



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

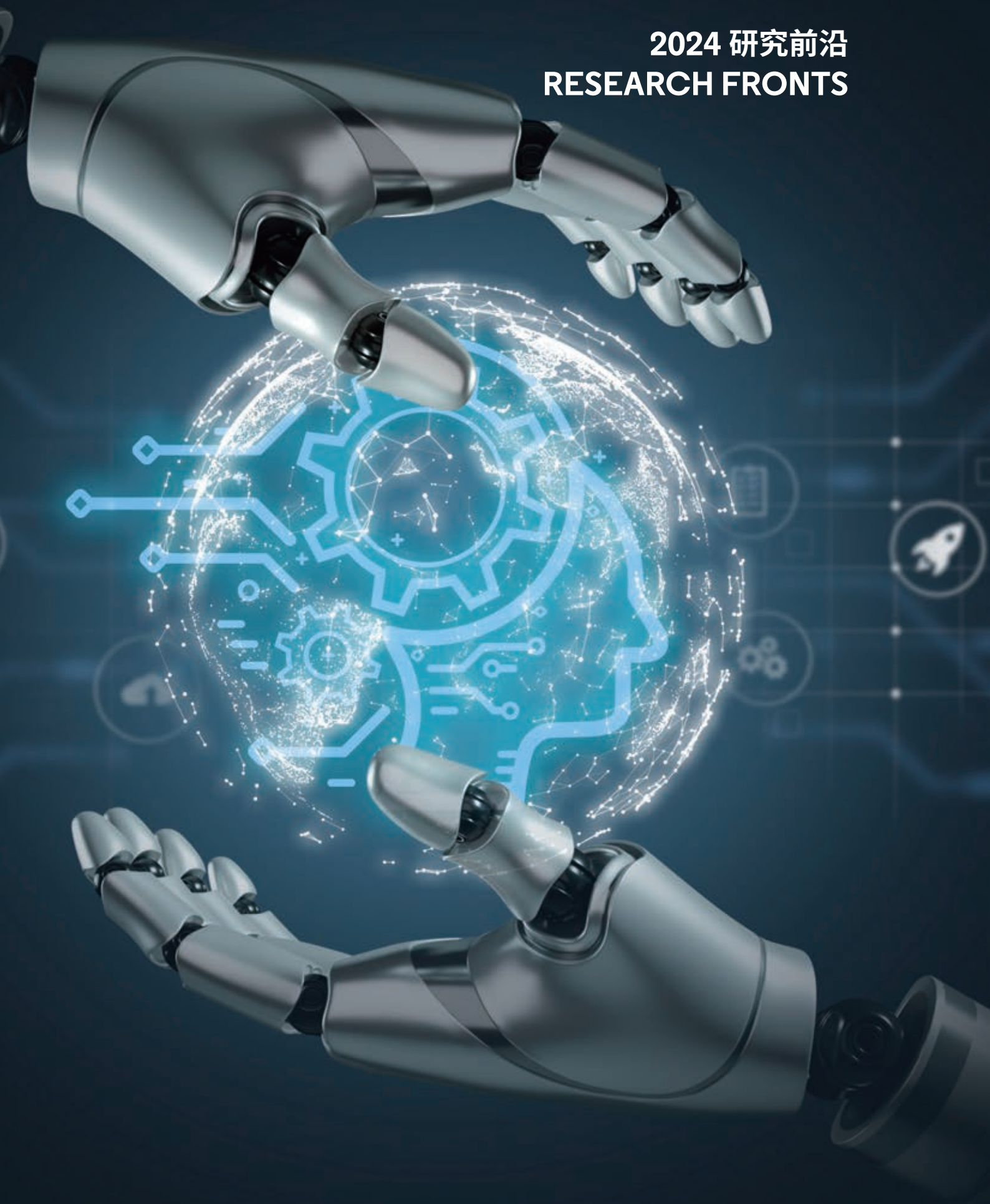
Clarivate™  
科睿唯安™

# 2024 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



**2024 研究前沿**  
**RESEARCH FRONTS**



# 目录 Contents

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 背景与方法论                               |    |
| 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 RNA 中 N6- 甲基腺苷修饰的检测、调控及其功能”   | 12 |
| 1.3 重点热点前沿—— “单细胞转录组测序在植物组织发育研究中的应用” | 15 |
| 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                           |    |
| —— “深度迁移学习方法在作物分类和病害检测中的应用”          | 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—— “轮胎磨损颗粒的环境归趋与生态毒理”      | 22 |
| 1.3 重点热点前沿—— “二氧化碳直接空气捕获的技术经济评估”     | 26 |
| 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—— “地下储氢技术发展潜力研究”          | 32 |
| 1.3 重点热点前沿—— “全新世温度变化研究”             | 36 |

