



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™

2023 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



2023 研究前沿 RESEARCH FRONTS



目录 Contents

背景和方法论	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

农业科学、植物学和动物学	1. 热点前沿及重点热点前沿解读	11
	1.1 农业科学、植物学和动物学领域 Top10 热点前沿发展态势	11
	1.2 重点热点前沿——“植物肉与细胞培养肉的替代性研究”	12
	1.3 重点热点前沿——“NLR 免疫受体介导的植物免疫机制”	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——“水果采摘机器人的识别与定位方法”	19	

生态与环境科学	1. 热点前沿及重点热点前沿解读	21
	1.1 生态与环境科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	21
	1.2 重点热点前沿——“土壤微塑料的环境归趋和生态毒理”	23
	1.3 重点热点前沿——“‘基于自然的解决方案’的理论与应用”	26
	2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	29
	2.1 新兴前沿概述	29
2.2 重点新兴前沿——“人体组织中微塑料的检测与暴露”	29	

地球科学	1. 热点前沿及重点热点前沿解读	31
	1.1 地球科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	31
	1.2 重点热点前沿——“CMIP6 模式高气候敏感度成因及影响研究”	32
	1.3 重点热点前沿——“利用重力勘测和气候试验及其后继任务研究 陆地水储量变化”	36
	2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	39
	2.1 新兴前沿概述	39
2.2 重点新兴前沿——“汤加火山喷发全球影响研究”	39	

临床医学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	41
1.1 临床医学领域 Top 10 热点前沿发展态势	41
1.2 重点热点前沿——“CRISPR-Cas9 基因编辑和 shRNA 等新型基因疗法靶向 BCL11A 治疗镰状细胞病和 β -地中海贫血”	42
1.3 重点热点前沿——“KRAS(G12C) 抑制剂与肿瘤靶向治疗”	44
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	48
2.1 新兴前沿概述	48
2.2 重点新兴前沿——“猴痘感染暴发”	48

生物科学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	51
1.1 生物科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	51
1.2 重点热点前沿——“空间转录组技术”	52
1.3 重点热点前沿——“第三代长读长测序技术解析人类基因组结构变异”	56
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	59
2.1 新兴前沿概述	59
2.2 重点新兴前沿——“铜死亡：铜诱导肿瘤细胞死亡机制”	59

化学与材料科学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	61
1.1 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿发展态势	61
1.2 重点热点前沿——“海水电解催化剂”	62
1.3 重点热点前沿——“电催化合成过氧化氢”	65
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	68
2.1 新兴前沿概述	68
2.2 重点新兴前沿——“高性能 HER 和 ORR 光催化剂的开发及其在太阳能燃料合成中的应用”	69

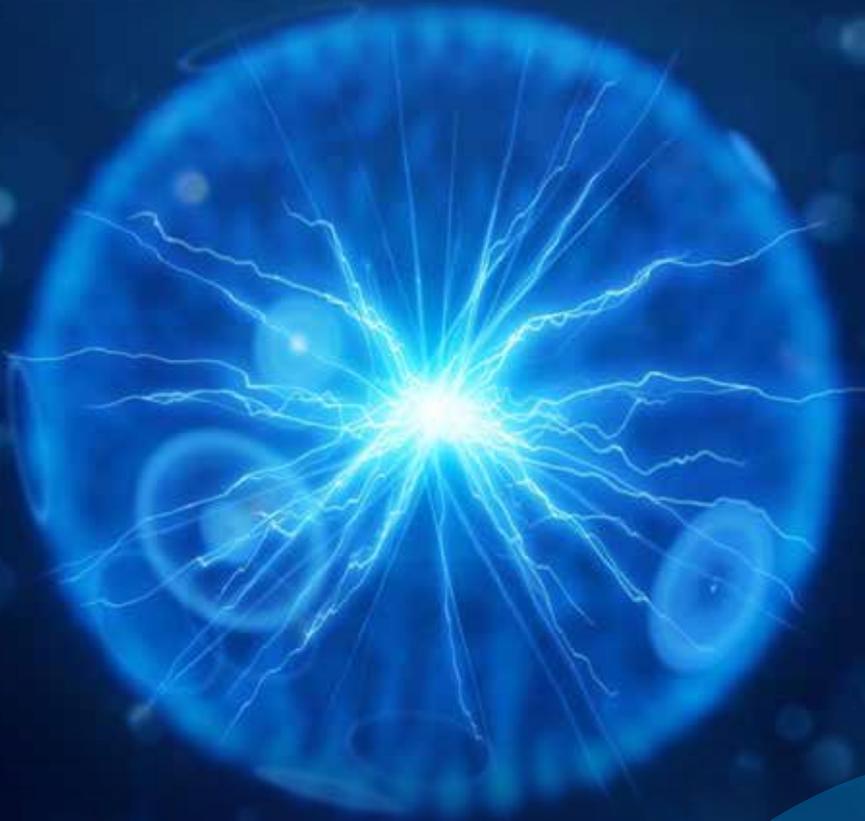
物理学

1. 热点前沿及重点热点前沿解读	71
1.1 物理学领域 Top 10 热点前沿发展态势	71
1.2 重点热点前沿——“笼目超导材料 AV_3Sb_5 的特性研究”	72
1.3 重点热点前沿——“双场量子密钥分发”	75
2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	79
2.1 新兴前沿概述	79
2.2 重点新兴前沿——“基于 W 玻色子质量精确测量结果的理论研究”	79

天文学与天体物理学	1. 热点前沿及重点热点前沿解读	81
	1.1 天文学与天体物理学领域 Top 10 热点前沿发展态势	81
	1.2 重点热点前沿——“‘激光干涉仪引力波天文台’ - ‘欧洲引力波探测器’ 引力波瞬态目录 2 及其对致密天体性质的揭示”	82
	1.3 重点热点前沿——“重复快速射电暴的观测及性质研究”	84
	2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	88
	2.1 新兴前沿概述	88
	2.2 重点新兴前沿——“俄德合作‘光谱-RG’空间天文台上的 eROSITA 望远镜观测结果”	88
数学	1. 热点前沿及重点热点前沿解读	91
	1.1 数学领域 Top 10 热点前沿发展态势	91
	1.2 重点热点前沿——“Onsager 猜想的证明”	92
	1.3 重点热点前沿——“基于随机块模型的社区发现”	95
	信息科学	1. 热点前沿及重点热点前沿解读
1.1 信息科学领域 Top 10 热点前沿发展态势		101
1.2 重点热点前沿——“脉冲神经网络及其神经形态芯片”		102
1.3 重点热点前沿——“生成式对抗网络”		105
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
	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	109
	1.2 重点热点前沿——“供应链风险管理及区块链技术在其中的应用”	110
	1.3 重点热点前沿——“人工智能 (AI) 伦理”	113
	2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读	116
	2.1 新兴前沿概述	116
	2.2 重点新兴前沿——“以人为本、可持续性和富有弹性的工业 5.0 发展”	116
	附录 研究前沿综述：寻找科学的结构	118
	编纂委员会	127

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

背景与方法论



1. 背景

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

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

通过持续跟踪全球最重要的科研和学术论文，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^①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2022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》、《2021研究前沿》和《2022研究前沿》分析报告。这一系列报告引起了全球广泛的关注。2023年，在以往系列研究前沿报告的基础上，推出了《2023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12922个研究前沿，遴选出了2023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18个新兴前沿。

^① 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，128 个研究前沿的核心论文及其施引论文的数据由科睿唯安提供；研究前

沿的分析和重点研究前沿（包括重点热点前沿和重点新兴前沿）的遴选及解读由中国科学院科技战略咨询研究院科技战略情报研究所主持完成。此次分析基于 2017-2022 年的论文数据，数据下载时间为 2023 年 3 月。

2.1 研究前沿的遴选与命名

《2023 研究前沿》分析报告反映了当前自然科学与社会科学的 11 大学科领域的 128 个研究前沿（包括 110 个热点前沿和 18 个新兴前沿）。我们将 ESI 数据库中 20 个学科的 12922 个研究前沿划分到 11^② 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 128 个研究前沿的具体遴选过程如下：

2.1.1 热点前沿的遴选

今年热点前沿的遴选用两种方法。方法 1 沿用往年的热点前沿和新兴前沿遴选方法。方法 2 在 2022 年数学领域和信息科学领域研究前沿遴选方法的基础上，进行了微调和拓展应用。

方法 1：首先将每个 ESI 学科中的研究前沿，按照核心论文的总被引频次进行排序，提取排在每个 ESI 学科前 10% 的最具引文影响力的研究前沿，并按照大学科领域进行合并。然后根据核心论文出版年的平均值重新排序，遴选出每个大学科领域中那些“最年轻”的研究前沿，并由各学科战略情报研究人员进行调整和归并。通过上述几个步骤在 11 个大学科领域分别选出若干个热点前沿。

方法 2：首先按照 11 个大学科领域研究前沿中核心论文的篇均被引频次进行排序，选出超过本领域平

均篇均被引频次的研究前沿，再根据核心论文出版年的平均值重新排序，由各学科战略情报研究人员判断这些研究前沿的研究主题是否显著促进了本领域的知识进步，并遴选出若干备选前沿。

结合上述两种方法，最终在 11 个大学科领域各遴选出 10 个热点前沿，共计 110 个热点前沿。因为每个领域具有不同的特点和引用行为，有些学科领域中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少，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，通常提示其是一个快速发展的专业研究方向。为了选取新兴的前沿，组成研究前沿的基础文献即核心论文的时效性是优先考虑的因素。这就是为什么我们称其为新兴前沿。

对 11 个大学科领域，为了识别新兴前沿，我们对研究前沿中的核心论文的出版年赋予了更多的权重或优先级，只有核心论文平均出版年在 2021 年 6 月之后的研究前沿才被考虑。将 11 个大学科领域对应的

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

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 11 大学科领域中，从而遴选出了 11 大学科领域的 18 个新兴前沿。

从 11 大学科领域中共遴选出 18 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，2023 年数学领域没有遴选出新兴前沿，而临床医学领域选出了 5 个新

兴前沿。

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

2.1.3 研究前沿的命名

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

2.2 研究前沿的分析及重点研究前沿的遴选和解读

本报告在遴选的 128 个研究前沿的数据的基础上，由中国科学院科技战略咨询研究院的战略情报研究人员对 11 大学科领域的 110 个热点前沿的发展趋势进行了分析，并对 31 个重点研究前沿进行了详细的解读（见后续各章）。重点研究前沿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，并根据核心论文的元数据及其统计结果揭示研究前沿的发展态势，其中核心论文数 (P) 标志着研究前沿的大小，核心论文的平均出版年和论文的时间分布标志着研究前沿的进度。核心论文数 (P) 表达了研究前沿中知识基础的重要程度。在一定时间段内，一个研究前沿的核心论文数 (P) 越大，表明该前沿越活跃。

(2) 年篇均被引频次 (CPT)

遴选重点研究前沿的指标年篇均被引频次 (CPT) 的计算方法是用核心论文的总被引频次 (C) 除以核心论文数 (P)，再除以施引论文所发生的年数 (T)。施引论文所发生的年数 (T) 指施引论文集合中最新发表的施引论文与最早发表的施引论文的发表时间的差值。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。它反映了某个研究前沿的引文影响力的广泛性和及时性，可以用于探测研究前沿的突现、发展以及预测研究前沿下一个时期可能的发展。该指标既考虑了某个研究前沿受到关注的程度，即核心论文的总被引频次，又考虑了该研究前沿受关注的时间长短，即施引论文所发生的年数。在研究前沿被持续引用的前提下，当两个研究前沿的 P 和 T 值分别相等时，则 C 值较大的研究前沿的 CPT 值也较大，指示该研究前沿引文影响力较大。

当两个研究前沿的 C 和 P 值分别相等时，则 T 值较小的研究前沿的 CPT 值会较大，指示该研究前沿在短期内受关注度较高。

当两个研究前沿的 C 和 T 值分别相等时，P 值较小的研究前沿的 CPT 反而会较大，指示该研究前沿中核心论文的平均引文影响力较大。

《2023 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两个重点热点前沿。综合这两种方法共遴选出 22 个重点热点前沿。从新兴前沿中，利用 CPT 指标结合战略情报研究人员的判断遴选出 9 个重点新兴前沿。因此从 128 个研究前沿中共遴选出 31 个重点前沿进行深入解读。

2.2.2 研究前沿的分析和解读

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

前沿进行了详细的解读。

(1) 热点前沿分析及重点热点前沿的解读

对于每个大学科领域，结合 Top10 热点前沿的核心论文的数量、被引频次、核心论文平均出版年，以及施引论文的年度变化，分析 Top10 热点前沿的发展趋势，包括覆盖的学科领域方向、前沿（群）分布特征及演变趋势。

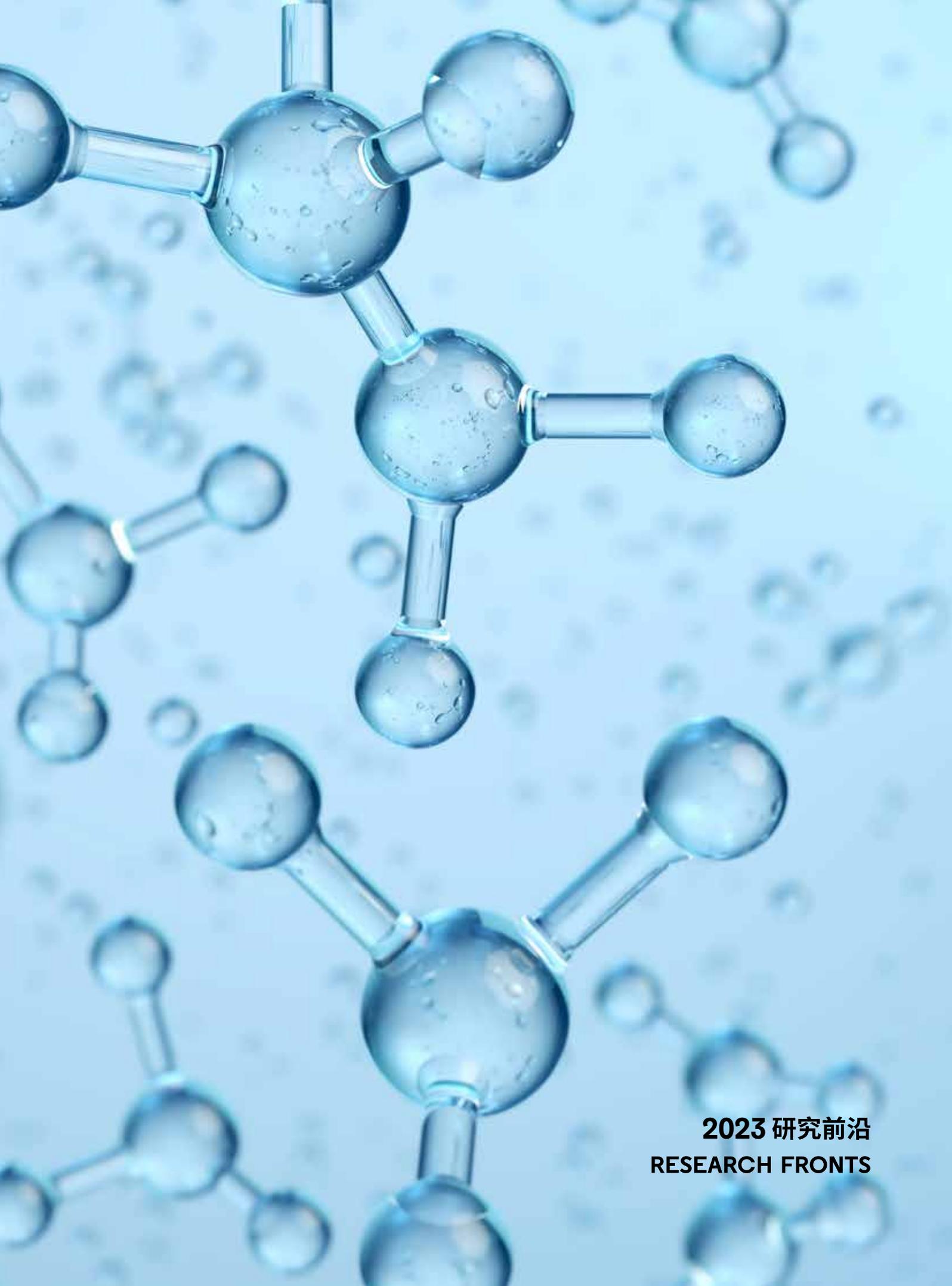
每个学科领域的第一张表展示本领域前 10 个热点前沿的核心论文的数量、被引频次以及核心论文平均出版年。每个领域的 10 个热点研究前沿中引用核心论文的论文（施引论文）的年度分布用气泡图的方式展示，气泡大小表示每年施引论文的数量。大部分研究前沿的施引论文每年均有一定程度的增长，因此气泡图也有助于对研究前沿发展趋势的理解。

对每个学科领域遴选出的两个重点热点前沿，深入分析解读其概念内涵、发展脉络、研究力量布局等，绘制核心论文被引频次分布曲线揭示被引频次较高的核心论文的研究内容、价值、影响。

每个重点热点前沿的第一张表对该热点前沿的核心论文的产出国家 / 地区（本报告的中国数据包含了中国大陆、中国香港、中国澳门的数据）、机构活跃状况进行了统计分析，有助于揭示出哪些国家 / 地区、机构在该热点前沿中有较大贡献。第二张表则对该热点前沿的施引论文的产出国家 / 地区和机构进行了统计分析，有助于探讨哪些国家 / 地区、机构在该热点前沿的发展中进行了研究布局。

(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。



2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

农业科学、植物学 和动物学



1. 热点前沿及重点热点前沿解读

1.1 农业科学、植物学和动物学领域 Top10 热点前沿发展态势

农业科学、植物学和动物学领域居于前10的热点前沿分布广泛，涉及食品科学与工程、植物免疫调控、植物非生物胁迫响应机制、植物生长发育调控、植物基因组，及动物营养等6个子领域（表1）。其中，食品科学与工程子领域热点前沿数量最多，有3个，分别是植物肉与细胞培养肉的替代性研究、食品中益生菌的微胶囊化研究、食物蛋白生物活性肽的结构与功能。植物免疫调控子领域有热点前沿2个，包括NLR免疫受体介导的植物免疫机制、植物细胞外囊泡的免疫调节功能。植物非生物胁迫响应机制子领域也有2个，分别是纳米颗粒提高作物镉耐受性和抗旱性的

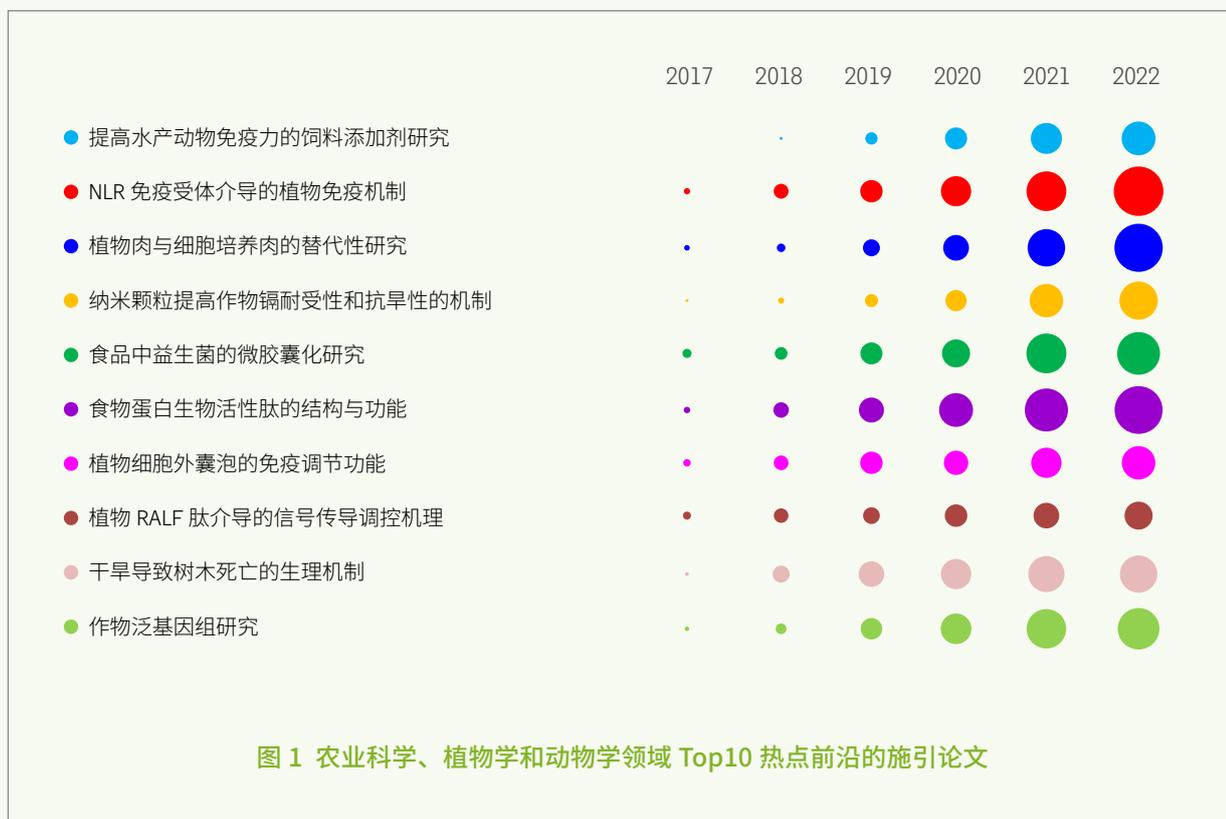
机制、干旱导致树木死亡的生理机制。植物基因组和动物营养子领域各有1个，分别研究作物泛基因组和提高水产动物免疫力的饲料添加剂研究。

上述子领域的研究已经持续多年入选研究前沿报告。尤其值得注意的是，今年有多个热点前沿曾多次连续入选Top10热点前沿，其中植物基因组子领域的作物泛基因组研究和植物免疫调控子领域的NLR免疫受体介导的植物免疫机制研究，均从2021年起连续三年入选。而目前热度较高的植物肉与细胞培养肉的替代性研究则首次入选Top10热点前沿。



表1 农业科学、植物学和动物学领域 Top10 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	提高水产动物免疫力的饲料添加剂研究	22	1561	2020.3
2	NLR免疫受体介导的植物免疫机制	49	5160	2020.2
3	植物肉与细胞培养肉的替代性研究	50	3961	2020.2
4	纳米颗粒提高作物镉耐受性和抗旱性的机制	22	1790	2020.0
5	食品中益生菌的微胶囊化研究	20	1735	2019.9
6	食物蛋白生物活性肽的结构与功能	34	3123	2019.8
7	植物细胞外囊泡的免疫调节功能	21	2030	2019.8
8	植物 RALF 肽介导的信号传导调控机理	18	1683	2019.8
9	干旱导致树木死亡的生理机制	19	2649	2019.7
10	作物泛基因组研究	17	2864	2019.4



1.2 重点热点前沿——“植物肉与细胞培养肉的替代性研究”

农业技术的进步和畜牧业的集约化提高了肉类生产的效益和产量，因此在发达国家，肉相对便宜且容易获得，但是密集的肉类生产对公共卫生、环境和动物福利造成了不利影响。联合国粮农组织曾预测，到 2050 年全球肉类需求将达到 4.55 亿吨，比 2005 年增长 76%。因此，为了减少动物养殖带来的负面影响，学术界和工业界正在努力探索利用非动物来源材料生产肉类，尤其是利用细胞培养工程和组织工程等技术，在体外培

养动物肌肉组织作为食用材料，这类肉产品被称为细胞培养肉。2001 年荷兰政府资助高校开展培养肉研究，2002 年美国国家航空航天局资助开展培养金鱼肉研究。2013 年，荷兰科学家首次研发出可食用的培养肉，随后成立公司推动培养肉商业化生产。2019 年，南京农业大学科研人员利用猪肌肉干细胞培养出中国第一块细胞培养肉。随着技术的不断发展，细胞培养肉的成本也在逐步降低，2021 年以色列细胞肉公司 Future Meat Technologies

(FMT) 开发了一种在反应器中高密度培养动物细胞的技术，且开创了培养基过滤再生专利技术，将实验室培养鸡肉的价格从 2019 年的 150 美元 / 磅降到了 3.9 美元 / 磅。随着新技术的开发和成本的逐步降低，细胞培养肉的研发和生产将持续受到关注。

该热点前沿共有 50 篇核心论文，包括 28 篇研究性论文和 22 篇综述性文章。综述性文章主要探讨了细胞培养肉商品化面临的技术

挑战、社会政治挑战和监管挑战，消费者对植物肉和细胞培养肉的认识和接受度，植物肉和细胞培养肉的生产方法，以及植物肉发展的历史、驱动力和制造等。研究性论文主要研究了消费者对植物肉和培养肉汉堡的偏好，培养肉和肉牛养殖对气候变化影响的比较，植物肉制备的结构化潜力和理化性质等。这 50 篇核心论文中，被引频次最高的是 1 篇综述文

章，被引用了 287 次（图 2），于 2017 年发表在《食品科学与技术趋势》（*Trends in Food Science & Technology*）上，作者来自瑞士联邦理工学院。该文系统综述了消费者对可持续蛋白质消费的认识和行为。在研究性论文中，被引频次最高的 1 篇论文被引用了 139 次，于 2018 年发表在《食欲》（*Appetite*）上，作者来自加拿大萨斯卡切温大学。该文调查研究了消费者对牛

肉、植物肉和培养肉汉堡的偏好性选择。结果显示，如果价格相等，65% 的消费者会购买牛肉汉堡，21% 的人会购买植物肉汉堡，11% 的人会买培养肉汉堡，4% 的人不会购买。由这 2 篇高被引论文的研究内容可见，当前，植物肉和细胞培养肉的进一步研发和大规模商业化生产仍面临消费者选择偏好的问题，因此目前对此问题的关注度也比较高。

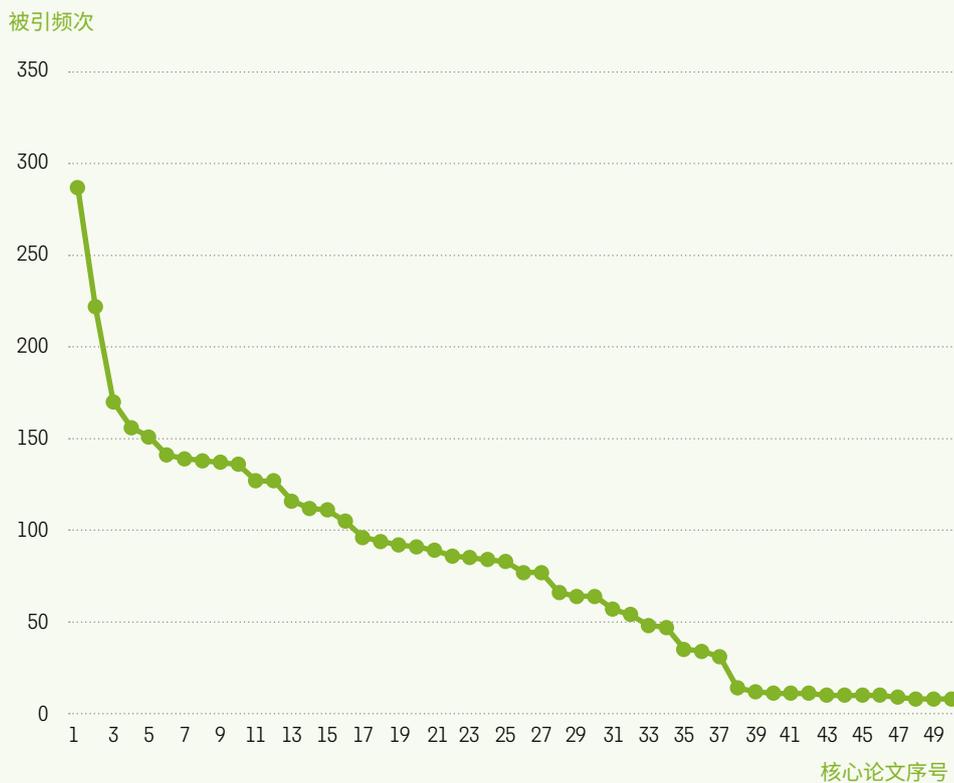


图 2 “植物肉与细胞培养肉的替代性研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

核心论文 Top 产出国家和机构中 (表 2)，美国贡献率最高，贡献了 11 篇论文；中国也积极参与，贡献了 9 篇论文，排名第二。荷兰和英国并列第三。荷兰的瓦格宁根

大学则在核心论文 Top 机构中表现突出，名列第一。英国的巴斯大学名列第二。中国的东北农业大学和瑞士的苏黎世联邦理工学院、美国的塔夫茨大学、法国的国家农业食

品与环境研究院并列第三。由此反映出，与其他国家相比，美国、中国、荷兰和英国对肉类替代品研究更为关注。

表 2 “植物肉与细胞培养肉的替代性研究” 研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	11	22.0%	1	瓦格宁根大学	荷兰	7	14.0%
2	中国	9	18.0%	2	巴斯大学	英国	5	10.0%
3	荷兰	8	16.0%	3	苏黎世联邦理工学院	瑞士	3	6.0%
3	英国	8	16.0%	3	塔夫茨大学	美国	3	6.0%
5	瑞士	4	8.0%	3	法国国家农业食品与环境研究院	法国	3	6.0%
6	德国	3	6.0%	3	东北农业大学	中国	3	6.0%
6	意大利	3	6.0%	7	麻省大学阿默斯特分校	美国	2	4.0%
6	法国	3	6.0%	7	牛津大学	英国	2	4.0%
6	加拿大	3	6.0%	7	密歇根州立大学	美国	2	4.0%
10	韩国	2	4.0%	7	普渡大学	美国	2	4.0%
10	新西兰	2	4.0%	7	肯塔基大学	美国	2	4.0%
10	芬兰	2	4.0%	7	Aleph Farms Ltd	以色列	2	4.0%
10	以色列	2	4.0%	7	以色列理工学院	以色列	2	4.0%
10	瑞典	2	4.0%	7	帕尔马大学	意大利	2	4.0%



施引论文产出国家和机构中（表3），核心论文产出最高的美国和中国同样施引论文产出量最多，且远领先于其他国家，表明中美两国在该研究方向上持续保持热

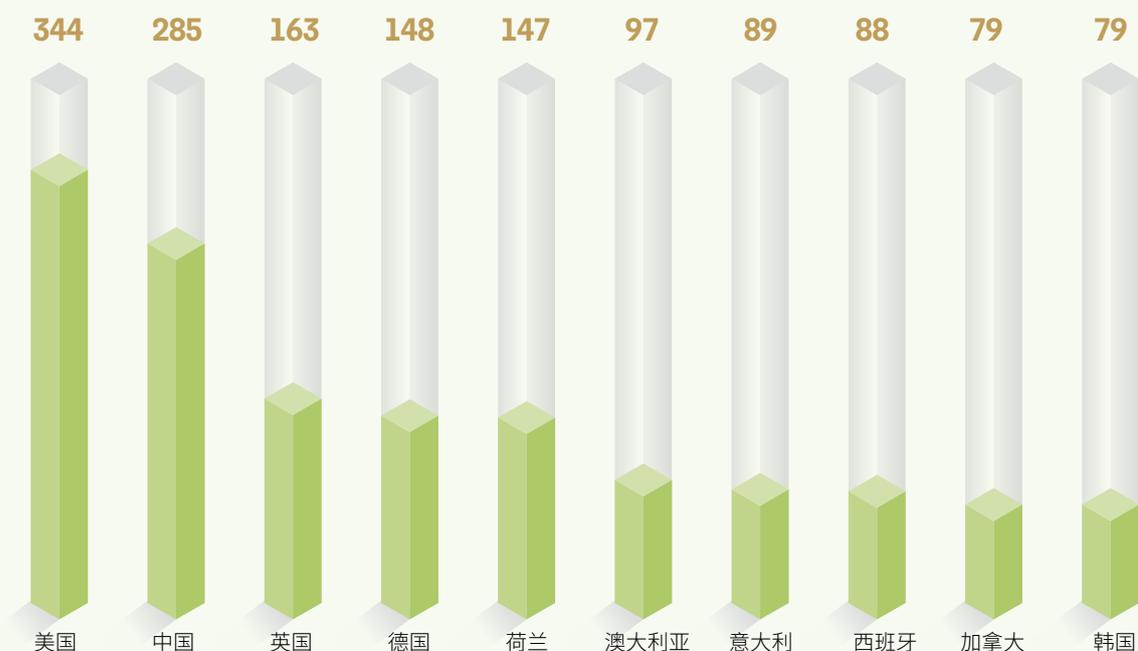
情。英国、德国和荷兰也积极跟进，施引文献量上形成第二梯队。施引论文机构方面，荷兰的瓦格宁根大学贡献了100篇施引论文，领先于其他机构。中国进入Top10的3所

机构，分别是江南大学、南京农业大学和中国农业科学院，分别排名第二、第七和第九。

表3 “植物肉与细胞培养肉的替代性研究”研究前沿中施引论文的Top10产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	美国	344	20.1%	1	瓦格宁根大学	荷兰	100	5.8%
2	中国	285	16.7%	2	江南大学	中国	41	2.4%
3	英国	163	9.5%	3	麻省大学阿默斯特分校	美国	37	2.2%
4	德国	148	8.6%	4	赫尔辛基大学	芬兰	33	1.9%
5	荷兰	147	8.6%	5	苏黎世联邦理工学院	瑞士	29	1.7%
6	澳大利亚	97	5.7%	6	牛津大学	英国	24	1.4%
7	意大利	89	5.2%	7	南京农业大学	中国	23	1.3%
8	西班牙	88	5.1%	7	巴斯大学	英国	23	1.3%
9	加拿大	79	4.6%	9	奥胡斯大学	丹麦	22	1.3%
9	韩国	79	4.6%	9	中国农业科学院	中国	22	1.3%
				9	霍恩海姆大学	德国	22	1.3%

· 施引论文 ·



1.3 重点热点前沿——“NLR 免疫受体介导的植物免疫机制”

农田植物病害防治是农业发展中亟需攻克的重要课题，对粮食安全、生态安全、人民健康都有非常重要的意义。利用抗病基因进行抗病育种是防控植物病害最为有效的手段之一，其中最有利价值且应用最广的一类是被称为 NLR 免疫受体的抗病基因，该类基因是植物免疫系统中最大的一类抗病基因。然而现实情况是，虽然距离 NLR 抗病基因被克隆已经将近 26 年了，但是学界对于 NLR 受体如何识别病原菌入侵以及如何启动抗病反应等问题还知之甚少，有很多重大科学问题值得研究。由此，NLR 免疫受体介导的植物免疫机制成为了植物

免疫研究领域的热点前沿，并不断取得新进展。

该热点前沿共有 49 篇核心论文，包括 17 篇综述性文章和 32 篇研究性论文。研究性论文中有 21 篇发表在《细胞》(Cell)、《科学》(Science) 或《自然》(Nature) 及其子刊上。综述性文章主要阐述了 NLR 激活的结构基础，NLR 的进化、组装和调节，NLR 的多样性和与病原体结合的多种策略，以及与其他受体在免疫中的联系等。研究性论文主要研究了 NLR 网络介导的对多种植物病原体的免疫及模式识别受体、病原体对 NLR 免疫受体复合物形成的诱导，以及细

胞表面和细胞内受体对植物免疫的相互增强作用等。这 49 篇核心论文中，被引频次最高的是 1 篇综述性文章，被引用了 332 次 (图 3)，于 2018 年发表在《植物细胞》(Plant Cell) 上，作者来自英国牛津大学。该文系统综述了 25 年来抗性基因的克隆以及 9 种抗性机制，其中包括 NLR 与病原体的结合这一重要机制。在研究性论文中，被引频次最高的论文被引用了 292 次，于 2019 年发表在《科学》(Science) 上，作者来自清华大学、中国科学院、德国马普学会及德国科隆大学。该文重建了一种具有免疫力的植物 NLR 抗体复合物，用于研究植物 NLR 激活的生化机制。

