米酶	4	2495	2019.0
7	不对称催化合成轴手性化合物	27	2904	2018.9
8	机械化学	17	2357	2018.9
9	机器学习辅助的化学合成	35	4788	2018.8
10	多金属氧簇研究	19	2319	2018.8



## 1.2 重点热点前沿——“纳米酶”

纳米酶是中国科学家提出的新概念。2007年，中国科学院生物物理研究所阎锡蕴团队报道了 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 纳米粒子具有辣根过氧化物酶的催化活性。在证实具有类酶催化活性普遍规律后，他们将这类纳米材料命名为纳米酶。按照定义，纳米酶是一类能够在温和或极端条件下催化酶的底物并遵循酶动力学将其转化为产物的纳米材料。截至目前，已报道的纳米酶有1100多种，包括氧化还原酶、水解酶、裂合酶和异构酶四大类型。其中，过氧化物和超氧化物歧化纳米酶的催化活性已接近或超越相应的天然酶。

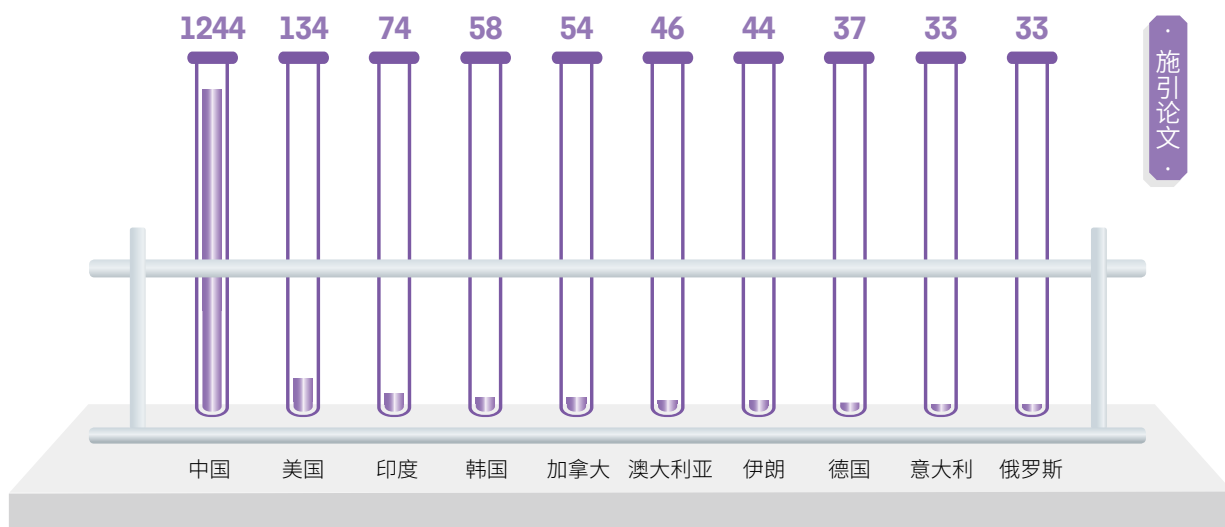
在纳米酶领域，无论是基础研究还是应用研究，中国科学家一直发挥着引领作用。该前沿的4篇高被引论文分别发表在化学领域权威的综述性期刊《化学会评论》(*Chemical Society Reviews*)、《化学评论》(*Chemical Reviews*)、《化学研究述评》(*Accounts of Chemical Research*)。其中，中国科学院生物物理研究所阎锡蕴院士贡献了2篇高被引综述论文，合作者分别来自深圳大学及美国威斯康星大学麦迪逊分校(1篇)和北京理工大学(1篇)。这两篇综述论文介绍了具有特定功能的纳米酶的设计和构建、纳米酶

研究的标准化和纳米酶在生物医学中的应用。中国科学院长春应用化学研究所曲晓刚研究员与来自南京林业大学的合作者介绍了纳米酶在生物传感、环境保护、疾病治疗等领域的应用进展。南京大学魏辉教授介绍了纳米酶在生物传感、诊疗、环境保护等领域的应用进展。

在施引论文方面(表30)，中国发表的论文数量排名第一，并遥遥领先。在排名前十的发文机构中，中国占据了9家，并占据了前6名的位置。这都反映了中国在该领域的研究非常活跃并形成了集群优势。

表 30 “纳米酶”研究前沿中施引论文 Top 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	1244	74.2%	1	中国科学院	中国	244	14.5%
2	美国	134	8.0%	2	吉林大学	中国	61	3.6%
3	印度	74	4.4%	3	南京大学	中国	57	3.4%
4	韩国	58	3.5%	4	中国科学技术大学	中国	56	3.3%
5	加拿大	54	3.2%	5	天津大学	中国	50	3.0%
6	澳大利亚	46	2.7%	6	郑州大学	中国	42	2.5%
7	伊朗	44	2.6%	7	西南大学	中国	37	2.2%
8	德国	37	2.2%	7	滑铁卢大学	加拿大	37	2.2%
9	意大利	33	2.0%	9	上海交通大学	中国	36	2.1%
9	俄罗斯	33	2.0%	10	东南大学	中国	34	2.0%



### 1.3 重点热点前沿——“机器学习辅助的化学合成”

长期以来，化学合成采取依赖专家经验和人工试错的研究模式，不仅失败率较高，而且容易引发安

全事故。实现化学合成智能化、自动化是化学科技工作者长久以来的梦想。以机器学习为代表的人工智

能的快速发展为实现这一梦想提供了可能。《研究前沿》系列报告捕捉到了机器学习助力化学研究的发

展趋势：2019年，“机器学习预测分子性质”入选化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿；2022年，“机器学习辅助的化学合成”进入 Top 10 热点前沿。

该前沿的 35 篇核心论文涉及反应预测（反应性、路线、产物等）和自动合成两方面内容。在反应预测方面，既包括基于化学反应规则

的方法，例如波兰科学院、波兰华沙大学、韩国国立蔚山科学技术院等开发的 Chematica 软件；也包括基于自然语言处理的方法，例如瑞士 IBM 欧洲研究院和英国剑桥大学合作开发的 Molecular Transformer 模型。德国明斯特大学和中国上海大学合作发表的关于使用深度神经网络规划逆合成路线的研究，是被引频次最高的一篇论文。在自动合

成方面，既包括自动合成技术研究，例如美国伊利诺伊大学开发的 Automated Synthesizers，英国格拉斯哥大学开发的 Chemputer 系统；也包括自主实验室研究，例如美国麻省理工学院开发的自动合成平台（相关论文被引频次排在第二位），英国利物浦大学开发的移动实验机器人。

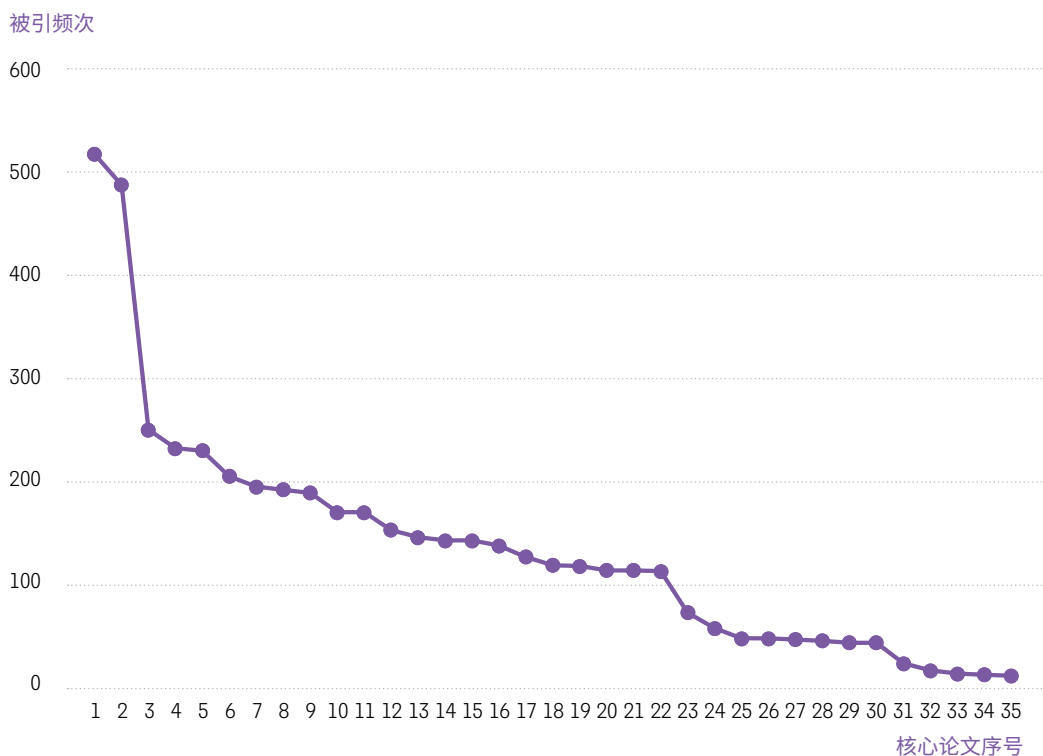


图 15 “机器学习辅助的化学合成”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

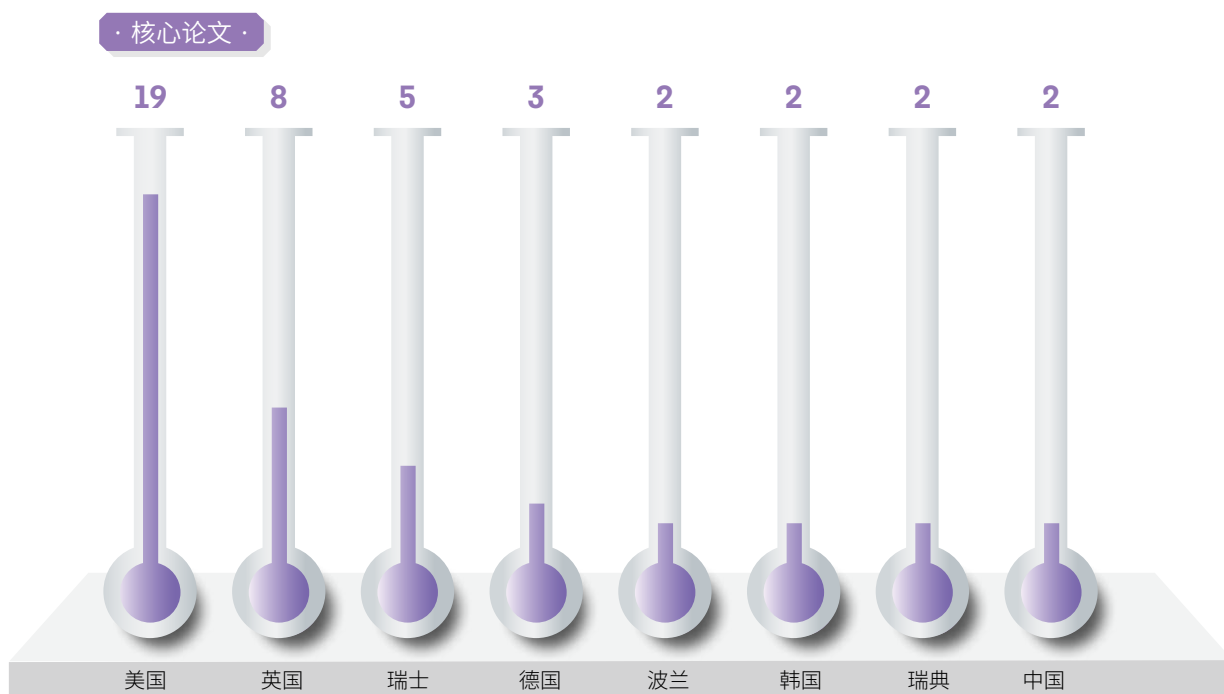
如表 31 所示，美国贡献了该前沿超过一半的核心论文，英国和瑞士分列第二、三位，这 3 个国家在该领域处于领先地位。具体到机

构层面，美国麻省理工学院、瑞士 IBM 欧洲研究院、英国格拉斯哥大学、美国伊利诺伊大学、韩国国立蔚山科学技术院不仅贡献了多篇核

心论文，而且自主研发了产品甚至实现了商业化。

表 31 “机器学习辅助的化学合成”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	19	54.3%	1	麻省理工学院	美国	8	22.9%
2	英国	8	22.9%	2	IBM 欧洲研究院	瑞士	4	11.4%
3	瑞士	5	14.3%	3	伯尔尼大学	瑞士	3	8.6%
4	德国	3	8.6%	4	伊利诺伊大学	美国	2	5.7%
5	波兰	2	5.7%	4	犹他大学	美国	2	5.7%
5	韩国	2	5.7%	4	格拉斯哥大学	英国	2	5.7%
5	瑞典	2	5.7%	4	阿斯利康公司	英国 / 瑞典	2	5.7%
5	中国	2	5.7%	4	华沙大学	波兰	2	5.7%
				4	哈佛大学	美国	2	5.7%
				4	国立蔚山科学技术院	韩国	2	5.7%
				4	明斯特大学	德国	2	5.7%
				4	波兰科学院	波兰	2	5.7%
				4	上海大学	中国	2	5.7%



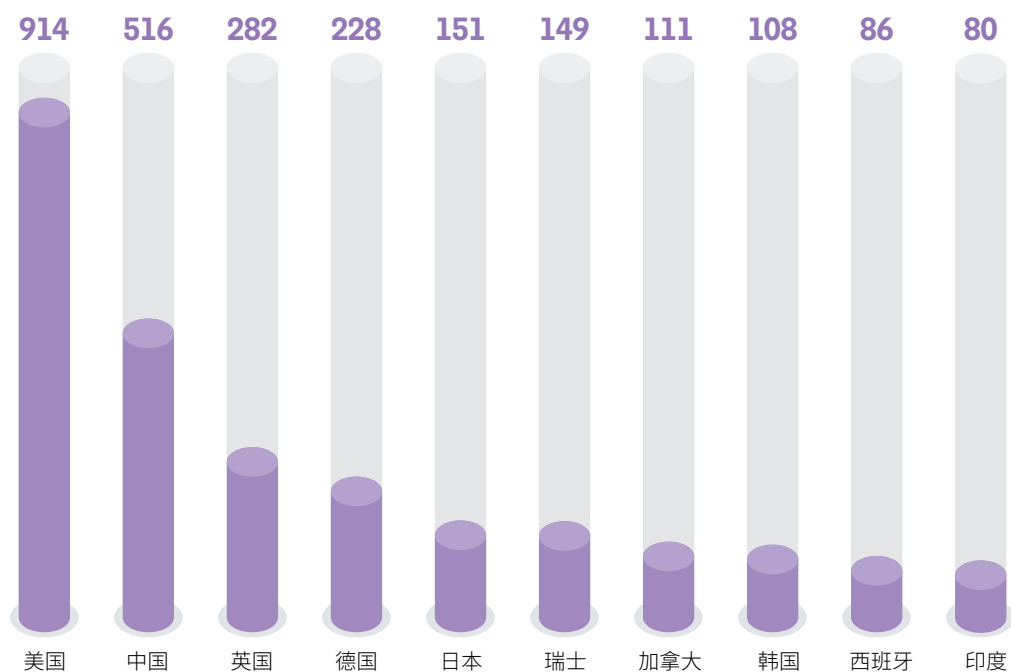


在施引论文方面（表 32），美国排名第一，并显示出很强的研究集群优势；中国排名第二，展现出积极发展的态势；加拿大表现突出，上升势头明显。在施引论文 Top 10 机构中，美国有麻省理工学院等 4 家机构入选，中国有中国科学院（排名第 2）和清华大学（排名第 10）入选。

表 32 “机器学习辅助的化学合成”研究前沿中施引论文 Top 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	914	36.1%	1	麻省理工学院	美国	163	6.4%
2	中国	516	20.4%	2	中国科学院	中国	94	3.7%
3	英国	282	11.1%	3	犹他大学	美国	63	2.5%
4	德国	228	9.0%	4	瑞士联邦理工学院	瑞士	56	2.2%
5	日本	151	6.0%	5	剑桥大学	英国	50	2.0%
6	瑞士	149	5.9%	6	哈佛大学	美国	48	1.9%
7	加拿大	111	4.4%	7	法国国家科学研究中心	法国	44	1.7%
8	韩国	108	4.3%	8	加州大学伯克利分校	美国	42	1.7%
9	西班牙	86	3.4%	9	清华大学	中国	41	1.6%
10	印度	80	3.2%	10	阿斯利康公司	英国 / 瑞典	39	1.5%

· 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 3 项研究入选新兴前沿，分别涉及能源材料、纳米生物医药材料和化学检测技术。钙钛矿太阳能电池多年来一直是化学与材料领域的热点前沿方向，较多关注材料制备、效率和稳定性提升等关键基础问题的解决，2022 年的新兴前沿方向除了持续关注以上问题外，促进钙钛矿太阳能电池商业化的大面积可扩展制备技术和工艺成为新的新兴前沿方向。新冠肺炎疫情肆虐，新型冠

状病毒的快速检测技术成为近两年的研究热点，2021 年的研究主要聚焦于金属纳米粒子制备病毒检测传感器，2022 年的新兴方向则聚焦在采用电化学的方式，如利用印刷电极检测免疫标记酶的副产物等实现唾液中的新型冠状病毒的快速智能检测。纳米材料在药物缓释和输送中的应用首次进入新兴前沿，主要聚焦于采用静电纺丝技术制备的纳米纤维材料在药物缓释和输送中的应用研究。

表 33 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	钙钛矿太阳能电池关键核心基础问题及其商业化实现技术研究	12	909	2020.8
2	采用静电纺丝技术制备的纳米纤维材料在药物缓释和输送中的应用研究	11	282	2020.8
3	用于新型冠状病毒检测的电化学传感技术	5	321	2020.6

### 2.2 重点新兴前沿——“钙钛矿太阳能电池关键核心基础问题及其商业化实现技术”

钙钛矿太阳能电池 (PSC) 除了具有与硅基太阳能电池相近的转换效率外，还具有加工和制造过程简单，可以制备成薄膜形状，成本

低，重量轻等优势，成为最有前途的薄膜光伏 (PV) 技术之一，有可能对成熟的硅太阳能电池市场产生冲击。效率提升、长期稳定性和实

现商业化的大面积材料的大规模可扩展制备是 PSC 需要面对的重要挑战，该前沿也致力于探索这些挑战的解决方案。



针对 PSC 效率提升, 该前沿包含的技术方案主要有: 在钙钛矿层和导电层之间放置电子传输层及添加甲胺基溴化铅; 从阴离子空位缺陷入手, 利用阴离子工程概念抑制存在于晶界和钙钛矿薄膜表面的阴离子空位缺陷等策略实现转换效率的提升。

针对提升 PSC 的长期稳定性

研究, 该前沿包含的技术方案主要有: 通过整体界面稳定策略, 对钙钛矿层和空穴传输层、电荷传输层和器件封装等相关层和界面进行修饰; 通过将苄基胍盐酸盐添加到制备钙钛矿电池的前驱体溶液中; 通过向甲脒-铯混合阳离子钙钛矿中添加过量的甲脒 / 铯和碘的等方式实现了钙钛矿微型模块的稳定性提升。

PSC 的大面积可扩展制备是实现商业化的关键, 本前沿包含的技术方案主要有: 通过甲脒铯钙钛矿前驱体溶液中添加二苯亚砷稳定前驱体膜; 通过可扩展的, 可正交加工的喷涂方法在表面区域以明确的组成梯度; 采用狭缝涂布印刷工艺等策略实现大面积薄膜的高质量可扩展制备。



2022 研究前沿  
RESEARCH FRONTS



# 物理学

The background features a large, glowing cyan sphere in the center. Inside this sphere, there are intersecting lines of cyan and magenta, creating a complex, abstract pattern. The overall color palette is dominated by dark blues and blacks, with bright cyan and magenta highlights.