临床医学

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>         | <b>41</b> |
| 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——“单克隆抗体药物治疗早期阿尔茨海默病” | 42        |
| 1.3 重点热点前沿——“靶向或免疫治疗不可切除肝细胞癌”   | 45        |
| <b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>         | <b>49</b> |
| 2.1 新兴前沿概述                      | 49        |
| 2.2 重点新兴前沿——“可穿戴超声系统的应用”        | 49        |

生物科学

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>             | <b>51</b> |
| 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——“表观遗传时钟”                | 52        |
| 1.3 重点热点前沿——“功能性人脑类器官的模型”           | 56        |
| <b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>             | <b>59</b> |
| 2.1 新兴前沿概述                          | 59        |
| 2.2 重点新兴前沿——“细胞焦亡的关键效应因子——GSDMs 家族” | 59        |

化学与材料科学

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>         | <b>61</b> |
| 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——“水系锌离子电池无枝晶锌金属负极设计” | 62        |
| 1.3 重点热点前沿——“吸附式大气集水研究”         | 65        |
| <b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>         | <b>68</b> |
| 2.1 新兴前沿概述                      | 68        |
| 2.2 重点新兴前沿——“有机电化学晶体管”          | 68        |

物理学

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>   | <b>71</b> |
| 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——“半导体量子计算”     | 72        |
| 1.3 重点热点前沿——“轴子暗物质探测”     | 76        |

|                    |                                      |            |
|--------------------|--------------------------------------|------------|
| 天文学与<br>天体物理学      | <b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>              | <b>81</b>  |
|                    | 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——“哈勃常数争议及宇宙学”             | 82         |
|                    | 1.3 重点热点前沿——“脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波”        | 85         |
|                    | <b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>              | <b>89</b>  |
|                    | 2.1 新兴前沿概述                           | 89         |
|                    | 2.2 重点新兴前沿——“‘詹姆斯·韦伯空间望远镜’初步成果”      | 89         |
| 数学                 | <b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>              | <b>91</b>  |
|                    | 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——“数据驱动模型预测控制中的稳定性与鲁棒性研究”  | 92         |
|                    | 1.3 重点热点前沿——“最优传输问题新算法及应用”           | 95         |
| 信息科学               | <b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>              | <b>101</b> |
|                    | 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——“机器学习辅助蛋白质定向进化”          | 102        |
|                    | 1.3 重点热点前沿——“通信感知一体化研究”              | 105        |
| 经济学、心理学及<br>其他社会科学 | <b>1. 热点前沿及重点热点前沿解读</b>              | <b>111</b> |
|                    | 1.1 经济学、心理学及其他社会科学领域 Top 10 热点前沿发展态势 | 111        |
|                    | 1.2 重点热点前沿——“超加工食品消费问题”              | 112        |
|                    | 1.3 重点热点前沿——“零工经济的算法、人力资源及平台管理”      | 116        |
|                    | <b>2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读</b>              | <b>119</b> |
|                    | 2.1 新兴前沿概述                           | 119        |
|                    | 2.2 重点新兴前沿——“生成式 AI 技术在教育领域的应用及影响”   | 119        |
|                    | <b>附录 研究前沿综述：寻找科学的结构</b>             | <b>120</b> |
|                    | <b>报告研究团队</b>                        | <b>130</b> |

# 01

## 背景与方法论

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 1. 背景

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

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

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

总之，研究前沿的分析提供了一个独特的视角来揭示科学研究的脉络。研究前沿的分析不依赖于对文献的人工标引和分类（因为这种方法可能会有标引分

类人员判断的主观性），而是基于研究人员的相互引用而形成的知识之间和人之间的联络。这些研究前沿的数据连续记载了分散的研究领域的发生、汇聚、发展（或者是萎缩、消散），以及分化和自组织成更近的研究活动节点。在演进的过程中，每组核心论文的基本情况，如主要的论文、作者、研究机构等，都可以被查明和跟踪。通过对该研究前沿的施引论文<sup>①</sup>的分析，可以发现该领域的最新进展和发展方向。