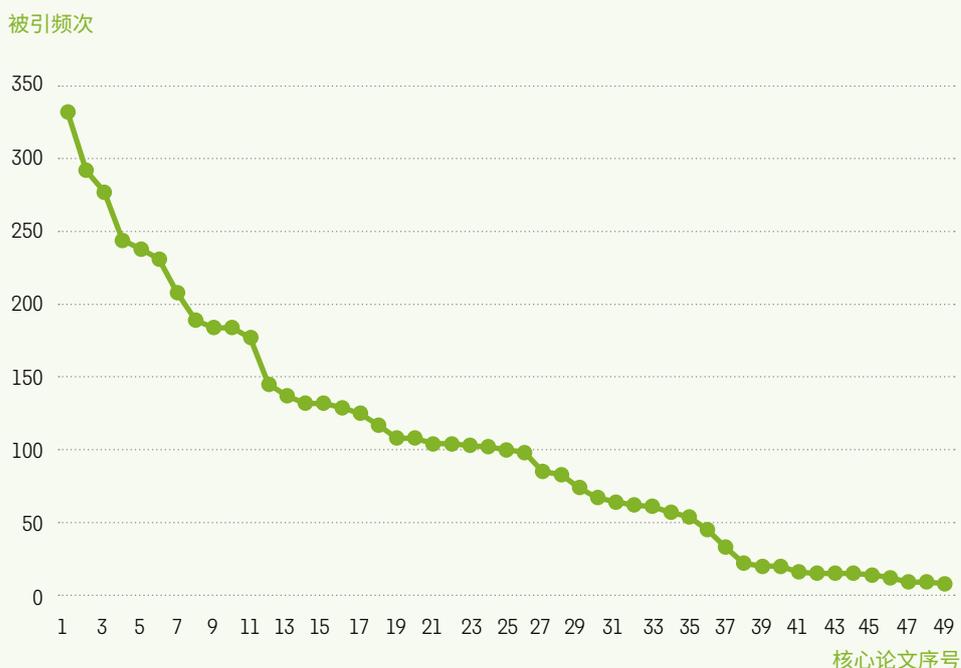


图 3 “NLR 免疫受体介导的植物免疫机制”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

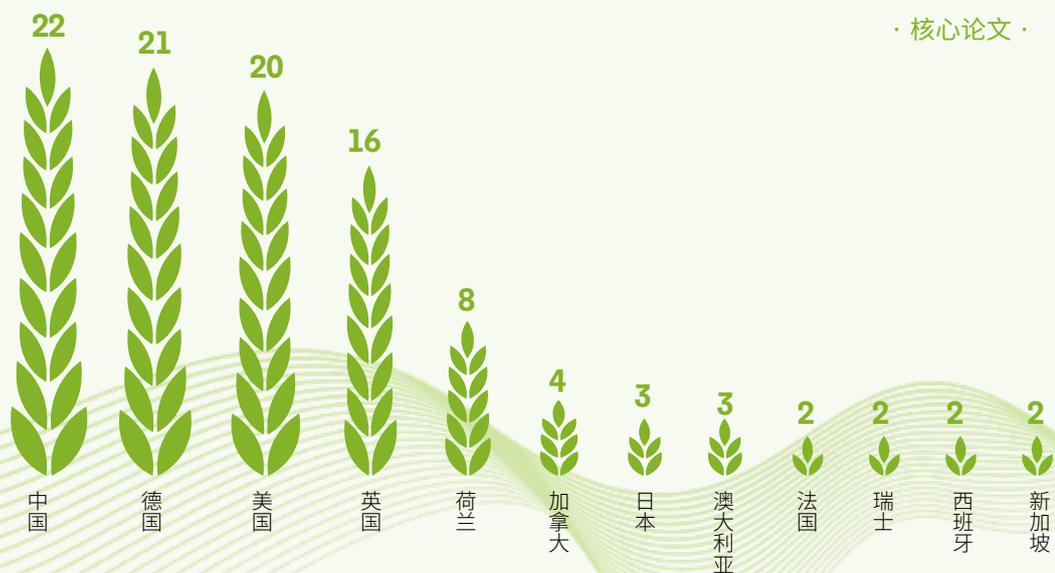
核心论文 Top 产出国家和机构中 (表 4)，中国、德国和美国贡献率较高，分别贡献了 22、21 和 20 篇论文，占比均超过 40%。

德国马普学会在 Top 机构中表现突出，核心论文产出名列第一，贡献率为 32.7%。英国生物技术和生物科学研究理事会以 24.5% 的

贡献率位列第二。中国科学院与德国的科隆大学则以 20.4% 的贡献率并列第三。

表 4 “NLR 免疫受体介导的植物免疫机制”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

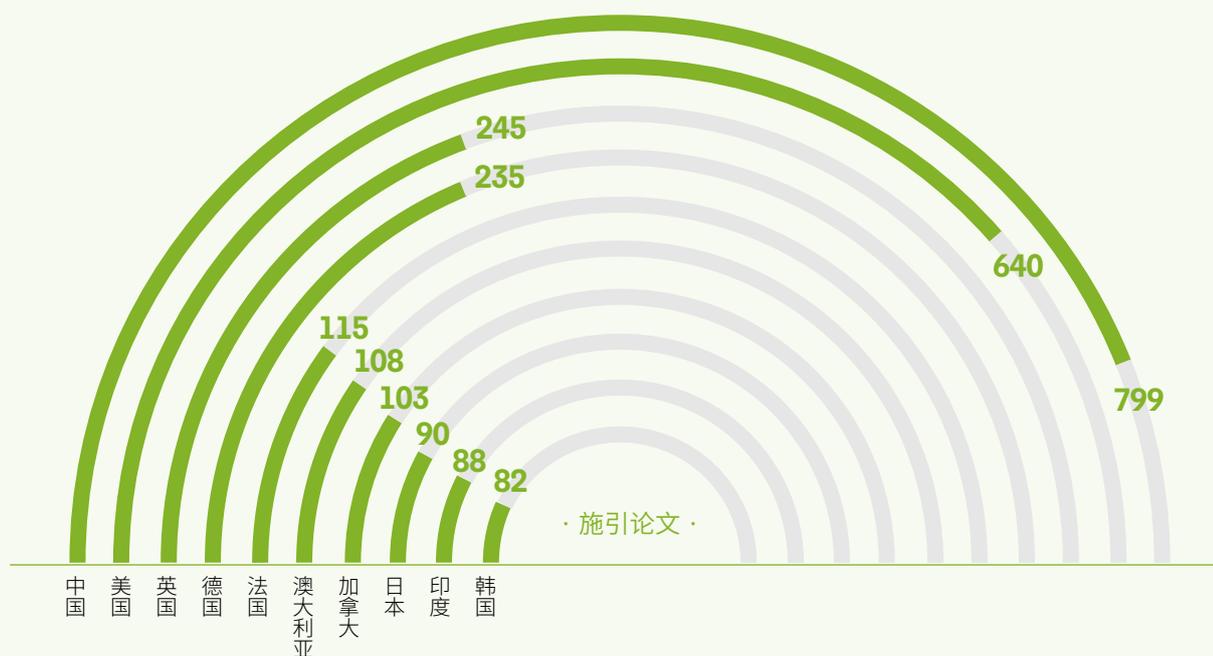
排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	中国	22	44.9%	1	马普学会	德国	16	32.7%
2	德国	21	42.9%	2	英国生物技术和生物科学研究理事会	英国	12	24.5%
3	美国	20	40.8%	3	科隆大学	德国	10	20.4%
4	英国	16	32.7%	3	中国科学院	中国	10	20.4%
5	荷兰	8	16.3%	5	东安格利亚大学	英国	8	16.3%
6	加拿大	4	8.2%	5	清华大学	中国	8	16.3%
7	日本	3	6.1%	7	霍华休斯医学研究所	美国	7	14.3%
7	澳大利亚	3	6.1%	8	加州大学伯克利分校	美国	5	10.2%
9	法国	2	4.1%	8	北卡罗来纳大学	美国	5	10.2%
9	瑞士	2	4.1%	10	英属哥伦比亚大学	加拿大	4	8.2%
9	西班牙	2	4.1%	10	圣路易斯华盛顿大学	美国	4	8.2%
9	新加坡	2	4.1%	10	图宾根大学	德国	4	8.2%
				10	剑桥大学	英国	4	8.2%



施引论文产出国家和机构中 (表 5)，中国和美国施引论文产出量依然最多，远超其它国家，占比均超过了 30%，排名前两位。机构方面，英国生物技术和生物科学研究理事会排名第一。中国有 5 所机构进入 Top10，分别为中国科学院、中国农业科学院、南京农业大学、中国农业大学和浙江大学。

表 5 “NLR 免疫受体介导的植物免疫机制” 研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

排名	国家	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	799	39.2%	1	英国生物技术和生物科学研究理事会	英国	130	6.4%
2	美国	640	31.4%	2	中国科学院	中国	123	6.0%
3	英国	245	12.0%	3	中国农业科学院	中国	88	4.3%
4	德国	235	11.5%	4	马普学会	德国	87	4.3%
5	法国	115	5.6%	5	南京农业大学	中国	76	3.7%
6	澳大利亚	108	5.3%	6	法国国家农业食品与环境研究院	法国	73	3.6%
7	加拿大	103	5.0%	7	东安格利亚大学	英国	69	3.4%
8	日本	90	4.4%	8	法国国家科学研究中心	法国	65	3.2%
9	印度	88	4.3%	9	中国农业大学	中国	45	2.2%
10	韩国	82	4.0%	10	浙江大学	中国	44	2.2%



2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

2.1 新兴前沿概述

农业科学、植物学和动物学领域有1个方向入选新兴前沿，是“水果采摘机器人的识别与定位方法”（表6）。

表6 农业科学、植物学和动物学领域的1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	水果采摘机器人的识别与定位方法	8	198	2021.9

2.2 重点新兴前沿——“水果采摘机器人的识别与定位方法”

采摘机器人是一种以水果或蔬菜为操作对象、兼有人类部分信息感知和肢体行动功能、可重复编程的柔性自动化或半自动化设备，是综合了电子、机械、计算机、传感技术、控制技术、人工智能、仿生学和农业知识等多种学科交叉的智能机械。运用采摘机器人代替人力不但可以降低劳动强度，还可提高劳动效率，帮助解决劳动力稀缺的难题，因此受到农业人口较少的发

达国家的重视，也成为了国际农业装备产业技术竞争焦点之一。对于采摘机器人，尤其是水果采摘机器人，由于自然条件下水果所处的背景十分复杂，被枝叶遮挡或者果实之间叠加的现象非常普遍，严重限制了机器视觉系统的识别，因此，水果采摘机器人的识别与定位方法成为研究热点。

该新兴前沿共有核心论文8

篇，均是研究性论文，主要内容包括：实时检测香蕉束和香蕉茎的深度学习轻量化神经网络模型开发，快速准确识别香蕉果实、花序轴和花蕾的深度学习算法，荔枝主干采摘位置识别方法，荔枝采摘机器人的近距离协调控制策略，通过视觉检测获得香蕉果轴切割点的精准定位方法，及用于葡萄目标检测的卷积神经网络研究等。



2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

生态与 环境科学



1. 热点前沿及重点热点前沿解读

1.1 生态与环境科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

生态与环境科学领域的 Top 10 热点前沿主要分布在生态科学和环境科学两个子领域（表 7 和图 4），针对新型环境问题、新型解决方案的研究方向是本年度的主要关注点。

具体来看，环境科学子领域的热点前沿主要涉及微塑料、气候变化、臭氧等新型环境问题，及新型水体污染控制技术、废水流行病学等新型解决方案或新的研究方向。微塑料污染相关研究是近 10 年来在研究前沿报告中多次呈现的重要前沿方向，相关主题在 2015-2017 年、2020、2022 年多次入选热点前沿。2023 年微塑料相关的热点前沿有两个，分别是“环境微塑料颗粒对污染物的吸附”和“土壤微塑料的环境归趋和生态毒理”。此外，气候变化是当前全球关注的重大环境问题，二氧化碳捕获、甲烷

减排是温室气体减排的热点，今年的两个相关热点前沿是“二氧化碳直接空气捕获的技术经济评估”和“全球甲烷排放趋势及来源”。近年，中国大气污染防治已取得阶段性成效，细颗粒物（PM_{2.5}）浓度持续下降，然而大气臭氧污染呈现快速上升和蔓延态势，多次出现大范围长时间臭氧污染，形势严峻。因应这一问题的“中国臭氧污染状况及健康风险”也是今年遴选出的热点前沿。利用过硫酸盐降解有机污染物相关研究曾在 2017 年、2018 年、2022 年分别入选热点前沿。今年的热点前沿“利用单原子催化剂活化过氧单硫酸盐”展现了具有超高性能、环境友好、结构 / 化学稳定、能最大化利用活性金属位点等优点的新兴单原子催化剂用于环境修复的高级氧化过程。“废水中新冠病

毒的检测及基于废水的流行病学监测”连续第二年入选热点前沿。在后疫情时代，基于废水监测的流行病学研究是监测药物、病毒、超级细菌及跟踪 COVID-19 爆发的新型、低成本解决方案。

生态科学子领域的热点前沿主要涉及生物多样性、生态治理两个方面，具体包括“昆虫衰退现状、灭绝危机与驱动因素”、“全球河流生物多样性危机及水坝对其的影响”及“‘基于自然的解决方案’的理论与应用”。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”是连续第三年入选热点前沿。基于自然的解决方案是一个综合利用生态系统多学科管理手段的新理念，其理论与方法研究及在众多领域的实践应用逐渐兴起。



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	利用单原子催化剂活化过氧单硫酸盐	16	1825	2021.0
2	废水中新冠病毒的检测及基于废水的流行病学监测	30	6050	2020.3
3	二氧化碳直接空气捕获的技术经济评估	6	1011	2020.0
4	环境微塑料颗粒对污染物的吸附	39	5732	2019.6
5	土壤微塑料的环境归趋和生态毒理	48	9518	2019.5
6	昆虫衰退现状、灭绝危机与驱动因素	12	4449	2019.4
7	中国臭氧污染状况及健康风险	23	5898	2019.1
8	全球河流生物多样性危机及水坝对其的影响	14	3577	2019.1
9	“基于自然的解决方案”的理论与应用	10	1836	2018.9
10	全球甲烷排放趋势及来源	9	1835	2018.9



图 4 生态与环境科学领域 Top10 热点前沿的施引论文

1.2 重点热点前沿——“土壤微塑料的环境归趋和生态毒理”

微塑料是指直径小于 5 mm 的塑料碎屑和颗粒，按照颗粒大小可以分为纳米塑料 (1~100 nm)、亚微米塑料 (100 nm~1 μ m) 和微米塑料 (1 μ m~5 mm)。微塑料的概念于 2004 年由英国科学家 Richard Thompson 首次提出，并逐渐成为全球环境领域的关注焦点。微塑料遍布全球环境，据研究报道海洋、湖泊、河流、土壤、大气中存在广泛而大量的微塑料，微塑料还在生物体及人体组织中被发现。微塑料粒径小、数量多、分布广，极易被生物吞食，在食物链中积累，并可在生物体组织中进一步富集，危害生物体健康。微塑料污染正成为整个地球表层生态系统最严重的威胁之一。关于塑料污染的国际行动已经启动，2022 年 3 月 2 日，在第五届联合国环境大会上，175 个联合国成员达成一致，制定一份具有法律约束力的国际协议以防治塑料污染。

微塑料污染一直是研究前沿报告中的热点。此前，海洋、陆地水体中的微塑料污染研究分别入选历年热点前沿。近来，土壤微塑料污染成为新的微塑料研究热点。本研究前沿共 48 篇核心论文，主要研究方向包括：(1) 土壤微塑料的分析方法。(2) 土壤微塑料的来源和分布特征，及在生物体特别是农作物中不同组织部位的分布和积

累。农田塑料地膜的使用带来严重的农田微塑料污染，中国微塑料污染分布也得到较多关注。(3) 微塑料单独或叠加其他环境问题产生的生态环境影响，如微塑料与重金属镉、砷等的协同污染作用，微塑料作为抗性基因、细菌等污染物的载体，对农作物生长发育及生理功能的影响，以及对土壤理化性质、土壤生态系统的影响。

本前沿被引频次最高的一篇核心论文，综述了土壤中微塑料的分析方法和可能来源。土壤微塑料

的分析方法晚于其他环境介质中的微塑料分析，仍需加强其方法和标准的研究。该文由德国波恩大学于 2018 年发表在《整体环境科学》(Science of the Total Environment)，被引频次达到 522 次。此外，瑞士伯尔尼大学学者 Michael Scheurer 和 Moritz Bigalke 于 2018 年发表在《环境科学与技术》(Environmental Science & Technology) 的论文发现 90% 的瑞士洪泛区土壤含有微塑料，其主要来源于人类活动产生的塑料废物，并已通过风力扩散到了偏远地区。该论文被引用 462 次。

被引频次

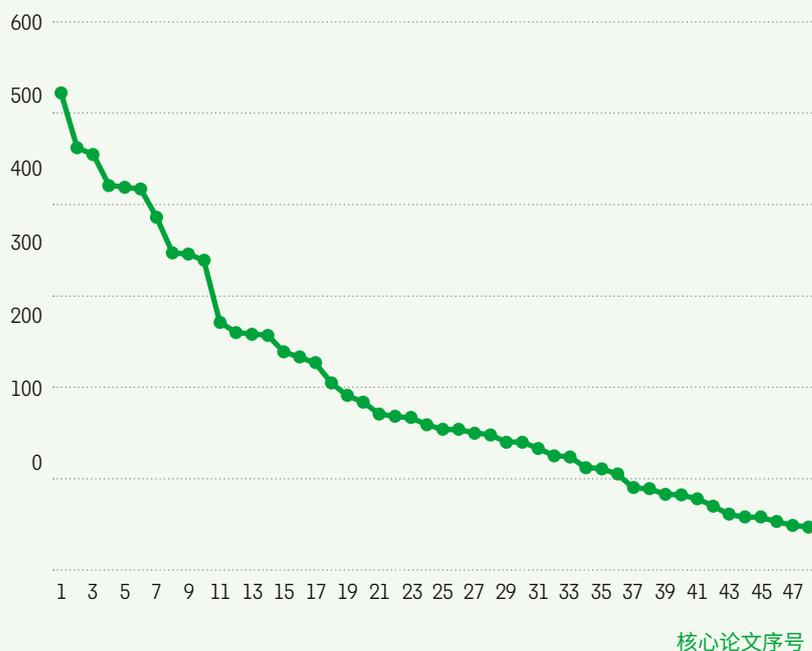


图 5 “土壤微塑料的环境归趋和生态毒理”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

从核心论文的产出国家和机构来看（表8），中国是该研究前沿核心论文的最大产出国，共34篇，占核心论文总数的70.8%，远超其他国家。荷兰和德国分别排名第二、三位，核心论文占比分别为20.8%和18.8%。发文机构中，中国科学院和荷兰瓦格宁根大学分别以10篇和8篇核心论文位居前两位。

表8 “土壤微塑料的环境归趋和生态毒理”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	国家	核心论文	比例
1	中国	34	70.8%	1	中国科学院	中国	10	20.8%
2	荷兰	10	20.8%	2	瓦格宁根大学	荷兰	8	16.7%
3	德国	9	18.8%	3	南方边境学院	墨西哥	5	10.4%
4	墨西哥	5	10.4%	3	西北农林科技大学	中国	5	10.4%
5	美国	4	8.3%	3	柏林自由大学	德国	5	10.4%
6	智利	3	6.3%	6	华东师范大学	中国	4	8.3%
7	西班牙	2	4.2%	6	北京大学	中国	4	8.3%
7	英国	2	4.2%	8	中国农业科学院	中国	3	6.3%
7	新西兰	2	4.2%	8	南开大学	中国	3	6.3%
10	瑞士	1	2.1%	8	哥廷根大学	德国	3	6.3%
10	意大利	1	2.1%	8	浙江农林大学	中国	3	6.3%
10	克罗地亚	1	2.1%	8	中国农业大学	中国	3	6.3%
10	洪都拉斯	1	2.1%	8	柏林-勃兰登堡高级生物多样性研究所	德国	3	6.3%
10	澳大利亚	1	2.1%					

· 核心论文 ·



从施引论文的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1567篇，占比超过一半。其次，美国和德国分别以303篇和261篇施引论文排

名第二、三位。施引论文的Top 10产出机构中，除排在第9位的荷兰瓦格宁根大学外，其余9家均来自中国，其中中国科学院和西北农林科技大学表现不俗，施引论文数量

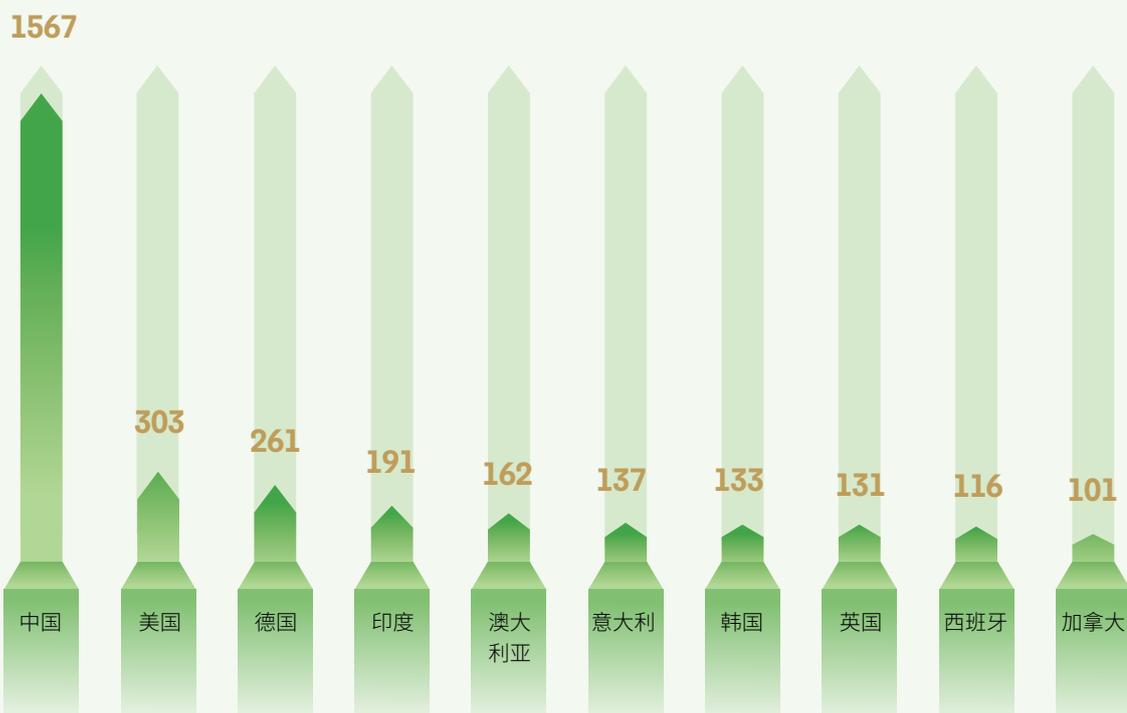
分别达到305篇和123篇。

从核心论文和施引论文数量来看，中国在该前沿研究中占据主导地位，贡献显著。

表9 “土壤微塑料的环境归趋和生态毒理”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	国家	施引论文	比例
1	中国	1567	52.3%	1	中国科学院	中国	305	10.2%
2	美国	303	10.1%	2	西北农林科技大学	中国	123	4.1%
3	德国	261	8.7%	3	中国农业科学院	中国	69	2.3%
4	印度	191	6.4%	4	南开大学	中国	68	2.3%
5	澳大利亚	162	5.4%	5	南京大学	中国	65	2.2%
6	意大利	137	4.6%	6	华南农业大学	中国	64	2.1%
7	韩国	133	4.4%	7	浙江大学	中国	62	2.1%
8	英国	131	4.4%	8	中国农业大学	中国	59	2.0%
9	西班牙	116	3.9%	9	瓦格宁根大学	荷兰	57	1.9%
10	加拿大	101	3.4%	10	华东师范大学	中国	53	1.8%

·施引论文·



1.3 重点热点前沿——“‘基于自然的解决方案’的理论与应用”

根据世界自然保护联盟 (IUCN) 2016年首次提出的定义, 基于自然的解决方案 (Nature-based Solutions, NbS) 是保护、可持续管理和恢复自然的和被改变的生态系统的行动, 能有效和适应性地应对社会挑战, 同时提供人类福祉和生物多样性效益。NbS 是应对全球生物多样性丧失和气候变化双重危机的必要手段, 是实现可持续发展的必要机制, 是促进保护和发展的关键工具。IUCN 提出了基于自然的解决方案的 8 大准则及 28 项指标, 倡导依靠自然的力量和基于生

态系统的方法, 应对气候变化、防灾减灾、粮食安全、水安全、生态系统退化和生物多样性丧失等社会挑战。作为一个全新的概念, NbS 一经提出, 即迅速被国际社会所接纳。许多国家已经采取行动, 将 NbS 纳入国家气候战略。

本研究前沿共 10 篇核心论文, 主要的研究内容是 NbS 的内涵探讨、应用原则、实施框架、多学科实践的案例和经验、其价值与有效性评估等。核心论文中被引频次最高的一篇文章是来自欧洲多国的科

学家在《整体环境科学》(Science of the Total Environment) 上合作发表的一篇文章, 辨析了 NbS 与其他相近概念的含义, 反思了其对科学、政策和实践的影响, 提出了其实施的关键要素, 确保多学科和跨学科知识的合理利用, 强调将不同学科领域的从业者、政策制定者和科学家联系起来进行跨学科研究, 来设计和实施基于自然的解决方案, 且其实践应基于一套均衡、清晰、广泛接受和可实施的关键原则。该文发表于 2017 年, 共被引用 370 次。

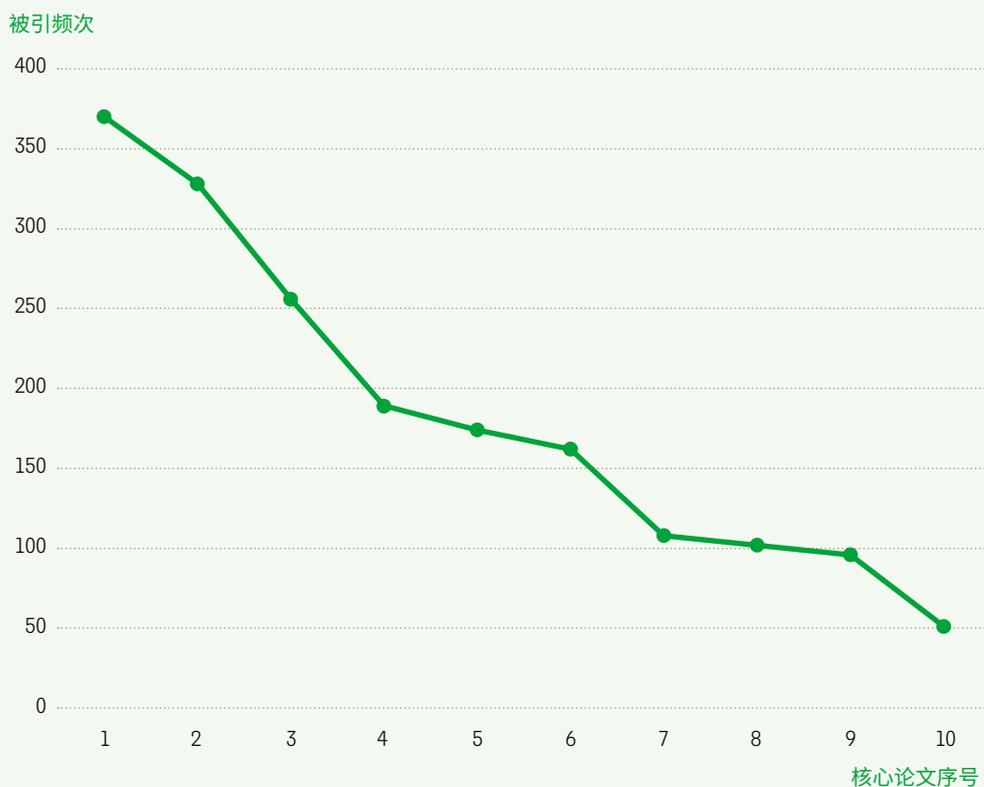
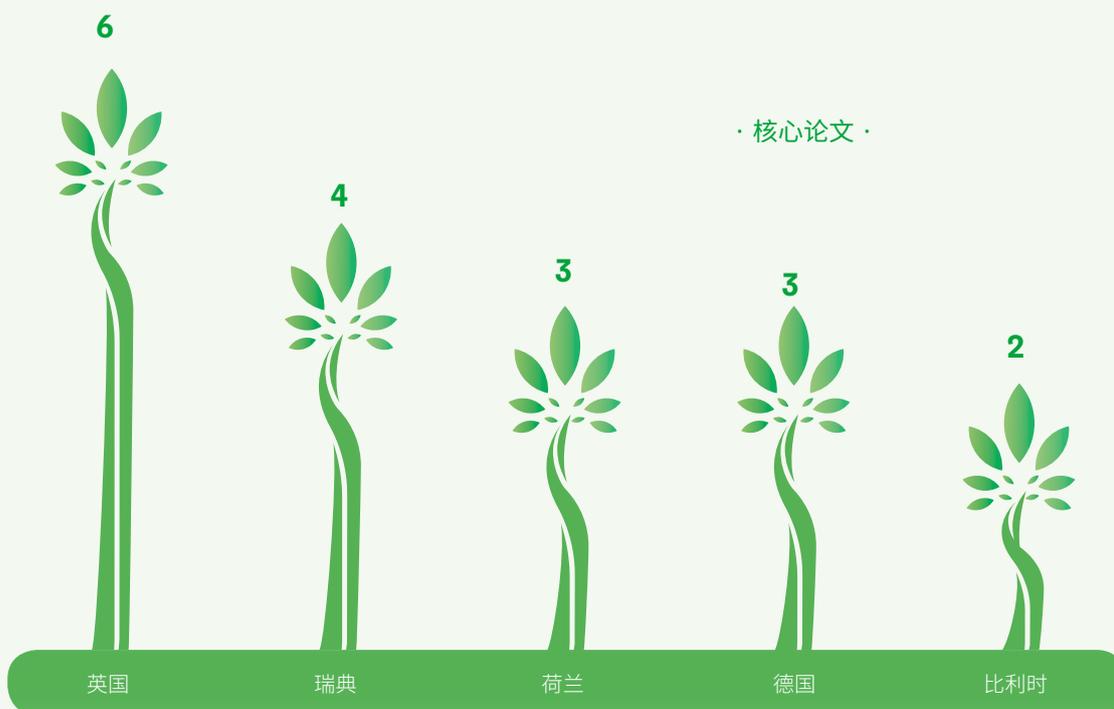


图 6 “‘基于自然的解决方案’的理论与应用”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

本前沿的数据显示，英国及其他主要欧洲国家在该前沿的研究中起到了引领和主导作用。核心论文产出国家和机构的统计结果（表 10）表明，英国、瑞典、荷兰与德国等欧洲发达国家及其机构的核心论文产出数量较多。

表 10 “‘基于自然的解决方案’的理论与应用”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	国家	核心论文	比例
1	英国	6	60.0%	1	牛津大学	英国	4	40.0%
2	瑞典	4	40.0%	2	柏林洪堡大学	德国	3	30.0%
3	荷兰	3	30.0%	3	亥姆霍兹联合会	德国	2	20.0%
3	德国	3	30.0%	3	鹿特丹伊拉斯姆斯大学	荷兰	2	20.0%
5	比利时	2	20.0%					



从施引论文的产出国家和机构来看（表 11），英国仍是施引论文的最大产出国，其 276 篇施引论文约占施引论文总数的四分之一；美国、德国的施引论文数量排在第二、三位；中国贡献了 132 篇施引论文，排名第七。在施引论文的产出机构方面，荷兰瓦格宁根大学和德国亥姆霍兹联合会的施引论文数量位居前两位，均超过 50 篇，中国科学院有 29 篇施引论文，位列第七，是施引论文 Top10 产出机构中唯一的中国机构。

表 11 “‘基于自然的解决方案’的理论与应用”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	国家	施引论文	比例
1	英国	276	23.5%	1	瓦格宁根大学	荷兰	54	4.6%
2	美国	227	19.3%	2	亥姆霍兹联合会	德国	51	4.3%
3	德国	170	14.5%	3	牛津大学	英国	45	3.8%
4	澳大利亚	158	13.4%	4	柏林洪堡大学	德国	37	3.1%
5	荷兰	148	12.6%	5	墨尔本大学	澳大利亚	32	2.7%
6	意大利	140	11.9%	5	乌得勒支大学	荷兰	32	2.7%
7	中国	132	11.2%	7	中国科学院	中国	29	2.5%
8	西班牙	100	8.5%	8	法国国家科学研究中心	法国	26	2.2%
9	加拿大	93	7.9%	9	埃克塞特大学	英国	25	2.1%
10	瑞典	89	7.6%	10	英属哥伦比亚大学	加拿大	24	2.0%



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一个方向入选新兴前沿，即“人体组织中微塑料的检测与暴露”。

表 12 生态与环境科学领域的 1 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	人体组织中微塑料的检测与暴露	2	216	2022.0

2.2 重点新兴前沿——“人体组织中微塑料的检测与暴露”

如前文所述，微塑料是一种全球性污染物，在海洋、淡水、陆地土壤、沉积物、大气、生物体、食物和饮用水中被广泛检出。更为严重的是，研究表明，微塑料可能通过空气、水或食物等多种途径进入人体，也可能通过特定的牙膏、化妆品等进入人体。

该新兴前沿的两篇核心论文主要聚焦在人体组织中微塑料的定量检测和暴露研究。2022年，

荷兰科学家发表在《国际环境》(Environment International) 上的一项研究中，来自荷兰阿姆斯特丹自由大学领导的研究团队首次在人体血液发现了微塑料。22位健康志愿者的血液样本中，80%的血液样本检测出微塑料。研究表明，塑料颗粒具有生物可利用性，可以被人体血液吸收。该论文目前已被引用 172 次。另一篇核心论文同样发表于 2022 年，由英国赫尔大学科学家在《整体环境科学》(Science

of the Total Environment) 首次报道了在人类活体肺组织中检出了微塑料污染，微塑料甚至存在于肺部的深处。该新兴前沿进一步引发思考，人体内的这些微塑料接下来会到何处？能被清除吗？还是会聚集在某些器官内，甚至通过血脑屏障？因此需要继续关注人体中微塑料的暴露情况以及此类暴露的相关危害，确定微塑料是否会构成公共卫生风险。

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

地球科学



1. 热点前沿及重点热点前沿解读

1.1 地球科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

地球科学是一门高度依赖观测技术的学科，2023 年地球科学领域 Top10 热点前沿中有 6 个属于地理学相关研究，3 个大气科学研究和 1 个行星地质学研究，且大多利用了地球系统模型和对地观测技术等先进的技术方法与模型，促进新的科学发现。CMIP6 模式高气候敏感度成因及影响研究、多种地球系统模型的配置优化与进展研究均通过不断优化地球系统模型，来更好

地分析过去、现在和未来的气候变化，为研究全球变化提供有力的科学支撑。集成卫星激光测高数据的海洋及森林测绘、利用重力勘测和气候试验及其后继任务研究陆地水储量变化、基于卫星遥感数据的城市热岛效应研究则体现了对地观测技术在获取全球表面和深部的时空信息方面发挥的重要作用，有助于定量研究地球宜居性的动态演化。

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	集成卫星激光测高数据的海洋及森林测绘	15	1439	2020.0
2	小行星地表特征和样本成分分析	15	1969	2019.7
3	CMIP6 模式高气候敏感度成因及影响研究	8	1509	2019.5
4	气候变化对美国西部野火后森林恢复力的影响	8	1037	2019.4
5	高亚洲冰川质量变化的水文响应	31	5327	2019.3
6	南极洲和格陵兰岛冰量损失对海平面变化的影响	26	4140	2019.3
7	基于卫星遥感数据的城市热岛效应研究	7	1152	2019.3
8	全球海风和海浪测量与评估	6	749	2019.3
9	多种地球系统模型的配置优化与进展研究	33	5382	2019.2
10	利用重力勘测和气候试验及其后继任务研究陆地水储量变化	10	1876	2019.2