2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 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

物理领域位居前十位的热点前沿主要集中于凝聚态物理、高能物理和理论物理。凝聚态物理方面的热点前沿有 5 个，笼目晶格金属、磁性拓扑绝缘体  $MnBi_2Te_4$ 、高效金属卤化物钙钛矿发光二极管成为了新出现的热点前沿，非厄米系统的

拓扑态连续 3 年入选热点前沿，高压下富氢化合物的高温超导电性连续 2 年入选热点前沿。高能物理方面的热点前沿有 3 个， $\mu$  子反常磁矩的测量是新出现的热点前沿，味对称性与轻子质量的研究继续作为热点前沿，四夸克和五夸克态奇特

强子继 2017-2020 连续 4 年入选之后、第 5 次入选热点前沿。理论物理方面的热点前沿有 2 个，分别聚焦量子场论中的散射振幅研究和绝对平行引力理论。

表 34 物理学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	笼目晶格金属的特性研究	34	2409	2020.2
2	味对称性与轻子质量的研究	36	2001	2019.8
3	量子场论中的散射振幅研究	45	2518	2019.7
4	$\mu$ 子反常磁矩的测量	34	3034	2019.6
5	隐粲四夸克态和五夸克态研究	45	4564	2019.4
6	磁性拓扑绝缘体 $MnBi_2Te_4$	23	3449	2019.2
7	非厄米系统的拓扑态研究	34	6166	2018.9
8	高效金属卤化物钙钛矿发光二极管	15	5398	2018.8
9	高压下富氢化合物的高温超导电性研究	21	3221	2018.8
10	绝对平行引力理论	10	1976	2018.8



## 1.2 重点热点前沿——“磁性拓扑绝缘体 $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ”

拓扑绝缘体是近年来发现的一种全新的物质形态，是一种内部绝缘、表面导电的材料。从 2005 年的理论预测到 2007 年二维拓扑绝缘体被实验验证，国际上开始掀起了拓扑物态和拓扑材料研究的热潮，并成为凝聚态物理领域重要和快速发展的热点前沿之一。各种全新的拓扑物态相继被发现，如拓扑

半金属、拓扑超导体、高阶拓扑绝缘体等。

磁性和拓扑之间的相互作用可以在材料中产生各种奇异的拓扑物态，因此，磁性拓扑绝缘体的研究引起了广泛的兴趣。2019 年， $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  被实验验证为本征磁性拓扑绝缘体， $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  体系快速成为

研究的热点，并取得了一系列重要的进展，如高温量子反常霍尔效应、高陈数量子反常霍尔效应等。磁性拓扑绝缘体的研究正在蓬勃发展中，其成果将有助于促进应用于低能耗自旋电子学、拓扑量子计算等领域的下一代电子器件的开发。



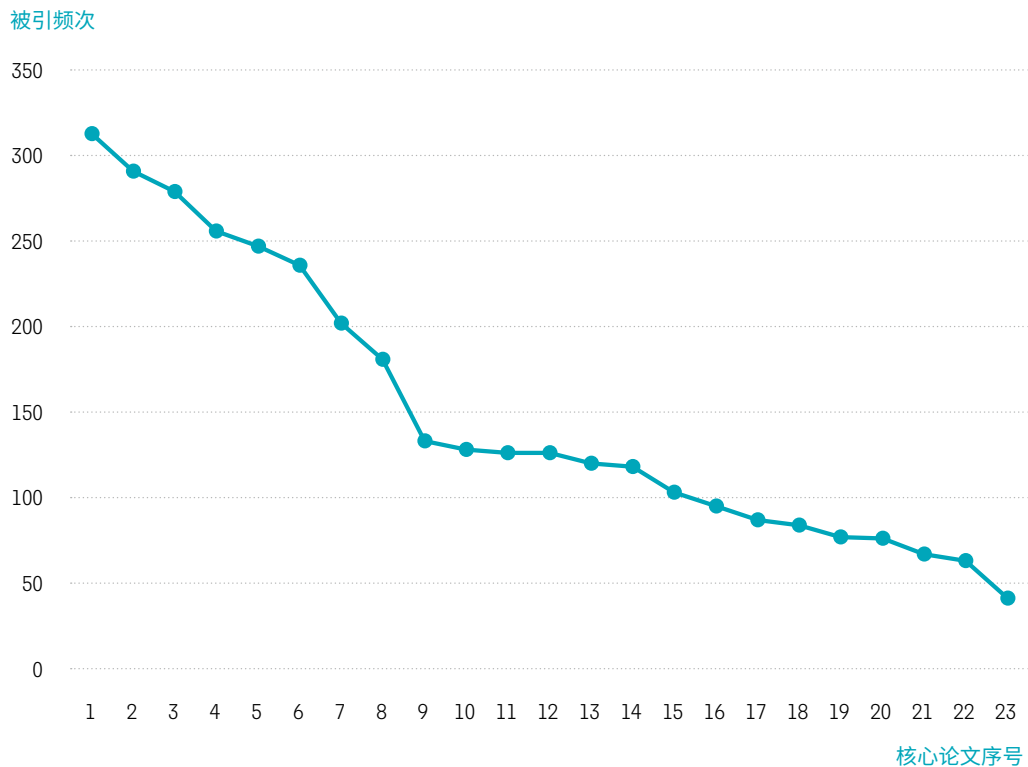


图 17 “磁性拓扑绝缘体 MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>” 研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

从影响力看（图 17），23 篇核心论文中被引频次最高的论文是 2020 年复旦大学和中国科学技术大学等在 MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 中实现量子反常霍尔效应（其实现温度为 1.4K）的研究，被引频次为 313 次。紧随其后的是 2019 年对 MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 体系中开展磁性拓扑物态研究的 4 篇论文，分别是清华大学等通过理论计算揭示 MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 的磁性拓扑性质，西班牙高等科研理事会 - 巴斯克大学联合中心（Centro Mixto CSIC-

UPV）实验验证 MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 为本征磁性拓扑绝缘体，南京大学和复旦大学理论预测 MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 为本征磁性拓扑绝缘体，清华大学等实验验证 MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 为本征磁性拓扑绝缘体，被引频次分别为 291、279、247 和 236 次。此外，2019 年日本理化学研究所（RIKEN）关于磁性拓扑绝缘体的综述也获得了较高的被引频次，为 256 次。

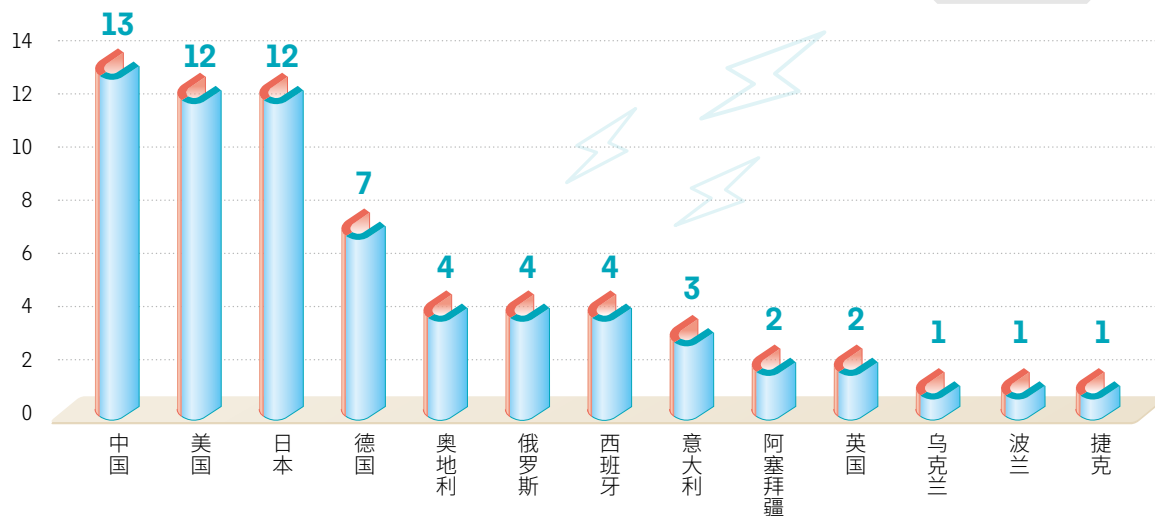
在这个热点前沿中，中国、美

国和日本表现最活跃，是核心论文的主要产出国家（表 35）。23 篇核心论文中，中国参与的有 13 篇，占核心论文总量的 56.5%，美国和日本参与的各有 12 篇，分别占核心论文总量的 52.2%。德国、西班牙、奥地利、俄罗斯等也有不错的表现。参与核心论文最多的机构是中国科学院和日本理化学研究所。核心论文 Top 产出机构中，来自德国的有 3 家，中国、俄罗斯、西班牙、美国各有 2 家，日本和奥地利各 1 家。

表 35 “磁性拓扑绝缘体  $MnBi_2Te_4$ ” 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	13	56.5%	1	中国科学院	中国	7	30.4%
2	美国	12	52.2%	2	理化学研究所	日本	6	26.1%
2	日本	12	52.2%	3	清华大学	中国	5	21.7%
4	德国	7	30.4%	3	马普学会	德国	5	21.7%
5	奥地利	4	17.4%	5	德累斯顿工业大学	德国	4	17.4%
5	俄罗斯	4	17.4%	5	托木斯克国立大学	俄罗斯	4	17.4%
5	西班牙	4	17.4%	5	圣彼得堡州立大学	俄罗斯	4	17.4%
8	意大利	3	13.0%	5	亥姆霍兹联合会	德国	4	17.4%
9	阿塞拜疆	2	8.7%	5	巴斯克科学基金会	西班牙	4	17.4%
9	英国	2	8.7%	5	巴斯克大学	西班牙	4	17.4%
11	乌克兰	1	4.3%	5	约翰尼斯·开普勒林茨大学	奥地利	4	17.4%
11	波兰	1	4.3%	5	橡树岭国家实验室	美国	4	17.4%
11	捷克	1	4.3%	5	劳伦斯伯克利国家实验室	美国	4	17.4%

## · 核心论文 ·



该前沿施引论文 Top 国家（表 36）中，中国和美国仍是最活跃的国家，远超其他国家。德国、日本、西班牙紧随其后。施引论文排名前

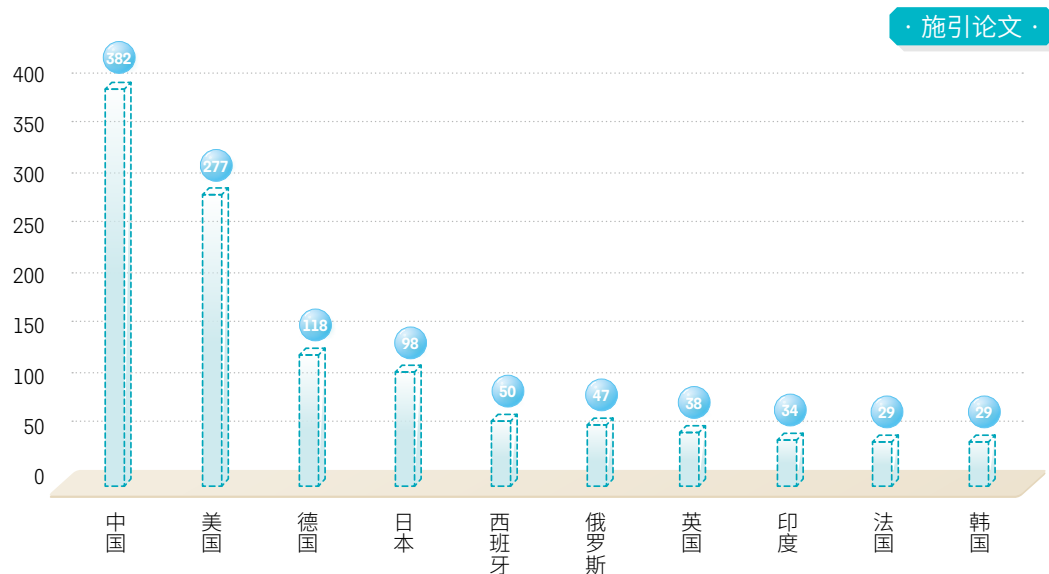
10 的机构中，中国科学院的施引论文最多，随后是德国马普学会、清华大学、北京大学和美国橡树岭国家实验室。这些机构中，来自中

国的有 5 家，美国和德国各 2 家，西班牙 1 家。



表 36 “磁性拓扑绝缘体  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ” 研究前沿中施引论文的 Top 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	382	47.0%	1	中国科学院	中国	139	17.1%
2	美国	277	34.1%	2	马普学会	德国	47	5.8%
3	德国	118	14.5%	3	清华大学	中国	47	5.8%
4	日本	98	12.1%	4	北京大学	中国	44	5.4%
5	西班牙	50	6.2%	4	橡树岭国家实验室	美国	44	5.4%
6	俄罗斯	47	5.8%	6	南京大学	中国	42	5.2%
7	英国	38	4.7%	7	中国科学技术大学	中国	40	4.9%
8	印度	34	4.2%	8	亥姆霍兹联合会	德国	34	4.2%
9	法国	29	3.6%	9	宾夕法尼亚州立大学	美国	32	3.9%
9	韩国	29	3.6%	10	巴斯克大学	西班牙	30	3.7%



### 1.3 重点热点前沿——“高效金属卤化物钙钛矿发光二极管”

发光二极管 (LED) 是一种半导体光电子器件, 具有能耗低、寿命长、体积小、可靠性高、显色丰

富等优点, 目前广泛应用于照明、显示、节能等领域。随着人们对照明和显示设备的需求不断提高, 新

的发光材料和器件的研发受到广泛关注。近年来, 金属卤化物钙钛矿材料因其优异的光电性能, 成为新

兴的发光材料，金属卤化物钙钛矿发光二极管也成为研究热点。

2014年，剑桥大学等报道了首个室温下电致发光的金属卤化物钙钛矿发光二极管，引发金属卤化

物钙钛矿发光二极管的研究热潮。外量子效率是衡量发光二极管光电转换效率的重要标准，经过多年的发展，近红外、红光和绿光金属卤化物钙钛矿发光二极管的外量子效率都已突破20%。然而，蓝光金属

卤化物钙钛矿发光二极管的外量子效率还有待进一步的提升，因此，蓝光金属卤化物钙钛矿发光二极管近年来获得了深入的研究，其外量子效率正在不断提高。

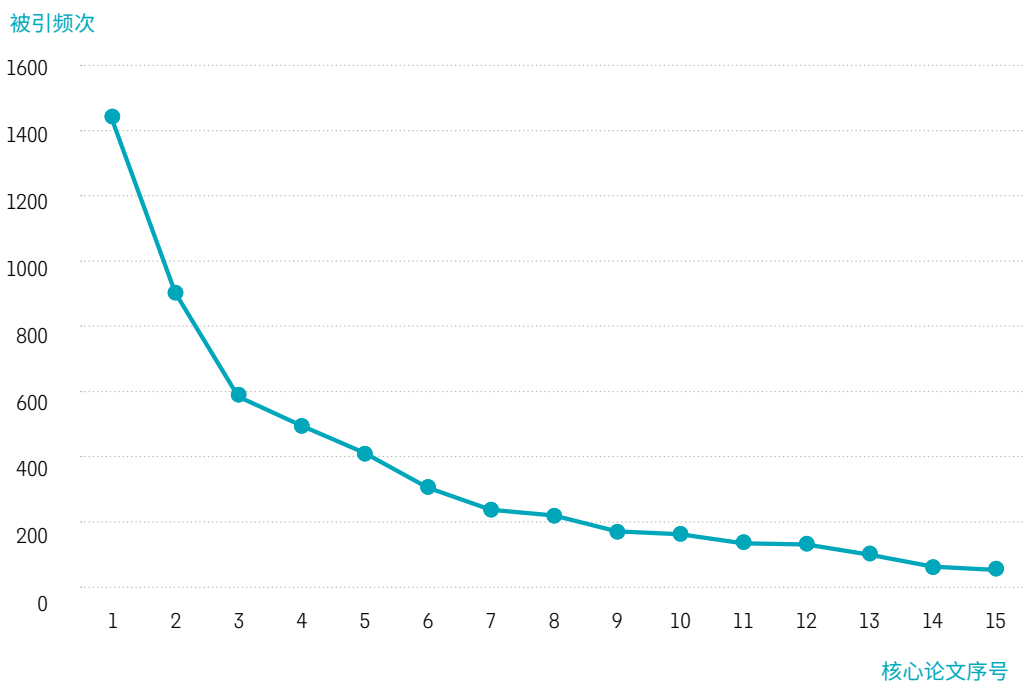


图 18 “高效金属卤化物钙钛矿发光二极管”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

从影响力看（图 18），15 篇核心论文中被引频次最高的论文是 2018 年中国华侨大学、新加坡南洋理工大学和加拿大多伦多大学合作实现外量子效率为 20.3% 的绿光钙钛矿发光二极管的研究，被引频次为 1433 次，远超其他论文。紧随其后的是 2018 年中国南京工业大学、浙江大学等合作实现外量子效率为 20.7% 的近红外钙钛矿发光

二极管的研究，被引频次为 903 次。表现突出的还有 2018 年日本山形大学实现外量子效率为 21.3% 的红光钙钛矿发光二极管，2019 年瑞典林雪平大学、南京工业大学等合作实现外量子效率为 21.6% 的近红外钙钛矿发光二极管，以及剑桥大学、林雪平大学等合作实现外量子效率为 20.1%、内量子效率接近 100% 的近红外钙钛矿发光二极管，

被引频次分别为 585、495、412 次。外量子效率不断突破（1.5%、9.5% 等）和光谱稳定的蓝光钙钛矿发光二极管也获得了广泛的引用。

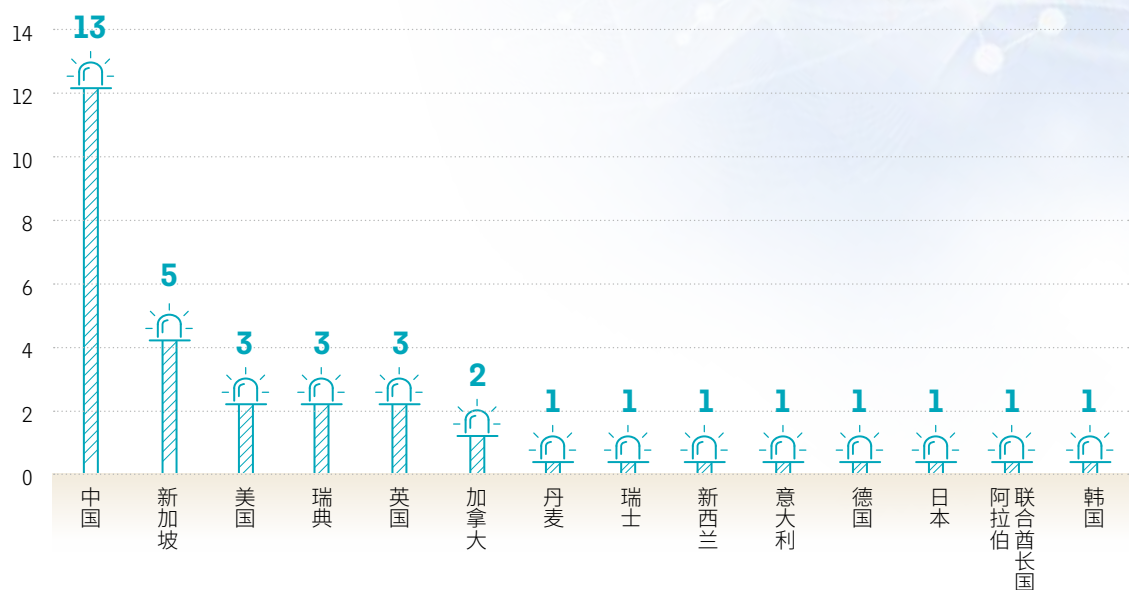
在这个热点前沿中，中国的表现最活跃，参与了 15 篇核心论文中的 13 篇，占核心论文总量的 86.7%。新加坡紧随其后，美国、瑞典、英国等也有不错的表现。参

与核心论文最多的机构是中国南京工业大学，新加坡南洋理工大学、瑞典林雪平大学、中国科学院、剑桥大学、中国西北工业大学等紧随其后。核心论文 Top 产出机构中，来自中国的有 5 家，新加坡、瑞典、英国、加拿大各有 1 家。

表 37 “高效金属卤化物钙钛矿发光二极管”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	13	86.7%	1	南京工业大学	中国	5	33.3%
2	新加坡	5	33.3%	2	南洋理工大学	新加坡	4	26.7%
3	美国	3	20.0%	3	林雪平大学	瑞典	3	20.0%
3	瑞典	3	20.0%	3	中国科学院	中国	3	20.0%
3	英国	3	20.0%	3	剑桥大学	英国	3	20.0%
6	加拿大	2	13.3%	3	西北工业大学	中国	3	20.0%
7	丹麦	1	6.7%	7	南京大学	中国	2	13.3%
7	瑞士	1	6.7%	7	浙江大学	中国	2	13.3%
7	新西兰	1	6.7%	7	多伦多大学	加拿大	2	13.3%
7	意大利	1	6.7%					
7	德国	1	6.7%					
7	日本	1	6.7%					
7	阿拉伯联合酋长国	1	6.7%					
7	韩国	1	6.7%					