2013 年科睿唯安发布了《2013 研究前沿——自然科学和社会科学的前 100 个探索领域》白皮书。2014 年和 2015 年科睿唯安与中国科学院文献情报中心成立的“新兴技术未来分析联合研究中心”推出了《2014 研究前沿》和《2015 研究前沿》分析报告。2016 年至 2023 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》、《2022 研究前沿》和《2023 研究前沿》分析报告。这一系列报告引起了全球广泛的关注。2024 年，在以往系列研究前沿报告的基础上，推出了《2024 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 13318 个研究前沿，遴选出了 2024 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 15 个新兴前沿。

<sup>①</sup> 引用核心论文的论文，也称引文。

## 2. 方法论

整个分析工作分为两个部分：研究前沿的遴选和命名由科睿唯安和中国科学院科技战略咨询研究院科技战略情报研究所合作完成，125 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 2018-2023 年的论文数据，数据下载时间为 2024 年 3 月。

### 2.1 研究前沿的遴选与命名

《2024 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 125 个研究前沿（包括 110 个热点前沿和 15 个新兴前沿）。我们将 ESI 数据库中 20 个学科的研究前沿划分到 11<sup>②</sup> 个高度聚合的大学科领域，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 125 个研究前沿的具体遴选过程如下：

#### 2.1.1 热点前沿的遴选

今年热点前沿的遴选用了一种方法。方法 1 沿用往年的热点前沿和新兴前沿遴选方法。方法 2 从 2022 年起，对数学领域和信息科学领域研究前沿的遴选方法进行了微调和拓展应用。

方法 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 2022 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 15 个新兴前沿，这 15 个新兴前沿最早的平均出版年是 2022.6。

从 11 大学科领域中共遴选出 15 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，2024 年数学领域没有遴

选出新兴前沿，而临床医学领域选出了 4 个新兴前沿。

通过以上两个流程，本报告突出显示了 11 个高度聚合的大学科领域中的 110 个热点前沿和 15 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 125 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 125 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 28 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。

研究前沿由一组共同高被引的核心论文和一组引用核心论文的施引论文组成。核心论文来自于 ESI 数据库中的高被引论文，即在同学科同年度中根据被引频次排在前 1% 的论文。这些有影响力的核心论文的作者、机构、国家在该领域做出了不可磨灭的贡献，本报告对其进行了深入分析和解读。同时，引用研究前沿核心论文的施引论文可以反映出核心论文所提出的技术、数据、理论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 2022 年，最早发表的施引论文的发表时间为 2018 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。

《2024 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 一个重点热点前沿。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 6 个重点新兴前沿。因此从 125 个研究前沿中共遴选出 28 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 125 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 28 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、机构活跃状况进行了统计分析，有助于揭示出哪些国家、机构在该热点前沿中有较大贡献。第二张表则对该热点前沿的施引论文的产出国家和机构进行了统计分析，有助于探讨哪些国家、机构在该热点前沿的发展中进行了研究布局。

(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。



2024 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 02

## 农业科学、植物学 和动物学

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 农业科学、植物学和动物学领域 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 的热点前沿主要分布在植物基因调控、动物营养、食品科学与工程及林木生态监测等 4 个子领域（表 1）。其中，植物基因调控子领域的热点前沿数量最多，有 5 个，聚焦三个研究方向：生长发育调控、免疫调控和 RNA 修饰调控。生长发育调控重点研究了植物气态激素乙烯、微生物接种及单细胞转录组测序；免疫调控着重研究了植物 NLR 免疫受体；RNA 修饰调控重点研究了植物 RNA 中的 N6-甲基腺苷修饰。食品科学与工