1.2 重点热点前沿——“CMIP6 模式高气候敏感度成因及影响研究”

全球气候模式是基于数学、物理、化学等自然定律编写的计算机程序，用来模拟地球气候系统各个圈层的相互作用和反馈过程。2012年发布的《推动气候模拟的美国国家战略》报告指出，气候模式是人类发展的最为复杂的模拟工具之一，是理解气候变化原因、评估其影响和预测预估其未来变化不可或缺的工具。正是依托气候模式的不断发展和完善，人类对气候变化的认知水平才取得了长足的进步，全

球应对气候变化行动才有了坚实的科学基础。

为提高模拟结果的准确性，世界气候研究计划“耦合模拟工作组”自1995年起组织实施“国际耦合模型比较计划”（CMIP），目标是更好地了解过去、现在和未来的气候变化，强调共享、比较和分析全球气候模式结果以提供高质量气候信息，在模式试验制定、模式数据格式标准化、建立数据共享平台等方面发挥了至关重要的作用。目前最

先进的CMIP6共有全球28家研究机构的50多个模式参加，重点解决地球系统如何响应外强迫变化，造成模式系统偏差的原因和后果是什么，以及如何在内部气候变率、可预测性和情景不确定性影响下预估未来气候变化等关键科学问题。但参加CMIP6的气候模式有1/5的平衡态气候敏感度达到5°C以上，超过了IPCC第六次评估报告认为很可能（超过90%概率）的2-5°C范围，即“过热”。

学术界针对 CMIP6 模式高气候敏感度的原因及影响开展了广泛研究。在本热点前沿中，美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室、英国利兹大学、伦敦帝国理工学院等机构在《地球物理研究通讯》(Geophysical Research Letters) 上合作发表的“Causes of Higher Climate Sensitivity in CMIP6 Models”一文

被引频次最高，研究发现在 CMIP6 模式中，大气中二氧化碳含量突然增加四倍会导致温度响应大幅增加，其主要原因是低云水含量和覆盖率会随着全球变暖而急剧下降，更多的太阳短波辐射能够到达地面，进一步加剧了升温，即云辐射的正反馈过程，最终造成较高的气候敏感度。由美国国家大气研

究中心主导完成的“High Climate Sensitivity in the Community Earth System Model Version 2”一文同样发表在《地球物理研究通讯》上，研究确定了 CESM2 模式下的平衡态气候敏感度为 5.3K，而云辐射是造成这种变化的原因，通过云反馈影响平衡态气候敏感度的过程也会影响气溶胶的辐射强迫。

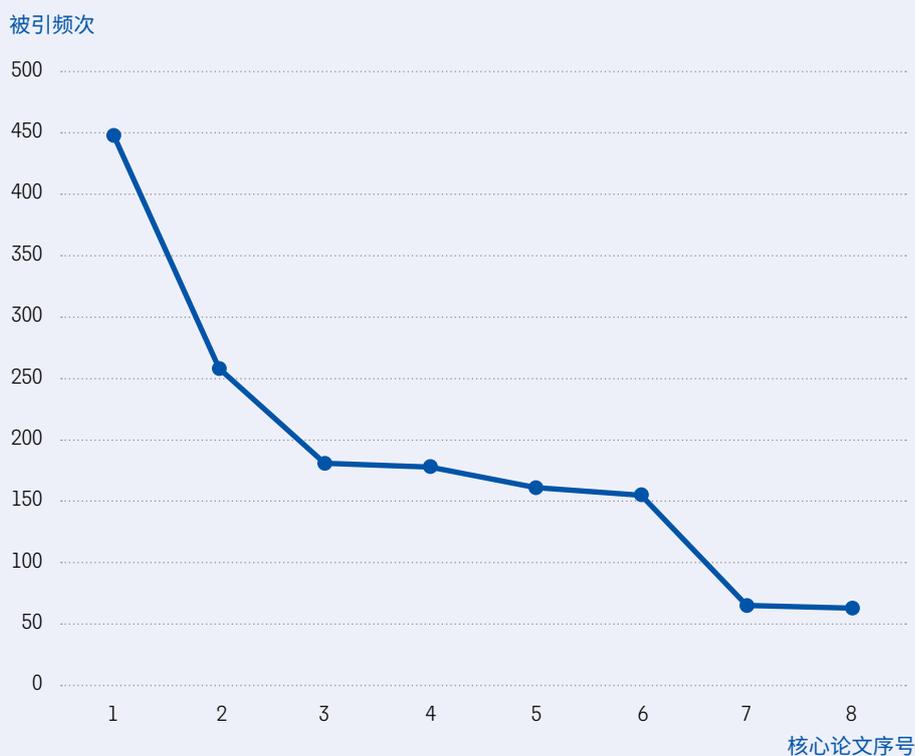


图 8 “CMIP6 模式高气候敏感度成因及影响研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

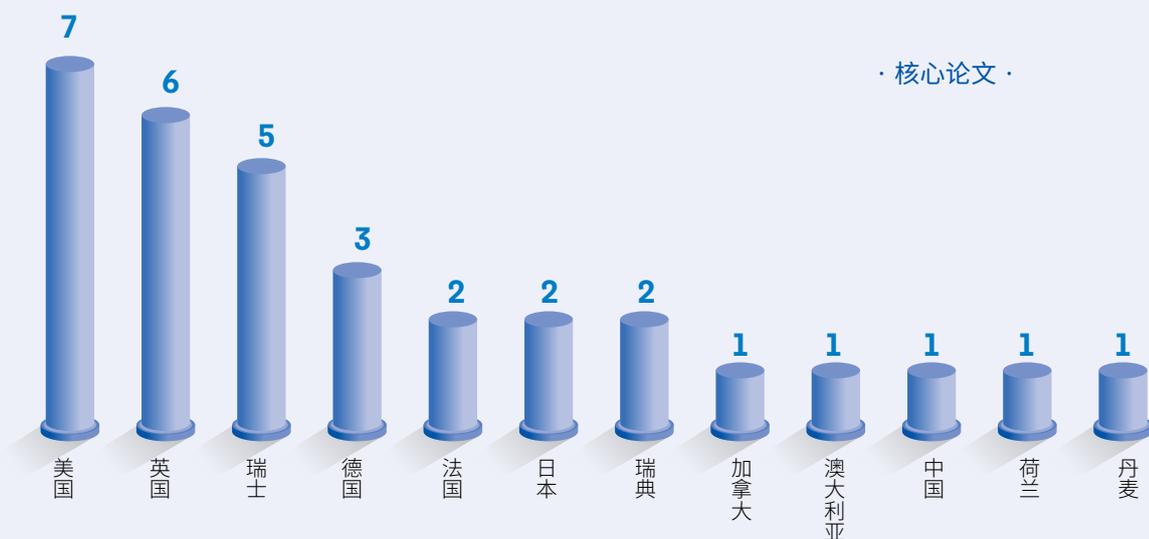
这次出现“过热”现象的 CMIP6 模式，多来自在模式物理过程方案研制方面居国际领先地位的、传统的优势研发中心，例如美国国家大气研究中心、英国气象局

哈德莱气候中心、日本东京大学和德国马普学会等。这些机构在参加 CMIP6 的模式版本中，更新了 CMIP5 中重要的物理过程方案，例如采用了新的包含气溶胶 - 云相互

作用的更为复杂的物理方案，结果产生了过强的冷却效应。此外，瑞士也积极参与研究，苏黎世联邦理工学院表现突出。

表 14 “CMIP6 模式高气候敏感度成因及影响研究”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	7	87.5%	1	美国国家大气研究中心	美国	5	62.5%
2	英国	6	75.0%	2	苏黎世联邦理工学院	瑞士	4	50.0%
3	瑞士	5	62.5%	3	利兹大学	英国	3	37.5%
4	德国	3	37.5%	3	英国气象局	英国	3	37.5%
5	法国	2	25.0%	5	美国国家航空航天局	美国	2	25.0%
5	日本	2	25.0%	5	爱丁堡大学	英国	2	25.0%
5	瑞典	2	25.0%	5	东京大学	日本	2	25.0%
8	加拿大	1	12.5%	5	斯德哥尔摩大学	瑞典	2	25.0%
8	澳大利亚	1	12.5%	5	马普学会	德国	2	25.0%
8	中国	1	12.5%	5	法国国家科学研究中心	法国	2	25.0%
8	荷兰	1	12.5%					
8	丹麦	1	12.5%					



从施引论文的角度看（表 15），美国和英国仍是表现最好的两个国家，核心论文贡献排名第八的中国积极跟进，施引论文量排名上升到第三位。在 Top 施引论文产出机构中，中国科学院排名第五。

表 15 “CMIP6 模式高气候敏感度成因及影响研究” 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	所属国家	施引论文	比例
1	美国	526	48.8%	1	美国国家大气研究中心	美国	126	11.7%
2	英国	252	23.4%	2	美国能源部	美国	110	10.2%
3	中国	211	19.6%	3	法国国家科学研究中心	法国	103	9.6%
4	德国	174	16.1%	4	美国国家航空航天局	美国	94	8.7%
5	法国	128	11.9%	5	中国科学院	中国	87	8.1%
6	加拿大	99	9.2%	6	美国国家海洋与大气管理局	美国	80	7.4%
7	澳大利亚	90	8.3%	7	英国气象局	英国	78	7.2%
8	挪威	76	7.1%	8	哥伦比亚大学	美国	74	6.9%
9	瑞典	74	6.9%	9	亥姆霍兹联合会	德国	67	6.2%
10	瑞士	72	6.7%	10	索邦大学	法国	66	6.1%



1.3 重点热点前沿——“利用重力勘测和气候试验及其后继任务研究陆地水储量变化”

地球重力场可以反映地球物质的分布特性。在几年或更短时间尺度上，大气圈、水圈和浅层地下水等物质的迁移与交换会造成地球质量重新分布，进而导致地球重力场发生变化。因此，利用稳态或时变的重力场信号可以了解地球圈层的物质迁移情况，特别是陆地水储量及其变化信息，对研究全球气候变化具有十分重要的意义。

美德合作的“重力勘测和气候试验”是本世纪卫星重力探测计划的代表性任务之一，于2002年3月发射，利用两颗卫星之间的距离变化与距离变化率精确监测地球系统的质量迁移及变化，开辟了地球重力场时变研究的新时代。通过跟踪液态水、冰和固体地球的连续运动，提供关于全球地下水、干旱和含水层储量变化等的测量数据，帮

助提高环境监测及预报的准确性，其应用成果也扩展到海洋学、冰川学、水文学、地震学等领域。2018年任务结束后，为满足对更长时间序列观测、更高空间分辨率、更高测量精度的需求，美德发射了“重力勘测和气候试验后续任务”，持续监测地下水量、大型湖泊和河流水量、土壤湿度、冰盖和冰川，以及海平面变化，绘制全球水循环图。

本热点前沿包含的10篇核心论文重点聚焦利用卫星数据开展的全球气候变化、地下水储量变化、全球质量变化、格陵兰岛和南极洲冰盖损失等方向的研究。其中，由美国国家航空航天局和马里兰大学合作完成的“*Emerging Trends in Global Freshwater Availability*”一文被引频次最高，达655次，发表在《自然》(Nature)上。该研究

利用“重力勘测和气候试验”任务2002至2016年观测数据，评估了陆地淡水储量的变化趋势及其成因，确定了陆地储水量发生显著变化的区域，明确揭示了人类活动对全球水循环的影响，为评价和预测人为影响和气候变化对水和粮食安全的威胁提供了参考。

基于卫星数据还取得了一些重要研究发现，例如：随着地下水抽取量不断攀升，美国有1/3的大型地下水盆地正在迅速枯竭；格陵兰岛和南极洲的冰盖消融速度极大地超出以往估计；区分出水的质量变化和海洋温度变化对海平面变化的影响程度；通过计算得出冰盖融化及地下水枯竭对地球旋转造成的影响，并帮助确定大地震发生时的瞬时质量变化。

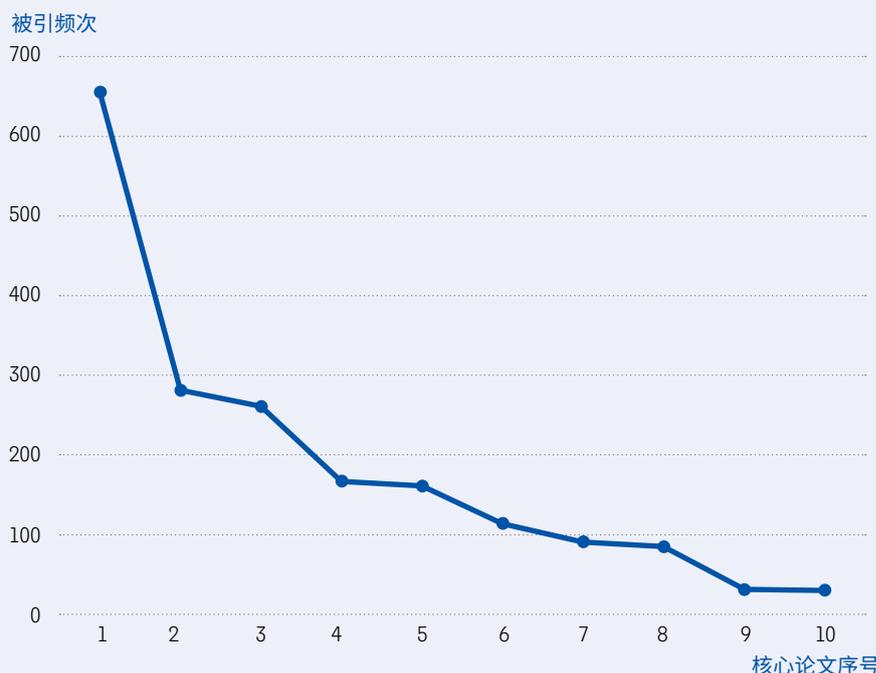


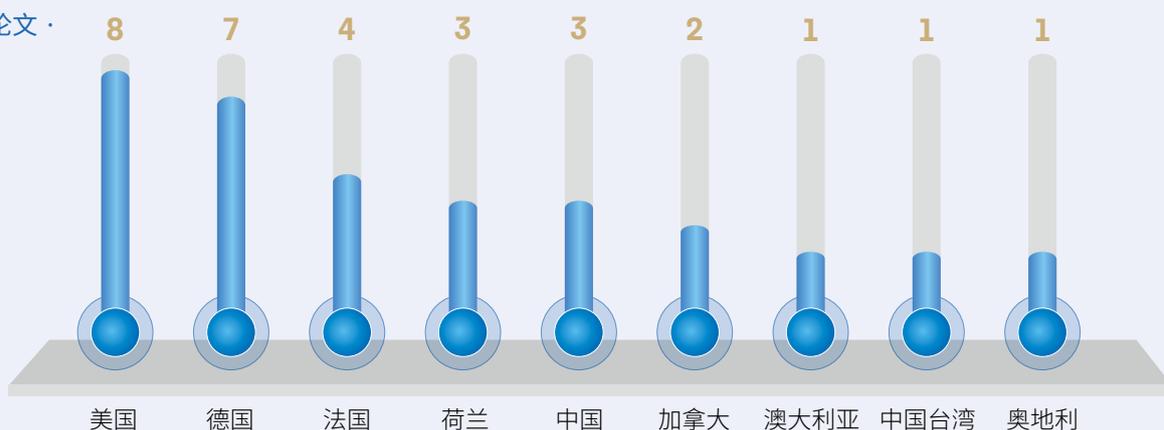
图9 “利用重力勘测和气候试验及其后继任务研究陆地水储量变化”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

表16可以看出，作为卫星任务的研发国，美国和德国的核心论文产出数量最多，负责卫星数据处理和产品发布的美国国家航空航天局喷气动力实验室、德国亥姆霍兹联合会下属波茨坦地学研究中心和美国德克萨斯大学也在核心论文产出机构排名中靠前。

表16 “利用重力勘测和气候试验及其后继任务研究陆地水储量变化”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	8	80.0%	1	美国国家航空航天局	美国	7	70.0%
2	德国	7	70.0%	2	加州理工学院	美国	6	60.0%
3	法国	4	40.0%	3	德克萨斯大学奥斯汀分校	美国	5	50.0%
4	荷兰	3	30.0%	4	亥姆霍兹联合会	德国	3	30.0%
4	中国	3	30.0%	4	柏林工业大学	德国	3	30.0%
6	加拿大	2	20.0%	6	法国国家科学研究中心	法国	2	20.0%
7	澳大利亚	1	10.0%	6	清华大学	中国	2	20.0%
7	中国台湾	1	10.0%	6	布列塔尼-卢瓦尔大学	法国	2	20.0%
7	奥地利	1	10.0%	6	乌得勒支大学	荷兰	2	20.0%
				6	雷恩第一大学	法国	2	20.0%
				6	中国科学院	中国	2	20.0%
				6	萨斯喀彻温大学	加拿大	2	20.0%

· 核心论文 ·



从施引论文（表 17）的角度看，中国积极跟进该前沿方向的研究，施引论文量排名第一，而美国、德国次之。在 Top 施引论文产出机构中，中国科学院表现最为突出，美国国家航空航天局和加州理工学院分列第二、三位。

表 17 “利用重力勘测和气候试验及其后继任务研究陆地水储量变化”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	中国	561	41.8%	1	中国科学院	中国	206	15.4%
2	美国	498	37.1%	2	美国国家航空航天局	美国	140	10.4%
3	德国	204	15.2%	3	加州理工学院	美国	88	6.6%
4	英国	128	9.5%	4	亥姆霍兹联合会	德国	80	6.0%
5	澳大利亚	107	8.0%	5	法国国家科学研究中心	法国	77	5.7%
6	法国	99	7.4%	6	武汉大学	中国	65	4.8%
7	加拿大	90	6.7%	7	德克萨斯大学奥斯汀分校	美国	61	4.5%
8	荷兰	88	6.6%	8	法国研究与发展研究所	法国	45	3.4%
9	印度	64	4.8%	9	图卢兹大学	法国	42	3.1%
10	意大利	53	3.9%	10	北京师范大学	中国	39	2.9%

· 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

地球科学领域有 1 项研究入选新兴前沿，即“汤加火山喷发全球影响研究”。

表 18 地球科学领域的 1 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	汤加火山喷发全球影响研究	17	328	2022.0

2.2 重点新兴前沿——“汤加火山喷发全球影响研究”

2022 年 1 月 14 日，位于南太平洋汤加俯冲带弧后区域的汤加-洪阿哈阿帕伊岛火山 (HTHH) 海底火山喷发，喷发指数 (VEI) 高达 6 级。火山喷发释放了巨大能量，火山主体大部分坠入海洋，在海水输运和大气共振作用下引发了全球性海啸，在几到数十个小时内迅速扩张至环太平洋沿岸地区，导致太平洋沿岸国家相继发布海啸预警；海啸信号随后到达了大西洋、印度洋、加勒比海等区域，甚至距离火山喷发源 1.8 万千米的地中海，也出现了小振幅远场海啸。

地球表面的突然运动引起的大气波会通过大气传播到上层大气，最终引起移动电离层的扰动 (TID)。

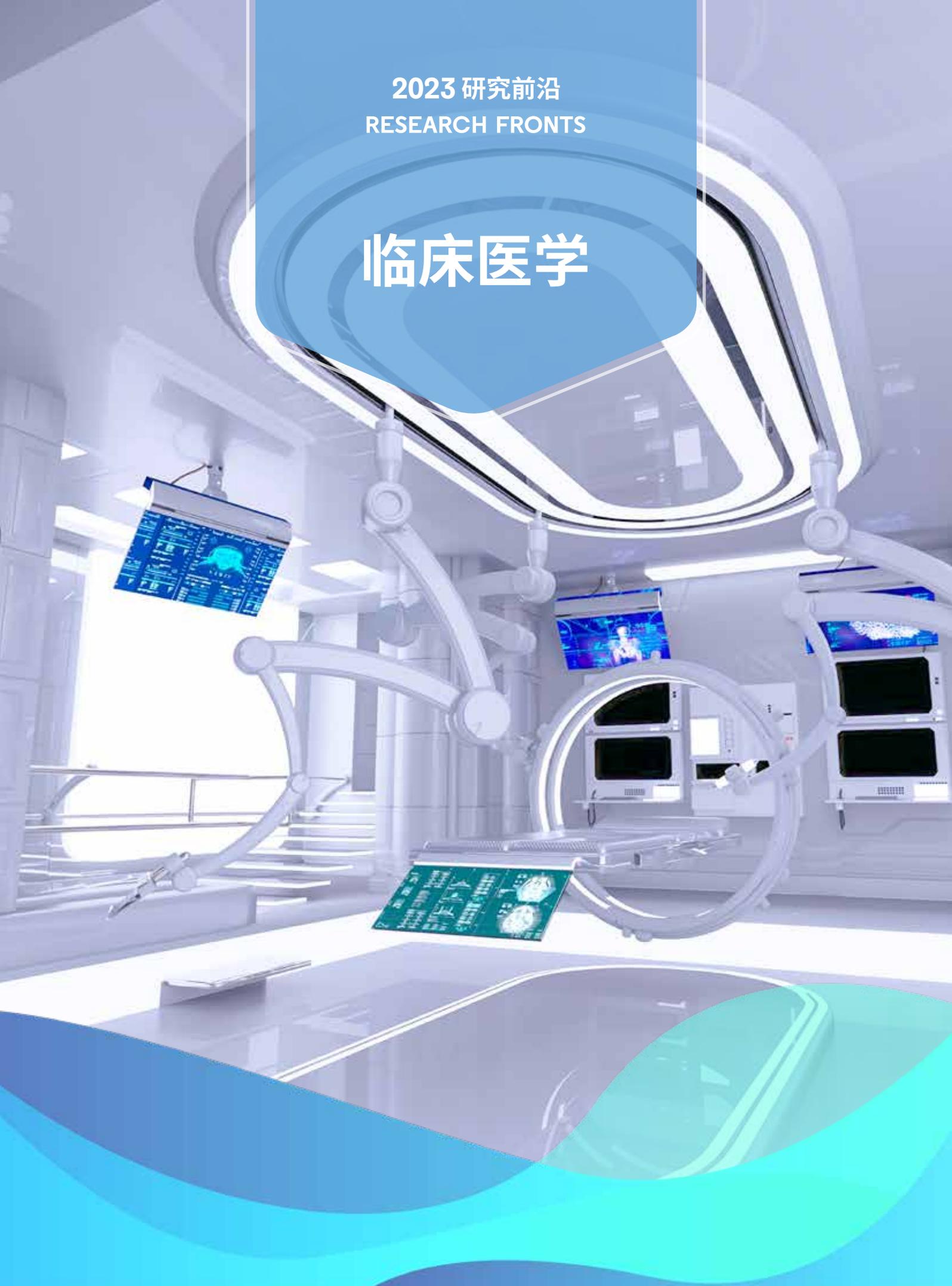
这种变化过去已经在地震、海啸、火山爆发、地下核爆炸等情景下被监测到。卫星观测数据显示，HTHH 火山喷发释放的巨大能量将岩石碎屑抛向高空，产生了高达 58km 的火山羽流，达到了大气中间层，同时伴有每小时 20 万次闪电。多种传感器均监测到了这一喷发的全球性特征，例如，日本本土的气压计在火山喷发后 3 天观测到 4 次大气压力波的过境扰动。除了波及全球的大气压力波与海啸，此次爆炸产生的多频段大气共振足以传播到达电离层并引发可探测的电子密度波动。

该新兴前沿共有 17 篇核心论文，内容主要聚焦对 HTHH 火山

喷发引发的大气波和全球地震声学观测以及海啸和电离层扰动的全球传播观测等。其中 2022 年 7 月发表在《科学》(Science) 上的“*Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga*”一文被引频次最高，达 110 次。研究团队观测到了本次汤加火山喷发所引发的大气波动 6 天内环绕地球 4 圈，论文对汤加火山喷发所引发的波动和地震声学进行了观测和分析，揭示了大气兰姆波对海啸的传播速度的助推作用。研究还指出，本次的汤加火山喷发是有仪器测量以来地球大气层附近的“最大爆炸”。

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

临床医学



1. 热点前沿及重点热点前沿解读

1.1 临床医学领域 Top 10 热点前沿发展态势

临床医学领域位居前十位的热点前沿集中于肿瘤免疫治疗、靶向治疗和分子特异性 PET 成像, 遗传病基因治疗, 以及新冠相关药物治疗和疫苗评价等方面。肿瘤免疫治疗、靶向治疗历年来一直保持较高热度, 是今年热点前沿的核心议题。

此外, 基因治疗经过多年发展和应用, 今年首次出现了基因治疗应用于临床的热点前沿, 预计未来会涌现出更多相关热点研究。随着新冠疫情进入尾声, 临床医学领域针对新冠病毒及其感染的研究热度也较前两年有所降低, 且关注点发生

变化。前两年以新冠病毒感染的临床表现、并发症、发病机制研究为主, 去年开始新冠药物治疗和疫苗评价成为新的热点前沿, 今年 4 个新冠热点前沿均聚焦于药物治疗和疫苗评价, 是去年热点的延续。

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	早期服用抗病毒药物可有效降低新冠病毒感染重症率和死亡率	3	972	2021.3
2	新冠病毒感染重症患者的抗凝治疗	12	2131	2021.1
3	成纤维细胞活化蛋白特异性 pet / ct 用于肿瘤成像	32	2589	2021.0
4	新冠病毒疫苗 CHADOX1 接种后出现血栓形成和血小板减少	4	2482	2021.0
5	BCMA CAR-T 疗法用于治疗复发或难治性多发性骨髓瘤	2	632	2021.0
6	CRISPR/CAS9 基因编辑和 shRNA 等新型基因疗法靶向 BCL11A 治疗镰状细胞病和 β -地中海贫血	2	479	2021.0
7	新冠病毒疫苗的安全性和有效性	4	13014	2020.8
8	KRAS(G12C) 抑制剂与肿瘤靶向治疗	31	5665	2020.5
9	PD-L1 制剂治疗非小细胞肺癌的效果和安全性	4	2090	2020.3
10	肠道菌群状态影响黑色素瘤抗 PD-1 免疫疗法效果	26	10137	2019.7



1.2 重点热点前沿——“CRISPR-Cas9 基因编辑和 shRNA 等新型基因疗法靶向 BCL11A 治疗镰状细胞病和 β-地中海贫血”

镰状细胞病和 β-地中海贫血是全球最常见的单基因遗传病，都是因血红蛋白 β 亚基（HBB）基因突变导致血红蛋白异常，进而引发溶血性贫血，严重时可危及生命。目前临床上异体骨髓移植虽能根治，但费用巨大、难以配型且存在并发症风险，只有少数患者通过该方法实现治愈，大部分患者只能依靠常规输血等辅助支持疗法，无法有效治愈。因此在分子水平上纠正致病基因表达的基因治疗就成为有效治疗镰状细胞病和 β 地贫的新方

向。基因治疗主要包含基因替代疗法，RNA 沉默疗法（RNAi）以及基因编辑等技术方案。其中 CRISPR-Cas9 作为新一代基因编辑技术，凭借其高效、简便、成本低等优势，短短几年内发展成为最主流的基因编辑系统，并荣获 2020 年度诺贝尔化学奖，引发基因治疗新一轮研究热潮。临床发现胎儿血红蛋白（HbF）表达水平较高可以降低异常血红蛋白聚合和红细胞变形，进而改善镰状细胞病和 β 地贫临床症状。BCL11A 是成人红细胞中的

一种转录因子，能抑制红细胞 γ 珠蛋白表达和 HbF 生成，因此其表达下调诱导 HbF 生成成为镰状细胞病和 β 地贫基因治疗的新靶点。

“CRISPR/CAS9 基因编辑和 shRNA 等新型基因疗法靶向 BCL11A 治疗镰状细胞病和 β-地中海贫血”热点前沿包括 2 篇核心论文，2020 年 12 月同时在线发表于《新英格兰医学杂志》（*The New England Journal of Medicine*）。两者都是通过特异性下调红系细

胞 BCL11A 表达，实现 γ 珠蛋白重激活，诱导胎儿血红蛋白生成，来治疗镰状细胞病或 β -地中海贫血的临床试验，但研究方法不同。其中被引频次更高的论文是萨拉坎农癌症研究所、德国雷根斯堡大学、CRISPR Therapeutics 公司、Vertex Pharmaceuticals 公司等合作的“CRISPR-Cas9 Gene Editing for Sickle Cell Disease and β -Thalassemia”，利用 CRISPR-Cas9 靶向 BCL11A 红系特异性增强子，编辑自体 CD34+ 细胞，实现降低红系细胞 BCL11A 蛋白表达，是世界首次报道经同行评议的 CRISPR 基因编辑治疗遗传性贫血的案例。另一篇论文是

哈佛大学医学院和蓝鸟生物公司等合作的“Post-Transcriptional Genetic Silencing of BCL11A to Treat Sickle Cell Disease”，则利用靶向 BCL11A mRNA 的 BCH-BB694 慢病毒载体，将基因沉默工具短发夹 RNA (shRNA) 转入自体 CD34+ 细胞，敲低 BCL11A mRNA 水平。这两项研究均论证了靶向 BCL11A 基因治疗策略的有效性，证明 CRISPR-Cas9 和 shRNA 技术实现镰状细胞病和 β -地中海贫血功能性治愈的可能性，是基因治疗从基础研究向临床应用转化的成功案例，但尚需更多患者进一步验证其有效性和安全性。

该热点前沿的核心论文 Top 产出国家中，美国贡献了全部 2 篇核心论文，在基因疗法临床研究方面占据绝对优势，其他参与的国家主要分布在欧洲和北美，如意大利、德国、英国、希腊、加拿大分别贡献 1 篇核心论文。

施引论文方面，美国贡献率近一半，远超其他国家，其后依次为中国、意大利、英国、德国，其中中国以 60 篇论文位列第二。Top 产出机构中，美国 9 家机构上榜，哈佛学位列榜首，Top10 机构中还有 2 家法国机构和 1 家中国机构，中国科学院是唯一上榜的中国机构。

表 20 “CRISPR/CAS9 基因编辑和 shRNA 等新型基因疗法
靶向 BCL11A 治疗镰状细胞病和 β -地中海贫血”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	206	49.3%	1	哈佛大学	美国	41	9.8%
2	中国	60	14.4%	2	美国国立卫生研究院	美国	31	7.4%
3	意大利	50	12.0%	3	波士顿儿童医院	美国	19	4.5%
4	英国	36	8.6%	4	丹纳-法伯癌症研究所	美国	17	4.1%
5	德国	34	8.1%	4	法国国家健康与医学研究所	法国	17	4.1%
6	法国	24	5.7%	6	巴黎西岱大学	法国	16	3.8%
7	日本	16	3.8%	7	博德研究所	美国	15	3.6%
8	荷兰	16	3.8%	7	中国科学院	中国	15	3.6%
9	加拿大	15	3.6%	7	麻省理工学院	美国	15	3.6%
10	印度	13	3.1%	10	圣朱迪儿童研究医院	美国	14	3.3%
				10	斯坦福大学	美国	14	3.3%
				10	宾夕法尼亚大学	美国	14	3.3%



1.3 重点热点前沿——“KRAS(G12C) 抑制剂与肿瘤靶向治疗”

KRAS 是人类肿瘤中最常突变的癌基因之一，在细胞生长信号通路调控方面发挥重要作用。KRAS 突变后，其蛋白持续活化，导致不受控制的细胞生长和肿瘤发生。已经发现 KRAS 存在多种突变形式，其中 G12C 突变发生率最高。KRAS(G12C) 特指 KRAS 第 12 位甘氨酸 Gly 突变为半胱氨酸 Cys。近几年随着 KRAS(G12C) 抑制剂的研发取得重大突破，终于打破了长期以来 KRAS 蛋白不可成药的瓶颈。多种 KRAS(G12C) 抑制剂相继进入临床试验，并且显示出良好的抗肿瘤效果，其中安进公司研发的

索托拉西布 (Sotorasib, 研发代号 AMG510) 于 2021 年首先获准在美国上市。但在临床持续用药过程中，KRAS(G12C) 抑制剂出现明显的耐药性，限制了其进一步发挥作用，也对研发新一代更有效的 KRAS 抑制剂带来挑战。因此深入研究其耐药机制，有效降低耐药性也是 KRAS 抑制剂研发的重要方向。

“KRAS(G12C) 抑制剂与肿瘤靶向治疗”热点前沿包括 31 篇核心论文，研究内容聚焦在 KRAS(G12C) 抑制剂（如索托拉西布、阿达格拉西布、ARS-1620 等）

的抗肿瘤机制、临床试验，研发过程、耐药性和耐药机制，以及 RAS 蛋白调控机制、RAS 突变频率、RAS 靶向治疗前景等方面。其中十余篇论文都与首批获准上市的 KRAS(G12C) 抑制剂索托拉西布和阿达格拉西布 (Adagrasib, 研发代号 MRTX849) 相关。在 24 篇非综述性论文中，被引频次最高的两篇分别讨论了索托拉西布的抗肿瘤免疫机制 (699 次) 和治疗晚期实体肿瘤的 I 期临床试验 (563 次)，可见其作为首个获准上市的 KRAS(G12C) 抑制剂广受关注，起到业界引领的作用。

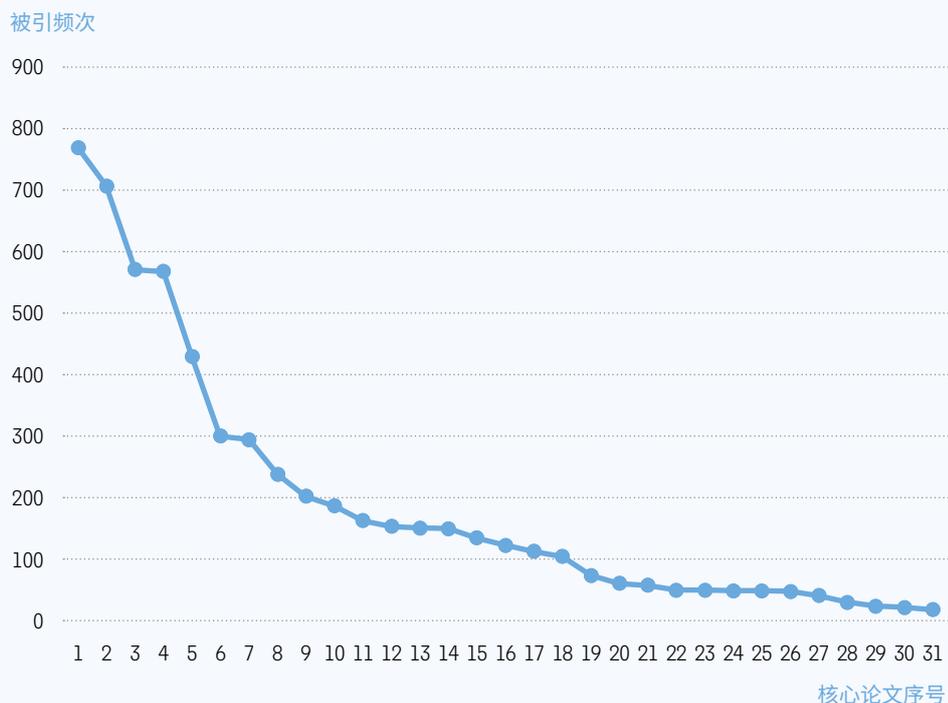


图 11 “KRAS(G12C) 抑制剂与肿瘤靶向治疗” 研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