· 核心论文 ·



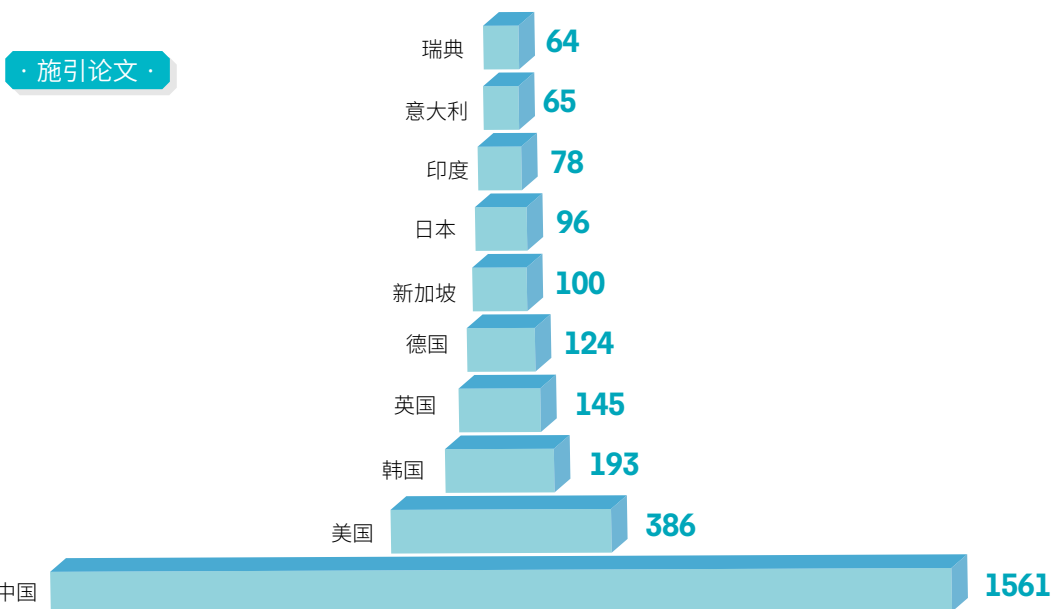
分析该热点前沿施引论文的 Top 产出国家和机构 (表 38) 可以发现, 中国仍是最活跃的国家, 参与的施引论文有 1561 篇, 占施

引论文总量的 64.6%, 远超紧随其后的美国、韩国、英国。施引论文排名前 10 的机构中, 8 家来自中国, 中国科学院的施引论文最

多, 为 296 篇, 占施引论文总量的 12.2%, 随后是中国苏州大学和吉林大学。

表 38 “高效金属卤化物钙钛矿发光二极管”研究前沿中施引论文 Top 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	1561	64.6%	1	中国科学院	中国	296	12.2%
2	美国	386	16.0%	2	苏州大学	中国	101	4.2%
3	韩国	193	8.0%	3	吉林大学	中国	97	4.0%
4	英国	145	6.0%	4	华中科技大学	中国	78	3.2%
5	德国	124	5.1%	5	南洋理工大学	新加坡	76	3.1%
6	新加坡	100	4.1%	6	剑桥大学	英国	70	2.9%
7	日本	96	4.0%	7	郑州大学	中国	69	2.9%
8	印度	78	3.2%	8	南京工业大学	中国	64	2.6%
9	意大利	65	2.7%	9	南方科技大学	中国	62	2.6%
10	瑞典	64	2.6%	10	浙江大学	中国	61	2.5%



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

物理学领域有 2 项研究入选新兴前沿，即“二维  $\text{MoSi}_2\text{N}_4$  材料的特性研究”和“黑洞信息佯谬与纠缠熵研究”。

表 39 物理学领域新兴前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	二维 $\text{MoSi}_2\text{N}_4$ 材料的特性研究	10	294	2020.9
2	黑洞信息佯谬与纠缠熵研究	42	1683	2020.6

### 2.2 重点新兴前沿——“二维 $\text{MoSi}_2\text{N}_4$ 材料的特性研究”

近年来，二维范德瓦尔斯材料因其独特的光学、电学、力学等性质，获得了广泛的研究，并多次出现在热点前沿和新兴前沿中，如双层转角石墨烯、二维范德瓦尔斯磁性材料等。石墨烯、过渡金属硫化物、黑磷等二维范德瓦尔斯材料，都有各自的三维母体材料。因此，合成自然界中尚未出现母体材

料的二维范德瓦尔斯材料，将拓展二维范德瓦尔斯材料的范围和应用。2020 年，中国科学院金属研究所等制备出一种不存在已知母体材料的新型二维范德瓦尔斯材料  $\text{MoSi}_2\text{N}_4$ 。这一成果为二维范德瓦尔斯材料家族增加了新成员，开辟了合成二维范德瓦尔斯材料的新方法，激发了科学家对  $\text{MoSi}_2\text{N}_4$  家族

的兴趣。在这个新兴前沿中，被引频次最高的论文就是中国科学院金属研究所等制备出  $\text{MoSi}_2\text{N}_4$  的研究，被引频次为 101 次。其他论文的研究内容主要聚焦在  $\text{MoSi}_2\text{N}_4$  的特性研究，包括力学性能、导热性、压电性、光催化、磁性、超导性等。





# 天文学与 天体物理学

2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 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 Top 10 热点前沿发展态势

天文学与天体物理学领域位居前十位的热点前沿涉及引力波、快速射电暴，黑洞与暗物质关系，中子星性质，银河系地图，宇宙、恒星及行星系统形成演化等研究主题。总体来看，引力波的观测发现及其引发的相关研究在天文学与天体物理学领域产生了深远影响，众

多热点前沿与此相关，如黑洞和中子星等致密天体观测及性质研究、双致密天体并和事件研究等。构建大规模数字宇宙模型模拟恒星、星系及宇宙演化已经成为天文学领域的研究热点。此外，近年来备受关注和神秘的快速射电暴事件的观测和理论研究再次上榜。大型科学任

务平台继续发挥极高的影响力，“帕克太阳探测器”（PSP）、“太阳轨道器”（Solar Orbiter）等任务的阶段性和集中产出榜上有名。黑洞、暗物质、恒星及行星系统形成等“一黑两暗三起源”相关的研究主题依旧表现突出。

表 40 天文学与天体物理学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	利用早期暗能量解释哈勃常数危机	17	2291	2019.6
2	基于“帕克太阳探测器”和“太阳轨道器”开展的日球层物理研究	28	2741	2019.3
3	基于 GW170817 事件观测约束中子星性质	45	7713	2019.1
4	快速射电暴的观测及性质研究	49	6680	2018.9
5	原行星盘观测揭示行星系统形成机制	36	4563	2018.4
6	原初黑洞观测及性质研究	35	5148	2018.1
7	计算机数字宇宙模型研究恒星、星系及宇宙演化	35	7724	2017.8
8	利用多个地基、地基天文台研究宇宙早期天体	26	4076	2017.8
9	“盖亚”绘制最精确银河系三维地图	5	9284	2017.6
10	对双中子星、双黑洞并合引力波事件的多信使观测	47	27244	2017.2

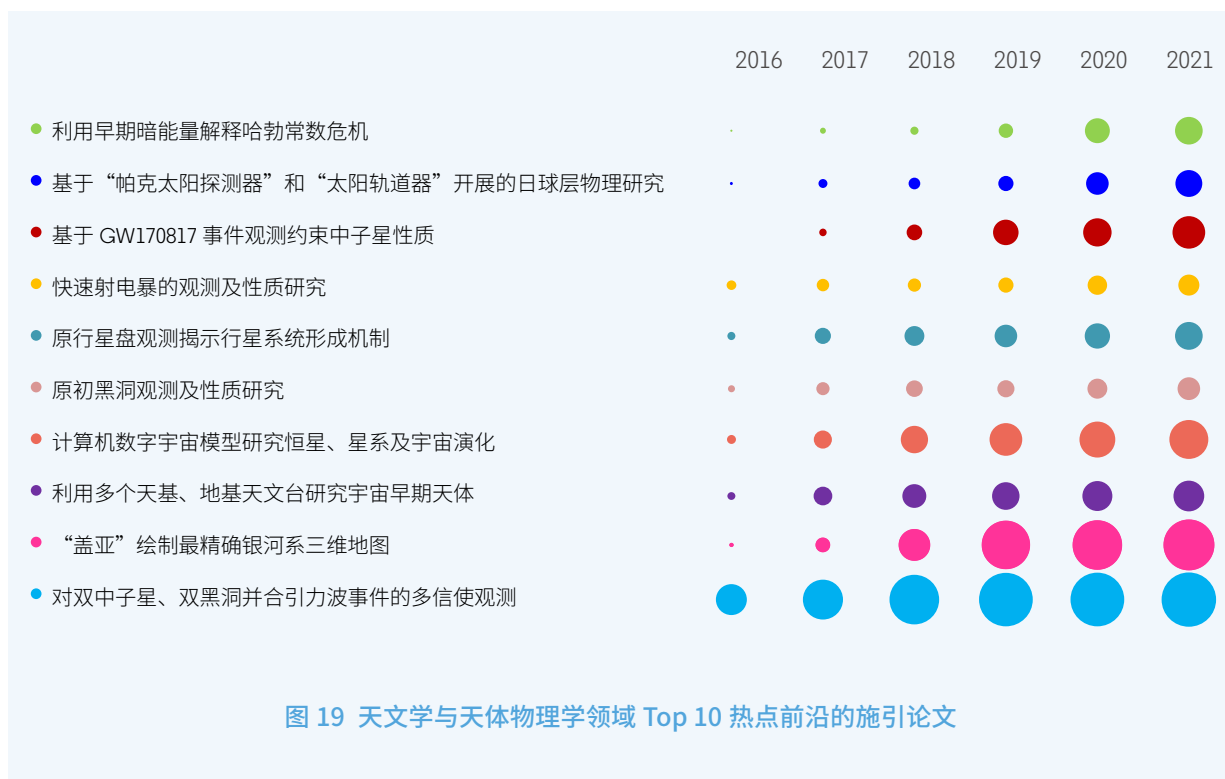


图 19 天文学与天体物理学领域 Top 10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“基于‘帕克太阳探测器’和‘太阳轨道器’开展的日球层物理研究”

通过对太阳、日地空间以及行星际空间进行多波段全方位观测，研究人员揭示出太阳是控制和影响日地和太阳系空间环境的主要源头。20 世纪 90 年代以来日球层物理研究进入了高速发展期，期间基于空间卫星的探测占据主导地位，一系列太阳探测卫星无论是探测技术还是探测范围都得到了空前提高，开启了多波段、全时域、高分辨率和高精度探测时代。

2018 年 8 月，美国国家航空航天局成功发射“帕克太阳探测器”

(PSP)，其主要科学目标是采用原位测量和成像技术相结合的方式改变对日冕的认识，增进对太阳风起源和演化的理解，并对提高空间天气事件预测能力作出重要贡献。

“帕克太阳探测器”以人类有史以来最接近太阳的距离对太阳进行探测，在任务的最后三圈，“帕克太阳探测器”距太阳表面仅约 600 万千米（8.86 个太阳半径）。2020 年 2 月，世界首颗可以针对太阳极区开展近距离观测的航天器——欧洲空间局的中型任务“太阳轨道器”

(Solar Orbiter) 成功发射。“太阳轨道器”的首要科学目标是研究太阳如何产生和控制日球层。当“帕克太阳探测器”开展近距离原位探测时，“太阳轨道器”还将与之协同，在相对较远的位置进行遥感观测。

热点研究前沿“基于‘帕克太阳探测器’和‘太阳轨道器’开展的日球层物理研究”包括 28 篇研究论文，围绕“帕克太阳探测器”和“太阳轨道器”任务的科学目标、任务、关键载荷以及基于观测数据开展的系列科学研究发现展开。



被引频次最高的 5 篇核心论文中有 4 篇与“帕克太阳探测器”有关，分别介绍了“帕克太阳探测器”的整体科学目标，两台重点载荷——“场仪器”（FIELDS）和“太阳风电子阿尔法粒子和质子”探测器

（SWEAP），以及通过对太阳的近距离原位观测发现低纬度日冕洞是慢太阳风的关键来源并揭示慢太阳风是如何加速的。其他核心论文涉及的重要发现还包括利用“帕克太阳探测器”和“太阳轨道器”观

测到大范围太阳高能粒子事件，探测到强隐形日冕物质抛射的太阳起源，在日冕中捕捉到瞬态等离子体流和射流等。

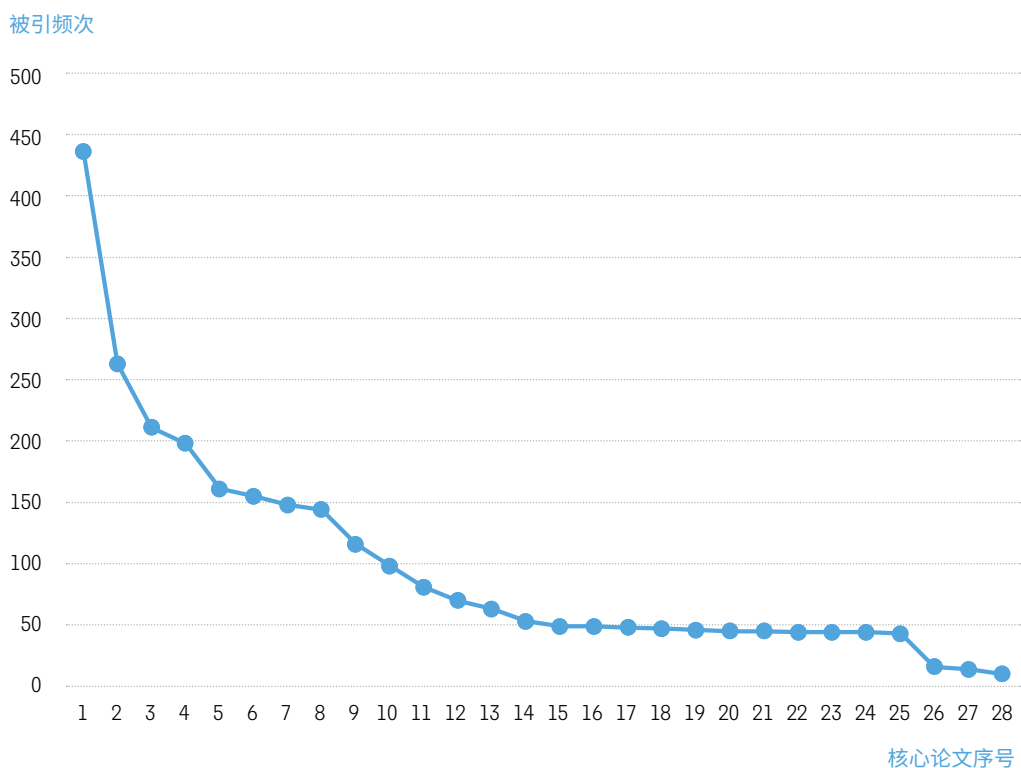


图 20 “基于‘帕克太阳探测器’和‘太阳轨道器’开展的日球层物理研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

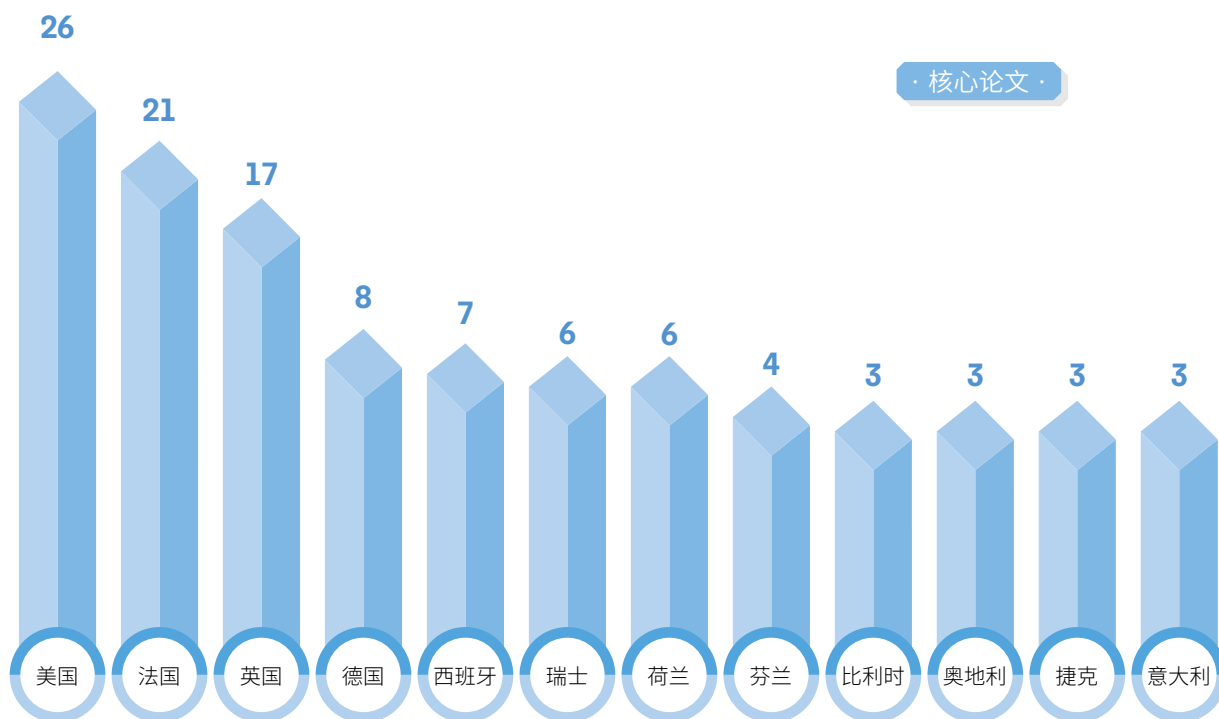
从核心论文的产出国家来看，美国作为“帕克太阳探测器”的投资国和“太阳轨道器”的参与国，产出了该前沿超过九成的核心论文。欧洲空间局作为“太阳轨道器”任务领导组织，其成员国表现极为突出，在核心论文 Top 国家

中，除美国不是欧洲空间局的成员国之外，其他 11 个国家均为欧洲空间局成员国。该前沿核心论文的 Top 产出机构全部来自两项任务的核心参与机构。其中美国国家航空航天局作为“帕克太阳探测器”的领导机构以及“太阳轨道器”的

合作机构，核心论文产出位居第一位。由于多数核心论文都是多国合作成果，参与国家和机构众多，因此 Top 产出机构参与核心论文数量差异不大。

表 41 “基于‘帕克太阳探测器’和‘太阳轨道器’开展的日球层物理研究”  
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	26	92.9%	1	美国国家航空航天局	美国	20	71.4%
2	法国	21	75.0%	1	加州大学伯克利分校	美国	20	71.4%
3	英国	17	60.7%	3	法国国家科学研究中心	法国	18	64.3%
4	德国	8	28.6%	4	密西根大学	美国	16	57.1%
5	西班牙	7	25.0%	5	巴黎文理研究大学	法国	15	53.6%
6	瑞士	6	21.4%	6	哈佛大学	美国	14	50.0%
6	荷兰	6	21.4%	6	帝国理工学院	英国	14	50.0%
8	芬兰	4	14.3%	8	科罗拉多大学博尔德分校	美国	13	46.4%
9	比利时	3	10.7%	9	伦敦大学学院	英国	12	42.9%
9	奥地利	3	10.7%	9	索邦大学	法国	12	42.9%
9	捷克	3	10.7%					
9	意大利	3	10.7%					



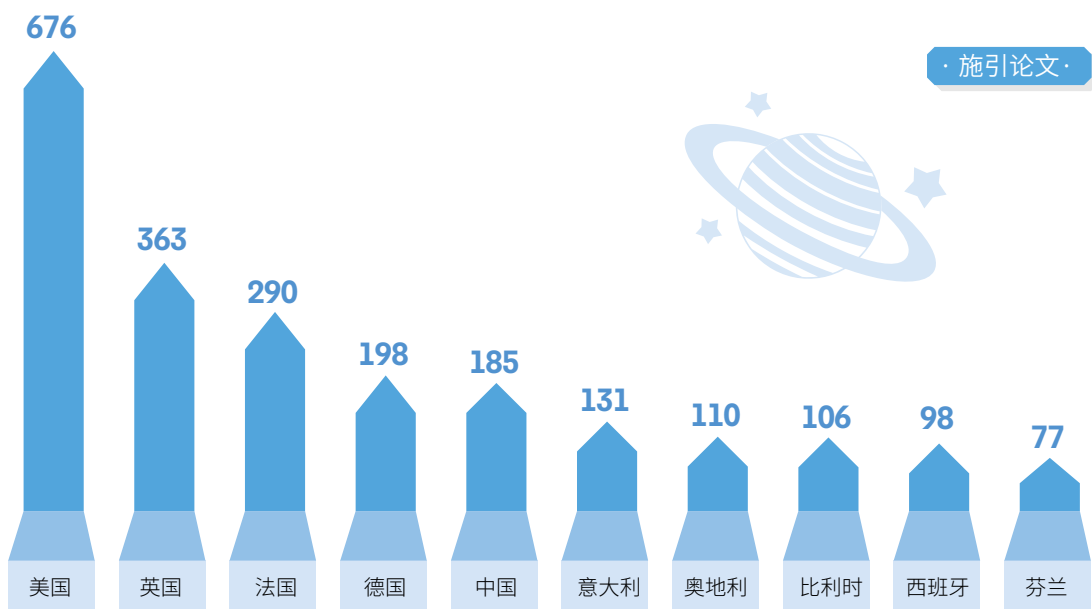
从施引论文角度来看，美国的施引论文最多，产出了超过一半的施引论文。英国、法国、德国的施引论文排名位列第 2-4 位。中国在该前沿也迅速跟进，施引论文数量