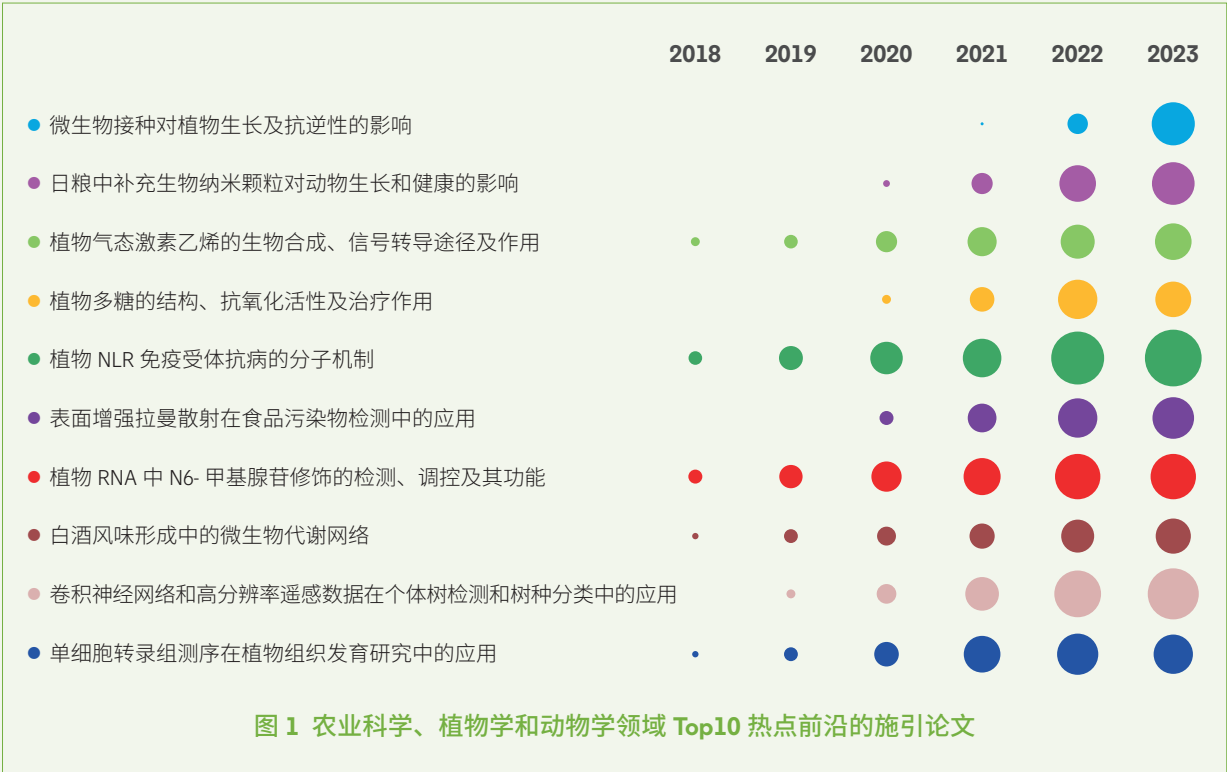
程子领域的热点前沿有 3 个，也聚焦三个研究方向：食品污染检测、食品营养物质和食品发酵工程，主要关注了表面增强拉曼散射检测法、植物多糖及白酒风味形成的微生物代谢网络。动物营养、林木生态监测子领域各有 1 个热点前沿，分别在研究饲料添加剂生物纳米颗粒及深度学习的运用。

纵观近 11 年的前沿研究，上述植物基因调控、食品科学与工程、动物营养三个子领域一直是热点领域，多年都有热点前沿入选。植物

基因调控子领域主要集中在生长发育调控和免疫调控，其中植物 NLR 免疫受体的研究最为突出，最近 4 年连续入选 Top10 热点前沿；RNA 甲基化修饰的调控则是该子领域今年新出现的一个热点前沿。食品科学与工程子领域多集中在食品污染物检测和营养物质分析这两个方向，11 年来先后分别有 4 个、6 个热点前沿入选 Top10；今年最新出现了一个新的热点研究方向——食品发酵工程。动物营养子领域对饲料添加剂研究较多，先后共有 4 个热点前沿入选 Top10。

表 1 农业科学、植物学和动物学领域 Top10 热点前沿

| 序号 | 热点前沿                           | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文平均出版年 |
|----|--------------------------------|------|------|-----------|
| 1  | 微生物接种对植物生长及抗逆性的影响              | 39   | 1217 | 2022.4    |
| 2  | 日粮中补充生物纳米颗粒对动物生长和健康的影响         | 25   | 1512 | 2021.3    |
| 3  | 植物气态激素乙烯的生物合成、信号转导途径及作用        | 13   | 1129 | 2021.3    |
| 4  | 植物多糖的结构、抗氧化活性及治疗作用             | 11   | 1175 | 2021.2    |
| 5  | 植物 NLR 免疫受体抗病的分子机制             | 47   | 5736 | 2021.0    |
| 6  | 表面增强拉曼散射在食品污染物检测中的应用           | 19   | 1591 | 2020.9    |
| 7  | 植物 RNA 中 N6-甲基腺苷修饰的检测、调控及其功能   | 33   | 3182 | 2020.8    |
| 8  | 白酒风味形成中的微生物代谢网络                | 13   | 1213 | 2020.8    |
| 9  | 卷积神经网络和高分辨率遥感数据在个体树检测和树种分类中的应用 | 18   | 1818 | 2020.7    |
| 10 | 单细胞转录组测序在植物组织发育研究中的应用          | 28   | 2477 | 2020.6    |