该热点前沿核心论文 Top 产出国家中，美国贡献率达到 90.3%，遥遥领先于其他国家，反映了其在该前沿领域的主导和领先地位。

Top 产出机构也绝大部分来自美国，前三位分别是哈佛大学、纪念斯隆凯特琳癌症中心和米拉蒂医疗股份有限公司，其中米拉蒂公司就

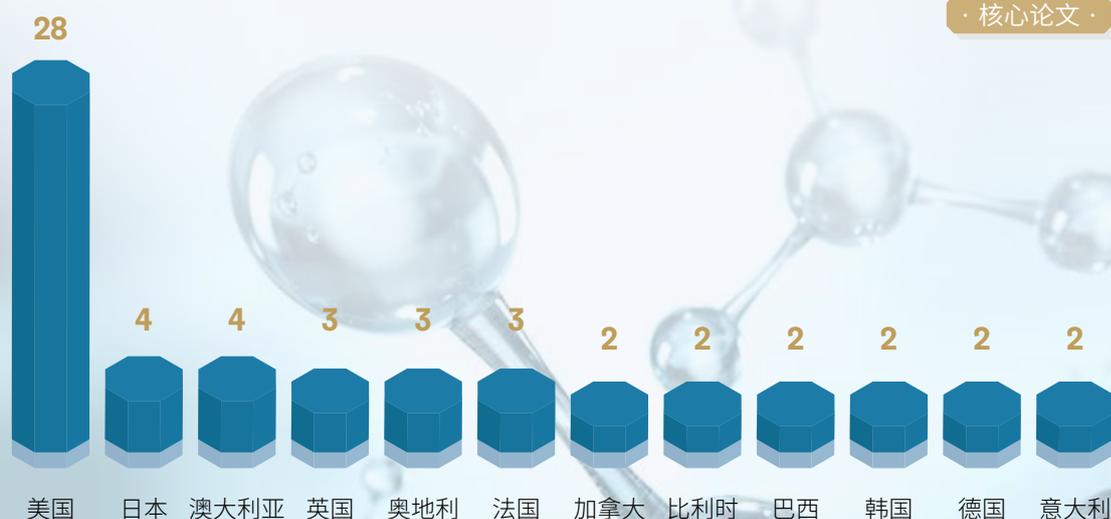
是阿达格拉西布的研发者；另有两家澳大利亚机构上榜。

表 21 “KRAS(G12C) 抑制剂与肿瘤靶向治疗” 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	28	90.3%	1	哈佛大学	美国	8	25.8%
2	日本	4	12.9%	1	纪念斯隆凯特琳癌症中心	美国	8	25.8%
2	澳大利亚	4	12.9%	3	米拉蒂医疗股份有限公司	美国	7	22.6%
4	英国	3	9.7%	4	纽约大学	美国	6	19.4%
4	奥地利	3	9.7%	4	萨拉坎农研究所	美国	6	19.4%
4	法国	3	9.7%	6	丹纳 - 法伯癌症研究所	美国	5	16.1%

排名	国家	核心论文	比例
7	加拿大	2	6.5%
7	比利时	2	6.5%
7	巴西	2	6.5%
7	韩国	2	6.5%
7	德国	2	6.5%
7	意大利	2	6.5%

排名	机构	所属国家	核心论文	比例
6	康奈尔大学	美国	5	16.1%
6	加州大学旧金山分校	美国	5	16.1%
9	安进公司	美国	4	12.9%
9	加州大学欧文分校	美国	4	12.9%
9	伊丽莎白女王医院	澳大利亚	4	12.9%
9	阿德莱德大学	澳大利亚	4	12.9%
9	辉瑞制药公司	美国	4	12.9%



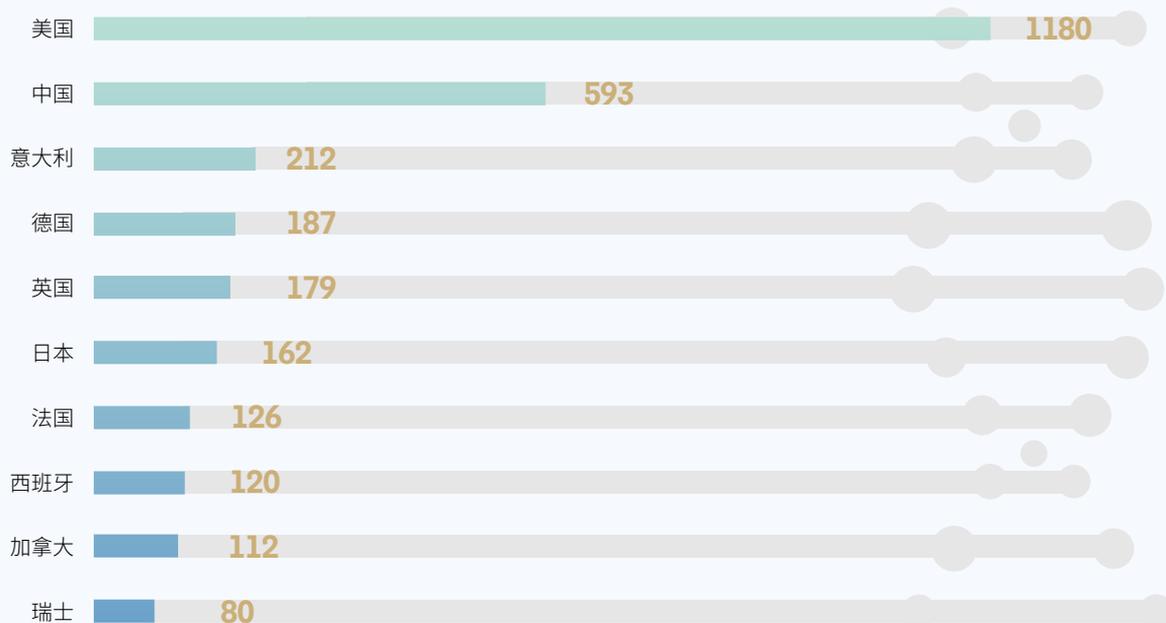
施引论文方面，美国贡献率近一半，反映其在 KRAS(G12C) 抑制剂研究领域关注度较高。中国以

593 篇位列第二，该领域的研究也相当活跃。施引论文 Top10 产出机构大部分来自美国，其他来自法国、

中国和加拿大。中国上榜机构分别是中国科学院和上海交通大学，说明其相关研究已形成一定规模。

表 22 “KRAS(G12C) 抑制剂与肿瘤靶向治疗” 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	1180	44.1%	1	哈佛大学	美国	163	6.1%
2	中国	593	22.2%	2	丹纳 - 法伯癌症研究所	美国	99	3.7%
3	意大利	212	7.9%	3	加州大学旧金山分校	美国	94	3.5%
4	德国	187	7.0%	4	纪念斯隆凯特琳癌症中心	美国	87	3.3%
5	英国	179	6.7%	5	美国国立卫生研究院	美国	80	3.0%
6	日本	162	6.1%	6	法国国家健康与医学研究所	法国	66	2.5%
7	法国	126	4.7%	7	中国科学院	中国	60	2.2%
8	西班牙	120	4.5%	8	多伦多大学	加拿大	59	2.2%
9	加拿大	112	4.2%	9	上海交通大学	中国	53	2.0%
10	瑞士	80	3.0%	10	康奈尔大学	美国	51	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

临床医学领域 2023 年入选的 5 个新兴前沿主要涉及猴痘流行病学研究、黑色素瘤免疫治疗、托法替尼治疗的心血管风险、前列腺癌联合治疗、2 型糖尿病治疗 5 个方面，具体研究方向如表 23 所示。综合

CPT 指标、前沿发展潜力及科技情报研究人员的判断，最终选取“猴痘感染暴发”前沿作为重点分析对象。

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	猴痘感染暴发	10	784	2022.0
2	Relatlimab+Nivolumab 双免疫联合疗法治疗黑色素瘤疗效	2	286	2022.0
3	托法替尼治疗类风湿关节炎患者的心血管风险	4	188	2022.0
4	第二代雄激素受体抑制剂联合 ADT 治疗转移性激素敏感性前列腺癌	4	208	2021.8
5	Tirzepatide 治疗 2 型糖尿病效果	14	688	2021.7

2.2 重点新兴前沿——“猴痘感染暴发”

既往猴痘在西非和中非区域呈地方性流行。自 2022 年 5 月英国报道第 1 例猴痘病例以来，欧美地区多个国家相继暴发非典型性猴痘疫情，引起世界范围的广泛关注。世界卫生组织于 2022 年 7 月 23 日针对猴痘疫情的快速扩散情况发布了最高级别警报，宣布在全球多个国家和地区发生的猴痘疫情已经构成“国际关注的突发公共卫生事件”。

“猴痘感染暴发”重点新兴前沿包含 10 篇核心论文，以病例报道为主，包括病毒感染的流行病学调查、临床表现、病毒检

测等，其中发表在《欧洲监测》(Eurosurveillance) 上的 5 篇论文分别报道了欧洲返回澳大利亚墨尔本后出现生殖器皮疹症状的猴痘病例、2022 年 4 月至 5 月英国猴痘的人际传播情况、针对 2022 年 5 月至 6 月西班牙 12 例患者临床样本的猴痘病毒 DNA 检测、葡萄牙 2022 年 4 月 29 日至 5 月 23 日间猴痘确诊病例的流行病学调查以及意大利通过性接触传播猴痘的流行病学、临床和病毒学特征分析等内容。此外，发表在《新英格兰医学杂志》(The New England Journal of Medicine) 上的论文通过对 16 个国家 43 个地点诊断出的 528 例

感染者进行分析发现性接触是猴痘的主要传播途径，皮疹、粘膜病变、发热、嗜睡和淋巴结病变是常见的临床表现，但猴痘病毒致死率较低。

研究表明，男同性恋者、双性恋者和其他男男性行为者（尤其是出现水疱或脓疱皮疹等症状）是当前感染猴痘病毒的高危人群，性接触是主要传播途径，皮疹、粘膜病变、发热、嗜睡和淋巴结病变是常见临床表现，少数患者也可伴有直肠疼痛和阴茎水肿。提高卫生专业人员对猴痘感染的快速、正确识别和诊断是当前遏制疫情蔓延的有效途径。



2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

生物科学



1. 热点前沿及重点热点前沿解读

1.1 生物科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

生物科学领域位居前十位的热点前沿包括先导编辑技术、新型测序技术、人工智能预测蛋白质结构、人类全基因组泛癌分析、阿尔茨海默病的血液生物标志物、外泌体的生物学功能和新型冠状病毒（SARS-CoV-2）感染等研究方向。

其中，基因编辑技术是历年来生物科学领域研究前沿的热门主题，近年来，该技术取得了重要进展，每年都会涌现新的生长点，连续多年入选研究前沿。今年入选的先导编辑（Prime Editing）技术则

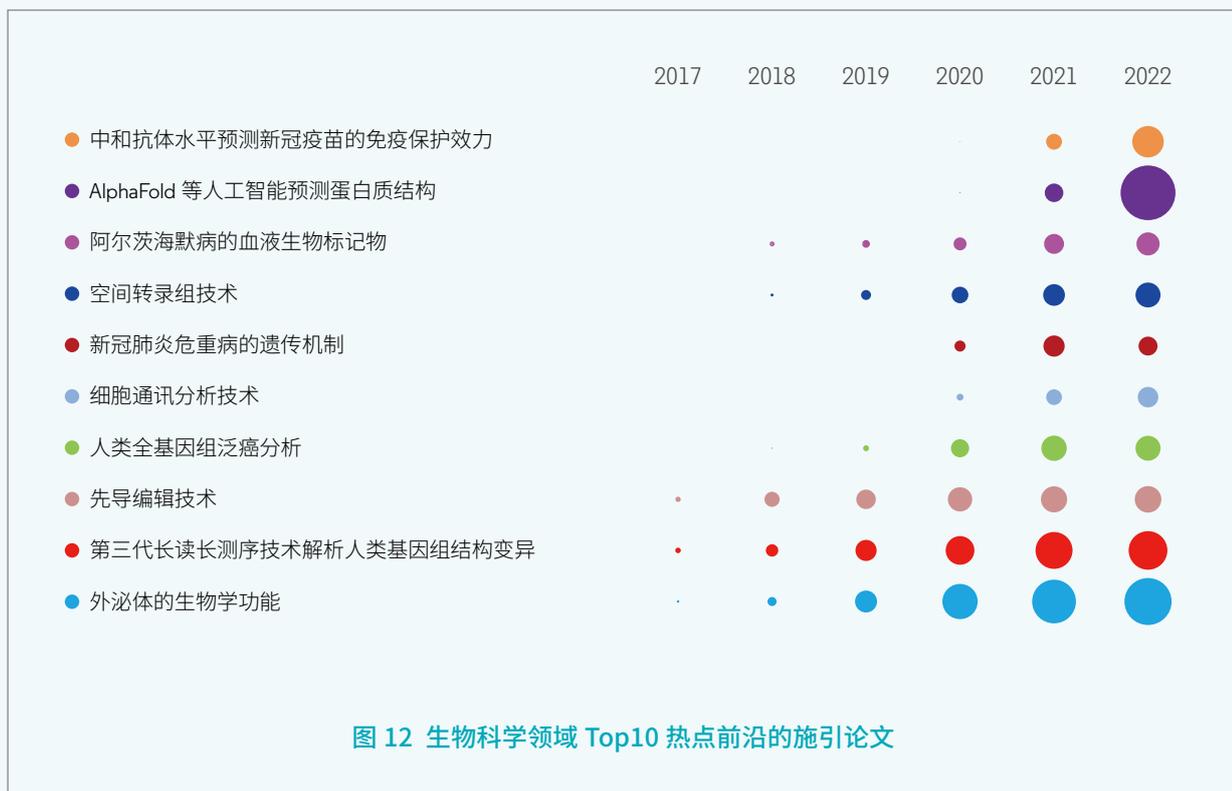
将基因编辑提升到了一个新的水平。新型测序技术近年来不断更新和提升，单细胞 RNA 测序技术入选 2020 年生物科学领域的新兴前沿。2023 年，具有长读长特点的第三代测序技术、空间转录组技术和细胞通讯分析技术等新型测序技术和辅助技术进入热点前沿。人工智能（AlphaFold 等）预测蛋白质结构在 2022 年为生物科学领域的新兴前沿，2023 年发展成为热点前沿。这一重大技术飞跃将加速新药开发、推动基础科学研究，引领

生物学领域的一场全新革命。全基因组泛癌分析在 2021 年入选生物科学领域的新兴前沿之后，2023 年成为热点前沿。

阿尔茨海默病的研究，关注早期阿尔茨海默病新的血液生物标志物的发现。外泌体生物学功能的研究首次入选热点前沿。此外，新冠病毒感染相关的两个热点前沿分别是“中和抗体水平预测新冠疫苗的免疫保护效力”和“新冠肺炎危重病的遗传机制”。

表 24 生物科学领域 Top10 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	中和抗体水平预测新冠疫苗的免疫保护效力	5	2406	2021.4
2	AlphaFold 等人工智能预测蛋白质结构	4	6106	2021.0
3	阿尔茨海默病的血液生物标记物	25	2974	2020.5
4	空间转录组技术	30	4662	2020.4
5	新冠肺炎危重病的遗传机制	3	1712	2020.3
6	细胞通讯分析技术	4	1261	2020.0
7	人类全基因组泛癌分析	8	3280	2019.6
8	先导编辑技术	44	11305	2019.4
9	第三代长读长测序技术解析人类基因组结构变异	11	8878	2018.9
10	外泌体的生物学功能	5	11095	2018.8



1.2 重点热点前沿——“空间转录组技术”

空间转录组 (Spatial Transcriptomics) 是一种从空间层面上分析和描述特定细胞类型的表达谱, 以了解器官、组织和病理状态之间表达差异的技术。空间转录组测序技术已成为了继单细胞测序技术之后的另一个生物技术研究热点。在 2020 年和 2022 年被《自然-方法》(Nature Methods) 期刊评为值得关注的 7 大年度技术之一。2023 年 6 月 26 日, 世界经济论坛发布了《2023 年十大新兴技术报告》, 空间组学技术被评选为未来

最有潜力对世界产生极大影响的十大新兴技术之一。空间转录组学时代已到来, 空间组学开启生物医学新篇章, 被誉为“生命科学”的下一个风口。

“空间转录组技术”热点前沿包括 30 篇核心论文, 多数聚焦于新技术的提出, 包括原位测序技术 (ISS): STARmap 和 ExSeq, 原位杂交技术 (ISH): smFISH、seqFISH+、MERFISH、osmFISH; 原位捕获技术: Slide-Seq、HDST、

Stereo-seq、DBiT-seq、Seq-Scope 等。其中, 2019 年发表在《科学》(Science) 期刊上的论文“Slide-seq: A scalable technology for measuring genome-wide expression at high spatial resolution”被引最高, 达到 631 次。Slide-seq 技术利用基因测序来绘制详细的三维组织图谱, 并不需要专门的成像设备, 不仅可以揭示组织中存在哪些细胞类型, 而且还能揭示它们的空间位置和功能。

由于空间转录组数据包含多个层次的信息，因此需要根据组织学经验和生物信息学工具以及算法一起进行分析。在分析方法方面，4篇核心论文提出了对空间转录组数据样本进行分群聚类的方法，如 SpaGCN 和 BayeSpace 等。另外6篇核心论文开发了单细胞转录组和空间转录组联合分析的方法和算法（包括 Giotto、RCTD、MIA、SPOTlight、Cell2location 等），对空间转录组数据进行去卷积分析，以此来提高空间转录组的分辨率。

还有核心论文提出新的统计分析方法 SPARK 可用于解析转录组空间表达模式。此外，人工智能（AI）有助于从空间分辨转录组学中识别组织亚结构，由中国科学院的研究人员发表的一篇核心论文开发了一个图注意自动编码器框架 STAGATE，通过集成空间信息和基因表达轮廓，来学习低维潜嵌件，进而准确地识别空间域。

目前，空间转录组技术已被广泛应用于发育、神经、肿瘤等领域。

该前沿中的多篇核心论文介绍了空间转录组技术在生理、发育和疾病机制研究中已取得的成果。例如，用空间转录组技术绘制了皮肤鳞状细胞癌的肿瘤微环境，以及利用空间转录组学研究不同状态癌细胞的关系。空间转录组技术结合常规的单细胞测序技术、原位技术和其他组学技术，可实现细胞异质性研究，并定位到组织的空间位置，为疾病研究提供更精准的研究方向，对深入理解疾病致病机理以及靶向治疗具有重要意义。

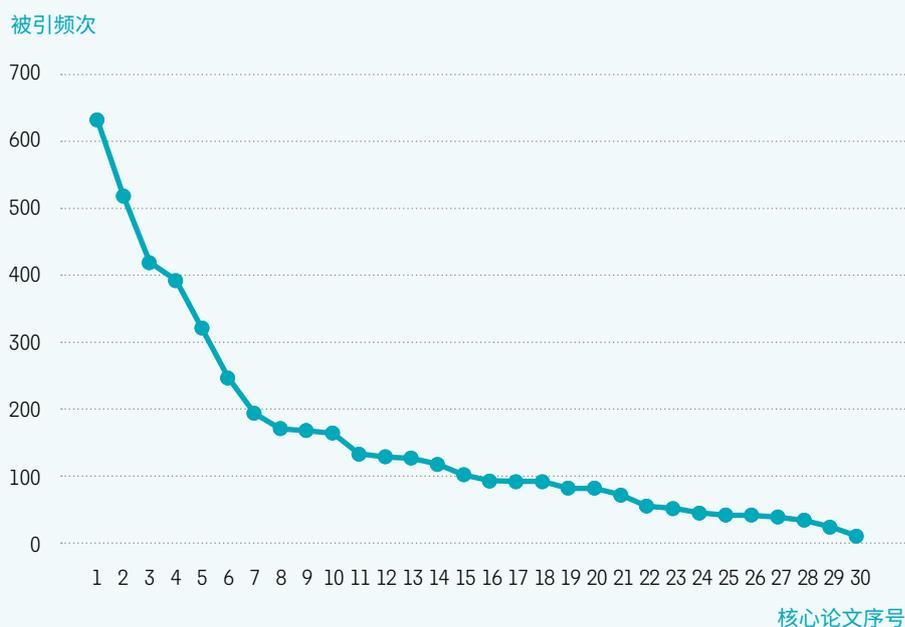


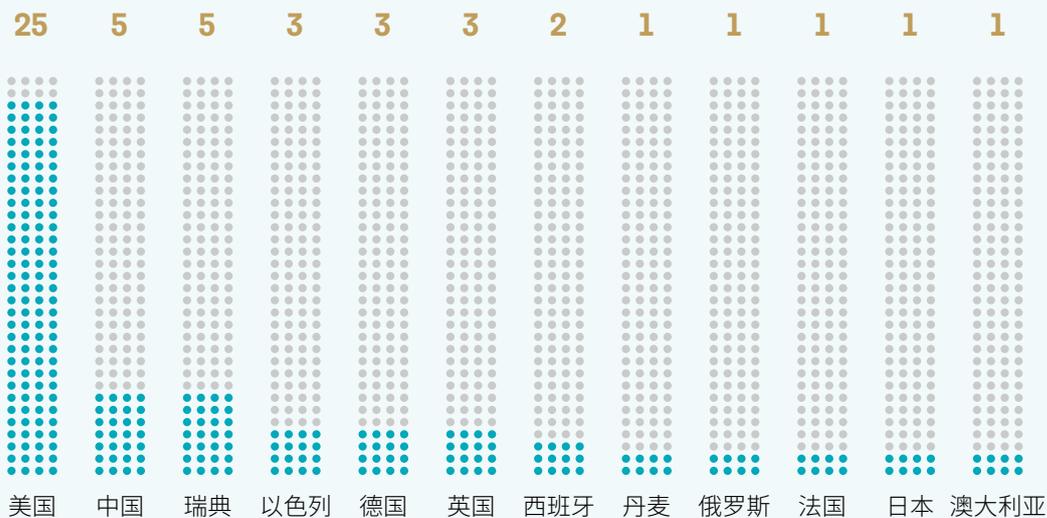
图 13 “空间转录组测序技术”研究前沿核心论文的被引频次分布曲线

从核心论文的产出国家和机构来看，美国贡献了该前沿 83.3% 的核心论文，在该领域处于领先地位，中国 and 瑞典并列第二。Top 产出机构有 7 家来自美国，其中，哈佛大学贡献的核心论文数最多，占比超过三分之一。另外 3 家机构分别是瑞典皇家理工学院、卡罗林斯卡学院，以及德国亥姆霍兹联合会（表 25）。

表 25 “空间转录组技术” 研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	25	83.3%	1	哈佛大学	美国	11	36.7%
2	中国	5	16.7%	2	麻省理工学院	美国	9	30.0%
2	瑞典	5	16.7%	3	博德研究所	美国	8	26.7%
4	以色列	3	10.0%	4	霍华休斯医学研究所	美国	7	23.3%
4	德国	3	10.0%	5	斯坦福大学	美国	4	13.3%
4	英国	3	10.0%	5	瑞典皇家理工学院	瑞典	4	13.3%
7	西班牙	2	6.7%	5	丹纳 - 法伯癌症研究所	美国	4	13.3%
8	丹麦	1	3.3%	8	加州理工学院	美国	3	10.0%
8	俄罗斯	1	3.3%	8	亥姆霍兹联合会	德国	3	10.0%
8	法国	1	3.3%	8	卡罗林斯卡学院	瑞典	3	10.0%
8	日本	1	3.3%					
8	澳大利亚	1	3.3%					

· 核心论文 ·

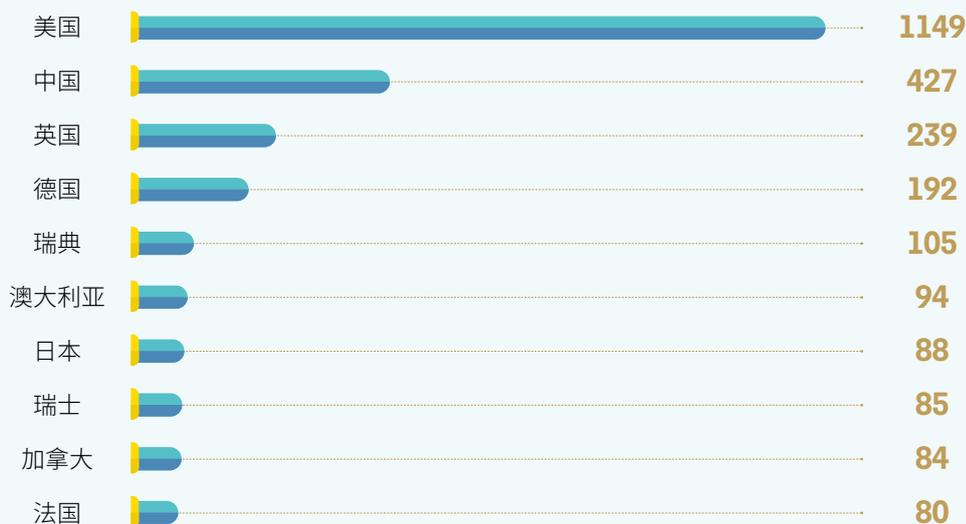


从施引论文的分布来看（表 26），美国是最活跃的国家，参与发表了 1149 篇施引论文，占比超过一半。其次是中国，积极跟进该研究方向并参与发表了 427 篇施引论文。施引论文的前十名产出机构中，美国机构占 6 家，排名前五的机构均来自美国，中国科学院以 86 篇施引论文排名第六。

表 26 “空间转录组技术”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	1149	53.1%	1	哈佛大学	美国	250	11.6%
2	中国	427	19.7%	2	麻省理工学院	美国	138	6.4%
3	英国	239	11.0%	3	斯坦福大学	美国	110	5.1%
4	德国	192	8.9%	4	博德研究所	美国	107	4.9%
5	瑞典	105	4.9%	5	霍华休斯医学研究所	美国	98	4.5%
6	澳大利亚	94	4.3%	6	中国科学院	中国	86	4.0%
7	日本	88	4.1%	7	亥姆霍兹联合会	德国	69	3.2%
8	瑞士	85	3.9%	8	剑桥大学	英国	63	2.9%
9	加拿大	84	3.9%	9	卡罗林斯卡学院	瑞典	59	2.7%
10	法国	80	3.7%	10	约翰·霍普金斯大学	美国	56	2.6%

· 施引论文 ·



1.3 重点热点前沿——“第三代长读长测序技术解析人类基因组结构变异”

以不经过扩增的单分子测序和长读长为标志的 DNA 测序技术被称为第三代测序技术。因其测序时 DNA 分子无需 PCR 扩增，实现了对每一条 DNA 分子的单独测序，也称为单分子测序技术。目前已经实现商业化的长读长测序平台主要有牛津纳米孔科技公司（Oxford Nanopore）的纳米孔测序平台（Nanopore）和美国太平洋生物公司（Pacific Biosciences, PacBio）开发的单分子实时（SMRT）测序平台。第三代长读长测序技术已在结构变异（Structural variations）检测和人类医学研究中大显身手，并逐渐向群体规模的结构变异研究迈进，持续引爆基因组遗传变异研究的热点。

相比于二代测序，三代测序平台将读长提升了万倍，但错误率、成本及样本要求都较高，科学家陆续开发出新的算法、软件、数据库等配套的工具和技术。该研究前沿的 11 篇核心论文中，一半涉及研究新的第三代长读长测序配套工具和技术。其中 Minimaps2 是美国博德研究所的李恒教授在 2018 年发表在《生物信息学》（*Bioinformatics*）上的一款针对三代数据开发的比对工具，该文已有 2681 次的被引量，在该研究前沿中引文影响力最高。另外一类是从头组装分析工具，将组装基因组和参考基因进行比较进而检测结构变异。Canu 是美国国立人类基因组研究所（NHGRI）用 JAVA 语言写的三代数据组装工具，

专门组装三代测序数据（同时适用于 PacBio 或 Oxford Nanopore 序列），相关论文于 2017 年发表在《基因组研究》（*Genome Research*）上，被引频次达到 2616 次。此外，核心论文中还介绍了 Racon、Flye、Wtdbg2 等工具对组装结果进行优化，其中 Wtdbg2 相比于 Canu 等软件，运行速度快了 10 倍左右，比 Flye 分析速度提升了 5 倍。

核心论文还涉及群体规模的第三代长读长测序检测结构变异在人类研究中的应用情况，包括：发现新的结构变异，助力结构变异金标准建立，获得大规模测序数据并揭示结构变异在人类表型中的作用，挖掘结构变异群体特征和探究人类群体环境适应性。



图 14 “第三代长读长测序技术解析人类基因组结构变异”研究前沿核心论文的被引频次分布曲线

从核心论文的分布来看，美国贡献了 90.9% 的核心论文，在该前沿领域占据绝对优势。Top 产出机构中，博德研究所、麻省理工学院和哈佛大学均参与发表 6 篇核心论文，并列首位。

表 27 “第三代长读长测序技术解析人类基因组结构变异” 研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

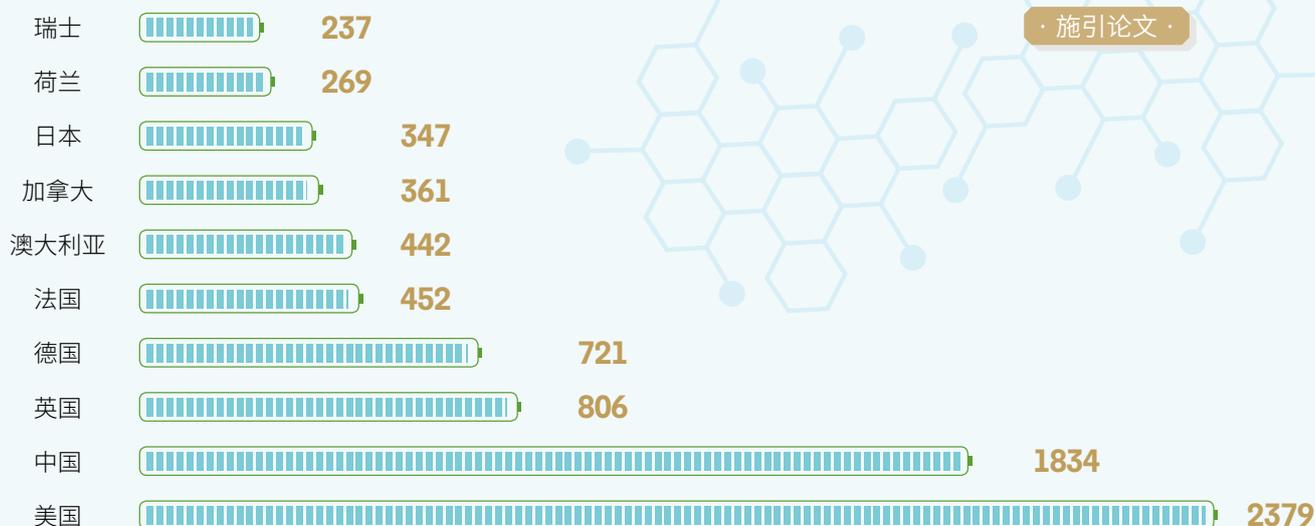
排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	10	90.9%	1	博德研究所	美国	6	54.5%
2	中国	3	27.3%	1	麻省理工学院	美国	6	54.5%
2	澳大利亚	3	27.3%	1	哈佛大学	美国	6	54.5%
2	德国	3	27.3%	4	南加利福尼亚大学	美国	3	27.3%
5	英国	2	18.2%	4	霍华休斯医学研究所	美国	3	27.3%
5	韩国	2	18.2%	4	密西根大学	美国	3	27.3%
5	加拿大	2	18.2%	4	华盛顿大学	美国	3	27.3%
8	奥地利	1	9.1%	4	约翰·霍普金斯大学	美国	3	27.3%
8	马来西亚	1	9.1%	4	圣路易斯华盛顿大学	美国	3	27.3%
8	荷兰	1	9.1%					
8	克罗地亚	1	9.1%					
8	土耳其	1	9.1%					
8	新加坡	1	9.1%					
8	西班牙	1	9.1%					



从施引论文的分布来看，美国和中国是两个最活跃的国家，分别贡献了 2379 篇和 1834 篇施引论文（表 28）。Top10 机构中，5 家机构来自美国，中国和法国分别有 2 家，另外 1 家来自德国。施引论文数最多的机构是中国科学院，发表了 362 篇施引论文；此外，中国农业科学院排名第五，共发表 197 篇施引论文。

表 28 “第三代长读长测序技术解析人类基因组结构变异”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	2379	37.7%	1	中国科学院	中国	362	5.7%
2	中国	1834	29.0%	2	法国国家科学研究中心	法国	261	4.1%
3	英国	806	12.8%	3	美国农业部	美国	213	3.4%
4	德国	721	11.4%	4	哈佛大学	美国	212	3.4%
5	法国	452	7.2%	5	中国农业科学院	中国	197	3.1%
6	澳大利亚	442	7.0%	6	美国国立卫生研究院	美国	153	2.4%
7	加拿大	361	5.7%	7	马普学会	德国	141	2.2%
8	日本	347	5.5%	8	康奈尔大学	美国	138	2.2%
9	荷兰	269	4.3%	9	法国国家农业食品与环境研究院	法国	134	2.1%
10	瑞士	237	3.8%	10	约翰·霍普金斯大学	美国	128	2.0%



2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

2.1 新兴前沿概述

生物科学领域有 4 项研究入选新兴前沿，主要研究主题包括“爱泼斯坦-巴尔病毒（EBV）是导致多发性硬化症的主要原因”、“人类基因组的完整序列”、“铜死亡：铜诱导肿瘤细胞死亡机制”和“色氨酸代谢：疾病治疗新靶点”。综合 CPT 指标、前沿发展潜力及科技情报研究人员的判断，最终选取“铜死亡：铜诱导肿瘤细胞死亡机制”前沿重点分析。

表 29 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	爱泼斯坦-巴尔病毒（EBV）是导致多发性硬化症的主要原因	2	334	2022.0
2	人类基因组的完整序列	10	561	2021.7
3	铜死亡：铜诱导肿瘤细胞死亡机制	14	908	2021.6
4	色氨酸代谢：疾病治疗新靶点	12	404	2021.6

2.2 重点新兴前沿——“铜死亡：铜诱导肿瘤细胞死亡机制”

铜是所有生物体必需的矿物质营养素，是诸多生物过程的基础元素，包括线粒体呼吸、铁吸收、抗氧化、解毒过程等。最近报道称，铜也具有信号传导的作用，可在外部刺激下调节或触发几种生物途径。还有一些证据表明，铜可能在癌症疾病的病因、发生发展、严重程度和进展中发挥作用，目前已发现多种癌症患者的血清和肿瘤组织中的铜含量发生了显著改变。因此对铜的研究具有十分重要的意义，它也可能成为具有潜力的抑制癌症发生的靶点。

2022年3月，《科学》(Science)上发表了题为“Copper induces cell death by targeting lipoylated TCA cycle proteins”的研究论文，发现了铜死亡（Cuproptosis）是一种由过量铜引起的新型死亡形式。短短一年间，该论文被引用 359 次。铜死亡是一种不同于当前已知细胞死亡机制的新型细胞死亡方式，胞内铜通过刺激线粒体相关蛋白的硫辛酰化聚集过程，促进铁硫簇蛋白的降解，导致蛋白质毒性应激，最终导致细胞死亡。这一重大发现无疑为铜代谢失衡尤其是铜过载相关