跻身 Top 10，排名第 5。施引论文 Top 10 产出机构中，美国研究机构占据了 4 席。法国国家科学研究中心、索邦大学、巴黎文理研究大学分列 Top 10 施引论文产出机构的

第二、第六和第八位。中国科学院利用两项空间任务的公开数据产出了较多的研究成果，施引论文数量位居第十位。

表 42 “基于‘帕克太阳探测器’和‘太阳轨道器’开展的日球层物理研究”研究前沿中施引论文 Top 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	676	59.2%	1	美国国家航空航天局	美国	309	27.1%
2	英国	363	31.8%	2	法国国家科学研究中心	法国	257	22.5%
3	法国	290	25.4%	3	加州大学伯克利分校	美国	234	20.5%
4	德国	198	17.3%	4	帝国理工学院	英国	174	15.2%
5	中国	185	16.2%	5	伦敦大学学院	英国	170	14.9%
6	意大利	131	11.5%	6	索邦大学	法国	169	14.8%
7	奥地利	110	9.6%	7	密西根大学	美国	165	14.4%
8	比利时	106	9.3%	8	巴黎文理研究大学	法国	151	13.2%
9	西班牙	98	8.6%	9	科罗拉多大学博尔德分校	美国	144	12.6%
10	芬兰	77	6.7%	10	中国科学院	中国	137	12.0%





### 1.3 重点热点前沿——“计算机数字宇宙模型研究恒星、星系及宇宙演化”

宇宙学的标准模型认为宇宙的质量-能量密度由未知形式的暗物质和暗能量掌控。对标准模型开展验证需要对可见物质结构的形成（即可以直接观测到的恒星、扩散气体、黑洞及星系等）进行精确预测。从头开始模拟在整个宇宙时间内观测到的各种星系是理论天体物理学领域面临的巨大挑战之一，学术界为此构建了多种数字宇宙模型以测试对星系形成和演化的认识。同时通过对比模拟结果与真实宇宙中对星系的观测结果的异同，进一步加深人类对星系形成过程的理解。

IllustrisTNG 项目是当前最具影响力的大型宇宙演化模拟项目，其模型开发和模拟工作始于 2014 年。

IllustrisTNG 包括多个模拟项目，每个模拟的物理尺寸、质量分辨率和包含的物理复杂性各不相同，其中 TNG50、TNG100 和 TNG300 分别模拟了边长为 50、100 和 300Mpc（百万秒差距，约合 326 万光年）的立方体宇宙空间，可以从不同的分辨率水平研究星系结构特性、气体结构特征以及星系团等。自 2016 年以来，IllustrisTNG 项目合作组发表了多篇论文，详细阐述了星系形成、演化以及宇宙学领域多个不同主题的模拟结果。

热点研究前沿“计算机数字宇宙模型研究恒星、星系及宇宙演化”包括 35 篇核心论文，其主体由 IllustrisTNG 项目的多项研究成果构成，同时还包括了其他数个计

算机数字宇宙模型（如 MUFASA、Simba100、BAHAMAS 等模型）的模拟研究。被引频次最高的 10 篇核心论文中有 8 篇来自 IllustrisTNG 项目合作组，分别描述了物理星系形成模型及其在 IllustrisTNG 模拟中的数值细节；利用模型研究重子、暗物质、星系和光晕在超大范围内的非线性相关函数和功率谱；TNG100 和 TNG300 模拟关于大质量星系群、星团的恒星质量含量以及星系的光学颜色、星系的元素分布等主要结果。通过与其他大量观测结果的对比，计算机数字宇宙模型研究令人信服地证明，在千秒差距空间分辨率下结构形成的流体动力学模拟可以合理地再现观测到的星系的基本特性和尺度关系。

被引频次

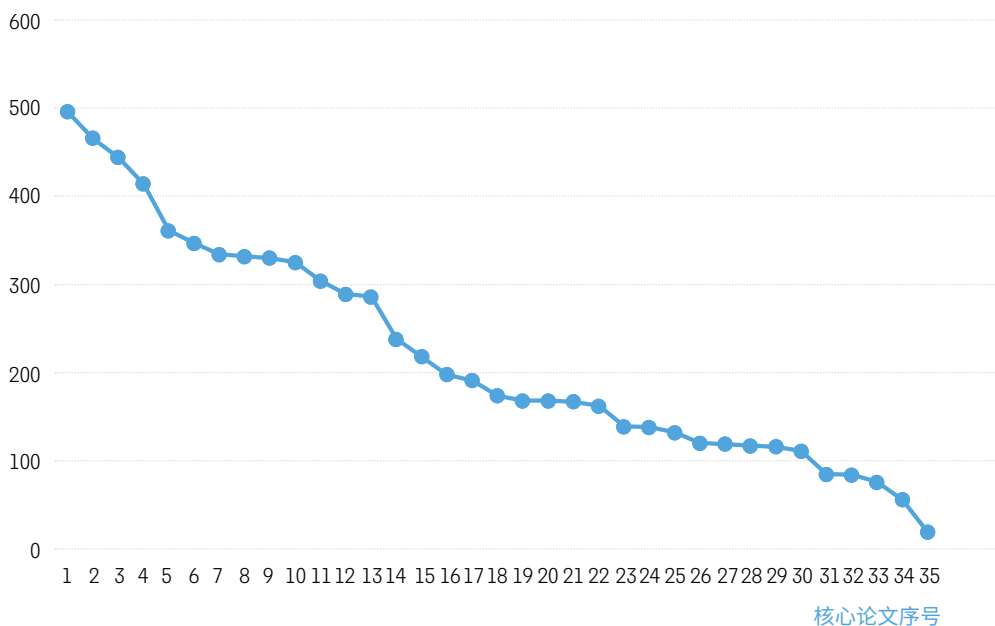


图 21 “计算机数字宇宙模型研究恒星、星系及宇宙演化”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

从核心论文的产出国家和机构来看，主导 IllustrisTNG 项目的美国和德国贡献了该领域绝大多数核心论文，英国、加拿大、意大利、法国等国紧随其后。核心

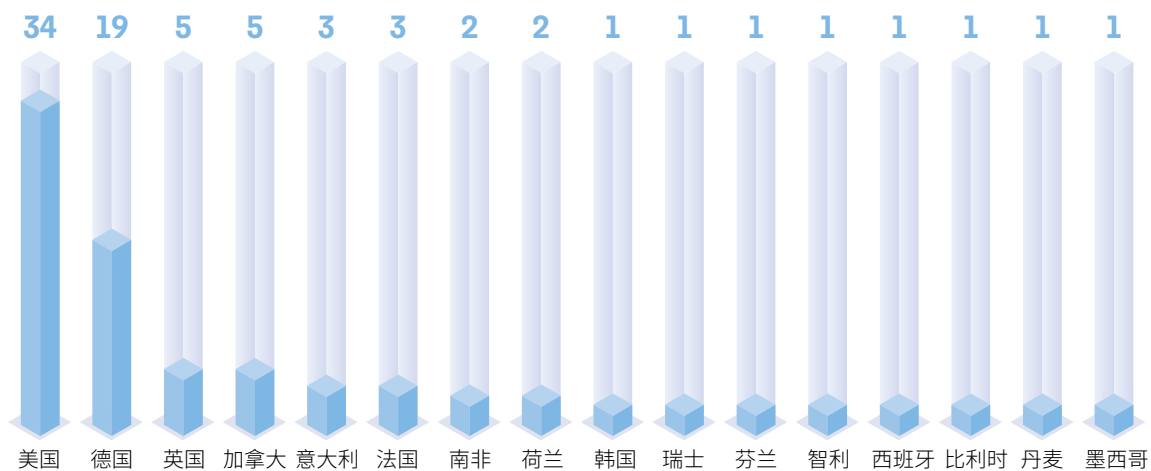
论文 Top 10 产出机构被美国和德国包揽。IllustrisTNG 项目首席科学家所在的德国马普学会毫无疑问拥有该领域最多的核心论文 (54.3%)，麻省理工学院、哈佛大学、西蒙斯

基金会、海德堡大学、海德堡理论研究所等核心参与机构在该领域也有突出表现。

表 43 “计算机数字宇宙模型研究恒星、星系及宇宙演化”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	34	97.1%	1	马普学会	德国	19	54.3%
2	德国	19	54.3%	2	麻省理工学院	美国	16	45.7%
3	英国	5	14.3%	3	哈佛大学	美国	14	40.0%
3	加拿大	5	14.3%	3	西蒙斯基金会	美国	13	37.1%
5	意大利	3	8.6%	3	海德堡大学	德国	11	31.4%
5	法国	3	8.6%	6	海德堡理论研究所	德国	9	25.7%
7	南非	2	5.7%	7	哥伦比亚大学	美国	9	25.7%
7	荷兰	2	5.7%	8	加州理工学院	美国	8	22.9%
9	韩国	1	2.9%	9	佛罗里达大学	美国	6	17.1%
9	瑞士	1	2.9%	9	加州大学伯克利分校	美国	6	17.1%
9	芬兰	1	2.9%	9	加州大学圣迭戈分校	美国	6	17.1%
9	智利	1	2.9%					
9	西班牙	1	2.9%					
9	比利时	1	2.9%					
9	丹麦	1	2.9%					
9	墨西哥	1	2.9%					

· 核心论文 ·



从施引论文角度来看，核心论文的 Top 产出国家仍在该前沿的后续研究中保持优势地位。美国和德国仍处于优势地位，施引论文分别占总施引论文的 58.3% 和 29.8%。

英国在该方向积极跟进，施引论文产出已与德国相当，位居第三。中国施引论文数量位列第七位。施引论文数量 Top 10 机构分别来自德国、法国、美国、意大利和英国等

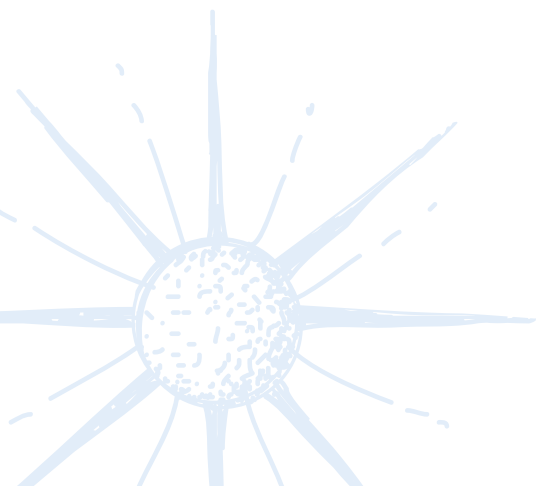
空间科技和信息技术传统强国，凸显出该研究前沿依赖空间科学和计算机科学紧密结合的鲜明特色。

表 44 “计算机数字宇宙模型研究恒星、星系及宇宙演化”研究前沿中施引论文的 Top 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	1992	58.3%	1	马普学会	德国	596	17.4%
2	德国	1018	29.8%	2	法国国家科学研究中心	法国	482	14.1%
3	英国	1009	29.5%	3	哈佛大学	美国	298	8.7%
4	法国	509	14.9%	4	意大利国家天体物理研究所	意大利	292	8.5%
5	意大利	478	14.0%	5	加州理工学院	美国	289	8.5%
6	澳大利亚	417	12.2%	6	达勒姆大学	英国	281	8.2%
7	中国	366	10.7%	7	哈佛大学	美国	281	8.2%
8	加拿大	361	10.6%	7	巴黎大学	法国	249	7.3%
9	荷兰	360	10.5%	9	西蒙斯基金会	美国	242	7.1%
10	西班牙	334	9.8%	10	莱顿大学	荷兰	234	6.9%

· 施引论文 ·

美国 **1992**  
 德国 **1018**  
 英国 **1009**  
 法国 **509**  
 意大利 **478**  
 澳大利亚 **417**  
 中国 **366**  
 加拿大 **361**  
 荷兰 **360**  
 西班牙 **334**



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

天文学与天体物理学领域有 2 项研究入选新兴前沿，分别是“基于 NANOGrav 观测数据开展宇宙学研究”和“GW190814 引力波事件中 2.6 倍太阳质量天体的性质研究”，下面选择第二个新兴前沿进行重点解读。

表 45 天文学与天体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	基于 NANOGrav 观测数据开展宇宙学研究	14	477	2020.9
2	GW190814 引力波事件中 2.6 倍太阳质量天体的性质研究	11	350	2020.6

### 2.2 重点新兴前沿——“GW190814 引力波事件中 2.6 倍太阳质量天体的性质研究”

通常大质量恒星死亡时，由于自身重力而崩塌成为黑洞；而质量较小的恒星死亡时，则爆发为超新星，并留下高密度的恒星遗迹，即中子星。已知最重的中子星不超过 2.5 倍太阳质量，最轻的黑洞约为 5 倍太阳质量，天文学家数十年来一直对中子星与黑洞之间的这一“质量间隙”（mass gap）感到困惑。

2020 年 6 月 23 日，“激光干涉引力波天文台”（LIGO）科学合作组和“室女座引力波探测器”（Virgo）科学合作组宣布发现了 GW190814 致密双星并合引力波事件，双星之一为 23 倍太阳质量的黑洞，另一为 2.6 倍太阳质量的天

体。由于这颗较小的天体恰巧处于中子星与黑洞的“质量间隙”内，为回答这一长期悬而未决的问题提供了契机。

该新兴前沿的 11 篇论文集中探讨了 GW190814 引力波事件中这颗 2.6 倍太阳质量的神秘天体的性质，包括黑洞、中子星、脉冲星、夸克星等各种可能，如：可能是已发现质量最小的黑洞，可能是一颗快速旋转的中子星在并合事件发生前坍缩成一个旋转的黑洞，可能是一颗具有奇异自由度的大质量快速旋转中子星，可能是已观测到的质量最大、旋转最快的脉冲星，可能是奇异夸克星（strange quark

star），可能是色味锁定夸克星（color-flavor locked quark star）等。

总而言之，揭开 GW190814 引力波事件中这颗 2.6 倍太阳质量天体的性质，或将挑战当前对极端致密物质以及恒星演化的理解，有望对中子星状态方程、致密天体形成方式等的认识产生深远影响。中子星与黑洞之间的“质量间隙”也许事实上根本不存在，而只是观测能力局限所致，时间和更多观测终将揭示真相。这些观测发现也是引力波天文学领域有望产生变革性影响的又一案例，每一次新的引力波探测都有望带来新的见解。

# 数学

2022 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

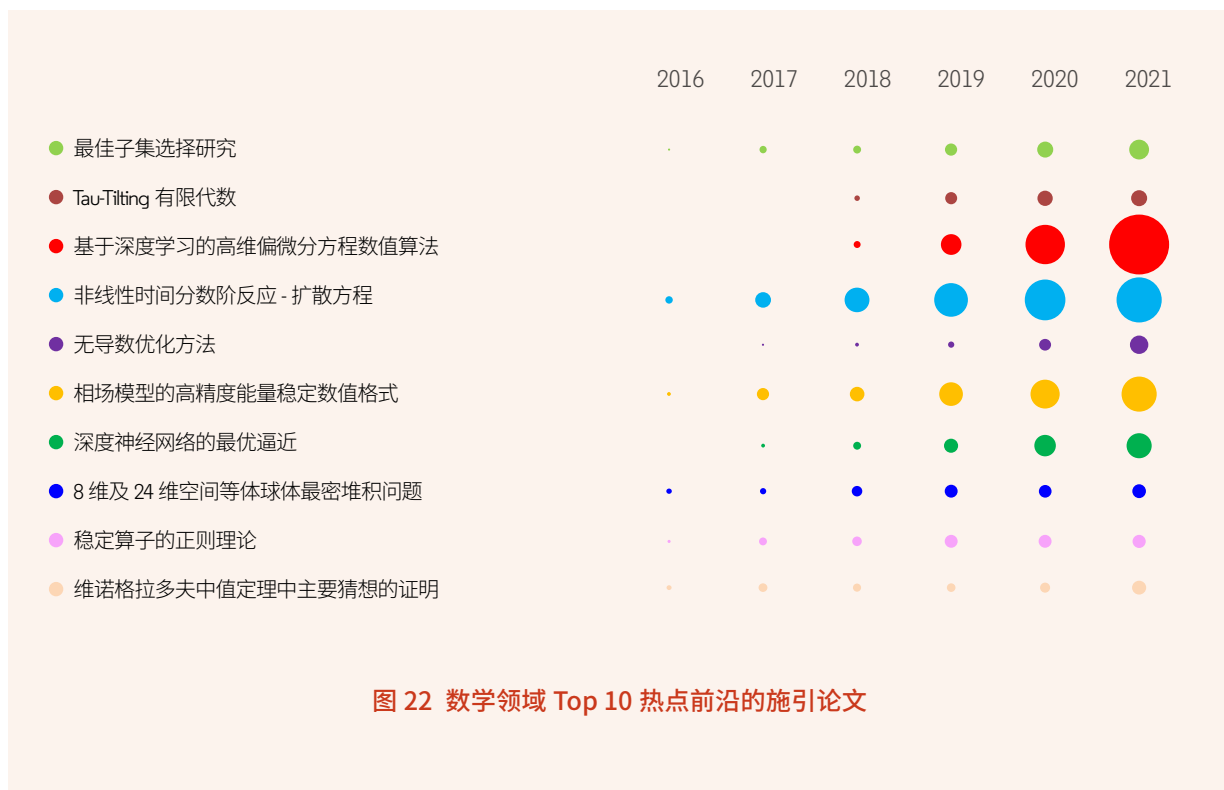
数学领域位居前十位的热点前沿主要集中于最佳子集选择、Tau-Tilting 有限代数、基于深度学习的高维偏微分方程数值算法、非线性时间分数阶反应 - 扩散方程、无导数优化方法、相场模型的高精度能

量稳定数值格式、深度神经网络的最优逼近、8 维及 24 维空间等体球体最密堆积问题、稳定算子的正则理论、维诺格拉多夫中值定理中主要猜想的证明等研究方向。与往年相比，2022 年 Top 10 热点前沿

既有延续又有发展。偏微分方程性质及求解研究以及非线性系统方向的多个热点前沿连续多年入选该领域的热点前沿或新兴前沿。几何学领域的 8 维及 24 维空间等体球体最密堆积问题首次入选。

表 46 数学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	最佳子集选择研究	3	217	2018.7
2	Tau-Tilting 有限代数	2	137	2018.5
3	基于深度学习的高维偏微分方程数值算法	9	1904	2018.3
4	非线性时间分数阶反应 - 扩散方程	38	2690	2018.2
5	无导数优化方法	2	114	2018
6	相场模型的高精度能量稳定数值格式	31	1968	2017.8
7	神经网络的最优逼近	5	375	2017.8
8	8 维及 24 维空间等体球体最密堆积问题	3	214	2017
9	稳定算子的正则理论	2	153	2016
10	维诺格拉多夫中值定理中主要猜想的证明	2	145	2016



## 1.2 重点热点前沿——“基于深度学习的高维偏微分方程数值算法”

偏微分方程是指未知函数及其偏导数的方程，用于描述自变量、未知函数及未知函数偏导数之间的关系。自十八世纪瑞士数学家欧拉在其著作中最早提出弦振动二阶方程，偏微分方程逐渐成为描述客观物理世界规律最重要的数学工具之一，在电磁学、热力学、流体力学、量子力学、几何学等学科中都有重要应用。直至今日，偏微分方程已经成为当代数学一个重要的组成部分，是把纯粹数学的许多分支和自然科学及工程技术等领域联系起来