## 1.2 重点热点前沿——“植物 RNA 中 N6- 甲基腺苷修饰的检测、调控及其功能”

RNA 甲基腺苷修饰是指在甲基转移酶的催化下，RNA 的腺嘌呤被选择性地添加甲基基团的化学修饰现象，其中，N6- 甲基腺苷（m6A）甲基化是 RNA 最关键的内部修饰之一，是 RNA 腺苷酸（A）第六位 N 上发生的甲基化，是真核生物 mRNA 中最丰富的表观转录组学修饰。m6A 甲基化是一种保守的转录后机制，用于丰富和调节真核生物的遗传信息。植物中该修饰的范围和功能一直是研究的热点，特别是在模式植物系统中。参与植物 m6A 甲基化的有三种关键蛋白，包括甲基转移酶（writers）、去甲基化酶（erasers）和结合蛋白（readers），

这三种蛋白的表征及功能分析是当前植物生物学研究中最引人关注的热点。在可预见的未来，m6A 在植物中的功能分析会蓬勃发展，将有助于通过操纵表观转录组进行作物遗传改良。

该热点前沿共有 33 篇核心论文，重点围绕上述三种关键蛋白开展研究。在基础理论方面，研究了植物中 m6A 甲基化调节机制的组成和进化，以及 m6A 修饰的功能，包括对抗逆性、果实发育和产量等的作用。在技术研发方面，创新 RNA 甲基化修饰的检测方法——纳米孔直接 RNA 测序法，以及研究

利用该方法分析 mRNA 的加工和 m6A 修饰的复杂性等。

其中，英国 DNA 测序公司牛津纳米孔科技（Oxford Nanopore Technologies Ltd.）于 2018 年发表在《自然 - 方法》（Nature Methods）上的 1 篇研究性论文被引频次最高，达 494 次（图 2）。该文开创了一种纳米孔直接 RNA 测序法，这是一种高度平行、实时和单分子的方法，无需经过逆转录或 PCR 扩增步骤，可以直接对 RNA 分子进行测序，并能够直接检测 RNA 中的核苷酸类似物，是研究 RNA 甲基化修饰的重要技术。



核心论文 Top 产出国家和机构中（表 2），中国贡献最多，有 22 篇，占比约为 67%；其次是美国，贡献了 11 篇论文，是中国的一半。其余国家均不足 5 篇，远低于中美两国。中国的北京大学在核心论文 Top 机构中表现突出，名列第一。美国的芝加哥大学和霍华休斯医学研究所并列第二，中国科学院和西北农林科技大学紧随其后。



表 2 “植物 RNA 中 N6- 甲基腺苷修饰的检测、调控及其功能” 研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