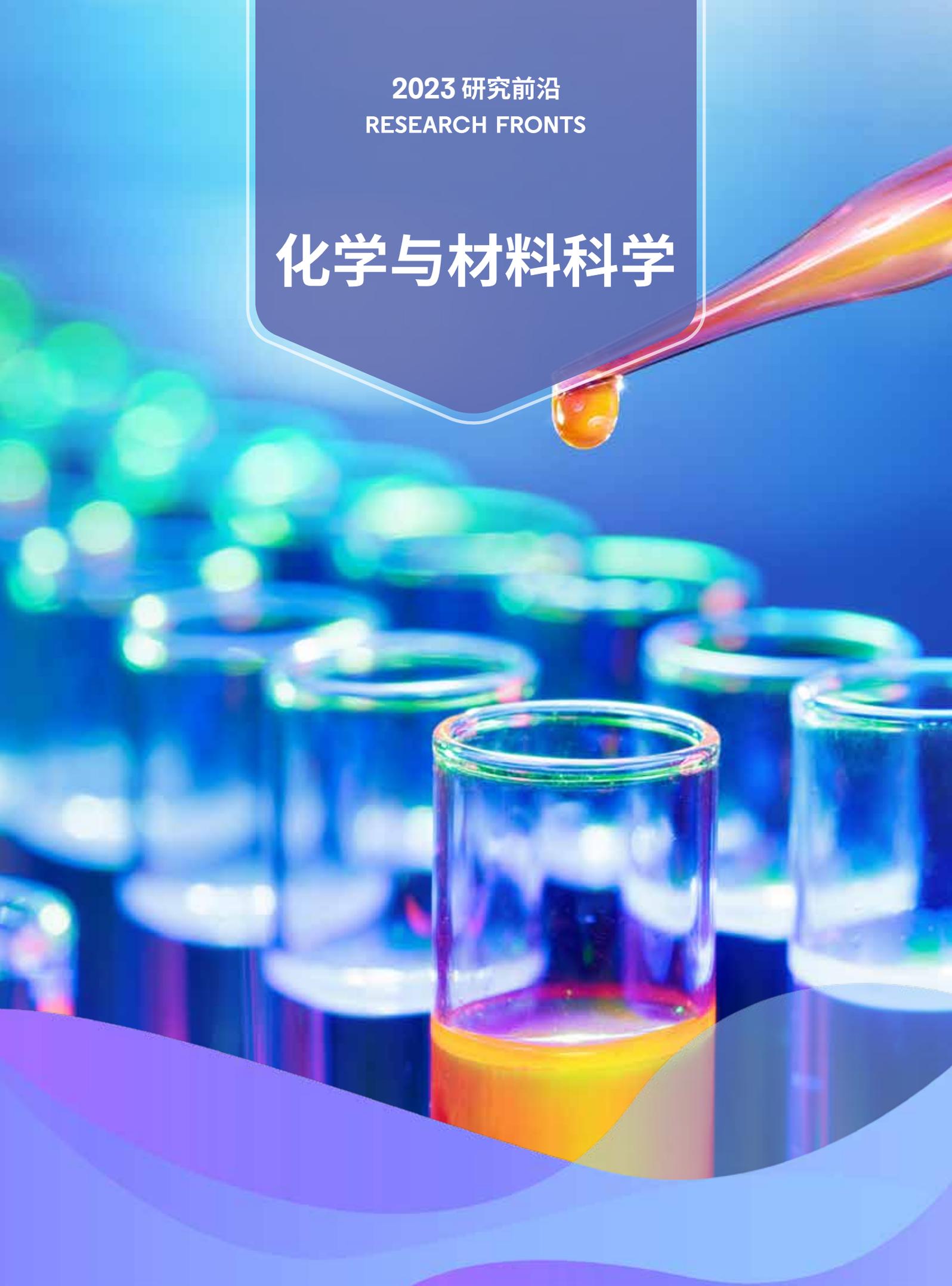
疾病的治疗提供了崭新的视角。

此外，该新兴前沿中的多篇核心论文分别分析了黑色素瘤、肾细胞癌和肝细胞癌等癌症中铜死亡相关基因（CRGs）的分子改变和临床相关性，探索铜死亡在相关疾病发展过程中的潜在机制。

铜死亡新机制的发现也为未来以铜为靶点的新药开发拓宽了道路。同时深入研究不同病理背景下铜死亡相关调控通路，对相关疾病的临床治疗具有重大的研究价值和转化意义。

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

化学与材料科学



1. 热点前沿及重点热点前沿解读

1.1 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

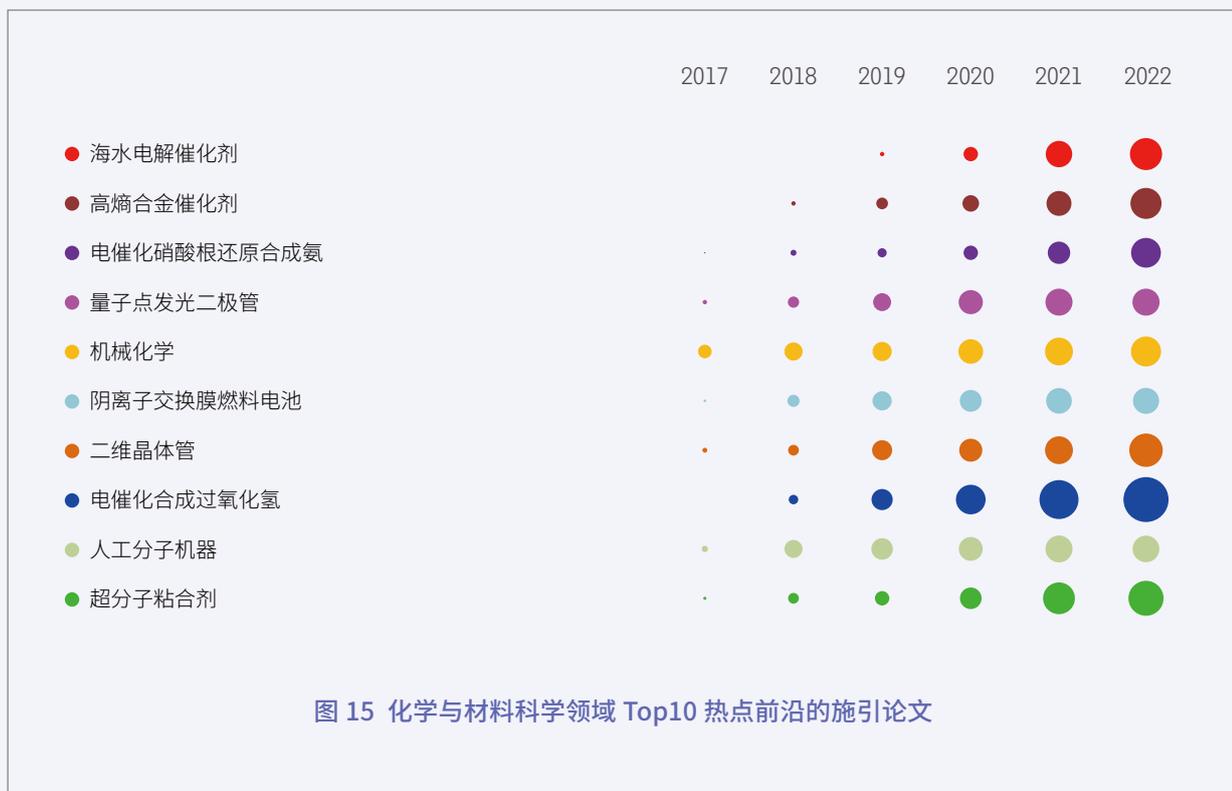
化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿主要分布在电化学、纳米材料、有机化学、新兴交叉等研究方向。电化学方向有 4 项，分别为海水电解催化剂、电催化硝酸根还

原合成氨、阴离子交换膜燃料电池、电催化合成过氧化氢。纳米材料方向有 3 项，分别为高熵合金催化剂、量子点发光二极管、二维晶体管。有机化学方向有 2 项，分别为人工

分子机器和超分子粘合剂。新兴交叉方向有 1 项，为机械化学。其中，人工分子机器和机械化学都是第二次入选 Top 10 热点前沿。

表 30 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	海水电解催化剂	11	2003	2020.0
2	高熵合金催化剂	13	2119	2019.9
3	电催化硝酸根还原合成氨	13	2673	2019.8
4	量子点发光二极管	13	2391	2019.7
5	机械化学	16	3095	2019.6
6	阴离子交换膜燃料电池	15	3096	2019.5
7	二维晶体管	10	2692	2019.5
8	电催化合成过氧化氢	39	7728	2019.4
9	人工分子机器	17	3240	2019.4
10	超分子粘合剂	13	2987	2019.4



1.2 重点热点前沿——“海水电解催化剂”

鉴于海水在自然界中数量丰富且成本低廉，海水电解不仅是一种生产清洁氢能的可行方法，而且对海水淡化也具有重要意义。然而，与析氧反应同时发生的析氯反应极大地影响了海水电解的整体性能。因此，海水电解的实施需要高效、耐用的电催化剂，特别是阳极催化剂，以保证析氧反应免受氯化物

腐蚀。

该前沿的 11 篇核心论文涉及阳极析氧催化剂和阴极析氢催化剂，重点是析氧催化剂。研究人员使用镍、铁、钴等活性元素制备催化剂，实现了常温、碱性、工业电流密度条件下长时间高效电解海水，超过了商业铱基催化剂的表现。

被引频次最高的一篇论文来自中国华中师范大学和美国休斯敦大学。在这篇论文中，研究人员组装了使用镍基阳极和阴极纳米催化剂的电解槽，在 60 °C 的碱性天然海水中，以 1.608 伏和 1.709 伏的低电压分别输出 500 和 1000 毫安 / 平方厘米的电流密度。

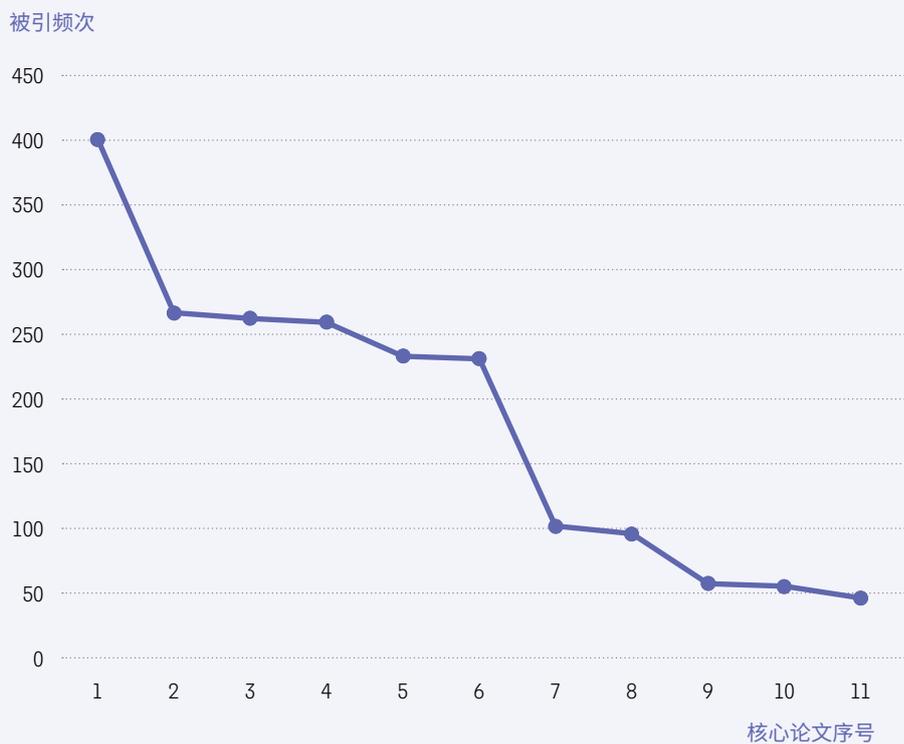
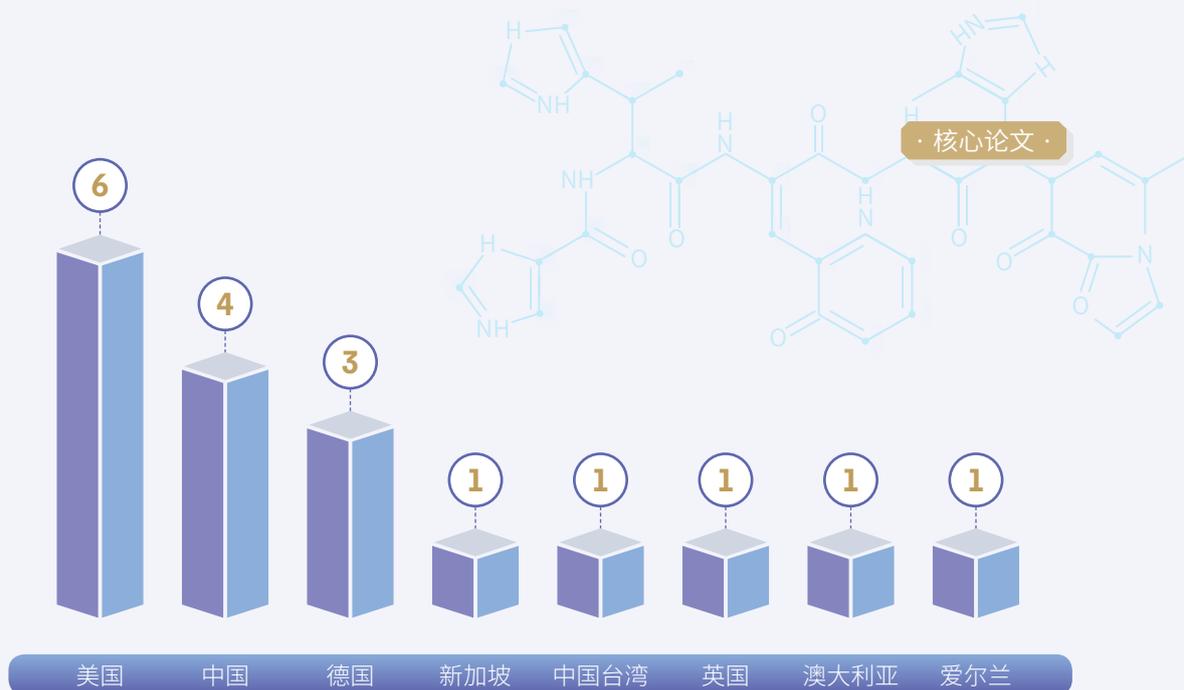


图 16 “海水电解催化剂”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

如表 31 所示，在该前沿中，美国贡献了 6 篇核心论文，其中 5 篇来自休斯顿大学。中国贡献了 4 篇核心论文，其中 2 篇来自华中师范大学与休斯顿大学的合作。德国贡献了 3 篇核心论文，全部来自柏林工业大学。

表 31 “海水电解催化剂”研究前沿中核心论文 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	6	54.5%	1	休斯顿大学	美国	5	45.5%
2	中国	4	36.4%	2	柏林工业大学	德国	3	27.3%
3	德国	3	27.3%	3	华中师范大学	中国	2	18.2%
4	新加坡	1	9.1%					
4	中国台湾	1	9.1%					
4	英国	1	9.1%					
4	澳大利亚	1	9.1%					
4	爱尔兰	1	9.1%					



在施引论文方面，如表 32 所示，中国在总量上遥遥领先，远超位列第二和第三的美国和韩国，而且施引论文前十机构也均来自中国，显示出很强的研究集群优势。

表 32 “海水电解催化剂”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	912	74.8%	1	中国科学院	中国	141	11.6%
2	美国	121	9.9%	2	青岛科技大学	中国	44	3.6%
3	韩国	90	7.4%	3	郑州大学	中国	36	3.0%
4	澳大利亚	49	4.0%	4	中国石油大学	中国	35	2.9%
5	德国	44	3.6%	5	武汉理工大学	中国	31	2.5%
5	英国	44	3.6%	6	北京化工大学	中国	27	2.2%
7	印度	43	3.5%	7	深圳大学	中国	26	2.1%
8	日本	29	2.4%	8	苏州大学	中国	25	2.0%
9	新加坡	23	1.9%	9	天津大学	中国	24	2.0%
10	加拿大	21	1.7%	10	吉林大学	中国	23	1.9%



1.3 重点热点前沿——“电催化合成过氧化氢”

作为一种高价值的环保型氧化剂,过氧化氢被广泛用于废水处理、化学品合成等过程。但是,当前工业上合成过氧化氢需使用高能耗的蒽醌工艺,成本高昂,不适合于现场按需制备。通过两电子氧还原反应或者两电子水氧化反应电催化合成过氧化氢,可以实现按需现场合

成,是一种富有前景的替代过程。然而,研发用于该过程的廉价、高效、高选择性的电催化剂仍具挑战。

该前沿的 39 篇核心论文涉及催化剂研究和电极设计,主要是前者。研究人员不仅研究了用于氧还原反应的金属单原子(例如,钴、钼)、碳基材料等催化剂类型,还

研究了用于水氧化反应的金属氧化物(例如, BiVO_4) 等催化剂类型。被引频次最高的一篇文章来自美国斯坦福大学和美国 SLAC 国家加速器实验室。在这篇论文中,研究人员通过表面氧化方法,显著提高了碳纳米管电催化合成过氧化氢的活性和选择性。

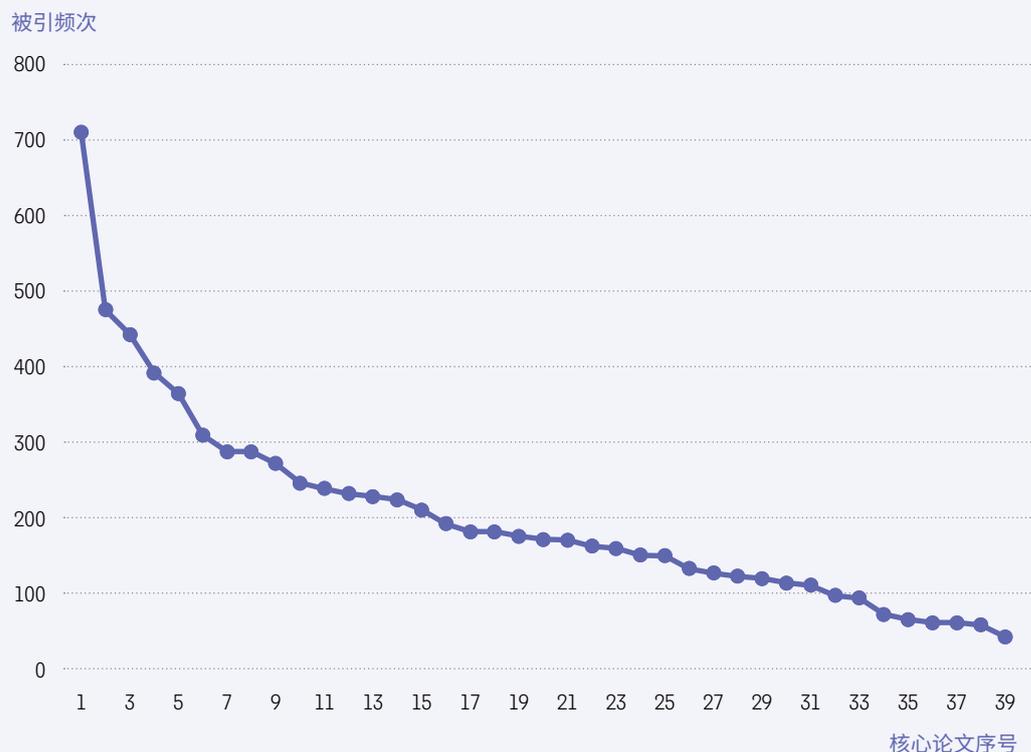


图 17 “电催化合成过氧化氢”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

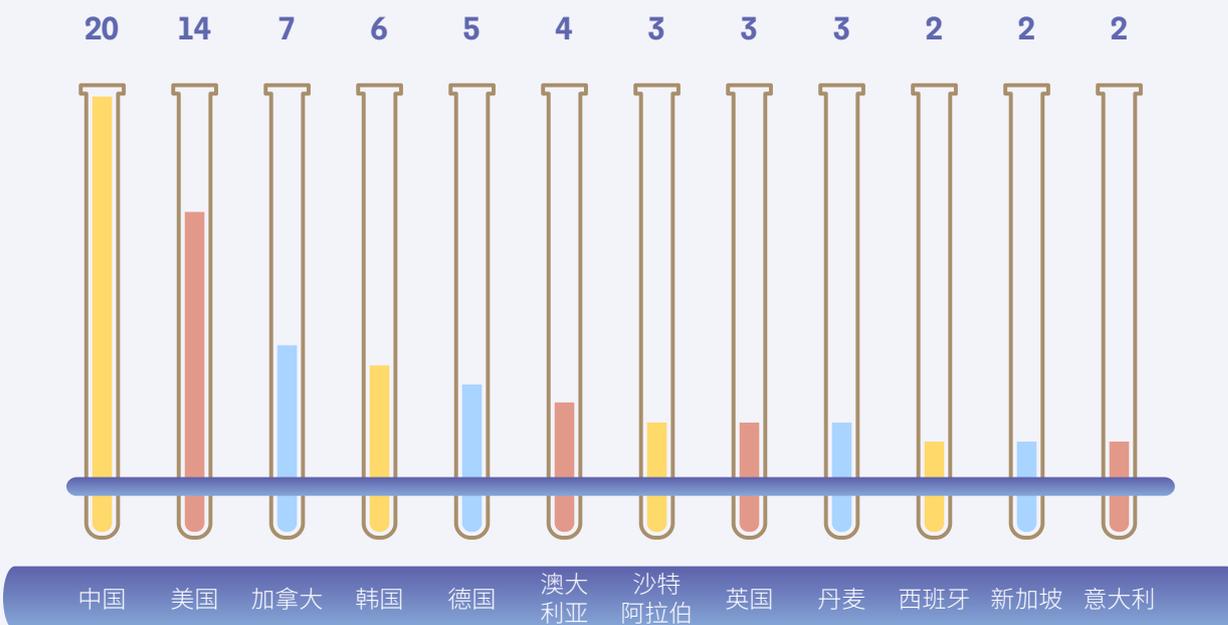
如表 33 所示，在该前沿中，中国和美国分别贡献了 20 和 14 篇核心论文，位居前两位，数量明显多于榜单上的其他国家。具体到机构层面，美国能源部国家实验室（包括 SLAC 国家加速器实验室、劳伦斯伯克利国家实验室、布鲁克海文国家实验室等）贡献了 9 篇核心论文，位列第一。美国斯坦福大学、中国科学院、加拿大卡尔加里大学紧随其后。

表 33 “电催化合成过氧化氢”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	20	51.3%	1	美国能源部国家实验室	美国	9	23.1%
2	美国	14	35.9%	2	斯坦福大学	美国	7	17.9%
3	加拿大	7	17.9%	3	中国科学院	中国	6	15.4%
4	韩国	6	15.4%	3	卡尔加里大学	加拿大	6	15.4%
5	德国	5	12.8%	5	莱斯大学	美国	5	12.8%
6	澳大利亚	4	10.3%	6	清华大学	中国	4	10.3%

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
7	沙特阿拉伯	3	7.7%	7	阿卜杜勒阿齐兹国王大学	沙特阿拉伯	3	7.7%
7	英国	3	7.7%	7	电子科技大学	中国	3	7.7%
7	丹麦	3	7.7%	7	柏林工业大学	德国	3	7.7%
10	西班牙	2	5.1%	7	河南大学	中国	3	7.7%
10	新加坡	2	5.1%	7	阿德莱德大学	澳大利亚	3	7.7%
10	意大利	2	5.1%					

· 核心论文 ·

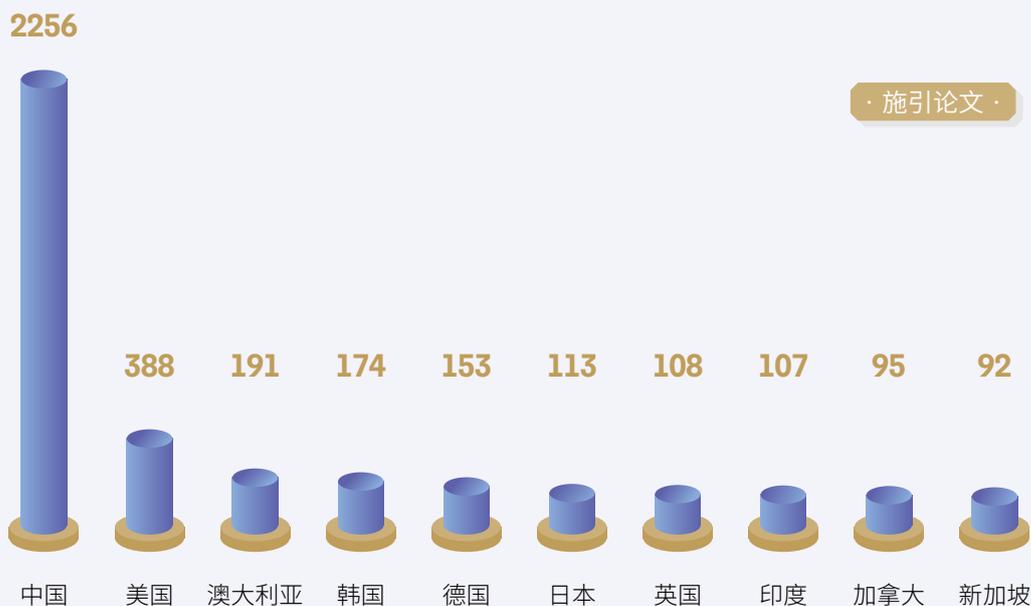


在施引论文方面，如表 34 所示，中国在总量上遥遥领先，美国、澳大利亚分列第二、三位。在施引论文前十机构中，除美国能源部国家实验室位列第六

外，其余均为中国机构，显示出了中国对该研究方向的高关注度。

表 34 “电催化合成过氧化氢”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	2256	72.8%	1	中国科学院	中国	492	15.9%
2	美国	388	12.5%	2	清华大学	中国	130	4.2%
3	澳大利亚	191	6.2%	3	哈尔滨工业大学	中国	92	3.0%
4	韩国	174	5.6%	4	天津大学	中国	89	2.9%
5	德国	153	4.9%	5	南开大学	中国	83	2.7%
6	日本	113	3.6%	6	美国能源部国家实验室	美国	82	2.6%
7	英国	108	3.5%	7	苏州大学	中国	73	2.4%
8	印度	107	3.5%	8	郑州大学	中国	70	2.3%
9	加拿大	95	3.1%	9	北京化工大学	中国	68	2.2%
10	新加坡	92	3.0%	10	大连理工大学	中国	65	2.1%
				10	电子科技大学	中国	65	2.1%



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 2 项研究入选新兴前沿，且均与能源的转化和存储相关。“高性能 HER 和 ORR 光催化剂的开发及其在太阳能燃料合成中的应用”，主要涉及利用光催化剂，如共价有机框架

化合物和金属氧化物半导体（主要是 BiVO_4 ）等，通过氢还原反应（HER）和氧还原反应（ORR）将

太阳能转化为绿色燃料，如氢气和双氧水。而“聚合物介质电容器的制备”主要涉及利用聚合物作为电

容器的介质，调整其组成和结构，实现电容器能量密度和放电效率的同时提高。

表 35 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	高性能 HER 和 ORR 光催化剂的开发及其在太阳能燃料合成中的应用	8	195	2021.9
2	聚合物介质电容器的制备	6	245	2021.7

2.2 重点新兴前沿——“高性能 HER 和 ORR 光催化剂的开发及其在太阳能燃料合成中的应用”

利用人工光合作用收集太阳能燃料，在全球应对气候变化、环境污染和能源危机的任务中具有重要价值。鉴于可扩展性和成本效益等因素，在各种各样通过人工光合作用获取太阳能燃料的反应中，太阳能驱动的水裂解制氢反应（HER）和利用地球丰富的水和氧气进行人工光合成 H_2O_2 的双电子氧还原反应（ORR）受到了众多研究者的关注。

在该新兴前沿方向中，主要探讨了高性能 HER 和 ORR 光催化剂的制备和优化路径，以实现太阳能燃料（氢气和双氧水）的高效、快速制取。其中，针对 HER 光催化剂制取氢气均围绕提高共价有机框架化合物（COF）稳定性和提升电子离域能力两方面展开：中

国科学院福建物质结构研究所采用将 COF 中的 N-酰脲连接基元（H-COF）不可逆氧化环化形成芳香性的恶二唑连接基元（ODA-COF）的策略，实现了 COF 化学稳定性和 π 电子离域能力的同时提高，制备的 ODA-COF 应用于光催化制氢可产生比不经修饰的 H-COF 4 倍多的氢气；由于碳碳双键连接单元具有良好的稳定性且利于电子离域，青岛科技大学基于 Knoevenagel 反应，制备了高结晶性的碳碳双键连接的共轭 COF（苯并二噻唑结构）材料，利用其光催化制氢的产氢速率可达 $15.1 \text{ mmol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$ 。针对 ORR 光催化制取 H_2O_2 研究，该新兴前沿方向主要涉及 COF 和无机 BiVO_4 两种光催化材料的制备及其在 H_2O_2 合成中的应

用。中国的三峡大学和澳大利亚的斯威本科技大学首次实验证明基于联吡啶的共价有机框架光催化剂（表示为 COF-TfpBpy）可以在不存在牺牲试剂或缓冲液的情况下光催化生成 H_2O_2 ；而北京理工大学则开发了一种部分氟化、无金属、亚胺连接的二维三嗪共价有机框架（TF50-COF）光催化剂，实现了 $1739 \mu\text{mol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$ 的 H_2O_2 产率；此外，浙江大学和日本中央大学利用无机 Mo 掺杂的多面 BiVO_4 （Mo:BiVO₄）制备了高效整体光催化 H_2O_2 生成系统，该系统可显著增强电荷分离并可抑制电荷载流子的快速捕获和复合，在全光谱下表观量子产率为 1.2%，太阳能到化学的转化效率为 0.29%，创下了无机半导体系统的新纪录。

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

物理学



1. 热点前沿及重点热点前沿解读

1.1 物理学领域 Top 10 热点前沿发展态势

物理领域位居前 10 位的热点前沿主要集中于凝聚态物理、理论物理、高能物理、光学和量子物理。凝聚态物理方面的热点前沿有 4 个，新型超导材料的研究表现突出，包括笼目超导材料 AV_3Sb_5 、

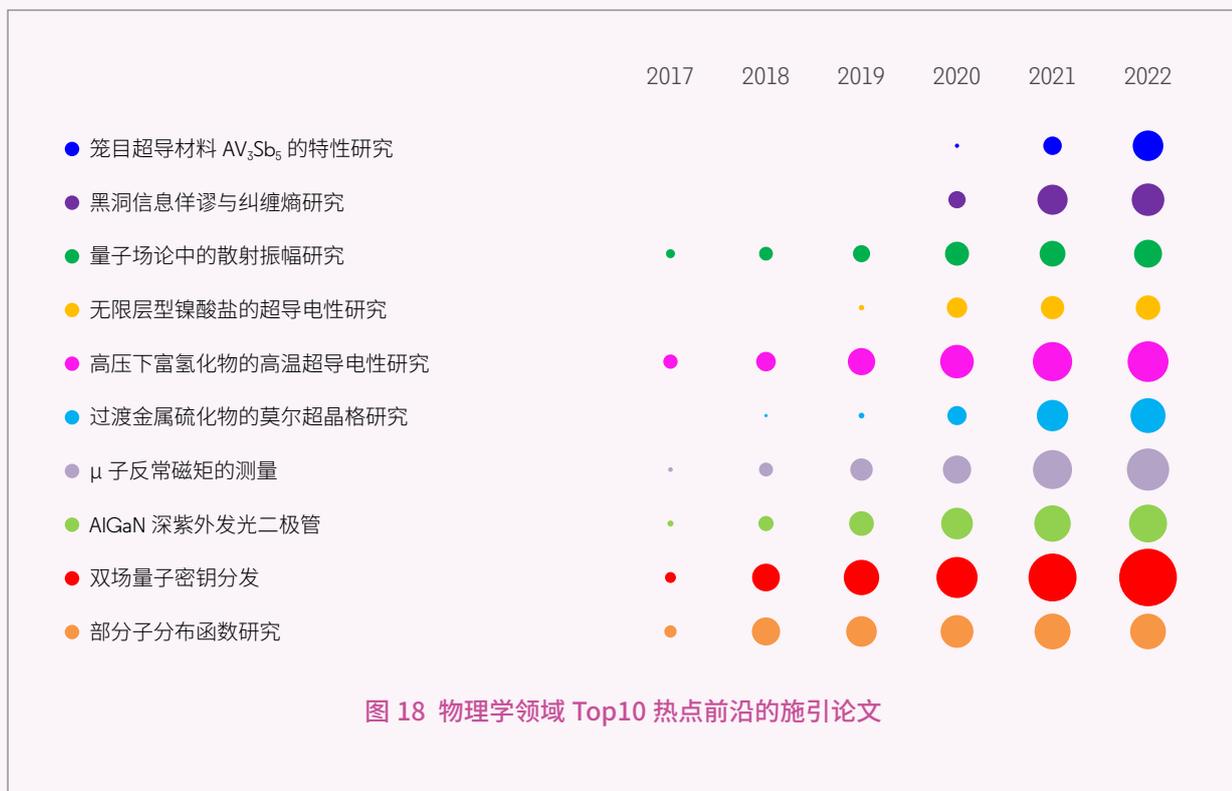
外，过渡金属硫化物的莫尔超晶格成为了新出现的热点前沿。理论物理方面的热点前沿有 2 个，分别聚焦黑洞信息佯谬与纠缠熵以及量子场论中的散射振幅研究。高能物理方面的热点前沿有 2 个，部分子分布函数是新出现的热点前沿， μ 子

反常磁矩的测量连续 2 年入选热点前沿。光学和量子物理各有 1 个新出现的热点前沿，分别关注 AlGaIn 深紫外发光二极管和双场量子密钥分发。

表 36 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	笼目超导材料 AV_3Sb_5 的特性研究	45	3121	2021.2
2	黑洞信息佯谬与纠缠熵研究	45	3277	2020.9
3	量子场论中的散射振幅研究	42	3251	2020.2
4	无限层型镍酸盐的超导电性研究	22	1981	2020.2
5	高压下富氢化物的高温超导电性研究	26	4222	2020.1
6	过渡金属硫化物的莫尔超晶格研究	12	1817	2020.1
7	μ 子反常磁矩的测量	34	5845	2019.6
8	AlGaIn 深紫外发光二极管	11	1957	2019.3
9	双场量子密钥分发	31	5825	2019.2
10	部分子分布函数研究	20	3140	2019.2





1.2 重点热点前沿——“笼目超导材料 AV_3Sb_5 的特性研究”

笼目晶格是一种由顶点共享的三角形构成的晶格结构,拥有平带、范霍夫奇点和狄拉克锥等独特的电子结构,已成为研究电子关联、拓扑物态、几何阻挫等的全新平台。具有笼目晶格的材料拥有丰富的物理现象,如已观察到的量子自旋液体、磁性外尔费米子、巨型反常霍尔效应等,已成为凝聚态物理研究的热点。

笼目材料之前的研究主要集

中在其磁性和拓扑性质等方面,近年来,笼目材料的超导特性研究引起了研究人员的广泛关注,其中,代表性材料就是钒基笼目超导材料 AV_3Sb_5 (A 为碱金属元素 K, Rb 或 Cs)。2019 年,美国加州大学圣芭芭拉分校等发现并合成了 KV_3Sb_5 、 RbV_3Sb_5 和 CsV_3Sb_5 。2020 年,美国加州大学圣芭芭拉分校等发现 CsV_3Sb_5 具有超导性,掀起了研究笼目超导材料特性的热潮。

从引文影响力看(图 19),45 篇核心论文中被引频次最高的论文是 2020 年加州大学圣芭芭拉分校等发现 CsV_3Sb_5 具有超导性的研究,被引频次为 207 次。此外,加州大学圣芭芭拉分校等 2019 年发现 AV_3Sb_5 材料、普林斯顿大学等 2021 年发现 KV_3Sb_5 中的非常规手性电荷序、德国马克斯·普朗克微观结构物理研究所等 2020 年在 KV_3Sb_5 中发现巨型反常霍尔效应等研究,也获得了广泛的引用。