的一座重要的桥梁。

偏微分方程相关研究是历年研究前沿的关注热点，如 2016 年“几类偏微分方程的求解”、2018 年“几类典型非线性发展偏微分方程的求解及其在流体力学、电磁学等领域的应用”、2021 年“高维非线性偏微分方程的求解方法”等。当前，由于偏微分方程计算成本随维数增高呈指数增长的“维数灾难”问题，发展高维偏微分方程的有效数值算法一直是应用数学中最具挑战性的任务之一。2022 年“基于深度学

习的高维偏微分方程数值算法”热点前沿便旨在应对这一挑战，相较于传统的数值算法，其关注高维偏微分方程近似求解的新兴深度学习方法，不单能节省巨大的存储和计算成本，而且使用简便、通用性更强。

该热点前沿共包含 9 篇核心论文，主要聚焦以下研究方向：基于深度学习的偏微分方程正向问题与反向问题求解算法；利用深度学习方法实现小样本数据中偏微分方程未知参数的学习；基于深度学习的

高维抛物型偏微分方程和倒向随机微分方程的数值算法；使用深度神经网络方法逼近复杂几何偏微分方程解的研究；基于深度学习 Deep Ritz 算法的变分问题数值解法等。其中，被引频次最高的论文来自美国宾夕法尼亚大学 Paris Perdikaris

教授团队，于 2019 年发表在计算物理学权威期刊《计算物理学杂志》(Journal of Computational Physics) 上，被引频次高达 703 次。论文首次提出了物理信息神经网络 (PINNs) 的概念，并且利用这种神经网络求解多种形式偏微分方程

的正向问题和反向问题。区别于纯数据驱动的神经网络学习方法，该方法不需要大批测量数据作为标签，训练过程施加物理信息约束，能用更少数据样本学习到更具泛化能力的模型。

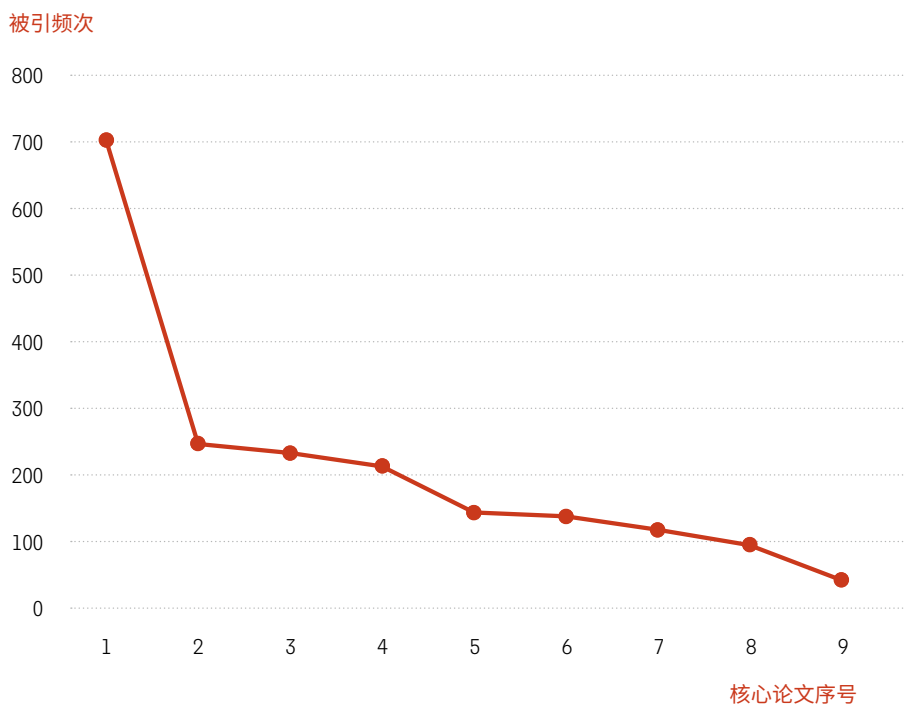


图 23 “基于深度学习的高维偏微分方程数值算法”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线



从该研究前沿核心论文产出国家来看（表 47），美国占据绝对优势地位，贡献 8 篇核心论文，占比高达 88.9%。中国排名第二，贡献 4 篇核心论文，仅次于美国，值得关注的是，这 4 篇论文均出自北

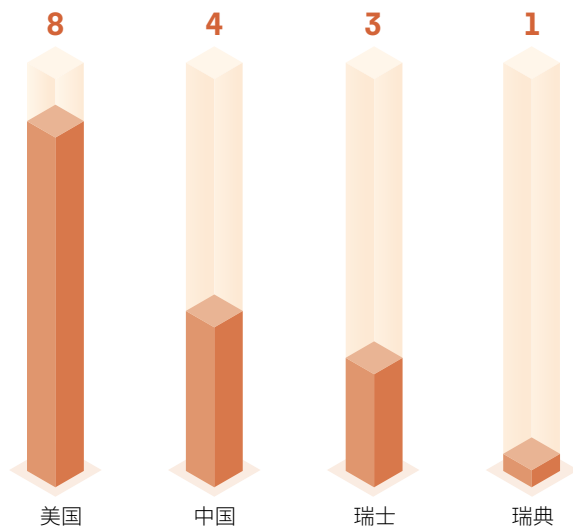
京大数据研究院鄂维南院士团队，且均聚焦其将深度学习技术应用到高维偏微分方程等科学计算中的开创性工作。瑞士和瑞典分列第三、四位。核心论文产出机构中，美国拥有 7 家上榜机构，遥遥领先于其

他国家，美国普林斯顿大学、中国北京大数据研究院、瑞士苏黎世联邦理工学院和美国布朗大学 4 家机构核心论文产出均在 3 篇以上。

表 47 “基于深度学习的高维偏微分方程数值算法”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	88.9%	1	普林斯顿大学	美国	4	44.4%
2	中国	4	44.4%	1	北京大数据研究院	中国	4	44.4%
3	瑞士	3	33.3%	3	苏黎世联邦理工学院	瑞士	3	33.3%
4	瑞典	1	11.1%	3	布朗大学	美国	3	33.3%
				5	北京大学	中国	2	22.2%
				6	英伟达	美国	1	11.1%
				6	波士顿大学	美国	1	11.1%
				6	科罗拉多大学博尔德分校	美国	1	11.1%
				6	宾夕法尼亚大学	美国	1	11.1%
				6	伊利诺伊大学香槟分校	美国	1	11.1%
				6	乌普萨拉大学	瑞典	1	11.1%

· 核心论文 ·



从该研究前沿的施引论文情况来看（表 48），美国仍保持领先地位，产出施引论文 596 篇，占比超过 50%。同时，中国和德国也在积极跟进，施引论文分列第二、三

位，分别产出 265 篇和 116 篇施引论文。施引论文 Top 产出机构中，以布朗大学、麻省理工学院等机构为代表的美国占据 5 席，瑞士和中国分别有 2 家机构上榜，中国北京

大学、中国科学院两家机构积极参与该前沿的跟踪研究，此外法国国家科学研究中心也榜上有名。

表 48 “基于深度学习的高维偏微分方程数值算法”研究前沿中施引论文的 Top 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	596	51.3%	1	布朗大学	美国	56	4.8%
2	中国	265	22.8%	2	麻省理工学院	美国	54	4.7%
3	德国	116	10.0%	3	瑞士联邦理工学院	瑞士	44	3.8%
4	英国	88	7.6%	4	斯坦福大学	美国	39	3.4%
5	法国	63	5.4%	5	苏黎世联邦理工学院	瑞士	36	3.1%
6	瑞士	50	4.3%	6	普渡大学	美国	35	3.0%
7	加拿大	42	3.6%	7	法国国家科学研究中心	法国	32	2.8%
8	意大利	40	3.4%	8	北京大学	中国	30	2.6%
9	日本	27	2.3%	9	中国科学院	中国	29	2.5%
9	挪威	27	2.3%	10	西北太平洋国家实验室	美国	27	2.3%
9	韩国	27	2.3%					





### 1.3 重点热点前沿——“8 维及 24 维空间等体球体最密堆积问题”

寻找堆积等尺寸球体的最密堆积方法是一个极具挑战性的问题。

1611 年德国数学家、天文学家开普勒推测，在三维空间中把相同大小的球体堆在一起的最密集的方式就是杂货店里常见的用来摆放橙子的金字塔形堆积。尽管该问题看起来很简单，但直到 1998 年该猜想才得以解决，美国数学家 Thomas Hales 以 250 页的数学论证结合大量计算机计算，最终证明了开普勒的猜想。

高维球体是高维空间中距给定中心点有固定距离的一组点的集合。高维空间中球体密堆积很难想象，但相关研究具有多种实用价值：球体密堆积与移动通信、空间探测器和互联网通过噪声信道发送信号使用的纠错码密切相关。在高维空间中研究等尺寸球体最密堆积问题比三维情况下更复杂，因为每增加一个维度就意味着要考虑更多可能的堆积方式。此前研究发现 8 维和 24 维空间中分别存在着被称为 E8 和利奇格 (Leech lattice) 的对称

球堆积，这两种堆积方式可能好于已知的其他最密堆积候选方案。

热点研究前沿“8 维及 24 维空间等体球体最密堆积问题”包括 3 篇核心论文。其中被引频次最高的论文即 Thomas Hales 对开普勒猜想的正式证明，该证明自 1998 年首次提出后经历了漫长的审查流程，直至 2014 年才完成全部验证并于 2017 年正式发表。被引频次排名第二的研究论文是乌克兰数学家 Viazovska 构建辅助函数正式证明 8 维空间中 E8 堆积方式为最优填充。被引频次排名第三的研究论文是 Viazovska 与其他四位受到她提出的方法启发的数学家合作，证明利奇格堆积方式是 24 维空间最优最密堆积方式。Viazovska 也因为对 8 维空间中等体球体最密堆积问题的开创性贡献荣获 2022 年菲尔兹奖。

从核心论文产出国家和机构来看，德国、瑞士两个国家以及柏林数学研究院、柏林洪堡大学、洛桑联邦理工学院 3 家机构作为

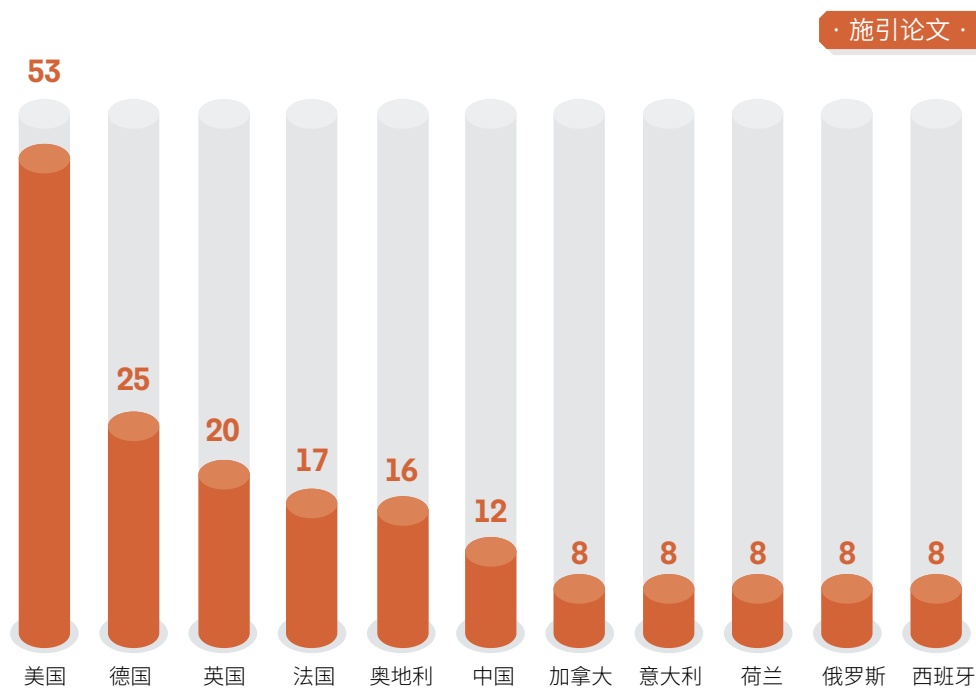
Viazovska 先后学习、工作过的地点，在论文产出中皆位居前列。

Thomas Hales 教授牵头的开普勒猜想证明工作则由来自美国、意大利、荷兰、英国、奥地利、法国、澳大利亚、中国、捷克、越南等国家的 18 家研究机构共同合作完成。

在 Hales、Viazovska 等人的突破性研究成果发表之后，高维空间等体球体最密堆积问题引起了学界的广泛兴趣。从施引论文的角度来看，美国占据领先地位，贡献了超过三分之一的施引论文。德国、英国、法国、奥地利、中国等也在该前沿积极跟进，施引论文数量均超过 10 篇。施引论文 Top 产出机构中，法国、英国、美国、奥地利研究机构占据了大量席位，贡献居于前列的典型机构包括法国国家科学研究中心、英国剑桥大学和奥地利维也纳大学等。跟进研究的主题主要聚焦在密堆积理论的科普宣传以及该理论在量子引力、量子信息、微生物学、材料学、晶体学等多个领域的应用研究。

表 49 “8 维及 24 维空间等体球体最密堆积问题”研究前沿中施引论文的 Top 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	53	36.8%	1	法国国家科学研究中心	法国	11	7.6%
2	德国	25	17.4%	2	剑桥大学	英国	7	4.9%
3	英国	20	13.9%	2	维也纳大学	奥地利	7	4.9%
4	法国	17	11.8%	4	普林斯顿大学	美国	5	3.5%
5	奥地利	16	11.1%	4	索邦大学	法国	5	3.5%
6	中国	12	8.3%	4	巴黎大学	法国	5	3.5%
7	加拿大	8	5.6%	7	牛津大学	英国	4	2.8%
7	意大利	8	5.6%	7	微软公司	美国	4	2.8%
7	荷兰	8	5.6%	7	纽约州立大学	美国	4	2.8%
7	俄罗斯	8	5.6%	7	洛桑联邦理工学院	瑞士	4	2.8%
7	西班牙	8	5.6%	7	图拉国立大学	俄罗斯	4	2.8%
				7	波恩大学	德国	4	2.8%
				7	因斯布鲁克大学	奥地利	4	2.8%
				7	国际理论物理中心	意大利	4	2.8%



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

数学领域有 2 项研究入选新兴前沿，分别是“用于时间序列预测的递归神经网络方法”和“基于物理的概率学习方法”。

表 50 数学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	用于时间序列预测的递归神经网络方法	9	772	2019.4
2	基于物理的概率学习方法	3	216	2019

### 2.2 重点新兴前沿——“用于时间序列预测的递归神经网络方法”

时间序列预测算法在许多领域有着广泛的应用，如金融市场预测、天气预报、复杂动力系统分析等。传统上，常用于时间序列预测的是统计学习方法，需要结合时序领域特有的统计学分析，将数据通过差分方式转换成平稳序列后，再通过线性回归方式建模，这种方法虽可融合大量专家对于时间序列的知识，但难以面对非线性特征等复杂情形，也不利于规模化预测。例如，著名的自回归移动平均模型已经证明了其对各种现实世界应用程序的有效性，但不能对非线性关系建模，也不能在外生（驱动）输入项之间进行区分。为了解决这些问题，各种非线性自生回归模型相继被提出，且已经通过内核方式、集

成方式、高斯过程等方法进行了大量的时间序列预测，但这些方法大多采用预先定义的非线性形式，可能无法适当捕获真正的潜在非线性关系。

近年来，作为一种专门面向序列建模的深度神经网络方法，递归神经网络方法由于其在捕获非线性关系方面的灵活性受到科学家广泛关注，尤其在非线性自生回归模型时间序列预测方面，递归神经网络方法更展现出了独特优势。然而，由于无法捕获长期的依赖关系，传统的递归神经网络方法可能会遭遇梯度消失等问题，近年来，长短时记忆网络（LSTM）和门控循环网络（GRU）一定程度上能够克服这种局限，并在机器翻译、语音识别

和图像处理等多领域得到应用。当前，探索用于时间序列预测的更先进的递归神经网络方法已成为科学家关注的焦点。

该新兴前沿共包含 9 篇核心论文，具体研究方向涉及：神经网络方法作为时间序列预测统计方法的准确性验证；可用于大规模时间序列建模的可解释模块化神经网络回归模型；用于对类似序列组进行跨时间序列数据库预测的递归神经网络聚类方法；可用于时序概率预测的自回归循环神经网络方法 DeepAR；用于时间序列特征加权组合预测的自动化方法 FFORMA；用于时间序列预测的指数平滑和递归神经网络混合方法等。



# 2022 研究前沿

## RESEARCH FRONTS





# 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

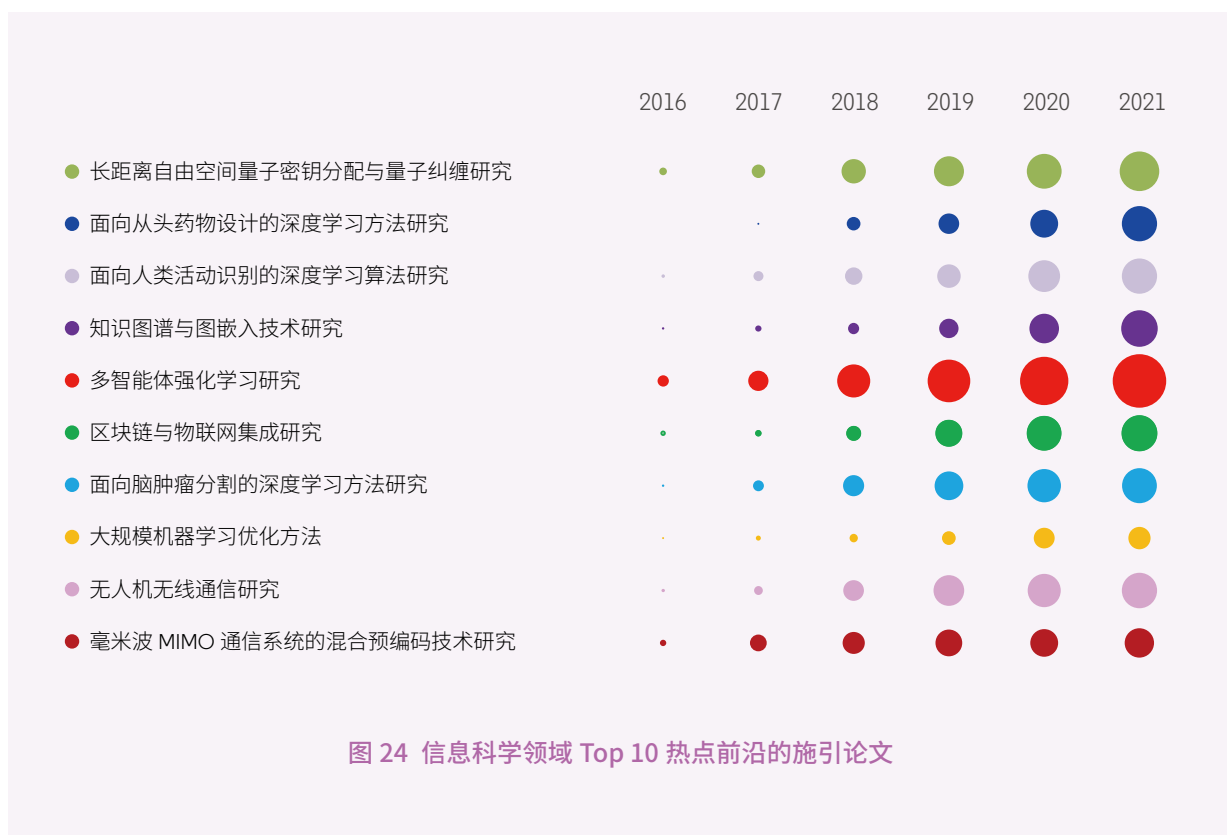
信息科学领域位居前十位的热点前沿主要包括面向从头药物设计、人类活动识别、脑肿瘤图像分割等领域的深度学习方法研究，长距离自由空间量子密钥分配与量子纠缠研究，知识图谱与图嵌入技术研究，多智能体强化学习研究，区

块链与物联网集成研究，大规模机器学习优化方法，以及无人机无线通信和毫米波 MIMO 通信系统的信号处理等方向（表 51）。“多智能体强化学习研究”在 2020 年热点前沿“AlphaGo Zero 的强化学习算法”的基础上继续深化，“无

人机无线通信研究”是 2021 年热点前沿“基于无人机的无线通信技术”的延续和扩展，“知识图谱与图嵌入技术研究”“大规模机器学习优化方法”“毫米波 MIMO 通信系统的混合预编码技术研究”前沿主题为首次入选。