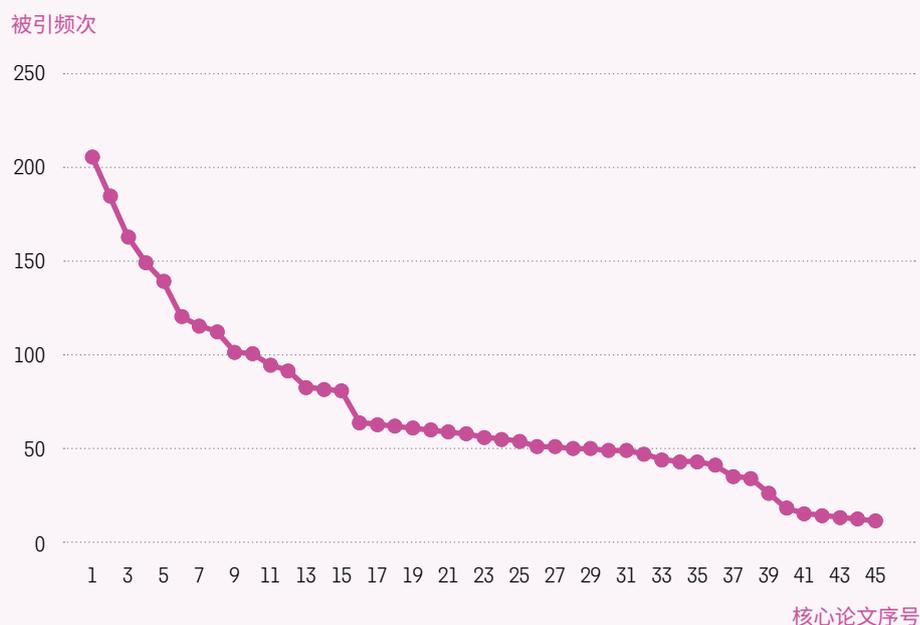


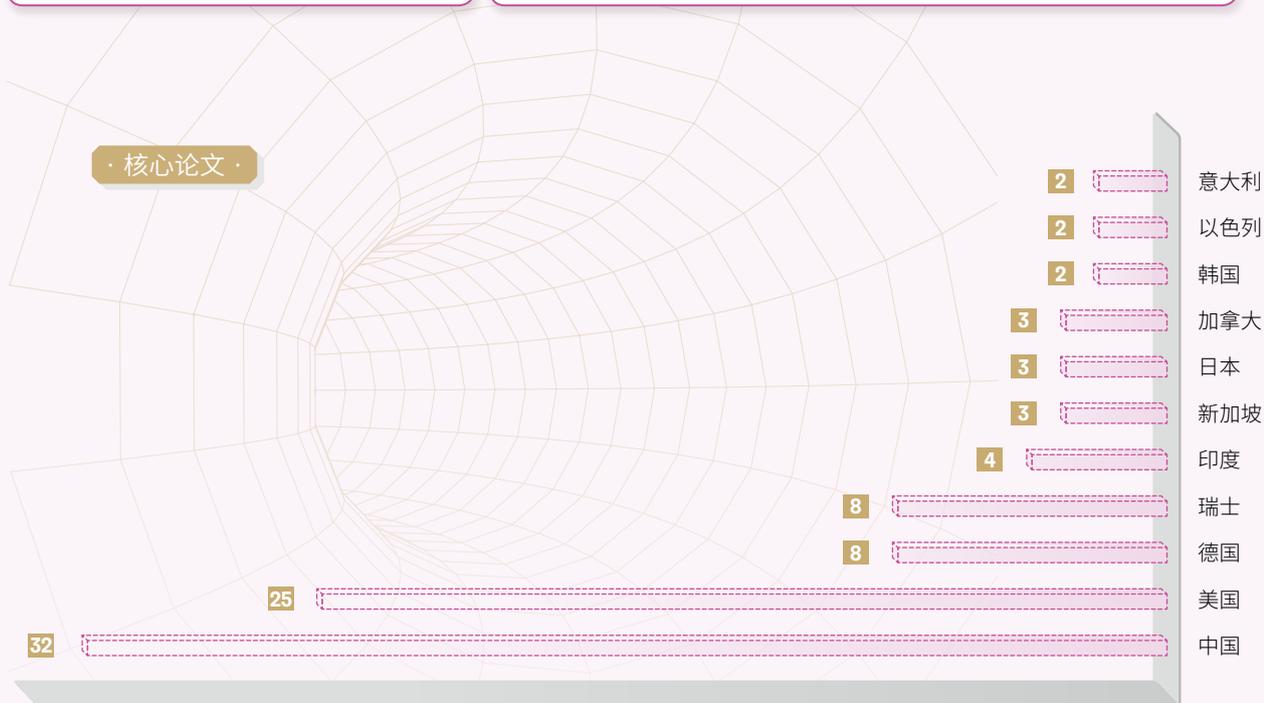
图 19 “笼目超导材料 AV_3Sb_5 的特性研究” 研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

在这个热点前沿中，中国和美国表现最活跃，是核心论文的主要产出国家（表 37）。45 篇核心论文中，中国贡献 32 篇，占核心论文总量的 71.1%，美国参与的有 25 篇，占核心论文总量的 55.6%。德国、瑞士等也有不错的表现。核心论文 Top 机构中，来自中国的有 6 所，美国的有 4 所，德国和瑞士各 1 所。参与核心论文最多的机构是中国科学院，其次为加州大学圣芭芭拉分校和中国人民大学。

表 37 “笼目超导材料 AV_3Sb_5 的特性研究” 研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	中国	32	71.1%	1	中国科学院	中国	23	51.1%
2	美国	25	55.6%	2	加州大学圣芭芭拉分校	美国	16	35.6%
3	德国	8	17.8%	3	中国人民大学	中国	9	20.0%
3	瑞士	8	17.8%	4	波士顿学院	美国	8	17.8%
5	印度	4	8.9%	5	维尔茨堡大学	德国	7	15.6%
6	新加坡	3	6.7%	6	松山湖材料实验室	中国	6	13.3%
6	日本	3	6.7%	7	劳伦斯伯克利国家实验室	美国	6	13.3%
6	加拿大	3	6.7%	7	保罗谢勒研究所	瑞士	6	13.3%

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
9	韩国	2	4.4%	9	南京大学	中国	5	11.1%
9	以色列	2	4.4%	9	普林斯顿大学	美国	5	11.1%
9	意大利	2	4.4%	9	北京理工大学	中国	5	11.1%



该前沿施引论文 Top 产出国家 / 地区 (表 38) 中, 中国和美国仍是最活跃的国家 / 地区, 远超其他国家 / 地区。德国、日本、瑞士也很活跃, 来自中国的机构有 4 家, 美国有 3 家。此外, 德国、瑞士和日本各有 1 家。

表 38 “笼目超导材料 AV_3Sb_5 的特性研究” 研究前沿中施引论文的 Top 产出国家 / 地区和机构

排名	国家 / 地区	施引论文	比例	排名	机构	所属国家	施引论文	比例
1	中国	212	59.1%	1	中国科学院	中国	112	31.2%
2	美国	133	37.0%	2	加州大学圣芭芭拉分校	美国	39	10.9%
3	德国	56	15.6%	3	中国人民大学	中国	29	8.1%
4	日本	43	12.0%	4	松山湖材料实验室	中国	27	7.5%
5	瑞士	29	8.1%	5	南京大学	中国	26	7.2%

排名	国家 / 地区	施引论文	比例
6	新加坡	16	4.5%
6	韩国	16	4.5%
8	加拿大	13	3.6%
8	印度	13	3.6%
10	法国	9	2.5%
10	英国	9	2.5%
10	以色列	9	2.5%
10	中国台湾	9	2.5%

排名	机构	所属国家	施引论文	比例
6	马普学会	德国	23	6.4%
6	普林斯顿大学	美国	23	6.4%
8	劳伦斯伯克利国家实验室	美国	22	6.1%
9	保罗谢勒研究所	瑞士	20	5.6%
10	东京大学	日本	18	5.0%

· 施引论文 ·



1.3 重点热点前沿——“双场量子密钥分发”

当前，量子信息已成为世界主要国家科技发展的聚焦点。量子通信是量子信息的主要领域之一，是量子物理、信息技术和密码技术的融合和创新。量子通信有多个研究方向，其中，初步进入实用化的方向是量子密钥分发（QKD）。基于量子力学原理，QKD理论上可以实现无条件安全通信。QKD通

通过对量子态的制备、传输和检测来实现密钥的安全分发，这些方法的规则称为 QKD 协议。研究人员提出了多种 QKD 协议，从首个 QKD 协议（BB84 协议）、诱骗态 QKD 到测量设备无关 QKD，来不断提高 QKD 的安全性。

要实现 QKD 的实际应用，安全传输距离和成码率是目前研究人

员关注的重点。有研究表明，无中继器的 QKD 或者经典光纤通信系统，都存在通信距离的上限。量子中继器是克服这一限制的方案之一，但尚在进一步研发中。2018 年，东芝欧洲研究所基于单光子干涉的思想，提出了双场量子密钥分发（TF-QKD），打破了无中继 QKD 的距离和成码率限制，同时，TF-

QKD 也是测量设备无关的，具有和测量设备无关 QKD 一样的安全性。TF-QKD 成为了近年来量子密钥分发研究的热点方向。TF-QKD 的改进协议研究以及基于 TF-QKD 的实验正在不断取得突破。

从引文影响力看（图 20），该前沿的 31 篇核心论文中被引频

次最高的 3 篇论文均于 2017 年发表，分别为中国科学技术大学等通过“墨子号”实现 1200 千米的星地量子密钥分发、英国约克大学等发现的传输距离和成码率的限制以及中国科学技术大学等实现 1200 千米的量子纠缠分发，被引频次分别为 578、521 和 431 次。随后是

东芝欧洲研究所 2018 年提出的双场量子密钥分发，被引频次为 384 次。清华大学 2018 年提出的相位调制 QKD、发送 - 不发送 TF-QKD（SNS-TF-QKD）等改进协议，以及中国科学技术大学等 2021 年实现 511 千米的现场 TF-QKD 等论文，也获得了较高的引用。

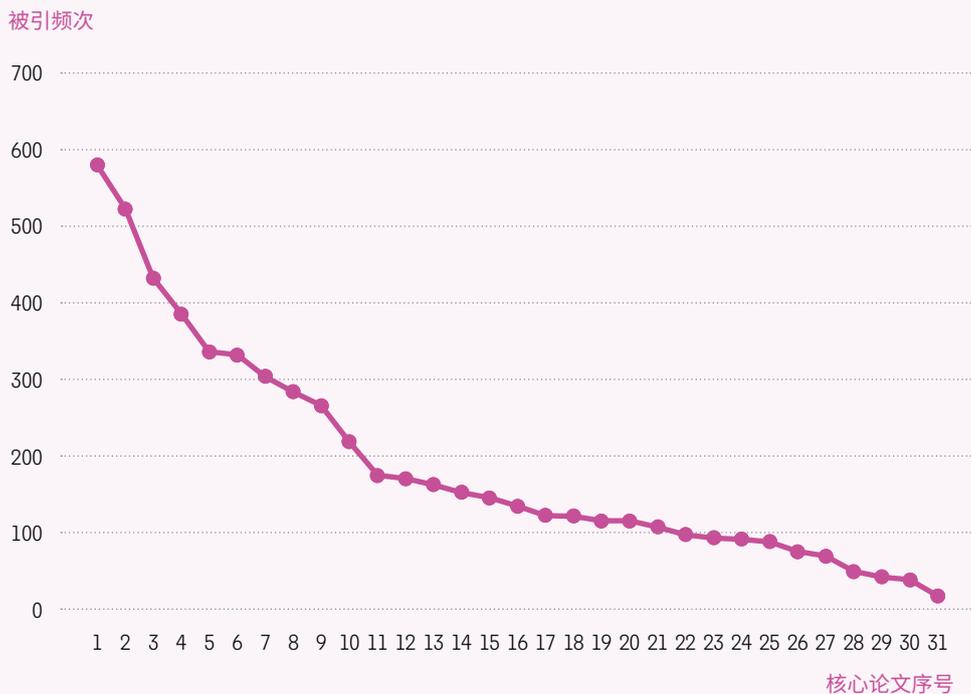


图 20 “双场量子密钥分发”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

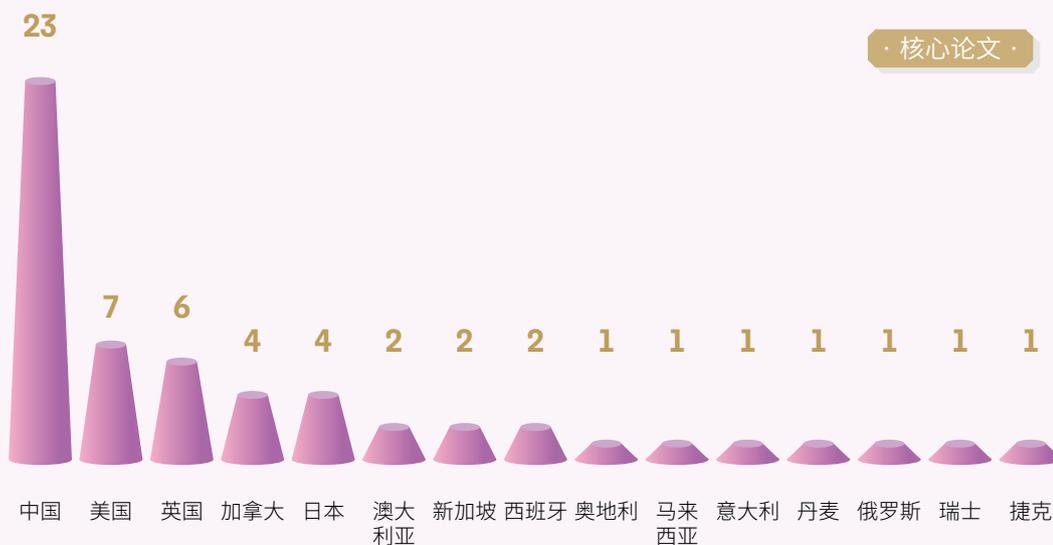
在这个热点前沿中（表 39），中国的表现最活跃，参与了 31 篇核心论文中的 23 篇，占核心论文总量的 74.2%。美国、英国、加拿

大和日本积极参与。核心论文贡献最多的机构是中国科学院，清华大学、英国约克大学、济南量子技术研究院等紧随其后。核心论文 Top

产出机构中，来自中国的有 7 家，英国 2 家，美国、日本和加拿大各有 1 家。

表 39 “双场量子密钥分发”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	23	74.2%	1	中国科学院	中国	18	58.1%
2	美国	7	22.6%	2	清华大学	中国	8	25.8%
3	英国	6	22.6%	3	约克大学	英国	5	16.1%
4	加拿大	4	12.9%	3	济南量子技术研究院	中国	5	16.1%
4	日本	4	3.2%	5	上海微小卫星工程中心	中国	4	12.9%
6	澳大利亚	2	6.5%	5	数据通信科学技术研究所	中国	4	12.9%
6	新加坡	2	6.5%	5	康宁公司	美国	4	12.9%
6	西班牙	2	6.5%	8	东芝集团	日本	3	9.7%
9	奥地利	1	3.2%	8	利兹大学	英国	3	9.7%
9	马来西亚	1	3.2%	8	多伦多大学	加拿大	3	9.7%
9	意大利	1	3.2%	8	北京邮电大学	中国	3	9.7%
9	丹麦	1	3.2%	8	西安卫星测控中心	中国	3	9.7%
9	俄罗斯	1	3.2%					
9	瑞士	1	3.2%					
9	捷克	1	3.2%					



分析该热点前沿施引论文的国家量和机构（表 40）可以发现，中国仍是量最活跃的国家，施引论文数量远超其他国家。美国、英国、德国也非常活跃，有 7 家，英国有 2 家，美国和新加坡各 1 家。

表 40 “双场量子密钥分发”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	1234	47.1%	1	中国科学院	中国	349	13.3%
2	美国	402	15.3%	2	北京邮电大学	中国	108	4.1%
3	英国	307	11.7%	3	中南大学	中国	76	2.9%
4	德国	192	7.3%	4	南京邮电大学	中国	73	2.8%
5	加拿大	143	5.5%	5	约克大学	英国	65	2.5%
6	意大利	126	4.8%	6	清华大学	中国	62	2.4%
7	日本	114	4.4%	7	新加坡国立大学	新加坡	61	2.3%
8	奥地利	91	3.5%	8	南京大学	中国	60	2.3%
9	印度	90	3.4%	9	南安普顿大学	英国	58	2.2%
10	新加坡	86	3.3%	10	麻省理工学院	美国	56	2.1%
				10	上海交通大学	中国	56	2.1%



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 1 项研究入选新兴前沿，即“基于 W 玻色子质量精确测量结果的理论研究”。

表 41 物理学领域的 1 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	基于 W 玻色子质量精确测量结果的理论研究	25	377	2022.0

2.2 重点新兴前沿——“基于 W 玻色子质量精确测量结果的理论研究”

W 玻色子是传递弱力的基本粒子，1983 年被欧洲核子研究中心发现，是标准模型取得重大成功的标志之一。W 玻色子的质量是标准模型的重要基本参数，国际上多个实验对其进行过测量，测量精度不断提高。2022 年，美国费米国家加速器实验室对撞机探测器

(CDF) 合作组发布了迄今为止对 W 玻色子质量的最精确测量，比标准模型的预期结果偏高了 7 个标准偏差。在粒子物理领域，高于 5 个标准偏差通常意味着新的发现，如果实验结果是正确的，就需要引入新物理来修正标准模型。因此，这一结果激起了物理学家的极大兴

趣。这个新兴前沿包含了 25 篇高被引论文，美国、意大利、瑞士、中国、日本等是参与核心论文较多的国家。被引频次最高的论文是 CDF 合作组 2022 年对 W 玻色子质量的最新测量结果，被引频次为 60 次。其他论文对该结果可能存在的新物理进行了理论研究。

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

天文学与天体 物理学



1. 热点前沿及重点热点前沿解读

1.1 天文学与天体物理学领域 Top 10 热点前沿发展态势

天文学与天体物理学领域位居前十位的热点前沿涉及引力波观测和理论、原初黑洞、宇宙再电离时期观测、快速射电暴、弱引力透镜巡天、弦论与宇宙学、银河系恒星晕等研究主题。总体来看，引力波相关研究仍是表现最为突出的研究主题，观测发现和理论研究并举，涌现出“激光干涉仪引力波天文台”和“欧洲引力波探测器”引力波观测活动阶段成果、基于 GW170817

引力波事件观测约束中子星性质、原初黑洞性质及引力波观测、黑洞阴影和四维 Einstein-Gauss-Bonnet 引力理论等多个热点前沿。快速射电暴事件的观测和理论研究再次上榜。2020 年的新兴前沿弦论沼泽地猜想与宇宙学进入 2023 年热点前沿行列。大型科学任务平台产出依旧瞩目，除两大引力波探测器外，“盖亚”发布阶段成果榜上有名。

表 42 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	“激光干涉仪引力波天文台” - “欧洲引力波探测器”引力波瞬态目录 2 及其对致密天体性质的揭示	2	899	2021.0
2	“盖亚”早期数据发布 3	2	485	2021.0
3	黑洞阴影和四维 Einstein-Gauss-Bonnet 引力理论	36	3290	2020.3
4	对宇宙再电离时期的观测研究	45	5529	2019.8
5	重复快速射电暴的观测及性质研究	48	6964	2019.6
6	原初黑洞性质及引力波观测	48	6241	2019.2
7	弦论沼泽地猜想与宇宙学	23	3322	2019.2
8	弱引力透镜巡天观测	12	2948	2019.2
9	基于 GW170817 引力波事件观测约束中子星性质	35	9158	2019.0
10	银河系恒星晕的起源与演化观测	13	2796	2018.9



1.2 重点热点前沿——“‘激光干涉仪引力波天文台’ - ‘欧洲引力波探测器’ 引力波瞬态目录 2 及其对致密天体性质的揭示”

引力波被形象地描述为时空的“涟漪”，由宇宙中如致密天体碰撞并合这样剧烈变化的物理过程产生。2015年，美国“激光干涉仪引力波天文台”（LIGO）首次直接探测到了引力波，印证了爱因斯坦百年前提出的理论预言，并自此开启了引力波天文学的新时代。欧洲“室女座引力波探测器”

（Virgo）和日本“神冈引力波探测器”（KAGRA）先后于2017年和2020年加入引力波探测行列，三者构成了全球引力波探测器网

络，协同合作开展关于致密双星并合、连续引力波和爆发引力波的探测、定位和表征。对相同天体物理源的协同观测可以提升观测认知，特别是通过从地球表面不同地点通过三角测量来定位其方向。

热点前沿“‘激光干涉仪引力波天文台’ - ‘欧洲引力波探测器’ 引力波瞬态目录 2 及其对致密天体性质的揭示”包括2篇核心论文，论述了对LIGO和Virgo在第三次

观测前半段（O3a，2019年4月-10月）开展联合观测的情况、获得的引力波瞬态目录2（GWTC-2）及其反映出的致密天体总体性质，质量分布、自旋分布、并合速率的红移演化等。O3a运行于2019年4月1日至10月1日，在此前公布的引力波瞬态目录1（GWTC-1）列出的11个已确认事件的基础上新增了39个引力波事件，使GWTC-2中事件总数达到了50个。O3a的发现涵盖了广泛天体物理参数，这些参数分别与双黑洞并合、



双中子星并合以及中子星黑洞并合事件的理论值一致。O3a 运行期间还发现了一些特别有趣的引力波事件：有史以来第二例观测到的双中子星并合，质量绝对不相等的双黑洞并合，总质量约为 150 倍太阳质量的超重双黑洞并合等。2 篇核心论文都是由来自全球 200 余家科研

机构的科学家合作完成的，充分体现出大科学计划的国际合作特点，鉴于参与国家和机构众多，不再一一列举。

从施引论文角度来看，美国的施引论文量遥遥领先，占比 45.6%；英国、德国、中国位列第 2-4

位，比例接近。施引论文产出机构中，德国马普学会位列第一，意大利国家核物理研究院、美国加州理工学院、中国科学院紧随其后。施引论文 Top 10 机构中，美国机构三家，德国、意大利、中国、法国、澳大利亚、日本、英国各一家。

表 43 “‘激光干涉仪引力波天文台’ - ‘欧洲引力波探测器’引力波瞬态目录 2 及其对致密天体性质的揭示”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	346	45.6%	1	马普学会	德国	113	14.9%
2	英国	182	24.0%	2	意大利国家核物理研究院	意大利	105	13.9%
3	德国	172	22.7%	3	加州理工学院	美国	93	12.3%
4	中国	160	21.1%	4	中国科学院	中国	91	12.0%
5	意大利	120	15.8%	5	法国国家科学研究中心	法国	81	10.7%
6	法国	92	12.1%	6	西北大学	美国	61	8.0%
7	西班牙	88	11.6%	7	莫纳什大学	澳大利亚	56	7.4%
8	日本	86	11.3%	7	东京大学	日本	56	7.4%
9	荷兰	83	10.9%	9	麻省理工学院	美国	54	7.1%
10	澳大利亚	80	10.6%	9	伯明翰大学	英国	54	7.1%



1.3 重点热点前沿——“重复快速射电暴的观测及性质研究”

2007年，科学家在分析澳大利亚帕克斯（Parkes）望远镜的历史存档观测数据时，首次发现了快速射电暴（FRB）这一神秘的天文现象。快速射电暴是在射电波段宇宙中最剧烈的爆发现象，其电磁辐射脉冲的持续时间通常只有几毫秒，却能够释放出相当于太阳在一整年内释放的能量，但其物理起源未知，是天文学领域研究热点之一。根据观测性质，天文学家目前普遍认为快速射电暴与致密天体，

特别是具有强磁场的致密天体爆发活动等有关。快速射电暴可以发出多个频率的射电波，可能在任何时间出现在天空中的任何位置。截至2023年7月，全球观测到的快速射电暴事件已达675例。

在观测上，虽然大多数快速射电暴被观察为单一事件，但其中一小部分被观测到在不同的时间尺度上重复，因此可将快速射电暴分为重复和非重复快速射电暴两类。在重复爆发的活跃期，天文学家可

以有准备地实施定位和监测，有助于精确定位和搜寻多波段对应体和宿主星系，从而可能解决快速射电暴的起源与演化等科学问题。天文学家于2016年发现首例重复快速射电暴FRB 20121102A，后续的系列观测将其定位至一个低金属含量的矮星系，还首次发现FRB 20121102A具有致密的持续射电源，在射电波段具有显著超出银河系内射电天体的亮度，FRB 20121102A中的持续射电源同快速

射电暴间应必然存在联系。

中国科研机构利用 500 米口径球面射电望远镜 (FAST) —— “中国天眼”，对首例重复快速射电暴 FRB 20121102A 开展探测，累积捕捉到大量的高信噪比脉冲。2019 年，中国国家天文台牵头的国际研究团队利用 “中国天眼”，发现了迄今为止唯一一例持续活跃的重复快速射电暴 FRB 20190520B。之后该团

队通过组织多台国际设备天地协同观测，综合射电干涉阵列、光学、红外望远镜以及空间高能天文台的数据，将 FRB 20190520B 定位为一个距离地球 30 亿光年的贫金属的矮星系，确认近源区域拥有目前已知的最大电子密度，并发现了迄今第二个快速射电暴持续射电源对应体。未来 “中国天眼” 有望在快速射电暴领域取得更多重要发现。

热点前沿 “重复快速射电暴的观测及性质研究” 包括 48 篇核心论文，内容涉及对首例重复快速射电暴 FRB 20121102A 和首例持续活跃快速射电暴 FRB 20190520B 事件的观测发现、性质研究以及对其宿主星系的定位等研究。其他重要研究主题还包括基于以上观测发现的快速射电暴理论模型研究等。

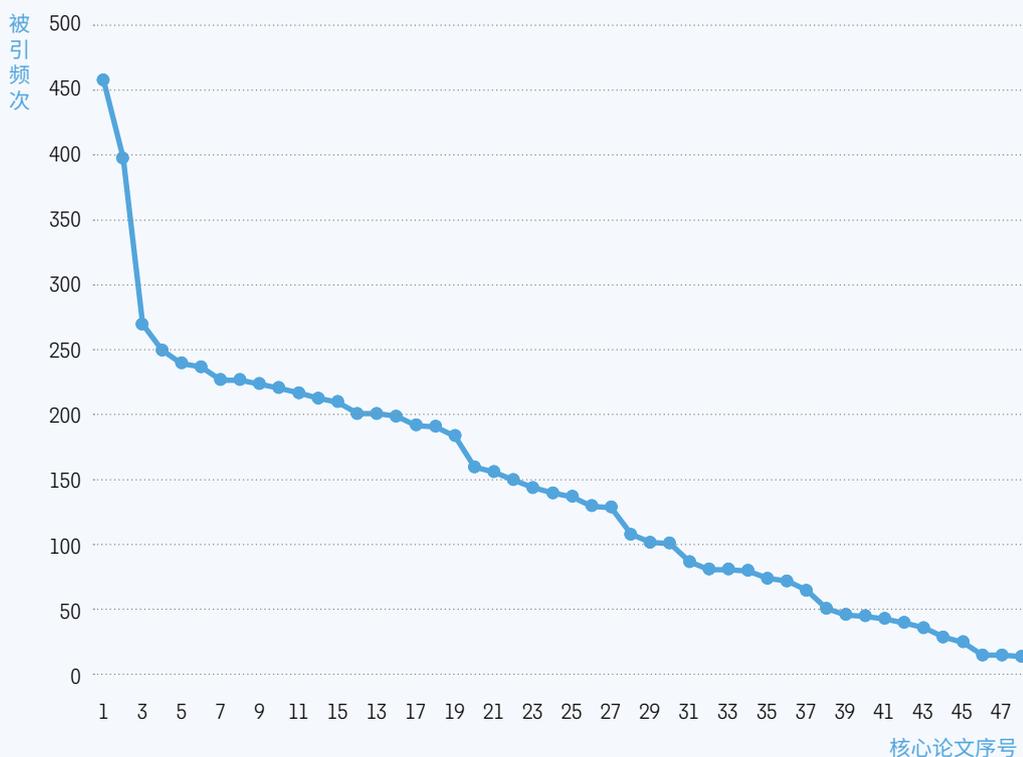


图 22 “重复快速射电暴的观测及性质研究” 研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

美国阿雷西博天文台 (Arecibo Observatory)、加拿大 “加拿大氢强度测绘实验” (CHIME)、“中

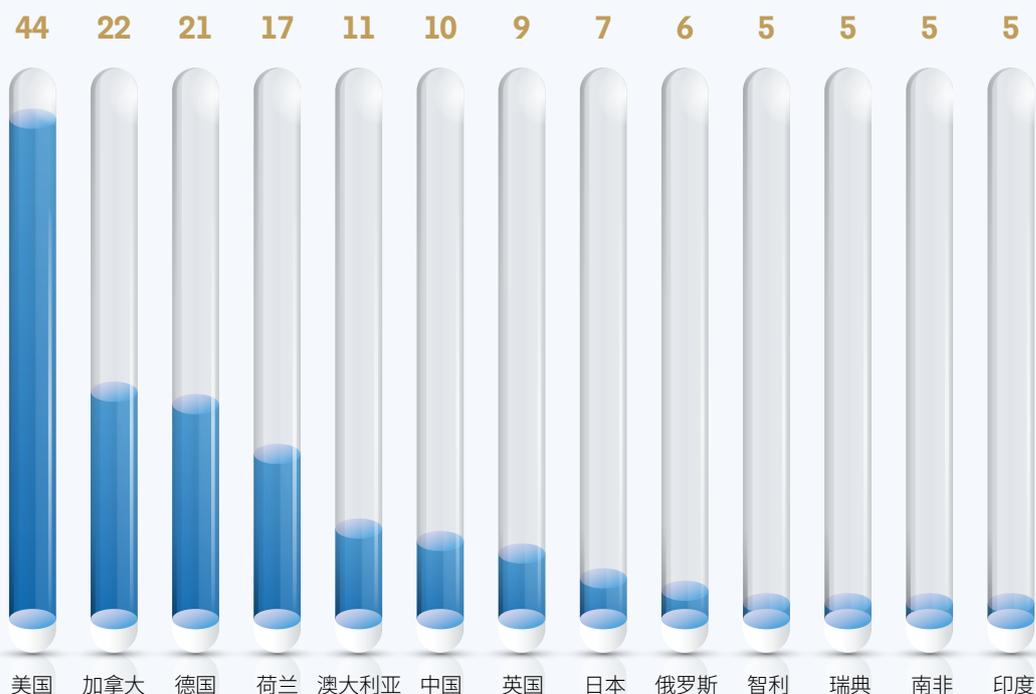
国天眼” 等作为快速射电暴事件的重要观测平台，其相关国家和研究机构都在核心论文和施引论文的产

出中表现良好，美国更是在该研究前沿中贡献了超过 90% 的核心论文。

表 44 “重复快速射电暴的观测及性质研究” 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	44	91.7%	1	西弗吉尼亚大学	美国	22	45.8%
2	加拿大	22	45.8%	2	麦吉尔大学	加拿大	19	39.6%
3	德国	21	43.8%	3	马普学会	德国	18	37.5%
4	荷兰	17	35.4%	3	美国国家射电天文台	美国	18	37.5%
5	澳大利亚	11	22.9%	5	荷兰射电天文学研究所	荷兰	15	31.3%
6	中国	10	20.8%	5	加州理工学院	美国	15	31.3%
7	英国	9	18.8%	7	阿姆斯特丹大学	荷兰	14	29.2%
8	日本	7	14.6%	7	加拿大国家研究委员会	加拿大	14	29.2%
9	俄罗斯	6	12.5%	9	多伦多大学	加拿大	13	27.1%
10	智利	5	10.4%	10	圆周理论物理研究所	加拿大	11	22.9%
10	瑞典	5	10.4%	10	美国国家航空航天局	美国	11	22.9%
10	南非	5	10.4%	10	麻省理工学院	美国	11	22.9%
10	印度	5	10.4%					

· 核心论文 ·



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。相对核心论文，中国在施引论文方面表现更佳，表现出良好发展态势。澳大利亚、德国、英

国的施引论文排名位列第 3-5 位。施引论文 Top10 产出机构中，中国科学院产出了较多的研究成果，施引论文数量位居首位。德国的马普学会和澳大利亚的联邦科学与工业

研究组织也积极跟进该研究方向，施引论文数分列第二和第三位，美国研究机构在 Top10 中也占据了三席。

表 45 “重复快速射电暴的观测及性质研究” 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	所属国家	施引论文	比例
1	美国	601	53.7%	1	中国科学院	中国	177	15.8%
2	中国	294	26.3%	2	马普学会	德国	145	12.9%
3	澳大利亚	209	18.7%	3	联邦科学与工业研究组织	澳大利亚	125	11.2%
4	德国	207	18.5%	4	加州理工学院	美国	119	10.6%
5	英国	191	17.1%	5	阿姆斯特丹大学	荷兰	109	9.7%
6	加拿大	186	16.6%	6	西弗吉尼亚大学	美国	103	9.2%
7	荷兰	174	15.5%	7	西澳大利亚大学	澳大利亚	99	8.8%
8	意大利	118	10.5%	8	加州大学伯克利分校	美国	94	8.4%
9	日本	115	10.3%	9	多伦多大学	加拿大	92	8.2%
10	南非	101	9.0%	10	意大利国家天体物理研究所	意大利	89	7.9%



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“俄德合作‘光谱-RG’空间天文台上的 eROSITA 望远镜观测结果”和“事件视界望远镜对人马座 A* 超大质量黑洞的观测”，下面选择前者进行重点解读。

表 46 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	俄德合作“光谱-RG”空间天文台上的 eROSITA 望远镜观测结果	6	344	2021.7
2	事件视界望远镜对人马座 A* 超大质量黑洞的观测	7	280	2022.0

2.2 重点新兴前沿——“俄德合作‘光谱-RG’空间天文台上的 eROSITA 望远镜观测结果”

于 2019 年 7 月 13 日发射的“光谱-RG” (Spektr-RG) 空间天文台是一项俄德合作空间天体物理学任务，旨在从距离地球 150 万千米远的地月系统拉格朗日 L2 点以 X 波段研究宇宙，绘制 X 波段可观测宇宙中的所有大质量结构。

“光谱-RG”搭载了 two 台科学仪器，分别是俄罗斯科学院空间研究所制造的 ART-XC 望远镜和德国马克斯·普朗克地外物理研究所制造的 eROSITA 望远镜。两台望远镜将扫描天球，获得不同能量范围 (eROSITA 覆盖 0.2-8 keV, ART-XC 覆盖 4-30 keV) 的全天 X 射线图谱。eROSITA 于 2019 年 12 月正式开始对整个天空开展巡天观测，计划对

天球开展 8 次完整的扫描，每次扫描为期 6 个月，持续进行至 2023 年底，随后还将开展定点观测。但是在 2022 年 2 月，由于俄德终止空间合作，eROSITA 被调整为安全模式，科学任务运行暂停，对已获得的科学数据的分析工作仍在继续。

新兴前沿“俄德合作‘光谱-RG’空间天文台上的 eROSITA 望远镜观测结果”共包括 6 篇核心论文，分别论述了“光谱-RG”任务，ART-XC 和 eROSITA 望远镜的性能及首批科学成果，eROSITA 望远镜地面测试和空间运行情况，以及 eROSITA 望远镜在校准和测试阶段开展的最终赤道深度巡天 (eFEDS) 取得的系列科学成果，包括星系团

目录、活动星系核目录、X 射线目录、点源对应物的识别和表征等。

驱动宇宙分裂的神秘暗能量性质是当今天文学和物理学领域最令人兴奋的问题之一，其答案有望成为物理学领域发生根本性变革的起点。星系团是宇宙中最大的坍缩天体，其形成和演化受到引力 (即暗物质) 的支配，大尺度分布和数密度则取决于宇宙的几何形状 (即暗能量)。对星系团的 X 射线观测可提供关于宇宙膨胀速率、可见物质质量比以及原初涨落振幅的信息。eROSITA 将通过 X 射线全天巡天观测，为更好了解暗能量、暗物质、黑洞以及迄今尚未观测到的新现象提供新见解。

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS



2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

数学

$$\int x^n dx = x^{n+1}/(n+1) + c$$

$$\int a^x dx =$$

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扩展物理神经网络、Onsager 猜想的证明、非线性时间分数阶反应扩散方程、样本均数最优估计方法研究、二阶能量稳定 BDF 数值格式、非线性动力学系统收敛性研究、基于随机块模型的社区发现、基于深度学习的高维偏数值算法、回归不连续性