表 51 信息科学领域 Top 10 热点前沿

排名	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	长距离自由空间量子密钥分配与量子纠缠研究	31	5009	2018.2
2	面向从头药物设计的深度学习方法研究	12	2551	2018.2
3	面向人类活动识别的深度学习方法研究	14	2443	2018.2
4	知识图谱与图嵌入技术研究	10	1804	2018.2
5	多智能体强化学习研究	6	5303	2017.7
6	区块链与物联网集成研究	6	2311	2017.3
7	面向脑肿瘤分割的深度学习方法研究	4	2588	2017
8	大规模机器学习优化方法	3	652	2017
9	无人机无线通信研究	10	4307	2016.9
10	毫米波 MIMO 通信系统的混合预编码技术研究	12	3171	2016.3



## 1.2 重点热点前沿——“面向从头药物设计的深度学习研究方法研究”

药物研发是一个长周期、高投入和高风险的过程。近年来，以计算机辅助药物设计（CADD）、AI 药物发现（AIDD）为代表的计算驱动手段在靶标发现和精准医疗、药物设计与发现等领域取得了显著的进步，为加快药物研发速度、降低药物开发成本赋予了希望。

化学空间中类药性分子的数量估计在  $10^{25}$ - $10^{60}$  量级。因此，通过计算的方法在整个化学空间中寻找特定的先导化合物成为药物发现中

的重大挑战。虽然高通量筛选和虚拟筛选方法可以对大型化合物库中的分子进行有效评价，但也只能对已知的化合物库进行筛选，从而寻找出满足特定性质的分子。而从头药物设计则不同，后者以理想的化学性质为目标，通过基于深度学习的分子生成的方法，生成具有特定性质的全新分子以探索化学空间，补充化合物库，从而打破药物发现与设计的常规结构壁垒。

热点前沿“面向从头药物设计

的深度学习研究方法研究”包含 12 篇核心论文，内容涵盖分子连续表示的自动化设计方法、循环和对抗神经网络、druGAN 自动编码器模型，以及分子生成模型的基准测试平台 MOSES 等。其中，哈佛大学 Alán Aspuru-Guzik 教授牵头发表于《ACS 中心科学》(ACS Central Science) 上的论文“Automatic Chemical Design Using a Data-Driven Continuous Representation of Molecules”被引频次最高，已接近 800 次（图 25），论文介绍了

使用神经网络将分子转化为连续向量表示，展示了基于梯度的分子性质优化，从而解决化学中的逆向设计难题。目前 Alán 教授在加拿大多伦多大学领衔 “AI for Discovery

and Self-Driving Labs” 研究小组，致力于将人工智能与自动化机器人平台相结合，以高通量的形式自主发现新材料，目标是将发现新功能材料或优化已知功能材料所需时

间和花费缩小 10 倍，即从估计的 1000 万美元和 10 年的开发时间减少到 100 万美元和 1 年。

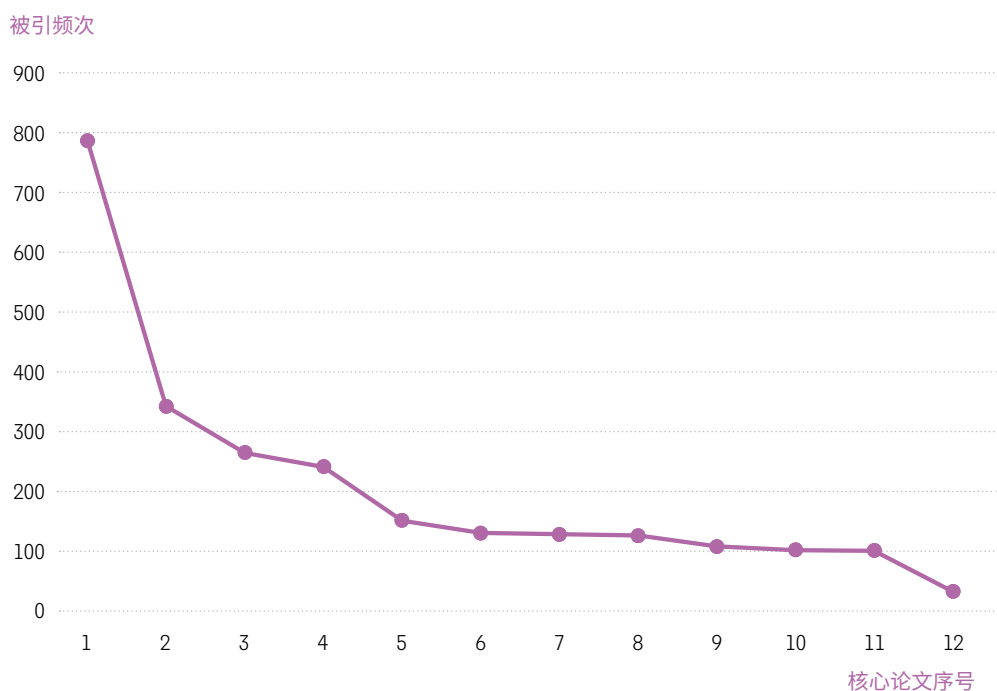


图 25 “面向从头药物设计的深度学习研究方法研究” 研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

从核心论文的产出国家和机构分布看（表 52），美国贡献的核心论文超过半数，瑞典和俄罗斯各贡献了三分之一的论文，英国和加拿大各发表 3 篇论文。全球领先的制药公司阿斯利康贡献

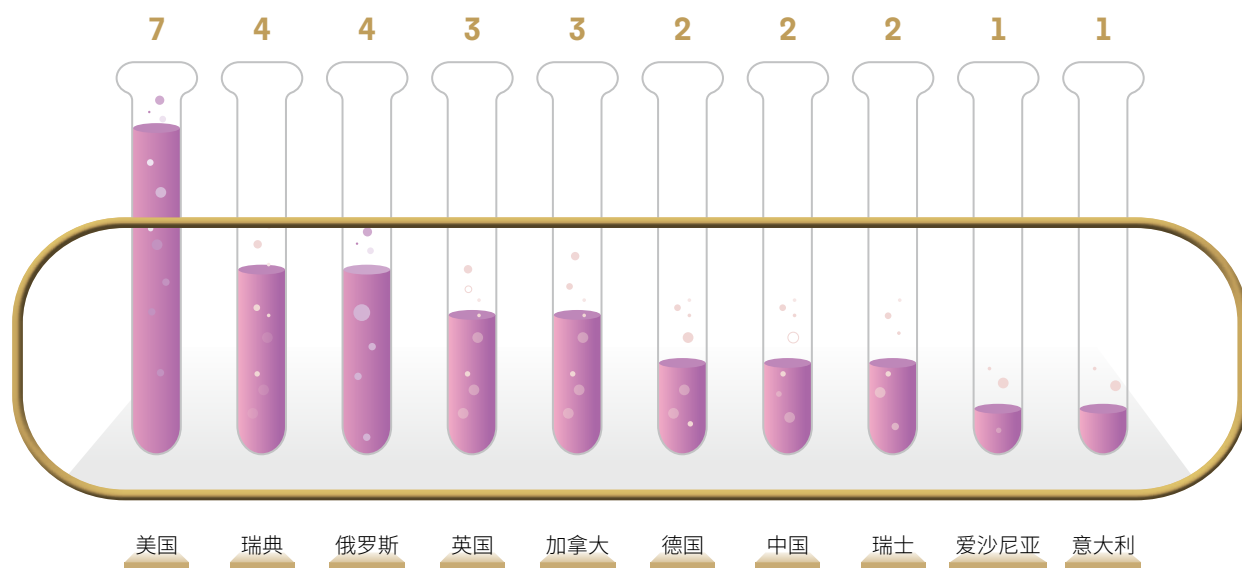
了 4 篇核心论文，位列 Top 产出机构之首。这 4 篇核心论文中，“Molecular de-novo design through deep reinforcement learning” 一文使用强化学习和循环神经网络，生成查询结构的类似物，以及预测、

生成对生物学目标有实际意义的化合物，被引频次接近 250 次。俄罗斯有 3 家机构进入 Top 机构名单，加拿大有 2 家机构上榜，此外中国的香港英矽智能科技有限公司和上海大学也各贡献 1 篇论文。

表 52 “面向从头药物设计的深度学习研究方法研究”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	国家	核心论文	比例
1	美国	7	58.3%	1	阿斯利康公司	瑞典	4	33.3%
2	瑞典	4	33.3%	2	莫斯科物理技术学院	俄罗斯	3	25.0%
2	俄罗斯	4	33.3%	2	哈佛大学	美国	3	25.0%
4	英国	3	25.0%	2	加拿大高等研究院	加拿大	3	25.0%
4	加拿大	3	25.0%	5	苏黎世联邦理工学院	瑞士	2	16.7%
6	德国	2	16.7%	5	俄罗斯高等经济大学	俄罗斯	2	16.7%
6	中国	2	16.7%	5	俄罗斯科学院	俄罗斯	2	16.7%
6	瑞士	2	16.7%	5	多伦多大学	加拿大	2	16.7%
9	爱沙尼亚	1	8.3%					
9	意大利	1	8.3%					

· 核心论文 ·



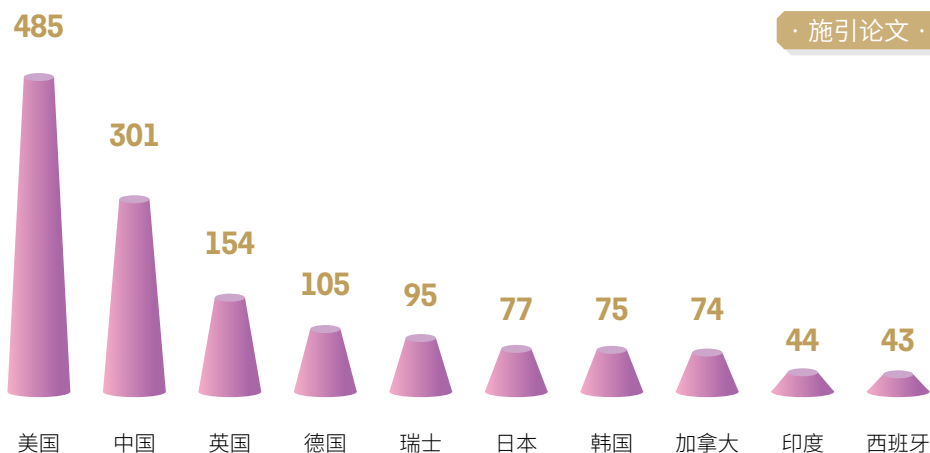
对施引论文的分析显示（表 53），美国是该研究前沿后续研究最为活跃的国家，代表性机构是麻省理工学院和哈佛大学。中国和英

国也进行了较多的研究。从施引论文 Top 10 机构名单可以看出，众多科研实力雄厚的科研机构、大学和企业都在进行相关研究，足见该前

沿方向的重要程度和竞争之激烈。中国科学院和剑桥大学进入 Top 10 机构之列，加拿大有 3 家机构入选，日本东京大学排名第 10 名。

表 53 “面向从头药物设计的深度学习研究方法研究”研究前沿中施引论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	中文	国家	施引论文	比例
1	美国	485	36.2%	1	中国科学院	中国	51	3.8%
2	中国	301	22.5%	2	麻省理工学院	美国	50	3.7%
3	英国	154	11.5%	3	多伦多大学	加拿大	42	3.1%
4	德国	105	7.8%	4	哈佛大学	美国	41	3.1%
5	瑞士	95	7.1%	5	苏黎世联邦理工学院	瑞士	40	3.0%
6	日本	77	5.7%	6	剑桥大学	英国	32	2.4%
7	韩国	75	5.6%	7	人工智能矢量研究所	加拿大	31	2.3%
8	加拿大	74	5.5%	8	阿斯利康公司	瑞典	28	2.1%
9	印度	44	3.3%	9	加拿大高等研究院	加拿大	26	1.9%
10	西班牙	43	3.2%	10	东京大学	日本	24	1.8%





### 1.3 重点热点前沿——“多智能体强化学习研究”

随着深度强化学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 近年来取得突破性进展, 大量与之相关的算法和应用不断涌现。最近的很多研究已经不仅仅局限于单智能体强化学习, 而是开始研究多智能体学习场景下的深度强化学习。强化学习中单个智能体与环境交互学习, 是一种简单系统的观点, 而将其扩展了的多智能体强化学习追求多个智能体在复杂环境中合作竞争, 共同进化, 是一种复杂系统的观点。多智能体强化学习在对不同智能体学习策略奖励不同的情况下, 不断改进学习算法。目前, 该方向已经取得了一系列瞩目的进展, 比如交通信号控制、机器人控

制、未知探索、公交车时刻表优化等。多智能体强化学习的研究与应用越来越多, 其在通信网络、合作探索、任务卸载等方面都进行了深入的探索。

热点前沿“多智能体强化学习研究”包含 6 篇核心论文, 《科学》(Science) 和《自然》(Nature) 各刊载 3 篇。研究主题聚焦以下方面: (1) 通过引入 DeepStack 探索一种用于处理信息不对称问题的算法, 这是 AI 在不完美信息博弈中堪称里程碑式的突破; (2) 增强 AlphaGo 神经网络的树算法, 在脱离人类监督学习的情况下迭代出更高质量的行为预测; (3) 利

用 self-play 思想通过不断调整对抗策略, 解决普通自我博弈方法的“循环学习”问题。其中, 被引频次在 300 次以上的论文共有 3 篇 (图 26), 均来自 DeepMind 公司 (该公司于 2014 年被 Google 收购)。发表在《自然》(Nature) 上的“Mastering The Game of Go With Deep Neural Networks and Tree Search”一文被引频次高达 3023 次, 论文介绍了一种把蒙特卡洛模拟和估值、策略网络结合在一起的算法, 通过自我博弈的强化学习, 使 AlphaGo 达到了 99.8% 的胜率。这篇论文标志着第一代 AlphaGo 的诞生, 也掀起了强化学习的热潮。

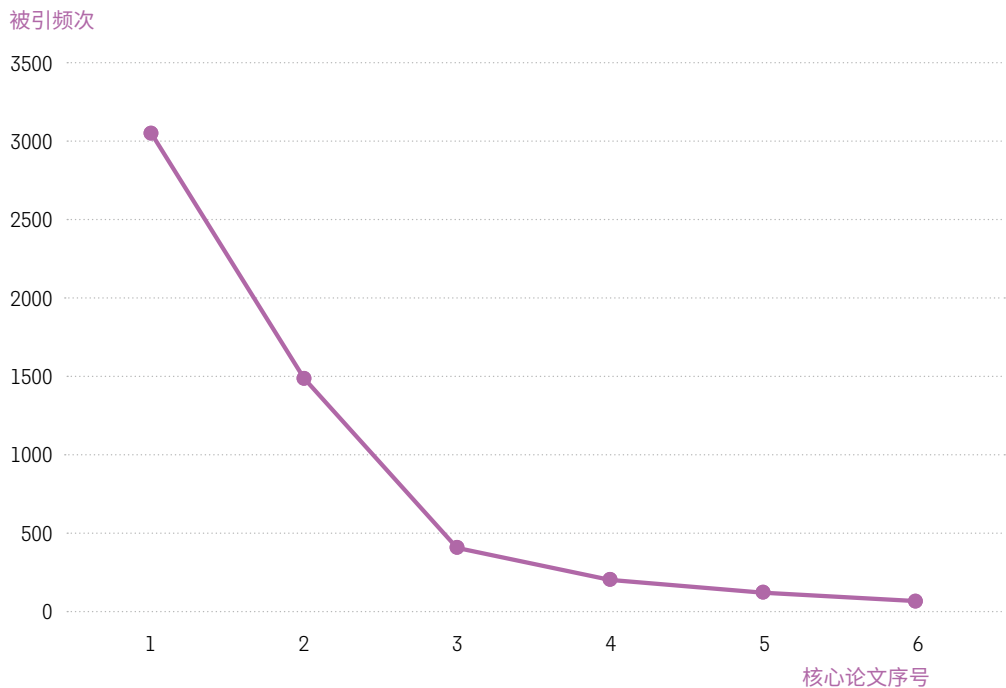


图 26 “多智能体强化学习研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线



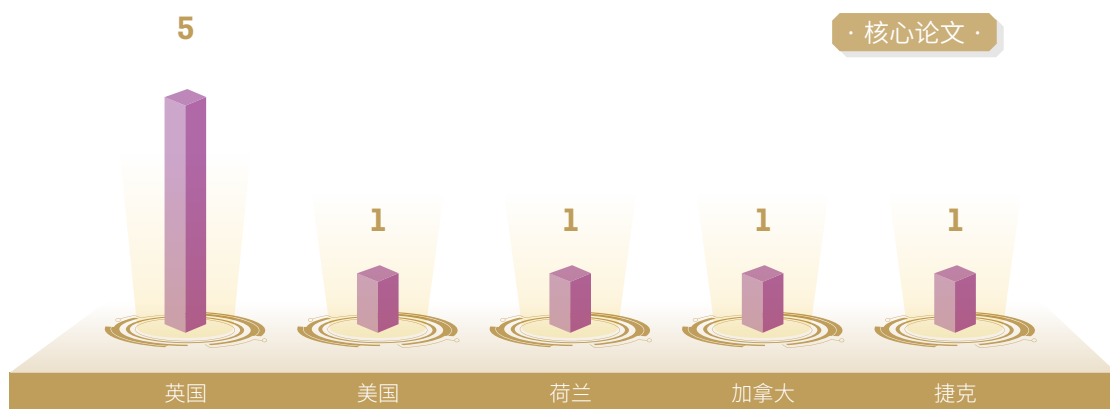
从表 54 可以看出，6 篇核心论文中英国贡献 5 篇，占据绝对优势。美国、荷兰、加拿大、捷克各贡献 1 篇。在产出机构方面，英国的 DeepMind 公司贡献 4 篇，捷克的布拉格查尔斯大学、捷克理工大

学、美国 Google 公司、加拿大阿尔伯塔大学各贡献 1 篇。不难看出，DeepMind 在该前沿主题遥遥领先，其 Alpha 系列产品占据着多智能体强化学习领域的绝对领先地位。总部位于荷兰的 Team Liquid 电竞俱

乐部通过参与 DeepMind 公司的研究，成为核心论文的贡献者之一。加拿大、捷克等机构合作产出的“Deepstack: Expert-Level Artificial Intelligence in Heads-Up No-Limit Poker”也获得较高关注。

表 54 “多智能体强化学习研究”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

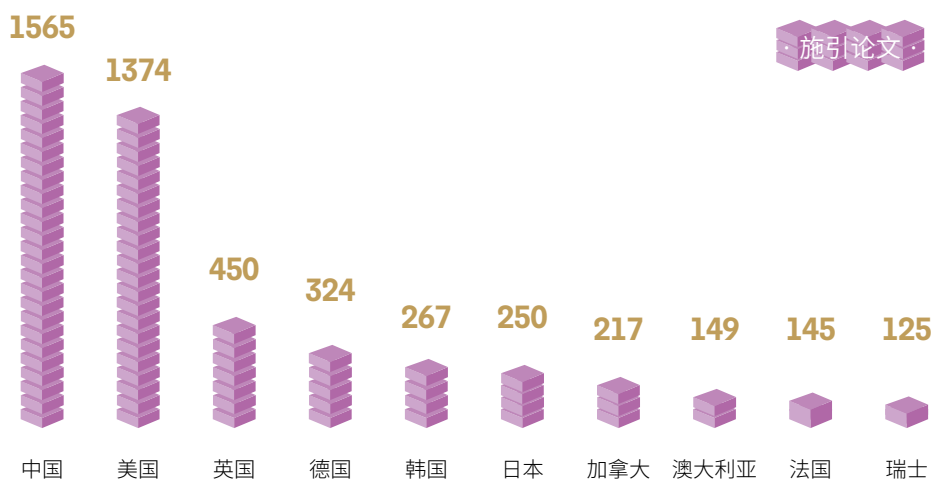
排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	国家	核心论文	比例
1	英国	5	83.3%	1	DeepMind	英国	4	66.7%
2	美国	1	16.7%	2	布拉格查尔斯大学	捷克	1	16.7%
2	荷兰	1	16.7%	2	伦敦大学学院	英国	1	16.7%
2	加拿大	1	16.7%	2	Google	美国	1	16.7%
2	捷克	1	16.7%	2	捷克理工大学	捷克	1	16.7%
				2	Team Liquid	荷兰	1	16.7%
				2	阿尔伯塔大学	加拿大	1	16.7%