设计、贝叶斯多层次模型及应用研究等研究方向。与往年相比，2023 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，Onsager 猜想的证明是该领域亮点研究成果的突出代表。

表 47 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	扩展物理神经网络	8	860	2020.1
2	Onsager 猜想的证明	4	294	2019.5
3	非线性时间分数阶反应扩散方程	34	2708	2019.1
4	样本均数最优估计方法研究	2	962	2019.0
5	二阶能量稳定 BDF 数值格式	34	2534	2018.6
6	非线性动力学系统收敛性研究	12	1270	2018.4
7	基于随机块模型的社区发现	7	561	2018.4
8	基于深度学习的高维偏微分方程数值算法	7	3448	2018.3
9	回归不连续性设计	7	1052	2018.3
10	贝叶斯多层次模型及应用研究	14	9444	2018.0



1.2 重点热点前沿——“Onsager 猜想的证明”

在流体动力学中，欧拉 (Euler) 方程是一组支配无黏性流体运动的方程，由数学家 Euler 在 1757 年提出。方程组各方程分别代表质量守恒 (连续性)、动量守恒及能量守恒，对应零黏性及无热传导项的 Navier-Stokes 方程。Euler 方程是流体力学的基本方程，因而其应用也非常广泛。在农业、地球科学、生命科学、航空航天等领域，Euler 方程都有着十分重要的意义。以航空航天为例，飞行器的设计需要考虑其空气动力学结构，而空气作为流体，则会遵循以 Euler 方程为代表的流体力学基本原理。

1949 年，诺贝尔化学奖得主、挪威裔物理化学家 Lars Onsager 在研究湍流现象时，形式推导出一个关于三维不可压 Euler 方程的弱解是否能保持能量守恒的猜想：对于 $\alpha > 1/3$ ，任意具有空间 Hölder- α 连续性的解都会保持能量守恒；而反过来，对于 $\alpha \leq 1/3$ ，则可能存在具有空间 Hölder- α 连续性但能量不守恒的解。换言之，Onsager 猜想认为三维不可压 Euler 方程发生反常耗散的空间 Hölder 连续性的临界指标是 $1/3$ 。

Onsager 猜想中正面陈述部分 (即 $\alpha > 1/3$ 的情形) 在 1994 年由 Gregory Eyink 取得部分进展，同年，

Peter Constantin、鄂维南和 Edriss Titi 完成了该部分的证明。Onsager 猜想中的反面陈述部分也取得了一系列重要进展。2009 年，Camillo De Lellis 和 László Székelyhidi, Jr. 将凸积分方法应用到研究 Euler 方程具有低正则性的解的非唯一性上来，并在 2014 年证明了 Onsager 猜想对于 $\alpha \leq 1/10$ 成立。在此后的一系列工作中，这一方法被不断改进，Hölder 指标 α 的范围也不断被扩大。2018-2019 年，Philip Isett 和 Tristan Buckmaster 等分别证明了 Onsager 猜想的反面陈述部分对 $\alpha < 1/3$ 成立。目前， $\alpha = 1/3$ 的端点情形仍是一个公开问题^③。

③ 部分内容来自北京国际数学研究中心童嘉骏教授撰写的“反常耗散”一文。

热点研究前沿“Onsager 猜想的证明”包括 4 篇核心论文。其中被引频次最高的 2 篇核心论文即 Philip Isett 以及 Tristan Buckmaster 等学者对 Onsager 猜想中的反面

陈述部分的最终证明。其他两篇核心论文聚焦在基于凸积分的分析框架应用于包括三维不可压 Navier-Stokes 方程在内的其他众多流体方程问题，从而构造非唯一的解或者

具有特殊能量函数的解。这一系列研究工作的主要贡献人员 Philip Isett、Tristan Buckmaster 以及 Vlad Vicol 也因此荣获 2019 年克雷研究奖。



图 24 “Onsager 猜想的证明”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

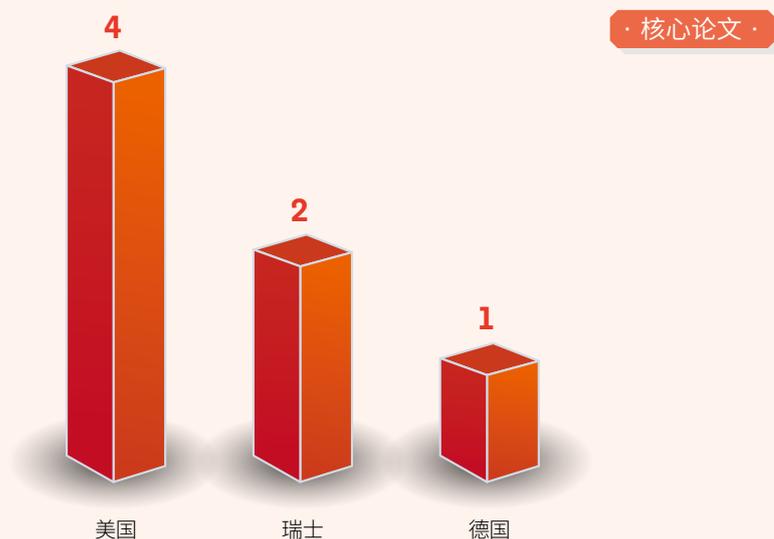
从该前沿核心论文的产出国家和机构来看（表 48），系列研究工作的核心贡献人员主要来自美国，所在机构包括普林斯顿大学、

纽约大学、加州理工学院和德克萨斯大学奥斯汀分校。来自瑞士、德国的研究机构，包括瑞士洛桑联邦理工学院、苏黎世大学以及德国莱

比锡大学也积极参与了该热点前沿的研究工作。

表 48 “Onsager 猜想的证明”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

排名	国家	核心论文	比例	排名	机构	所属国家	核心论文	比例
1	美国	4	100.0%	1	普林斯顿大学	美国	3	75.0%
2	瑞士	2	50.0%	2	纽约大学	美国	2	50.0%
3	德国	1	25.0%	3	加州理工学院	美国	1	25.0%
				3	莱比锡大学	德国	1	25.0%
				3	德克萨斯大学奥斯汀分校	美国	1	25.0%
				3	洛桑联邦理工学院	瑞士	1	25.0%
				3	苏黎世大学	瑞士	1	25.0%



从该研究前沿的施引论文情况来看（表 49），美国依然占据领先地位，贡献了超过三分之一的施引论文。德国和中国等国家也在该

前沿积极跟进。施引论文 Top 产出机构中，美国、德国的研究机构分别占据 4 席和 3 席。参与度居于前列的典型机构包括法国国家科学研

究中心、德国莱比锡大学、美国普林斯顿大学、美国纽约大学以及中国科学院等。

表 49 “Onsager 猜想的证明” 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	59	35.1%	1	法国国家科学研究中心	法国	11	6.5%
2	德国	37	22.0%	1	莱比锡大学	德国	11	6.5%
3	中国	36	21.4%	1	普林斯顿大学	美国	11	6.5%
4	瑞士	17	10.1%	4	纽约大学	美国	9	5.4%
5	法国	16	9.5%	5	中国科学院	中国	8	4.8%
6	英国	14	8.3%	5	捷克共和国科学院	捷克	8	4.8%
7	意大利	11	6.5%	5	伊利诺伊大学芝加哥分校	美国	8	4.8%
8	捷克	10	6.0%	8	洛桑联邦理工学院	瑞士	7	4.2%
9	波兰	7	4.2%	9	柏林工业大学	德国	6	3.6%
10	以色列	6	3.6%	9	德州农工大学	美国	6	3.6%
10	西班牙	6	3.6%	9	比勒费尔德大学	德国	6	3.6%
				9	剑桥大学	英国	6	3.6%
				9	魏茨曼科学研究所	以色列	6	3.6%



1.3 重点热点前沿——“基于随机块模型的社区发现”

随着社交网络、生物网络等复杂网络研究的兴起，社区发现已成为网络科学的核心任务之一。社区通常被定义为网络中的一组节点，这些节点之间的相互连接比其他节点的相互连接更为紧密。传统上，虽然已有多种社区发现方法，但不仅缺乏有效的统计模型，其在处理大规模或多层次社区结构时也面临诸多挑战。而随机图模型，例如 Erdős-Rényi 模型，在描述实际社区结构能力方面也常存在局限。在此背景下，随机块模型 (SBM) 应运而生，它通过为节点分配至不同的“块”或社区，可以利用特定的概率矩阵描述不同社区之间的连接。此外，随机块模型还能基于网络异构性整合节点和边的各种属性，可作为社区发现的重要统计框架，为

解析网络社区结构提供更为灵活、精确和系统的方法。当前，为了适应更多不同类型的网络数据和更加复杂的社区结构，在大规模网络、模型扩展与细化、计算效率与算法、多层网络与动态社区发现等方面，随机块模型正逐渐取得突破，发展成为一种多面向工具，并被广泛应用于社交网络、生物信息学、市场分析、推荐系统、安全检测、疾病传播和流行病学研究等多个学科领域。

“基于随机块模型的社区发现”重点热点前沿，共包含 7 篇核心论文，作为 2023 年研究前沿数学领域中统计方向的代表，该热点前沿体现了随机块模型研究当前及未来的关键突破方向：随机块模型在社区发现应用时信息论和计算阈值边界、不同恢复精度要求及其算

法，通过动态随机块模型对时态网络的统计聚类研究，关注随机块模型及其变种的高效网络交叉验证算法，用于动态网络社区发现的全局谱聚类检测方法，用于社区发现和结构识别优化问题的随机块模型半定规划 (Semidefinite Programming, SDP)，用于随机块模型社区发现的统计机器学习方法等。该热点前沿被引频次最高的论文出自普林斯顿大学应用与计算数学系的 Emmanuel Abbe 教授，被引频次高达 224 次，论文介绍了随机块模型在社区发现中的最新进展，重点讨论了从数据中恢复真实社区结构的信息论阈值和计算阈值，以及如精确恢复、部分恢复和弱恢复等的各种恢复需求，还介绍了为实现这些目标而开发的算法及开放性问题。

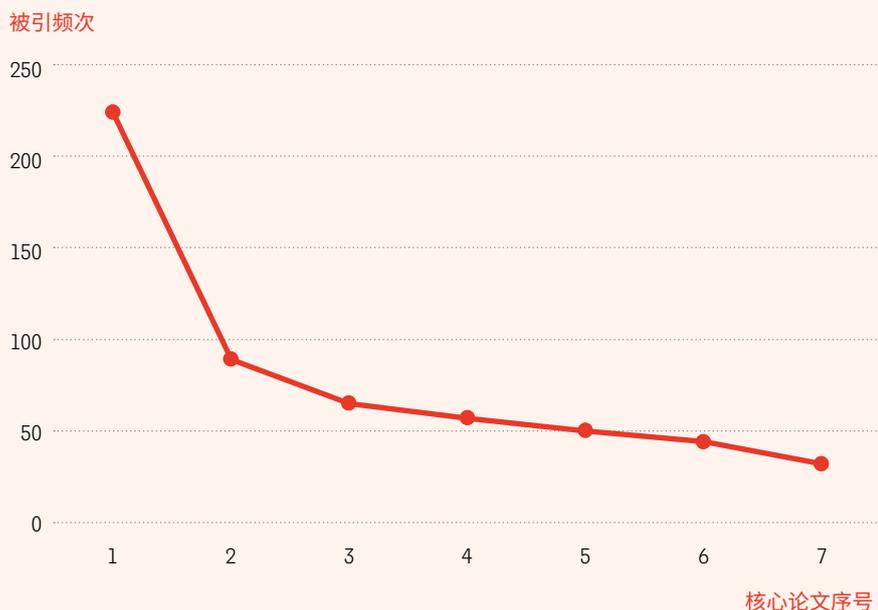


图 25 “基于随机块模型的社区发现”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

从该研究前沿核心论文产出国家来看（表 50），美国占据绝对优势地位，组成该前沿的 7 篇核心论文中，有 6 篇来自美国，占比高达 85.7%。除美国外，还有一篇核心论文来自法国。从核心论文产出

机构来看，排名第一的 3 家机构均来自美国，分别为普林斯顿大学、密西根大学和卡内基梅隆大学，均贡献 2 篇核心论文。另外，在发表一篇核心论文的 8 家机构中，除美国的加州大学洛杉矶分校、弗吉尼

亚大学、匹兹堡大学 3 家机构外，其他 5 家机构均来自法国，显示出美国和法国在该前沿领域的国际领先地位。

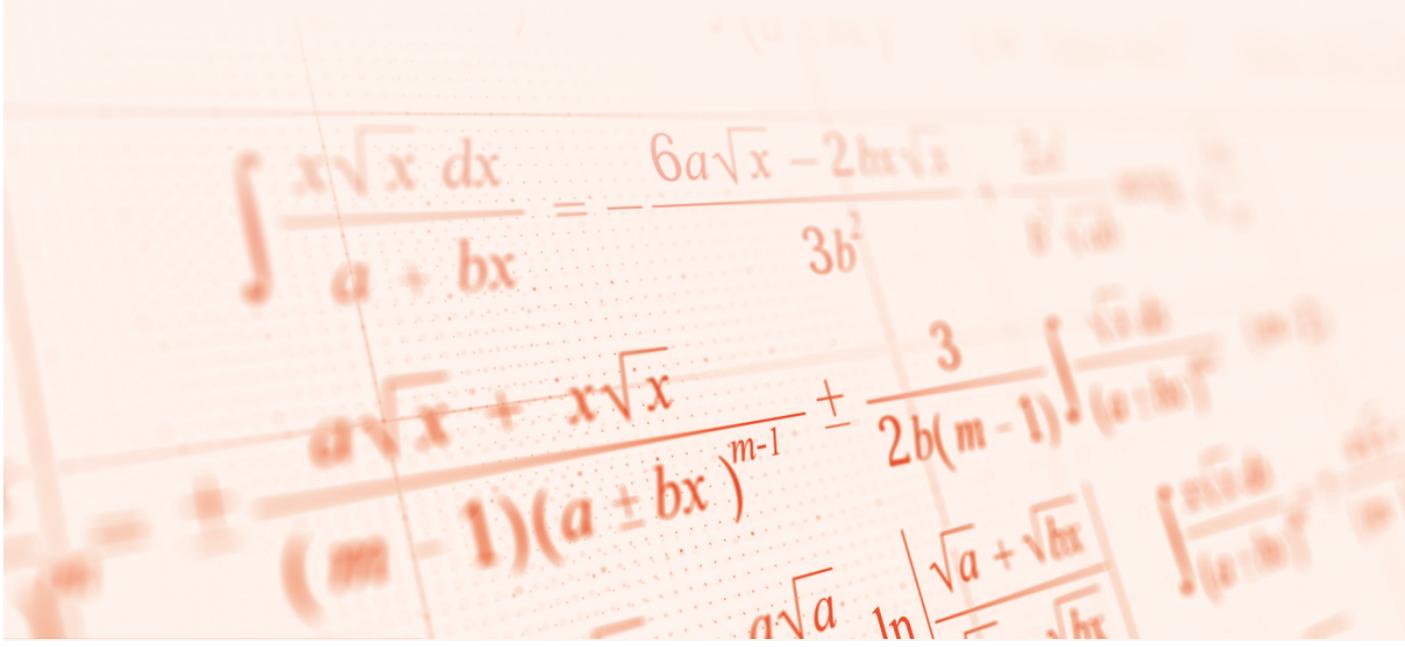
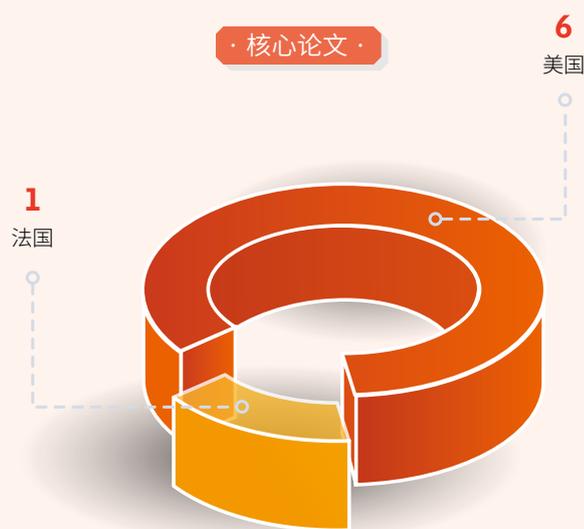


表 50 “基于随机块模型的社区发现”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

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	6	85.7%	1	普林斯顿大学	美国	2	28.6%
2	法国	1	14.3%	1	密西根大学	美国	2	28.6%
				1	卡内基梅隆大学	美国	2	28.6%
				4	巴黎西岱大学	法国	1	14.3%
				4	里昂大学	法国	1	14.3%
				4	加州大学洛杉矶分校	美国	1	14.3%
				4	克莱蒙 - 奥弗涅大学	法国	1	14.3%
				4	索邦大学	法国	1	14.3%
				4	弗吉尼亚大学	美国	1	14.3%
				4	法国国家科学研究中心	法国	1	14.3%
				4	匹兹堡大学	美国	1	14.3%



从该研究前沿施引论文的角度看（表 51），美国仍保持领先地位，产出施引论文 168 篇，贡献率超过 50%。值得关注的是，中国在该前沿领域正积极跟进，产出施引

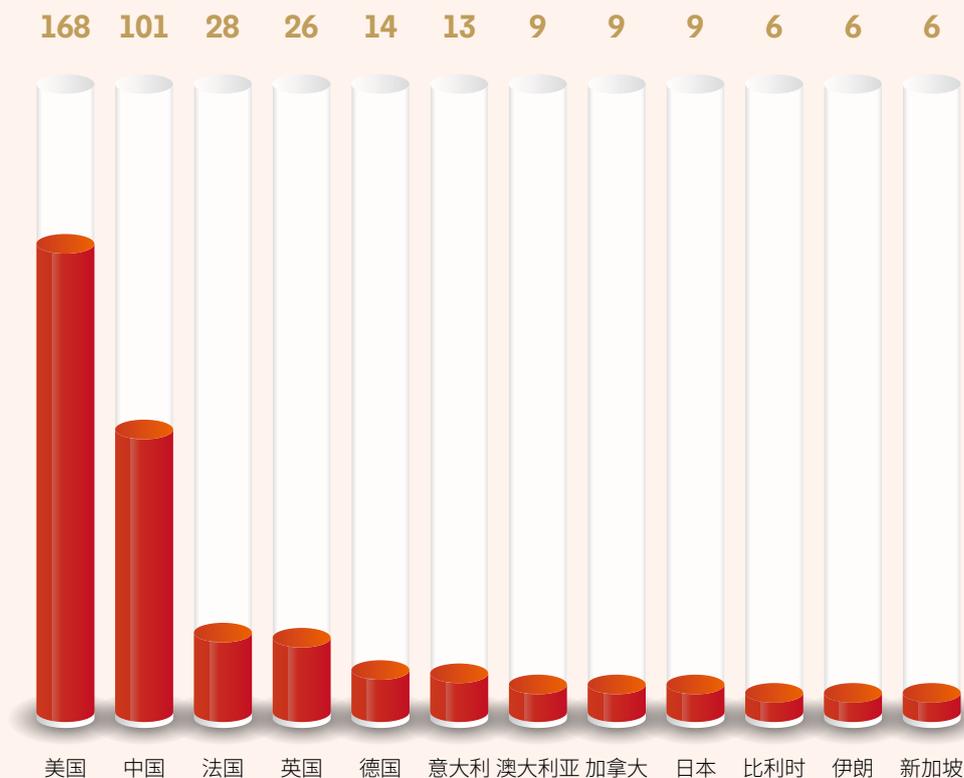
论文 101 篇，以明显优势占据次席。施引论文 Top 产出机构中，美国有 7 家机构上榜，数量最多，核心论文产出中表现抢眼的卡内基梅隆大学、普林斯顿大学、密西根大学仍

榜上有名。法国有 3 家机构上榜，其中法国国家科学研究中心在施引论文产出中表现比较突出。

表 51 “基于随机块模型的社区发现”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	168	52.5%	1	卡内基梅隆大学	美国	21	6.6%
2	中国	101	31.6%	2	法国国家科学研究中心	法国	15	4.7%
3	法国	28	8.8%	2	普林斯顿大学	美国	15	4.7%
4	英国	26	8.1%	2	密西根大学	美国	15	4.7%
5	德国	14	4.4%	5	宾夕法尼亚大学	美国	12	3.8%
6	意大利	13	4.1%	6	加州大学戴维斯分校	美国	11	3.4%
7	澳大利亚	9	2.8%	7	法国国家农业食品与环境研究院	法国	9	2.8%
7	加拿大	9	2.8%	7	斯坦福大学	美国	9	2.8%
7	日本	9	2.8%	7	加州大学伯克利分校	美国	9	2.8%
10	比利时	6	1.9%	7	巴黎-萨克雷大学	法国	9	2.8%
10	伊朗	6	1.9%					
10	新加坡	6	1.9%					

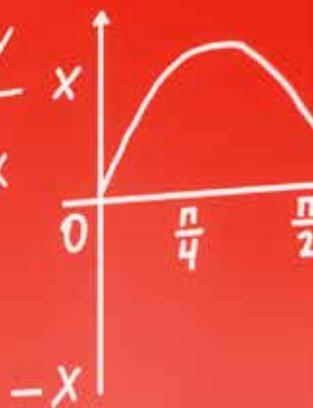
· 施引论文 ·



$$\sqrt{\sum_{t=2}^n (y_t - \bar{y}_1)^2 \cdot \sum_{t=2}^n (y_{t-1} - \bar{y}_2)^2}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

$$\tilde{G}^2(\varepsilon) = \tilde{S}^2(\varepsilon) = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-2} \cdot \frac{\sum_{t=2}^n y_t}{\sum_{t=2}^n y_{t-1}} \cdot \frac{\sum y}{\sum x}$$



$$\sum_{i=1}^N \nabla x_f \cdot \nabla y_f$$

$$\varepsilon_{ex} = \frac{dQ_{ex}}{de} \cdot \frac{e}{Q_{ex}}; \varepsilon_{im} = \frac{dQ_{im}}{de} \cdot \frac{e}{Q_{im}}$$

Integrate

$$NE(e) = Q_{ex}(e) - e Q_{im}(e)$$

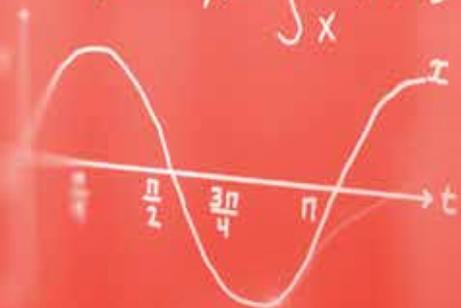
$$\frac{8}{105} (x + \sqrt{x})$$

$$x_{lu} = \frac{\sum p_0 q_1}{\sum q_1} + \frac{\sum p_0 q_0}{\sum q_0}$$

$$\Delta NE = \frac{dQ_{ex}}{de} \Delta e - e \frac{dQ_{im}}{de} \Delta e - e Q_{im} \cdot (4)$$

$$\beta_{yx} = r_{yx} \cdot \frac{\sum y}{\sum x} \cdot (4)$$

$$B(a, b) = \int_0^1 (1-x)^{b-1} d \frac{x^a}{a} = \beta_{yx} = r \cdot \frac{1}{56} (7 + \sqrt{7})$$



$$= \frac{x^2(1-x)^{b-1}}{a} \Big|_0^1 + \frac{b-1}{a} \int_0^1 x^a (1-x)^{b-2} dx = f(x) = \frac{a_0}{2}$$

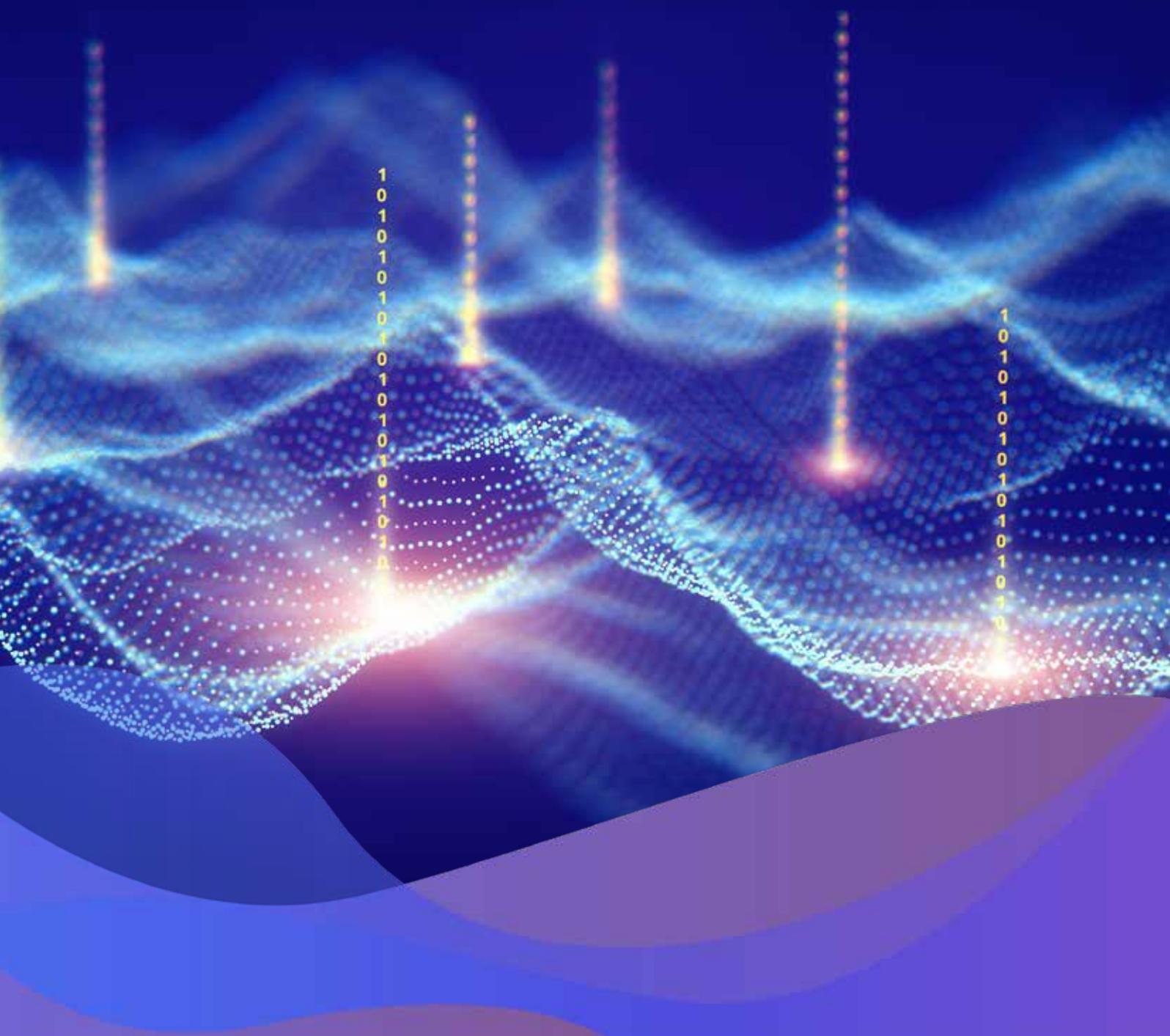
$$= \frac{b-1}{a} \int_0^1 x^{a-1} (1-x)^{b-2} dx - \frac{b-1}{a} \int_0^1 x^{a-1} (1-x)^{b-2} dx$$

$$= \frac{b-1}{a} B(a, b-1) - \frac{b-1}{a} B(a, b-1)$$

$$B(a, b) = \frac{b-1}{a+b-1} B(a, b-1)$$

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

信息科学



1. 热点前沿及重点热点前沿解读

1.1 信息科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

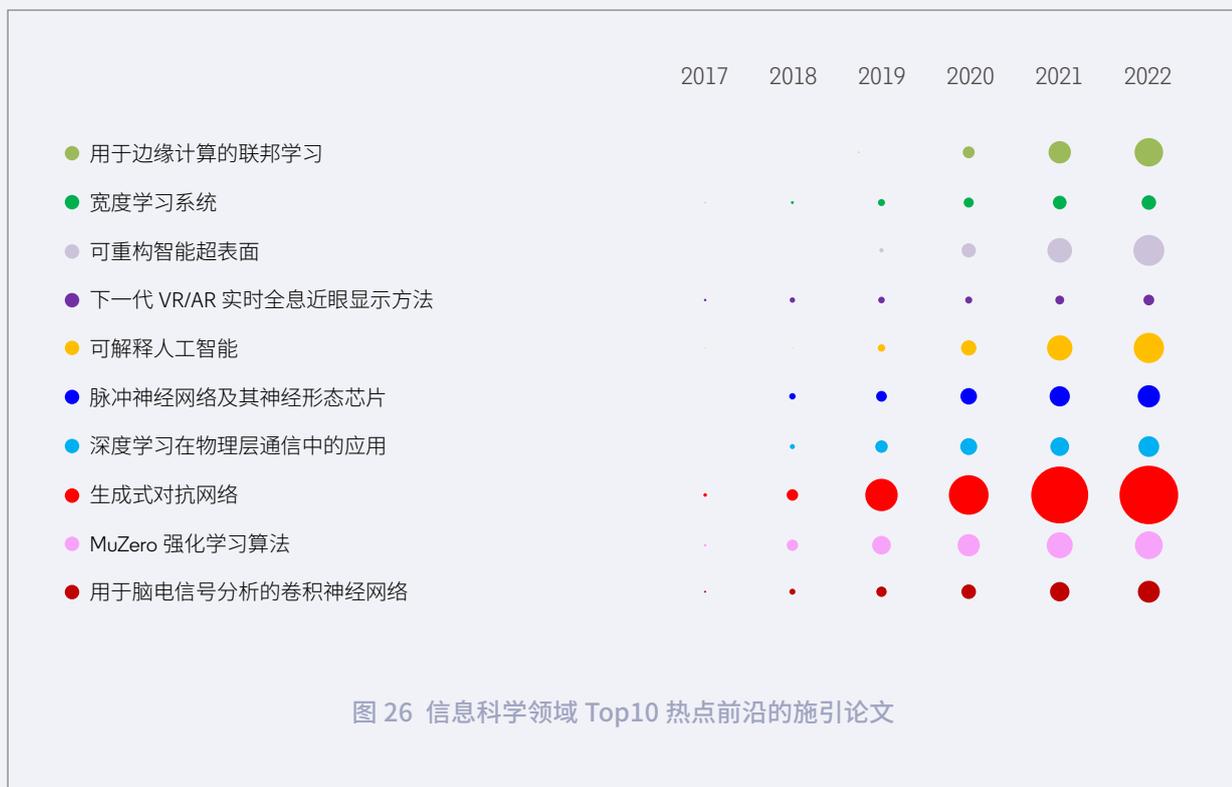
信息科学领域位居前十位的热点前沿主要集中于人工智能基础理论方法、6G 通信、人-机交互、类脑智能、医学信息处理等方向(表 52)。人工智能基础理论方法方面的热点前沿有 5 个,生成式对抗网络、宽度学习系统、用于边缘计算的联邦学习成为新的热点前沿,可

解释人工智能从去年的新兴前沿成为今年的热点前沿;强化学习相关前沿多次出现在热点前沿中,本期重点是推动强化学习解决真实世界问题的 MuZero 算法。6G 通信方面的热点前沿有两个,深度学习在物理层通信中的应用首次成为热点前沿,可重构智能超表面是从去

年的新兴前沿进入到今年的热点前沿。在人-机交互方面,下一代 VR/AR 实时全息近眼显示方法首次成为热点前沿。在类脑智能方面,脉冲神经网络及其神经形态芯片首次出现。在医学信息处理方面,用于脑电信号分析的卷积神经网络首次成为热点前沿。

表 52 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	用于边缘计算的联邦学习	22	3682	2020.2
2	宽度学习系统	6	1053	2020.0
3	可重构智能超表面	32	9372	2019.7
4	下一代 VR/AR 实时全息近眼显示方法	3	457	2019.3
5	可解释人工智能	4	2900	2019.0
6	脉冲神经网络及其神经形态芯片	13	2931	2018.6
7	深度学习在物理层通信中的应用	13	2949	2018.5
8	生成式对抗网络	8	15051	2018.4
9	MuZero 强化学习算法	6	3607	2018.3
10	用于脑电信号分析的卷积神经网络	9	2531	2018.2



1.2 重点热点前沿——“脉冲神经网络及其神经形态芯片”

人工智能芯片发展有两大主流方向：支持人工神经网络的深度学习加速器和支持脉冲神经网络的类脑芯片。前者通过计算机硬件来加速深度学习的训练过程，实现自然语言处理、计算机视觉和强化学习等应用，如谷歌的 TPU、英特尔的 Gaudi2 等。而后者通过借鉴人类大脑的工作机理，利用大规模神经

形态器件、芯片和系统支持源自神经科学的脉冲神经网络（SNN），从而实现类脑智能，如 IBM 的 TrueNorth、英特尔的 Loihi 等。因此，兼具生物合理性和计算高效性的脉冲神经网络是实现类脑智能的基础。

由于算法和模型的差别，人

工智能芯片通常只支持人工神经网络或者脉冲神经网络，难以发挥计算机和神经科学两个领域的交叉优势。中国清华大学开发的异构融合芯片“天机芯”则整合了这两种方法，为通用人工智能的开发提供了混合、协同的平台。

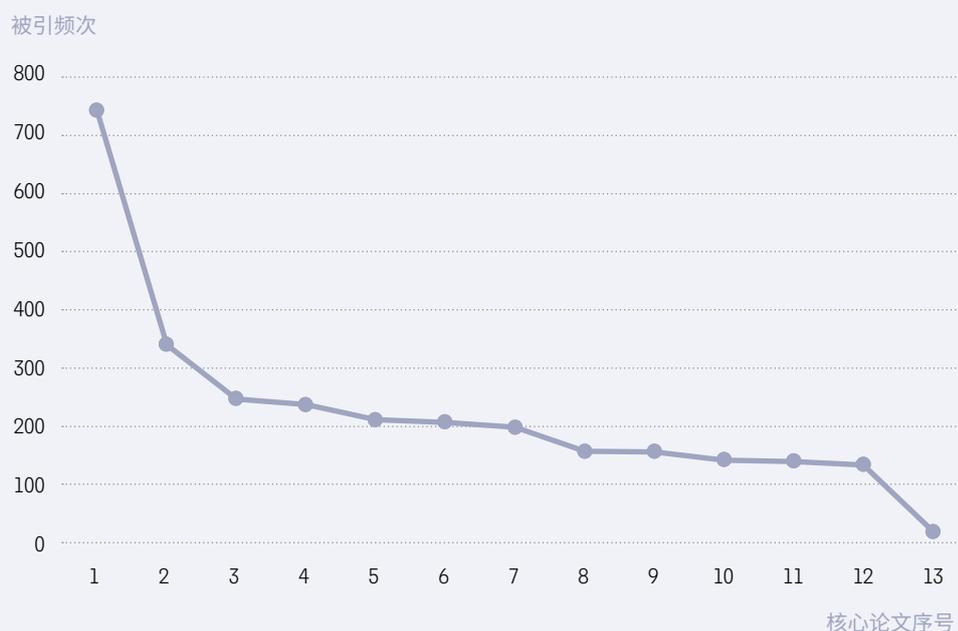


图 27 “脉冲神经网络及其神经形态芯片”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

在该前沿的13篇核心论文中，主要涉及SNN的训练方法和神经形态硬件两个方面。在SNN的训练方法方面，包括将传统深度网络转换为SNN、转换前的约束训练、反向传播的脉冲变体以及脉冲时间依赖可塑性（STDP）的生物动机变体等。在神经形态芯片方面，主要包括英特尔公司2017年推出的Loihi，相关论文被引频次排名第一；

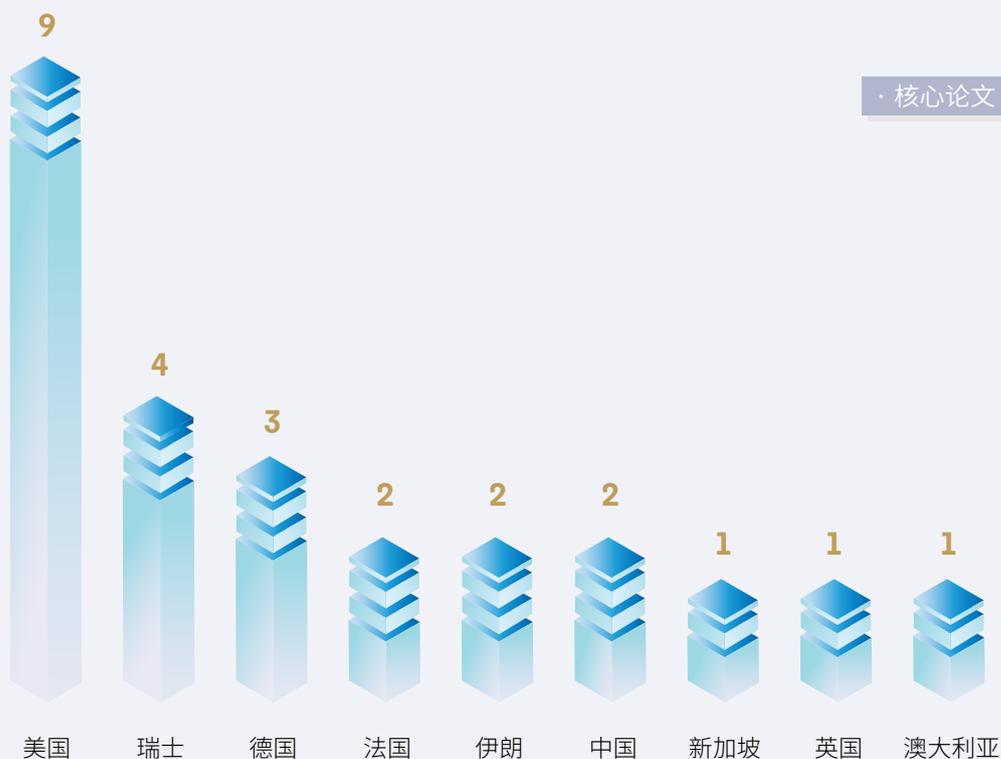
2019年清华大学开发的“天机芯”，相关论文被引频次排名第四；以及2018年耶鲁大学提出的一种神经形态计算系统。2019年美国普渡大学的Kaushik Roy等人在《自然》（*Nature*）上发表的综述文章也受到了较高的关注（被引频次排名第二），文章概述了神经形态计算在算法和硬件方面的发展，以及神经形态计算的主要挑战和发展前

景等。

如表53所示，美国贡献了该领域一半以上的核心论文，瑞士和德国分列第二、三位。在机构层面，有8家机构均贡献了2篇核心论文，包括普渡大学、加州大学圣芭芭拉分校、瑞士苏黎世联邦理工学院、中国清华大学等6所大学，以及瑞士和法国的2家科研机构。

表 53 “脉冲神经网络及其神经形态芯片”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	9	69.2%	1	普渡大学	美国	2	15.4%
2	瑞士	4	30.8%	1	加州大学圣芭芭拉分校	美国	2	15.4%
3	德国	3	23.1%	1	苏黎世联邦理工学院	瑞士	2	15.4%
4	法国	2	15.4%	1	苏黎世大学	瑞士	2	15.4%
4	伊朗	2	15.4%	1	弗雷德里希·米歇尔生物医学研究所	瑞士	2	15.4%
4	中国	2	15.4%	1	法国国家科学研究中心	法国	2	15.4%
7	新加坡	1	7.7%	1	清华大学	中国	2	15.4%
7	英国	1	7.7%	1	图卢兹第三大学	法国	2	15.4%
7	澳大利亚	1	7.7%					



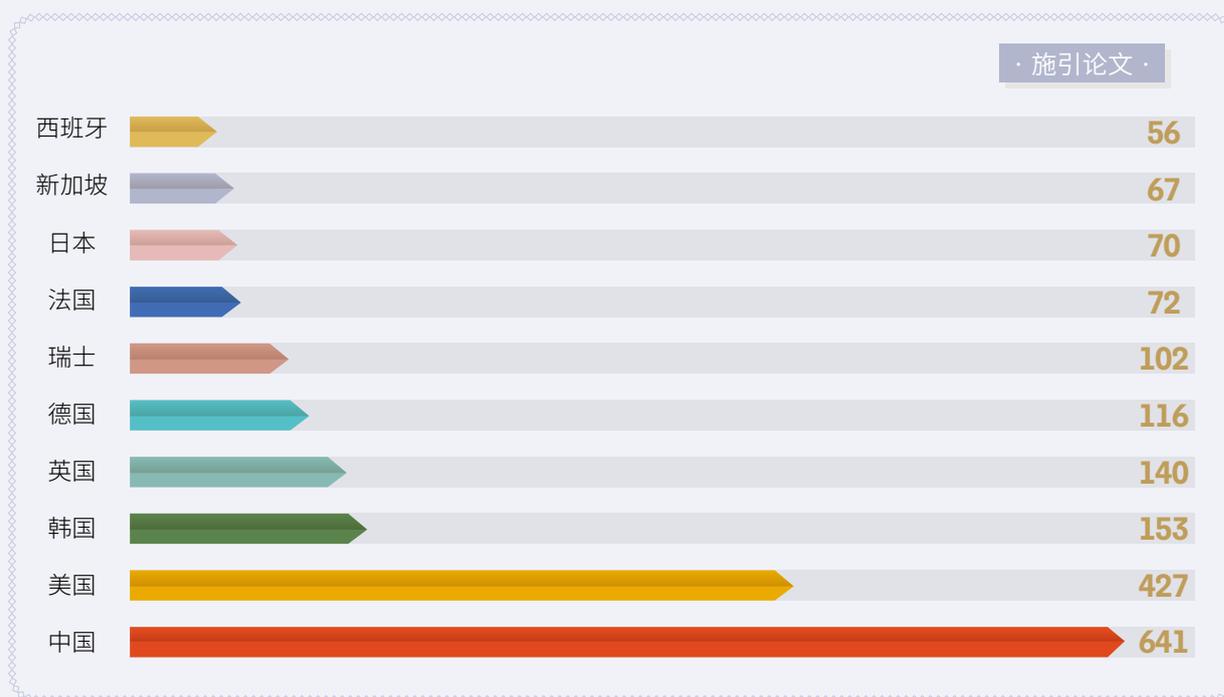
对施引论文的分析显示（表 54），中国和美国是该前沿后续研究最活跃的国家，韩国、英国、德国和瑞士也积极跟进。在施引机构层面，中国科学院和清华大学的表

现非常突出，位列 Top10 机构前两位，另有 4 所中国大学进入 Top 机构榜单。韩国虽不是核心论文 Top 产出国，但首尔国立大学在施引论文机构层面表现抢眼。施引机构中

的清华大学、苏黎世联邦理工学院、苏黎世大学、法国国家科学研究中心和普渡大学也是该前沿的核心论文的主要产出机构，可见其在该研究方向上的深入性和持续性。

表 54 “脉冲神经网络及其神经形态芯片”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	641	38.2%	1	中国科学院	中国	98	5.8%
2	美国	427	25.5%	2	清华大学	中国	76	4.5%
3	韩国	153	9.1%	3	首尔国立大学	韩国	54	3.2%
4	英国	140	8.4%	4	苏黎世联邦理工学院	瑞士	52	3.1%
5	德国	116	6.9%	5	苏黎世大学	瑞士	52	3.1%
6	瑞士	102	6.1%	6	法国国家科学研究中心	法国	45	2.7%
7	法国	72	4.3%	7	北京大学	中国	43	2.6%
8	日本	70	4.2%	8	浙江大学	中国	39	2.3%
9	新加坡	67	4.0%	9	普渡大学	美国	36	2.1%
10	西班牙	56	3.3%	10	复旦大学	中国	35	2.1%
				10	华中科技大学	中国	35	2.1%



1.3 重点热点前沿——“生成式对抗网络”

2014年，Ian J. Goodfellow 等人开创性地提出了生成式对抗网络 (Generative Adversarial Networks,

GAN)。此后，GAN 热潮席卷 AI 领域顶级会议，高质量论文不断涌现。图灵奖得主 Yann LeCun 曾评

价 GAN 是“20 年来机器学习领域最酷的想法”。

GAN 的基本原理是让生成器和判别器两个神经网络相互对抗，从而学习到数据的分布。GAN 能够在不使用标注数据的情况下进行生成任务的学习。当前，GAN 在计算机视觉、自然语言处理等领域取得了令人惊叹的成果，比如：图像生成、图像风格迁移、图像修复、图像数据增强、图像超分辨率恢复、文本生成、语音生成、视频生成等。

热点前沿“生成式对抗网

络”包含 8 篇核心论文，内容涵盖生成式对抗网络研究概述、全局 / 局部一致图像补全、场景识别数据库等。其中，“谷歌大脑” (Google Brain) 的科学家 Ian J. Goodfellow 发表于《美国计算机协会通讯》 (Communications of the ACM) 期刊上的论文“Generative Adversarial Networks”是生成式对抗网络的开山之作，被引次数高达 12747 次 (图 28)。该论文介绍了生成式对抗网络的原理、架构和最

新应用，强调了 GAN 的关键特性：

(1) GAN 是基于博弈论的生成模型，生成器和判别器之间的对抗性，使得 GAN 具有更高的生成能力和判别能力；(2) GAN 可以产生适用于各种场景的高质量、多样化样本；(3) GAN 具有一定的鲁棒性，可以处理不同尺度和形状的输入数据。文章还讨论了 GAN 面临的挑战和问题，如模式崩溃、训练不稳定等。



图 28 “生成式对抗网络”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

8 篇核心论文中美国贡献 3 篇，加拿大和中国各贡献 2 篇，韩国、西班牙、日本等国家各贡献 1 篇。在核心论文产出机构方面，

加拿大蒙特利尔大学贡献 2 篇，其他机构均贡献 1 篇。其中，美国 Google 公司贡献的 1 篇核心论文“Generative Adversarial Networks”

的引文影响力在该前沿占据绝对领先地位。

从施引论文的角度来看 (表

55)，施引论文产出最多的为中国，参与了6458篇，占比达到总量的54.4%。其次为美国，其参与发表的施引论文占比超过20%。从施引机构上看，中国机构表现非常突出，占据了施引论文的全部Top10机构。其中，中国科学院最为活跃、排名第一，清华大学、浙江大学、武汉大学等9所知名大学进入榜单。

表 55 “生成式对抗网络”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	6458	54.4%	1	中国科学院	中国	747	6.3%
2	美国	2420	20.4%	2	清华大学	中国	244	2.1%
3	英国	857	7.2%	3	浙江大学	中国	212	1.8%
4	韩国	769	6.5%	4	武汉大学	中国	204	1.7%
5	德国	480	4.0%	5	上海交通大学	中国	183	1.5%
6	加拿大	475	4.0%	6	西安电子科技大学	中国	183	1.5%
7	澳大利亚	456	3.8%	7	电子科技大学	中国	180	1.5%
8	日本	450	3.8%	7	北京大学	中国	174	1.5%
9	印度	376	3.2%	9	哈尔滨工业大学	中国	159	1.3%
10	法国	300	2.5%	10	北京航空航天大学	中国	153	1.3%



2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

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

1.1 经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

经济学、心理学及其他社会科学领域位居前 10 位的热点前沿体现了经济社会向数字化、绿色化转型发展的趋势。“供应链风险管理及区块链技术在其中的应用”、“消费者对在线订餐服务的使用和接受研究”和“人工智能 (AI) 伦理” 3 个热点前沿侧重数字化、智能化对经济社会的改变和影响分析。绿色可持续发展也是该领域热点前沿中另一个突出的主题，有 3 个前沿方向与之相关，包括“绿色能源消费和经济政策的不确定性研究”、“土

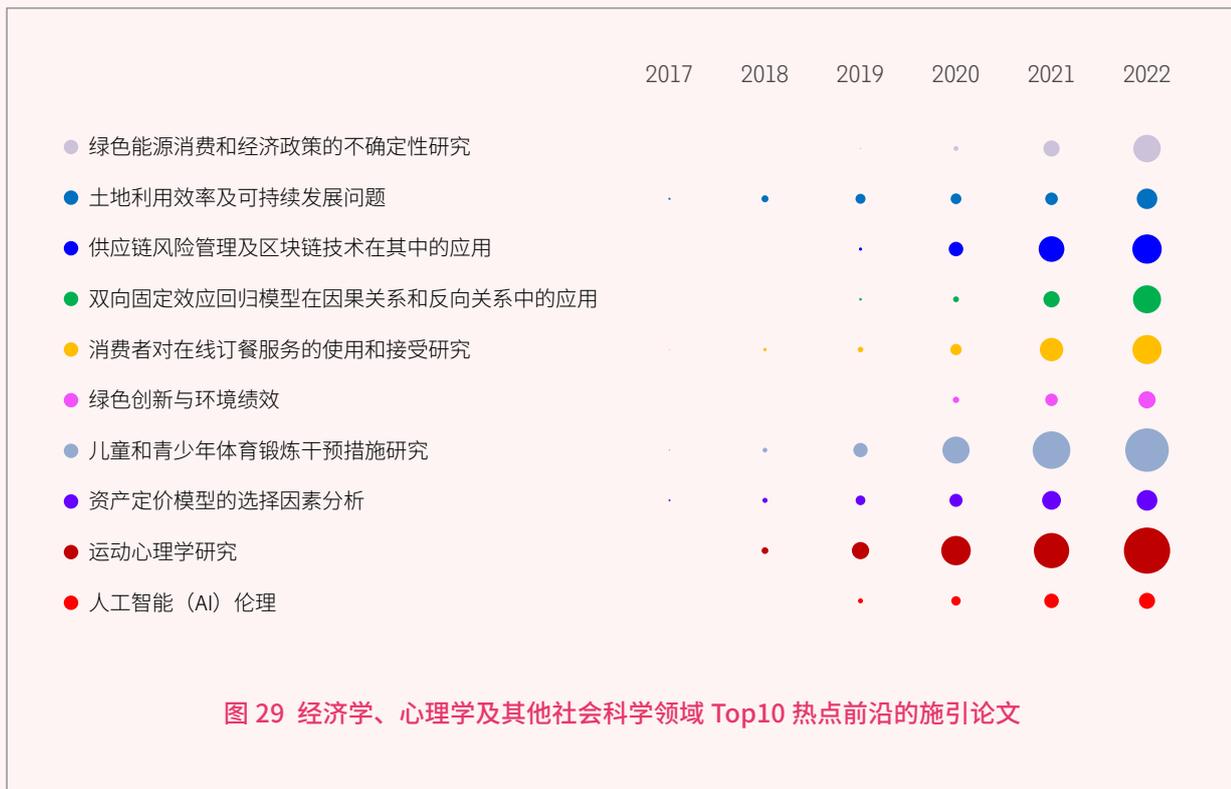
地利用效率及可持续发展问题”、“绿色创新与环境绩效”。

“运动心理学研究”是唯一一个入选前 10 的心理学领域的热点前沿。此外，“儿童和青少年体育锻炼干预措施研究”也成为 2023 年热点前沿。

“双向固定效应回归模型在因果关系和反向关系中的应用”和“资产定价模型的选择因素分析”两个热点前沿重点聚焦在相关模型在经济学或社会学领域的应用。

表 56 经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 热点前沿

序号	热点前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	绿色能源消费和经济政策的不确定性研究	39	1961	2021.4
2	土地利用效率及可持续发展问题	17	1339	2020.8
3	供应链风险管理及区块链技术在其中的应用	25	3377	2020.5
4	双向固定效应回归模型在因果关系和反向关系中的应用	10	1854	2020.5
5	消费者对在线订餐服务的使用和接受研究	42	2783	2020.4
6	绿色创新与环境绩效	3	585	2020.3
7	儿童和青少年体育锻炼干预措施研究	16	5386	2019.8
8	资产定价模型的选择因素分析	13	1586	2019.5
9	运动心理学研究	7	6864	2019.4
10	人工智能 (AI) 伦理	4	738	2019.3



1.2 重点热点前沿——“供应链风险管理及区块链技术在其中的应用”

新冠疫情、地缘政治和绿色转型引发全球供应链重塑，企业供应链在实际运行过程中出现大量诸如需求不确定、信息不对称以及供应商不稳定等随机因素，这些因素导致供应链管理中存在巨大风险。企业更加注重获得预期利润的可能性以及如何应对各种风险问题，在

此背景下，供应链风险管理研究再度成为热点，从供应链的弹性、可持续性、适应性等角度开展了具体分析。

在具体技术应用方面，区块链技术去中心化的架构、透明化的数据流通、高安全性的数据保护以及

智能合约的自动化操作等成为供应链风险管理研究中的热门问题。例如，相关研究在信息透明度和可追溯性、合同和支付的自动化、库存管理和物流优化、反欺诈和保护知识产权等方面进行了区块链技术的应用探索，以实现更高效、更安全和更可靠的供应链运作。



图 30 “供应链风险管理及区块链技术在其中的应用”研究前沿核心论文被引频次分布曲线

该热点前沿共有 25 篇核心论文（图 30），主要发表在 2020-2021 年，其中 4 篇从供应链的概念与度量、重构性、弹性、涟漪效应等方面进行分析，9 篇重点研究疫情对供应链带来的风险及后疫情时代的发展及建议，12 篇聚焦于区块链技术在供应链的可追溯性、打击假冒伪劣产品、信息披露等方面的应用研究。其中被引频次最高的

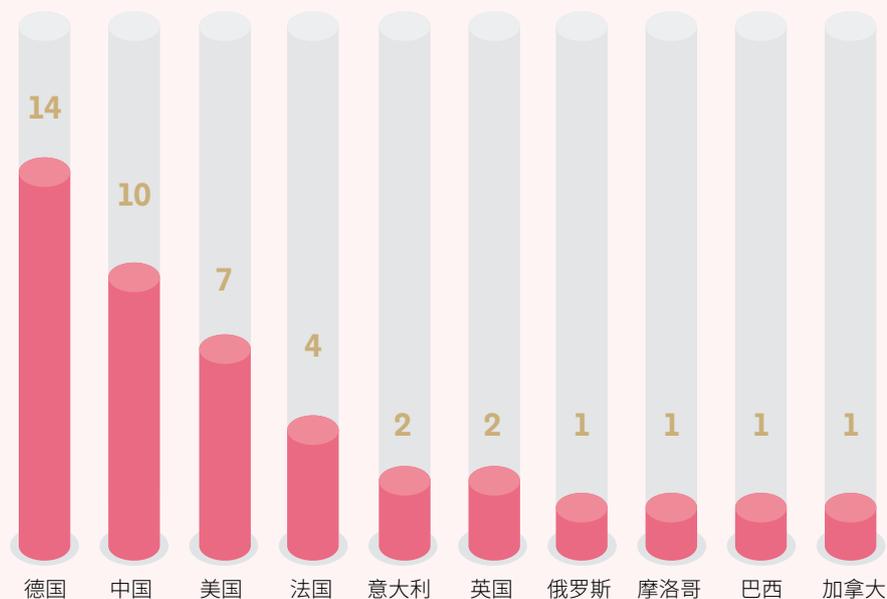
论文是柏林经济与法律学院发表于《交通研究 E 部分》（*Transportation Research Part E*）上的分析疫情对全球供应链影响的论文，被引频次为 467 次。该论文通过构建仿真模型来检查和预测流行病爆发对全球供应链的影响，探索流行病传播速度、上下游中断时间、设施关闭开放时间等因素对供应链影响的差异性。

热点前沿核心论文中有 14 篇来自德国，占有所有论文的 56%。中国贡献了 10 篇论文，排名第 2。从机构层面看，在 7 家 Top 机构中，有 4 家是法国机构，其他 3 家机构分别是核心论文产出最高的德国的柏林经济与法律学院、排名第二中国的香港理工大学和东华大学（表 57）。

表 57 “供应链风险管理及区块链技术在其中的应用”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	德国	14	56.0%	1	柏林经济与法律学院	德国	12	48.0%
2	中国	10	40.0%	2	香港理工大学	中国	6	24.0%
3	美国	7	28.0%	3	法国国立矿业电信研究院	法国	3	12.0%
4	法国	4	16.0%	3	大西洋矿业电信学院	法国	3	12.0%
5	意大利	2	8.0%	3	布列塔尼-卢瓦尔大学	法国	3	12.0%
5	英国	2	8.0%	6	东华大学	中国	2	8.0%
7	俄罗斯	1	4.0%	6	法国国家科学研究中心	法国	2	8.0%
7	摩洛哥	1	4.0%					
7	巴西	1	4.0%					
7	加拿大	1	4.0%					

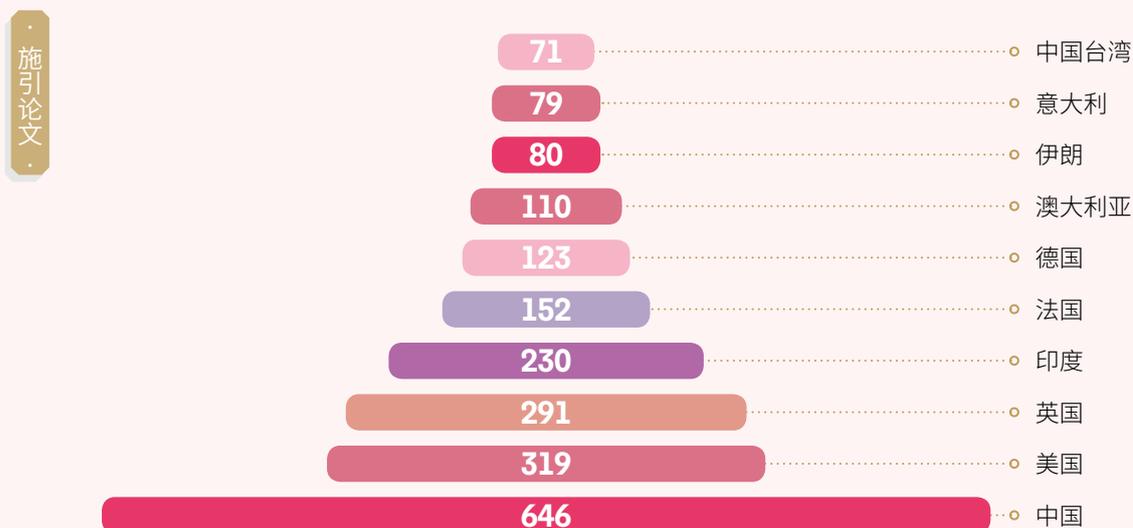
· 核心论文 ·



从施引论文来看，中国以 646 篇施引论文位居首位，是位居第二美国的 2 倍多，英国、印度、法国分别位列第三至第五位。在产出机构层面，香港理工大学施引论文最多，其次是印度管理学院和印度理工学院。华南理工大学、中国科学院、台湾大学分别位列第七、八、九位。

表 58 “供应链风险管理及区块链技术在其中的应用”研究前沿中施引论文 Top 产出国家 / 地区和机构

排名	国家 / 地区	施引论文	比例	排名	机构	所属国家 / 地区	施引论文	比例
1	中国	646	36.8%	1	香港理工大学	中国	104	5.9%
2	美国	319	18.2%	2	印度管理学院	印度	55	3.1%
3	英国	291	16.6%	3	印度理工学院	印度	43	2.4%
4	印度	230	13.1%	4	柏林经济与法律学院	德国	37	2.1%
5	法国	152	8.7%	5	利物浦大学	英国	35	2.0%
6	德国	123	7.0%	6	悉尼科技大学	澳大利亚	32	1.8%
7	澳大利亚	110	6.3%	7	华南理工大学	中国	31	1.8%
8	伊朗	80	4.6%	8	中国科学院	中国	30	1.7%
9	意大利	79	4.5%	9	国立工业工程学院	印度	28	1.6%
10	中国台湾	71	4.0%	9	台湾大学	中国台湾	28	1.6%



1.3 重点热点前沿——“人工智能 (AI) 伦理”

当前，以深度学习为核心的新一代人工智能技术取得了极大的成功，大模型的发展令人工智能在下游任务的性能体现出极强的应用赋能潜力。人工智能新技术正在不断刷新着人们的认知极限，颠覆性地重塑着人类生活、工作和交流的方

式，与人类社会融合为一。但是，在人工智能产业保持高速发展态势的同时，人工智能技术自身发展面临诸多困境。人工智能所带来的隐私泄露、偏见歧视、责权归属、技术滥用等伦理问题已引起各界的广泛关注，人工智能伦理成为无法绕

开的重要议题。因此，如何确保人工智能研发及应用符合人类伦理，让人工智能更好地造福社会并被公众信任是管理主体和研发主体等利益相关方近年关注的热点研究问题。



图 31 “人工智能 (AI) 伦理” 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 4 篇核心论文，主要从人工智能伦理的治理准则、规则方法、行动路径、政策评估等方面开展研究。其中被引频次最高的论文是瑞士苏黎世联邦理工学院学者发表于《自然机器智能》(Nature Machine Intelligence) 上的关于“人工智能道德准则的全球格局”论文，主要绘制并分析了世界主要国家有关人工智能伦理的原则和指南，揭示了全球人工智能治理在透明度、正义和公平、非恶意、责任和隐私等五项道德原则方面呈现出的全球趋同态势。被引频次第二、第三的论文都发表于《思维与

机器》(Minds and Machines) 期刊，分别从人工智能伦理分析框架、指南评价等方面分析了当前人工智能给社会带来的核心机遇和风险。第四篇重点探讨了人工智能伦理如何从原则向实践推进的方法及工具，2020 年发表于《科学与工程伦理学》(Science and Engineering Ethics)。

在热点前沿核心论文 Top 产出国家中，瑞士、德国、英国各发表 2 篇核心论文。从机构层面看，苏黎世联邦理工学院、牛津大学产出较为突出，各发表 2 篇核心论文。此外，欧美国机构间开展了较为

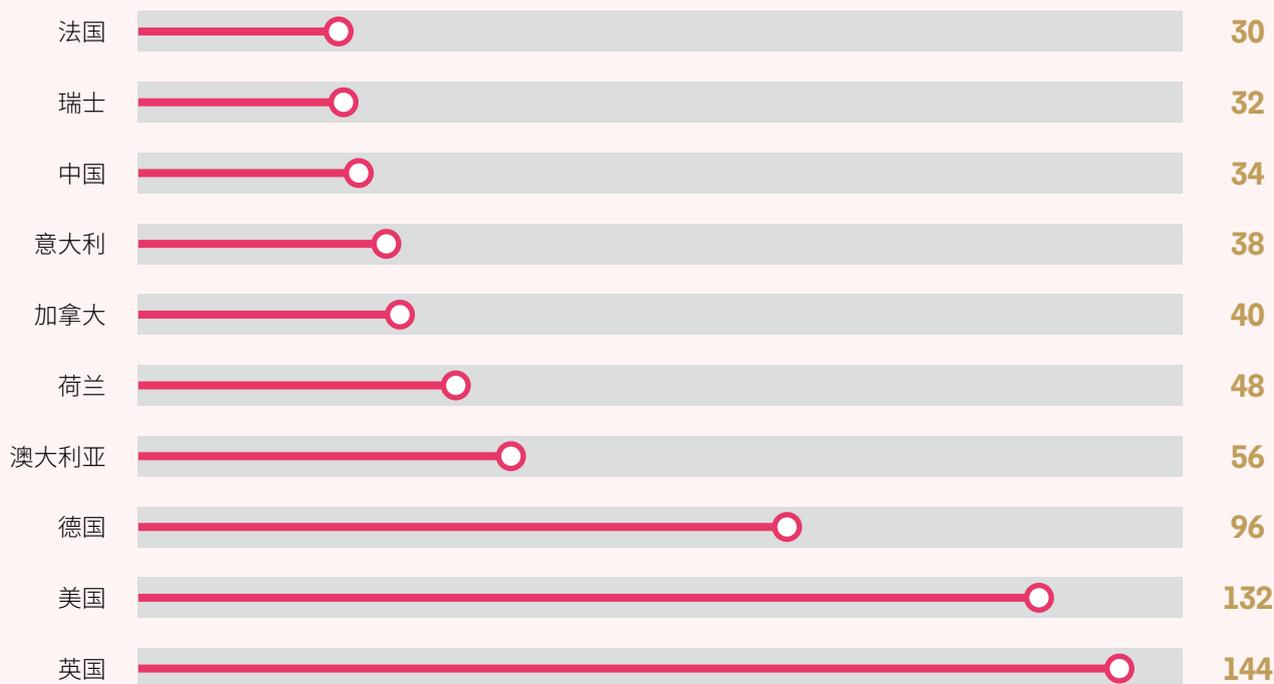
紧密的合作，牛津大学、阿兰图灵研究所、格勒诺布尔大学、法国国家科学研究中心、荷兰代夫特工业大学、英国爱丁堡大学、德国慕尼黑工业大学、意大利都灵大学等机构致力于该前沿的研究，合作完成了相关论文。

从施引论文来看，英国以 144 篇施引论文位居首位，美国 132 篇位列其后，德国、澳大利亚、荷兰分别位列第三至第五位。在产出机构层面，英国的牛津大学施引论文最多，阿兰图灵研究所、伦敦大学学院和加拿大的多伦多大学也积极跟进该方向的研究。

表 59 “人工智能（AI）伦理”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	英国	144	24.5%	1	牛津大学	英国	35	6.0%
2	美国	132	22.5%	2	阿兰图灵研究所	英国	19	3.2%
3	德国	96	16.4%	3	伦敦大学学院	英国	18	3.1%
4	澳大利亚	56	9.5%	4	多伦多大学	加拿大	16	2.7%
5	荷兰	48	8.2%	5	慕尼黑工业大学	德国	13	2.2%
6	加拿大	40	6.8%	5	剑桥大学	英国	13	2.2%
7	意大利	38	6.5%	7	代夫特工业大学	荷兰	12	2.0%
8	中国	34	5.8%	7	哈佛大学	美国	12	2.0%
9	瑞士	32	5.5%	9	帝国理工学院	英国	11	1.9%
10	法国	30	5.1%	10	斯坦福大学	美国	9	1.5%
				10	阿姆斯特丹大学	荷兰	9	1.5%
				10	波恩大学	德国	9	1.5%
				10	屯特大学	荷兰	9	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

经济学、心理学及其他社会科学领域有 1 项研究入选新兴前沿，即“以人为本、可持续性和富有弹性的工业 5.0 发展”。

表 60 经济学、心理学及其他社会科学领域新兴前沿

序号	新兴前沿	核心论文	被引频次	核心论文平均出版年
1	以人为本、可持续性和富有弹性的工业 5.0 发展	10	416	2021.6

2.2 重点新兴前沿——“以人为本、可持续性和富有弹性的工业 5.0 发展”

工业革命的演进推动了所有社会子系统的变革性发展。然而，随着可持续发展、以人为本、碳达峰/碳中和等社会发展理念的引入，制造系统与范式已难以适应创新社会的需求。工业 5.0 作为一个新兴的概念，旨在将工人的福祉置于制造系统的核心，从而实现超越就业和经济增长之外的社会目标，促进人类的全面发展、可持续发展。自欧盟工业 5.0 白皮书发布以来，关于工业 5.0 的研究热度快速增长，成为新兴研究前沿。

欧盟委员会提出工业 5.0 的三个核心要素，分别是以人为本 (Humancentric)、可持续 (Sustainability) 和富有弹性 (Resilience)。具体定义为：工业 5.0 要求工业生产必须尊重和保护地球

生态，将工人的利益置于生产过程的中心位置，进而使工业可以实现就业和增长以外的社会目标，成为社会稳定和繁荣的基石。围绕工业 5.0 相关内容，学者主要从工业 4.0 与 5.0 间的比较研究、技术维度、应用维度等方面开展研究分析。

从比较研究角度，部分学者从概念转变、框架对比、转变原因等方面开展了工业 4.0 和工业 5.0 之间的比较研究。并指出工业 4.0 和工业 5.0 之间最重要的区别是生产过程中人与机器之间的关系。在工业 5.0 阶段，最重要的核心是“人”，更加重视人工与技术的结合，并注重人工所需技能和培训的可持续性。工业 5.0 的提出是为了实现超智能社会和生态价值可持续发展的目标，它将促进工业命运共同体的

构建，并促进社会的稳定和可持续性发展。

从技术维度来看，《工业 5.0：关于赋能技术和潜在应用的调查》等研究指出，诸如物联网、云计算、人工智能等赋能技术在创新中与认知技能和发展理念相结合，从而实现先进知识在技术间的流动，并在技术支持下实现价值驱动的工业 5.0 模式。

在应用维度方面，学者们提出从工业革命的演变角度来看，工业 5.0 虽未得到广泛认可，但已开始萌芽，工业 5.0 的实施不可能一蹴而就，它需要以现实的工业发展需求为指导。工业 5.0 概念可能将在如智能制造、医疗卫生、供应链管理、航运、工程教育和智慧城市等场景获得率先实施与倡导。



2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

2023 研究前沿
RESEARCH FRONTS

附录

研究前沿综述：寻找科学的结构

© 作者：David Pendlebury



Eugene Garfield 1955 年第一次提出科学引文索引概念之际，即强调了引文索引区别于传统学科分类索引的几点优势^[1]。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^[2]。”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，2023 年已有 57 个年头^[3]。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^[4]。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^[5]。

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，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^[6,7]。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”^[8]。

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^[9]。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”^[10]。

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^[11]。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-Shaikovich。她也在1973年提出了“共被引分析”的思想^[12]。但是 Small 与 Marshakova-Shaikovich 并不了解彼此的工作，因此他们的工作可以被看作是相互独立、不谋而合的研究。科学社会学家 Robert K. Merton 将这种现象称作“共同发现”，这在科学史上是非常常见的现象，而很多人却没有意识到这种常见现象的存在^[13,14]。Small 与 Marshakova-Shaikovich 都将“共被引分析”与“文献耦合”现象进行了对比，后者是 Myer Kessler 于1963年阐释的思想^[15]。

“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^[16]。

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^[17,18]。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0.1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；另外一部分就是对这些核心论文进行引用的施引论文，它们中最新发表的论文反映了该领域的新进展。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”^[21]。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^[22]，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^[19]。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。”^[20]

在出版了另一本书和一系列综述性期刊之后^[23,24]，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)^[25]。

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^[26]。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^[27]。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^[28,29]。

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^[30,31]。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^[32,33]。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^[34]。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^[35]。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^[36,37]。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^[38,39]。

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^[40]。

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”。从这个角度说，他们两人不仅开创了信息科学的先锋领域，而且成就了他们富有传奇的人生。科睿唯安将继续支持并推进这个传奇的持续发展。

参考文献

- [1] Eugene Garfield. Citation indexes for science: a new dimension in documentation through association of ideas. *Science*, 122 (3159): 108-111, 1955.
- [2] Eugene Garfield. *Citation Indexing: its Theory and Application in Science, Technology, and Humanities*. 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	周琪	常进																
执行	副	主	任	潘教峰	翟立新	刘细文	王利													
委	员		于录	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	王亚蕻	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	孙敏	熊洋	王振	王思茗	危期
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	冀玉静 李军莲 李赞梅 李阳
生物科学	周秋菊
化学与材料科学	边文越 张超星
物理学	黄龙光
天文学与天体物理学	王海名 韩淋
数学	王海名 孙震
信息科学	王海霞 白如江
经济学、心理学及其他社会科学	王文君

英文翻译组：

袁建霞	邢颖	周秋菊	范唯唯	王海名	杨帆	李赞梅	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
李阳	Christopher M. King	岳卫平	王娜	郭杨	黄庭颖		
马亚鹏	王文君	孙敏	熊洋	王振	王思茗	危期	

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



2023 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

网址：<http://clarivate.com.cn/>