从施引论文的角度来看（表 55），中国和美国的施引论文产出数量均超过 1000 篇，其次为英国、德国、韩国、日本等国家。从产出机构上看，中国有 5 家机构进入 Top 10 施引论文机构，其中中国科学院和清华大学最为活跃，排名第一和第二名；美国的麻省理工学院、斯坦福大学、哈佛大学等 3 家机构发文量基本相当；英、法两国也有机构上榜。

表 55 “多智能体强化学习研究”研究前沿中施引论文的 Top 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	1565	35.3%	1	中国科学院	中国	198	4.5%
2	美国	1374	31.0%	2	清华大学	中国	147	3.3%
3	英国	450	10.2%	3	麻省理工学院	美国	86	1.9%
4	德国	324	7.3%	4	斯坦福大学	美国	79	1.8%
5	韩国	267	6.0%	5	法国国家科学研究中心	法国	78	1.8%
6	日本	250	5.6%	6	哈佛大学	美国	74	1.7%
7	加拿大	217	4.9%	7	浙江大学	中国	69	1.6%
8	澳大利亚	149	3.4%	8	伦敦大学学院	英国	63	1.4%
9	法国	145	3.3%	9	电子科技大学	中国	59	1.3%
10	瑞士	125	2.8%	10	北京大学	中国	57	1.3%



## 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 2 项研究入选新兴前沿，“面向 MISO、MIMO 通信的可重构智能表面研究”和“可解释人工智能”。

表 56 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	面向 MISO、MIMO 通信的可重构智能表面研究	45	5653	2019.7
2	可解释人工智能	3	1111	2019

### 2.2 重点新兴前沿——“可解释人工智能”

可解释人工智能 (eXplainable Artificial Intelligence, XAI) 是让专家能够理解人工智能成果的方法与技术, 通过机器学习技术使深度神经网络呈现一定的可理解性, 以满足相关用户对模型及应用服务产生的信息诉求 (如因果或背景信息), 从而为使用者对人工智能服务建立认知层面的信任。

面对深度神经网络模型的“黑匣子”, XAI 从算法模型生命周期

的各个环节介入, 通过对数据、模型和结果的解释, 解决深度学习机制下技术细节不透明的问题, 帮助用户排除模型故障或提升性能。与传统 AI 相比, XAI 更加注重可信度、因果关系、公平性、透明性和隐私意识, 因此, 未来在医疗、司法、安全、金融等关键领域具有广阔的应用前景。

新兴前沿“可解释人工智能”包含 3 篇核心论文, 重点综述了可

解释人工智能技术的发展情况。其中, 来自西班牙巴斯克应用数学中心、格拉纳达大学等研究机构的学者合作发表的“Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI”一文系统回顾了与 XAI 相关的概念、类别、未来发展机遇, 从理论层面对可解释人工智能进行了介绍。意大利比萨大学的学者则对黑箱模型解释方法进行了分析。

# 经济学、心理学 及其他社会科学

2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 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

2022 年经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 的热点前沿中，心理学占据一半，包括与新型冠状病毒肺炎（COVID-19，简称新冠肺炎）疫情相关的健康风险行为、特殊人群心理和身体健康、身心健康与预防措施、恐惧量表改编与评估等热点前沿，另外一项是关于积极心理学在外语课堂情绪

和教学中如何增强外语学习的享受感，降低外语学习的焦虑感。与新冠肺炎疫情相关的热点前沿有 7 个，突出体现了新冠肺炎疫情对经济学、心理学及其他社会科学领域的影响，除心理学领域外，还有 2 项经济管理领域的研究，包括“流行病爆发对供应链的影响和重构”“COVID-19 全球大流行

下的金融市场波动”，以及“对 COVID-19 的知识、态度和做法”的社会学研究。此外，2022 年经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 热点前沿还体现了文献计量方法在经济管理领域研究中的应用以及数字智能农业的社会科学研究。

表 57 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	COVID-19 大流行期间的酒精消费等健康风险行为	35	1266	2020.7
2	COVID-19 对儿童等特殊人群心理和身体健康影响与护理	44	1836	2020.6
3	流行病爆发对供应链的影响和重构	21	1522	2020.5
4	COVID-19 全球大流行下的金融市场波动	19	2359	2020.3
5	COVID-19 大流行期间身心健康与预防措施	24	11907	2020.1
6	各地 COVID-19 恐惧量表的改编和评估	23	2823	2020.1
7	对 COVID-19 的知识、态度和做法	10	1595	2020
8	外语享受与焦虑：积极心理学在外语课堂情绪和教学中的作用	30	1404	2019.7
9	基于文献计量的经济管理领域科学图谱研究	42	3136	2019.3
10	数字农业、智能农业和农业 4.0 的社会科学研究	16	1283	2019.3

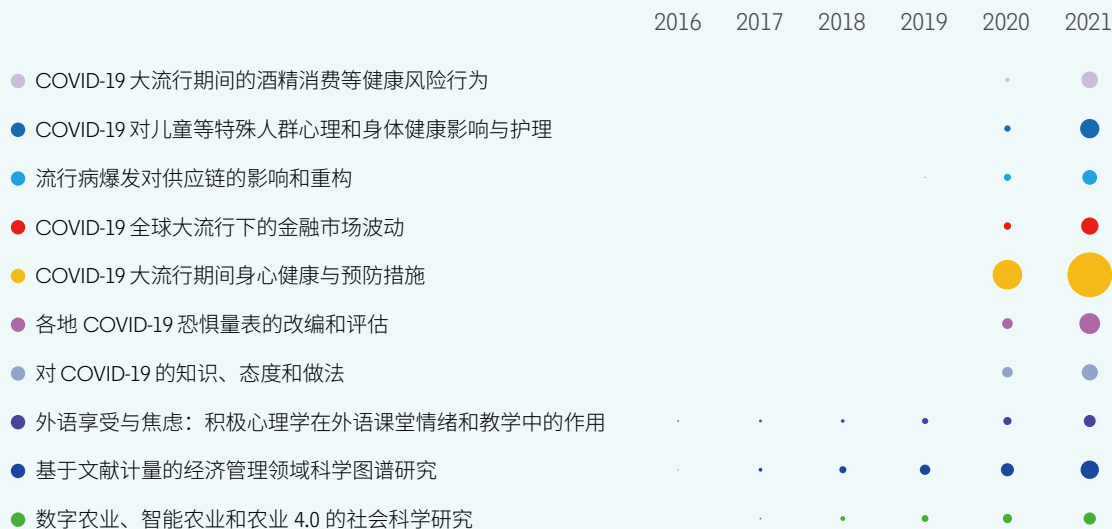


图 27 经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 热点前沿的施引论文

## 1.2 重点热点前沿——“COVID-19 全球大流行下的金融市场波动”

新冠肺炎（COVID-19）的持续传播对全球金融市场产生了巨大的影响，它带来了前所未有的风险水平，导致投资者在很短的时间内遭受重大损失。该热点前沿主要涵盖两个方面的研究内容，一是测算新冠肺炎疫情对金融市场的影响，二是评估不同资产的避险作用。

在测算新冠肺炎疫情对金融市场的影响方面，12 篇论文实证分析或综述了新冠肺炎疫情对金融市场的影响，证明了传染性疾病会对

股市产生严重的消极影响。一是随着确诊病例数量的增加，股市回报率下降，与死亡人数的增长相比，股市对确诊病例数量的增长反应更为显著；二是分析了不同国家的疫情防控政策对股市波动影响的差异，证明了非药物干预显著增加了股市波动；三是研究了冠状病毒相关新闻产生的情绪与股市波动之间的关系，发现新闻媒体产生的压倒性恐慌与股市波动性增加有关。

在评估不同资产的避险作用方

面，面对市场上前所未有的风险，人们越来越需要寻找投资避风港，因此迫切需要重新评估一些传统资产类型（黄金、加密货币、外汇和大宗商品等）的避险作用。研究显示，比特币、以太坊等不能起到良好的避险作用，它们的加入增加了投资组合的下行风险。全球最大稳定币发行商 Tether 在新冠肺炎动荡期间成功地维持了与美元的挂钩，具有一定的避风港属性。而在此次大流行期间，黄金和大豆商品期货作为避险资产仍然保持强劲。

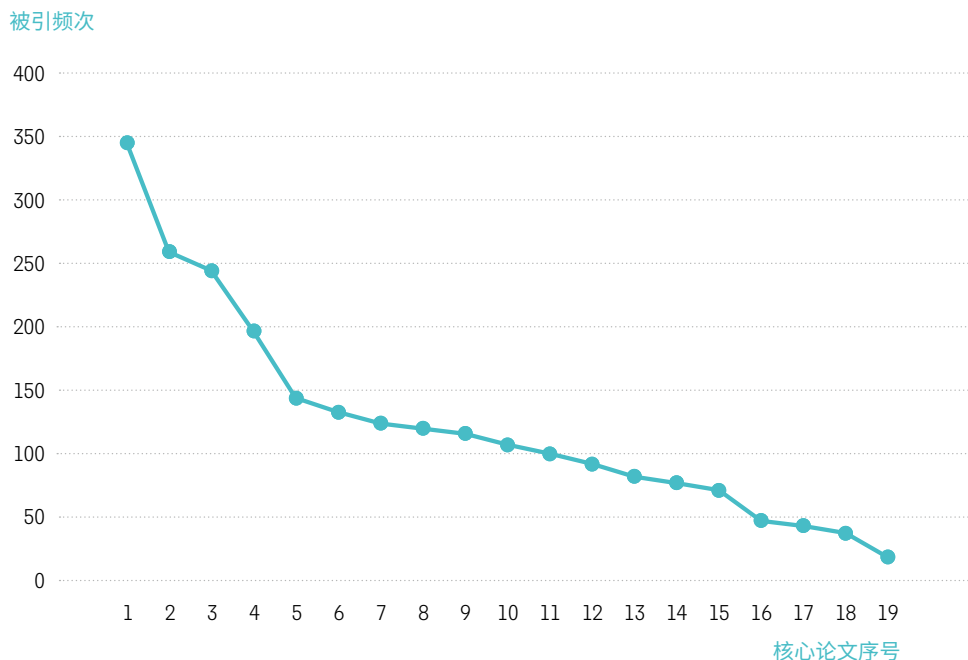


图 28 “COVID-19 全球大流行下的金融市场”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

该热点前沿共有 19 篇核心论文（图 28），主要集中在 2020 年，2021 年有 2 篇。其中被引频次超过 200 次的论文有 3 篇，被引最高的论文（被引频次为 346 次）是 2020 年 10 月中国西南财经大学的张大永和中国科学院科技战略咨询研究院的姬强合作发表在《金融研究快报》(Finance Research Letters) 上的一篇文章，主要研究了新冠肺炎疫情迅速传播对全球金融市场的影响，绘制全球

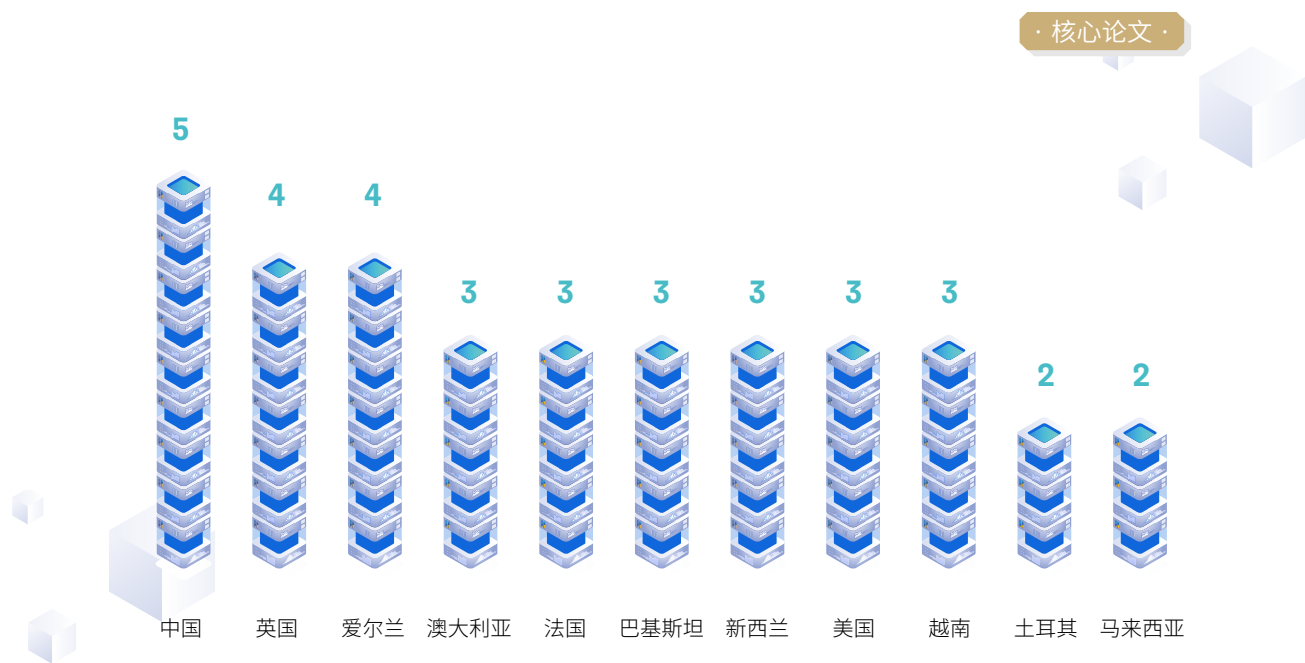
金融市场中特定国家风险和系统性风险的一般模式，并分析政策干预的潜在影响。被引频次在 200-300 次之间的 2 篇论文分别发表在《金融研究快报》(Finance Research Letters) 和《国际金融分析评论》(International Review of Financial Analysis) 上，涉及疫情对金融市场的影响测度和比特币等资产的避险效应分析。

各国在该领域中的贡献较为

均衡，其中核心论文最多的国家是中国，有 5 篇核心论文，占全部核心论文的 26.3%；其次是英国和爱尔兰，分别贡献 4 篇核心论文，占比均为 21.1%。从机构层面看，在 Top 机构中，美国的阿克伦大学、爱尔兰的都柏林城市大学和新西兰的怀卡托大学均贡献 3 篇核心论文，并列排名第一。中国科学院和西南财经大学以 2 篇核心论文跻身于核心论文 Top 产出机构之列（表 58）。

表 58 “COVID-19 全球大流行下的金融市场” 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	国家	核心论文	比例
1	中国	5	26.3%	1	阿克伦大学	美国	3	15.8%
2	英国	4	21.1%	1	都柏林城市大学	爱尔兰	3	15.8%
2	爱尔兰	4	21.1%	1	怀卡托大学	新西兰	3	15.8%
4	澳大利亚	3	15.8%	4	都柏林大学	爱尔兰	2	10.5%
4	法国	3	15.8%	4	拉合尔管理科学大学	巴基斯坦	2	10.5%
4	巴基斯坦	3	15.8%	4	中国科学院	中国	2	10.5%
4	新西兰	3	15.8%	4	都柏林三一学院	爱尔兰	2	10.5%
4	美国	3	15.8%	4	巴黎商学院	法国	2	10.5%
4	越南	3	15.8%	4	巴黎 - 萨克雷大学	法国	2	10.5%
10	土耳其	2	10.5%	4	西南财经大学	中国	2	10.5%
10	马来西亚	2	10.5%	4	南安普顿索伦特大学	英国	2	10.5%
				4	胡志明市经济大学	越南	2	10.5%
				4	悉尼大学	澳大利亚	2	10.5%
				4	南安普顿大学	英国	2	10.5%



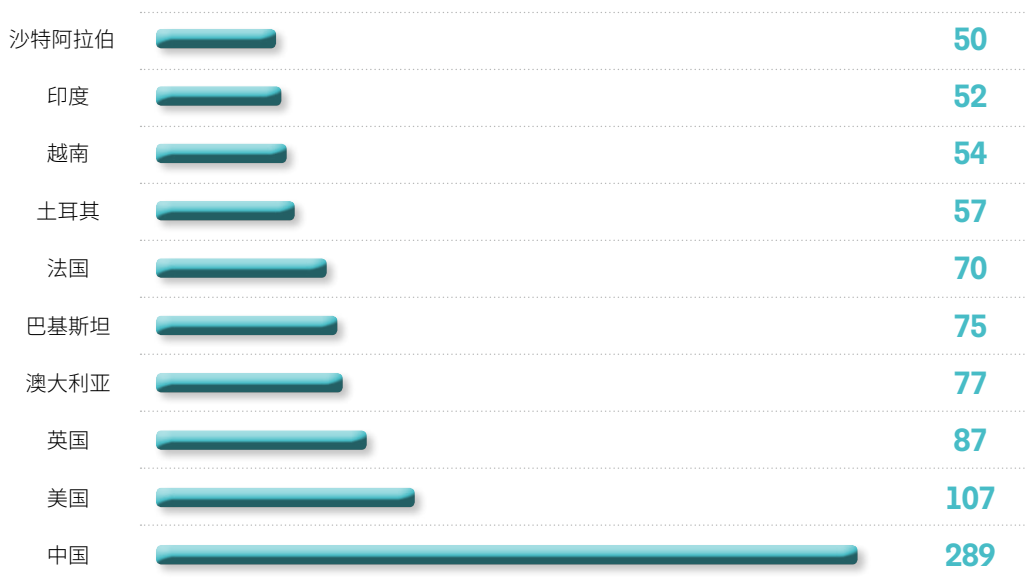


从施引论文来看，中国以 289 篇施引论文位居首位，远超其后的美国、英国和澳大利亚。在产出机构层面，越南的胡志明市经济大学施引论文最多，其次是俄罗斯的南乌拉尔国立大学，中国中南大学和中国科学院分别排名第五和第八。

表 59 “COVID-19 全球大流行下的金融市场”研究前沿中施引论文 Top 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	289	30.3%	1	胡志明市经济大学	越南	34	3.6%
2	美国	107	11.2%	2	南乌拉尔国立大学	俄罗斯	28	2.9%
3	英国	87	9.1%	3	蒙彼利埃高等商学院	法国	19	2.0%
4	澳大利亚	77	8.1%	3	扎耶德大学	阿拉伯联合酋长国	19	2.0%
5	巴基斯坦	75	7.9%	5	中南大学	中国	18	1.9%
6	法国	70	7.3%	5	伊巴丹大学	尼日利亚	18	1.9%
7	土耳其	57	6.0%	7	怀卡托大学	新西兰	17	1.8%
8	越南	54	5.7%	8	中国科学院	中国	16	1.7%
9	印度	52	5.5%	8	都柏林城市大学	爱尔兰	16	1.7%
10	沙特阿拉伯	50	5.2%	8	南安普顿索伦特大学	英国	16	1.7%

· 施引论文 ·





### 1.3 重点热点前沿——“基于文献计量分析的经济管理领域科学图谱研究”

文献计量分析是探索和分析大量科学文献数据的一种流行且科学的方法，通过文献计量分析，能帮助学者剖析某一特定领域演变过程及其细微变化，同时揭示该领域的新兴前沿。尽管文献计量分析在许多领域得以广泛应用，但在经济管理和商业研究中的应用相对较晚，最近几年才迅速发展。本热点前沿主要是利用文献计量分析、元分析和系统文献综述等方法对经济管理和商业研究领域的研究脉络、研究进展和发展趋势进行分析，描绘了经济管理不同领域的科学知识

图谱。

从研究方法看，42篇核心论文均是基于文献的分析，其中26篇利用了文献计量分析的方法，此外，还涉及基于文献的内容分析、元分析以及系统文献综述和文献回顾等方法；2篇论文分别阐述了文献综述的原则和文献计量分析方法，同时提供了开展文献计量分析的步骤和适用情景，并比较了文献计量分析与其他类似技术（如元分析和系统文献综述）的异同，阐明了文献计量分析在经济管理领域研究中的应用。

从分析视角看，除介绍文献计量分析方法的1篇论文外，其余的41篇论文中有28篇是通过构建某一特定领域检索式的方式，从全域视角绘制某一领域的知识图谱；有13篇是锚定经济管理和商业研究领域的权威期刊来分析该领域的发展概况。

从研究领域看，42篇核心论文中有17篇属于营销领域，其他领域还包括：国际投资与经营、金融、创新（开放式创新）、创业、电子商务、知识管理、管理科学等。

被引频次

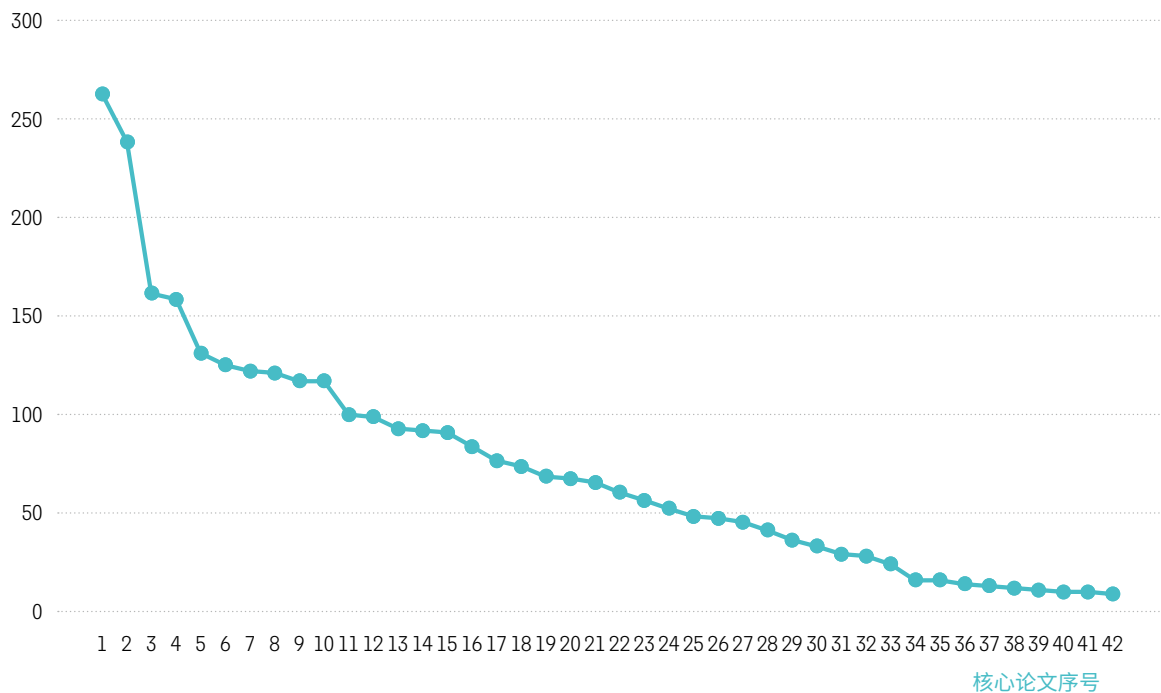


图 29 “基于文献计量的经济管理领域科学图谱研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

该热点前沿共有 42 篇核心论文，跨越 2016-2021 年，说明该热点前沿兴起较早，并在持续发展中。在 42 篇核心论文中，有 2 篇的被引频次高于 200 次，这两篇分别由悉尼科技大学的 Krithika Randhawa 等人于 2016 年发表在《产品创新管理杂志》(Journal of Product Innovation Management) 上和由哥本哈根大学的 Marcel Bogers 等人于 2017 年发表在《产业与创新》

(Industry and Innovation) 上的论文，从不同角度描述了开放式创新的发展概况，从文献计量的角度给出了开放式创新研究的议程，从不同层次描述了开放式创新已有的研究视角和新兴主题。被引频次最高的前 3-5 位的核心论文中，有 2 篇发表在 2017 年，分别利用文献计量分析方法对模糊决策制定和中小企业发展挑战领域研究进行综述；1 篇发表在 2018 年，是关于新兴国家

对外直接投资的文献综述。

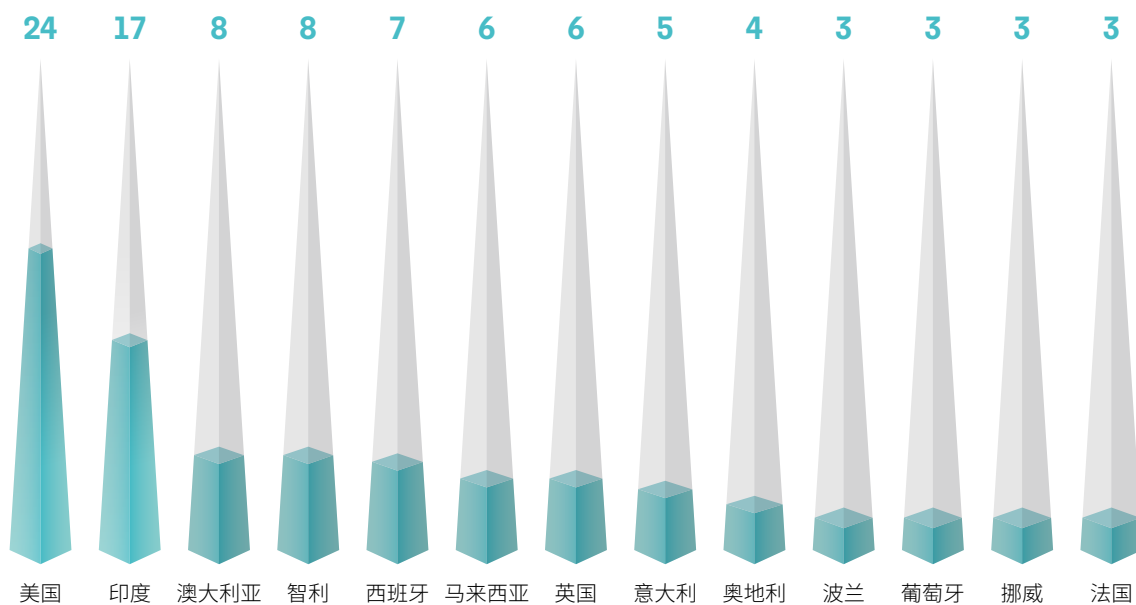
该热点前沿核心论文最多的国家是美国，有 24 篇核心论文，占比超过一半 (57.1%)；其次是印度，产出 17 篇核心论文，占比为 40.5%。核心论文 Top 机构集中在印度、智利、澳大利亚和美国，且分布相对均衡。其中，印度的斋浦尔马拉维亚国家理工学院产出 9 篇核心论文，占比最大 (21.4%)，紧随其后的是智利大学。

表 60 “基于文献计量的经济管理领域科学图谱研究” 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	国家	核心论文	比例
1	美国	24	57.1%	1	斋浦尔马拉维亚国家理工学院	印度	9	21.4%
2	印度	17	40.5%	2	智利大学	智利	8	19.0%
3	澳大利亚	8	19.0%	3	斯威本科技大学	澳大利亚	6	14.3%
3	智利	8	19.0%	3	斯威本科技大学砂拉越校区	马来西亚	6	14.3%
5	西班牙	7	16.7%	5	乔治亚州立大学	美国	5	11.9%
6	马来西亚	6	14.3%	5	罗林斯学院	美国	5	11.9%
6	英国	6	14.3%	7	印度管理学院科泽科德分院	印度	4	9.5%
8	意大利	5	11.9%	8	挪威科技大学	挪威	2	4.8%
9	奥地利	4	9.5%	8	美国大学	美国	2	4.8%
10	波兰	3	7.1%	8	圣托马斯圣地亚哥大学	智利	2	4.8%
10	葡萄牙	3	7.1%	8	印度管理发展研究所	印度	2	4.8%
10	挪威	3	7.1%	8	波多黎各美洲大学	美国	2	4.8%
10	法国	3	7.1%	8	哈特福德大学	美国	2	4.8%
				8	英国诺丁汉特伦特大学	英国	2	4.8%

排名	机构	国家	核心论文	比例
8	维也纳大学	奥地利	2	4.8%
8	巴塞罗那自治大学	西班牙	2	4.8%
8	哥本哈根大学	丹麦	2	4.8%
8	华盛顿大学西雅图分校	美国	2	4.8%
8	葡萄牙天主教大学	葡萄牙	2	4.8%
8	巴塞罗那大学	西班牙	2	4.8%
8	诺丁汉大学	英国	2	4.8%
8	萨格勒布大学	克罗地亚	2	4.8%

## · 核心论文 ·

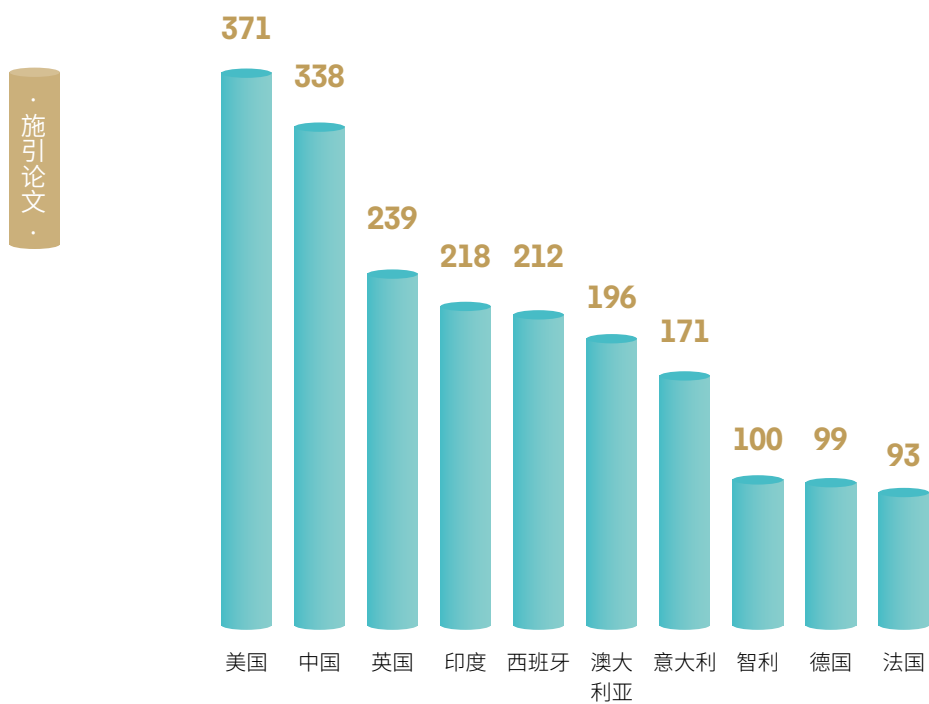


从施引论文来看，美国以 371 篇施引论文位居首位，中国、英国、印度、西班牙均超过 200 篇，中国对该前沿的关注度逐渐提升。在机构层面，智利大学

的施引论文最多，澳大利亚悉尼科技大学排名第二，中国的四川大学以 37 篇施引论文排名第五。

表 61 “基于文献计量的经济管理领域科学图谱研究”研究前沿中施引论文 Top 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	371	20.1%	1	智利大学	智利	80	4.3%
2	中国	338	18.3%	2	悉尼科技大学	澳大利亚	70	3.8%
3	英国	239	13.0%	3	斋浦尔马拉维亚国家理工学院	印度	55	3.0%
4	印度	218	11.8%	4	哥本哈根大学	丹麦	38	2.1%
5	西班牙	212	11.5%	5	四川大学	中国	37	2.0%
6	澳大利亚	196	10.6%	6	加州大学伯克利分校	美国	29	1.6%
7	意大利	171	9.3%	7	斯威本科技大学砂拉越校区	马来西亚	28	1.5%
8	智利	100	5.4%	8	巴塞罗那大学	西班牙	25	1.4%
9	德国	99	5.4%	9	格拉纳达大学	西班牙	23	1.2%
10	法国	93	5.0%	10	乔治亚州立大学	美国	22	1.2%
				10	麦格理大学	澳大利亚	22	1.2%
				10	康塞普西翁卡托利卡 - 圣蒂西马大学	智利	22	1.2%
				10	瓦伦西亚大学	西班牙	22	1.2%





## 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11项研究入选新兴前沿，其中6项新兴前沿与COVID-19疫情有关，分别是COVID-19疫情大流行期间老年人的孤独感和心理健

康，COVID-19疫情大流行期间公众对数字接触者追踪的接受度研究，COVID-19疫情大流行期间人格特征与感知压力、风险认知和保护行为的关联性研究，COVID-19

疫情及地缘政治风险对比特币等金融市场的影响，以及COVID-19疫苗接种意向研究。下面选取“COVID-19疫苗接种意向研究”做重点解读。

表 62 经济学、心理学及其他社会科学领域的 11 个新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	技术创新、能源消费与碳排放	22	560	2021
2	COVID-19 疫情大流行期间老年人的孤独感和心理健康	5	453	2020.8
3	能源消耗、经济政策不确定性和碳排放	10	304	2020.8
4	零售消费者购买行为的变化及原因	10	278	2020.8
5	治疗效果的双重差分研究	4	207	2020.8
6	COVID-19 疫情背景下抑郁症、焦虑症或强迫症的心理健康与行为表现	12	417	2020.7
7	基于区块链的物联网与智慧城市建设	21	954	2020.6
8	COVID-19 疫苗接种意向研究	7	894	2020.6
9	COVID-19 疫情大流行期间公众对数字接触者追踪的接受度研究	14	747	2020.6
10	COVID-19 疫情大流行期间人格特征与心理特征研究	16	684	2020.6
11	COVID-19 疫情及地缘政治风险对比特币等金融市场的影响	18	679	2020.6

## 2.2 重点新兴前沿——“COVID-19 疫苗接种的意向研究”

新冠肺炎（COVID-19）疫情在全球持续蔓延，疫苗接种对防止新冠肺炎疫情蔓延至关重要，但由于新型新冠肺炎疫苗研制时间较短，出于对疫苗安全性的担忧，很多地方出现了“疫苗犹豫”现象，这也成为全球范围内接种高传染性疾病预防的障碍，不利于疫情防控。因此，调研分析全球各地“疫苗犹豫”现状，以及哪些人群是“疫苗犹豫”最严重的人群，对于有针对性地开展政策干预和干预教育，以防控新

冠肺炎疫情蔓延具有重要意义。该问题成为“经济学、心理学及其他社会科学领域”的新兴前沿之一。

该新兴前沿的7篇核心论文通过匿名调查的方式，对法国、比利时、加拿大法语区、以色列、中国香港等地的医护人员和普通民众的疫苗接种意愿进行了调查，研究主要获得四个发现。一是参与护理新冠病毒阳性患者的医护人员以及认为自己有患病风险的个人更倾向于接受疫苗接种，而不照顾阳性患者

的父母、护士和医务人员对疫苗的犹豫程度更高。二是年龄较大、男性、白人或亚洲人的受访者比其他群体更有可能接种疫苗，女性、黑人、拉丁裔和农村人员愿意在疫苗上市后立即接种的比例较小。三是新冠肺炎大流行对流感疫苗的接受率没有积极影响。四是安全性、有效性和开发/批准速度被认为是影响新冠肺炎疫苗接种犹豫的主要因素，这些必须在疫苗接种活动之前或期间解决。



# 附录

## 研究前沿综述： 寻找科学的结构

© 作者：David Pendlebury

2022 研究前沿 RESEARCH FRONTS



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做索引，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，无论是顺序或回溯引用论文，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见多识广的判断，并反映在他们文章的参考文献中，而图书情报索引专家对出版物的内容并不如作者熟悉只靠分类来做索引。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。Science Citation Index (现在的 Web

of Science) 创建于 1964 年，2022 年已有 56 个年头<sup>[3]</sup>。虽然 Science Citation Index 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。

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 年的一篇文章“Citation Indexes for Sociological and Historical Research”，论述了利用引文分析客观探寻研究前沿的方法<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智力判断，反映了学术领域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 并不孤独。同期，物理学、科学史学家 Derek J. de Solla Price 也在试图探寻科学研究的本质与结构。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籍，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，因为在他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“科学研究论文网络”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，即某些卓越科学家在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。如果有人想探寻这种‘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, 人们可以通过期刊在地图中的位置以及在‘条’中的战略中心地位来识别期刊(实际上是国家、个人或单篇论文)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, 加入费城的美国科技信息所, 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“文字”转向了“文章间相互引用行为”, 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 在 Garfield 1955年介绍引文思想论文的基础上, 开拓出了自己全新的方向, 发表了论文“Co-citation in the scientific literature: A new measure of relationship between two documents”, 这篇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的时期<sup>[11]</sup>。Small 利用两篇论文被共同被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。他认为基于论文被引用频率的分析, 可以用来寻找领域中关键的概念、方法和实验, 是进行“共被引分析”的起点。前者用客观的方式揭示了学科领域的智力、社会和社会认知结构。像 Price 做研究前沿的研究一样, 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“学科”或较大的领域。Small 将“共被引分析”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, 可以呈现某个研究领域的结构图, 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研究的进展, 以及评估不同研究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-Shaikovitch。她也在1973年提出了“共被引分析”的思想<sup>[12]</sup>。但是 Small 与 Marshakova-Shaikovitch 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-Shaikovitch 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: 不用两篇文章共同引用的参

考文献频次做内容相似度研究的线索，而是将“共同被引用”的参考文献聚类，通过“共被引分析”度量这些参考文献的相似度。“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”，他认为这样的逆过程能够反映科学活动、科学家认知随着时间发生的变化<sup>[16]</sup>。

接下来的一年，即1974年，Small与位于费城Drexel University的Belver C. Griffith共同发表了两篇该领域里程碑式的著作，阐释了利用“共被引分析”寻找“研究单元”的方法，并且利用“研究单元”间的相似度做图呈现研究工作的结构<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。将这样的高被引论文合集限定在一定规模范围内，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，利用引用频次建立的统

计分析模型可以证明这些论文的确具有学科代表性与稳定性。一旦这样的合集被筛选出来，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。我们就认为两个“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，阈值过低则会形成不间断的“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”最小阈值是相似度.1的余弦，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。

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。

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的相似度基础上的。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。

对 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,生成巨型地图。这个过程是动态的,不断随着时间而变化,这使得我们在第一时间就能捕捉到它的进展与特性。”<sup>[20]</sup>

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>。

根据引用论文的参考文献的多少,通过计算分数被引频次调整领域内平均引用率差异,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。随着方法的改进,数学显得愈发重要,而在整数计数时代,数学曾被忽视。他还提出基于相似度可以将不同研究前沿聚类,这超越了单个研究前沿聚组的工作<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,勾勒出全球该领域的研究状况,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,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显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 有类似的想法，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论文互动图形系统<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。

Essential Science Indicators (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

拟真实情况的三维虚拟图形，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 领导了一个科学论文虚拟图形项目，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，在动态实时图形化学术论文领域，该研究无疑迈出了巨大的一步，这也是一个未来发展迅速的领域。该软件可以将论文的密度及显著特征用山形描绘出来。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，清楚地看到相对于它们所处的时代来说两者都有些超前。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大量数据的渠道，并受到落后的数据存储、运算、分析技术的限制。直到上实际 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”。从这个角度看，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*. New York: 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*. New York: 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-Shaikevich. 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.



## 编纂委员会

### 专家指导委员会：

主 任	侯建国									
副 主 任	高鸿钧	周 琪								
执行副主任	潘教峰	翟立新	刘细文	王 利						
委 员	于 淦	李国杰	方荣祥	李永舫	姚檀栋	翟明国	王 赤	喻树迅		
	李晋闵	张 凤	张晓林	刘 清	何国威	肖立业	程代展	朱 祯		
	高彩霞	单保慈	赵 冰	张建玲	刘会贞	田 野	史建波	施 一		
	张正斌	张 雯	何 畅	张双南	田志喜	石正丽	步文博	姜雪峰		
	刘安安	朱朝东	王亚韩	马琰铭	宋 成	詹 成	周 强			

### 总体组：

科睿唯安	David Pendlebury	岳卫平	王 娜
	郭 杨	黄庭颖	马亚鹏
	熊 洋	袁庆文	王 振
中国科学院科技战略咨询研究院	冷伏海	周秋菊	杨 帆

### 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	李赞梅 李军莲 冀玉静
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、心理学以及其他社会科学	裴瑞敏

### 英文翻译组：

袁建霞	邢 颖	周秋菊	范唯唯	王海名	杨 帆	李赞梅	李军莲
冀玉静	边文越	张超星	黄龙光	韩 淋	王海霞	孙 震	白如江
裴瑞敏	Christopher M. King	岳卫平	王 娜	郭 杨	黄庭颖		
马亚鹏	孙 敏	熊 洋	袁庆文	王 振			

### 数据支持组：

科睿唯安  
中国科学院科技战略咨询研究院 王小梅 李国鹏

## 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，聚焦科技发展战略、科技和创新政策、生态文明与可持续发展战略、预测预见分析、战略情报等领域，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专业信息服务提供商。今天，科睿唯安锐意进取，为用户提供值得信赖的信息与卓越的洞见，帮助客户解决复杂难题，洞察先机，加速创新步伐。我们的专业知识和解决方案覆盖创新生命周期的每一个关键环节，从学术研究和科学发现，到知识产权的管理保护，直至实现创新成果的商业化，涵盖学术研究、生命科学与制药、知识产权各个领域。更多信息，请访问 [clarivate.com.cn](http://clarivate.com.cn)。

**2022 研究前沿**  
**RESEARCH FRONTS**



### **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/>