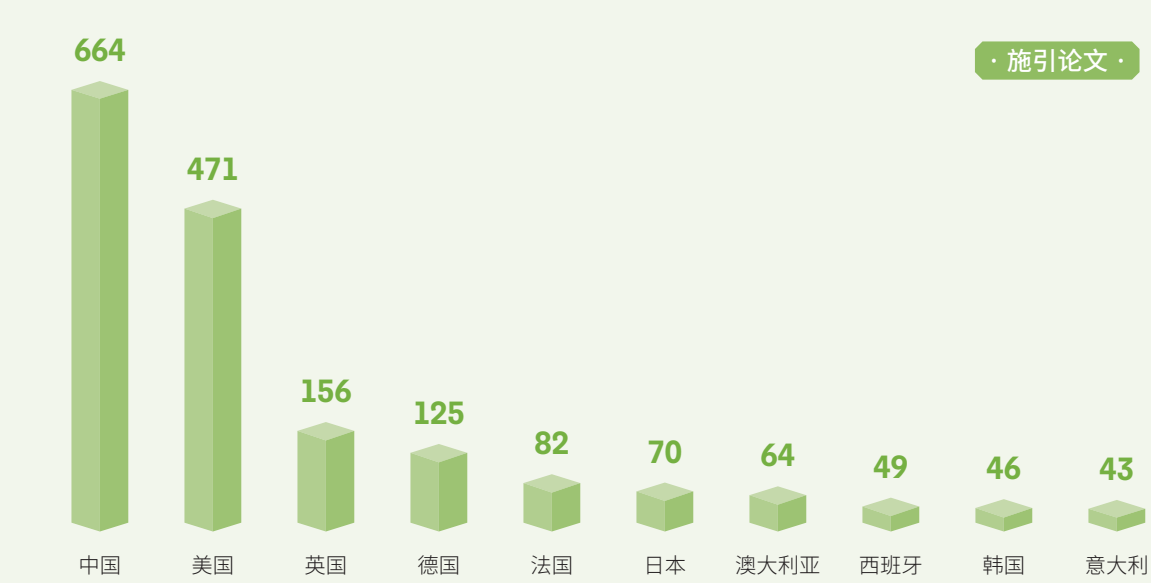
| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构        | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|-----------|------|------|-------|
| 1  | 中国   | 22   | 66.7% | 1  | 北京大学      | 中国   | 7    | 21.2% |
| 2  | 美国   | 11   | 33.3% | 2  | 芝加哥大学     | 美国   | 5    | 15.2% |
| 3  | 英国   | 4    | 12.1% | 2  | 霍华休斯医学研究所 | 美国   | 5    | 15.2% |
| 4  | 丹麦   | 3    | 9.1%  | 4  | 中国科学院     | 中国   | 4    | 12.1% |
| 5  | 德国   | 2    | 6.1%  | 5  | 西北农林科技大学  | 中国   | 3    | 9.1%  |
| 5  | 以色列  | 2    | 6.1%  | 5  | 哥本哈根大学    | 丹麦   | 3    | 9.1%  |
| 5  | 澳大利亚 | 2    | 6.1%  | 7  | 魏茨曼科学研究所  | 以色列  | 2    | 6.1%  |
| 5  | 韩国   | 2    | 6.1%  | 7  | 全南国立大学    | 韩国   | 2    | 6.1%  |
| 5  | 新加坡  | 2    | 6.1%  | 7  | 新南威尔士大学   | 澳大利亚 | 2    | 6.1%  |
|    |      |      |       | 7  | 山东农业大学    | 中国   | 2    | 6.1%  |
|    |      |      |       | 7  | 利物浦大学     | 英国   | 2    | 6.1%  |
|    |      |      |       | 7  | 新加坡国立大学   | 新加坡  | 2    | 6.1%  |
|    |      |      |       | 7  | 南开大学      | 中国   | 2    | 6.1%  |
|    |      |      |       | 7  | 康奈尔大学     | 美国   | 2    | 6.1%  |
|    |      |      |       | 7  | 清华大学      | 中国   | 2    | 6.1%  |
|    |      |      |       | 7  | 中国农业科学院   | 中国   | 2    | 6.1%  |
|    |      |      |       | 7  | 江苏师范大学    | 中国   | 2    | 6.1%  |



施引论文产出国家和机构中(表 3)，产出最多的依然是中国和美国，且远领先于其他国家，表明中美两国在该研究方向上的关注和跟进。英国和德国积极跟进，在施引论文数量上形成第二梯队。施引机构方面，中国科学院贡献了 89 篇施引论文，排名第一；其次是法国国家科学研究中心，贡献了 71 篇。核心论文数量排名中表现突出的北京大学和芝加哥大学持续保持热情，施引论文数量分列第四和第五位。

表 3 “植物 RNA 中 N6- 甲基腺苷修饰的检测、调控及其功能” 研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

| 排名 | 国家   | 施引论文 | 比例    | 排名 | 机构           | 所属国家 | 施引论文 | 比例   |
|----|------|------|-------|----|--------------|------|------|------|
| 1  | 中国   | 664  | 41.9% | 1  | 中国科学院        | 中国   | 89   | 5.6% |
| 2  | 美国   | 471  | 29.7% | 2  | 法国国家科学研究中心   | 法国   | 71   | 4.5% |
| 3  | 英国   | 156  | 9.8%  | 3  | 中国农业科学院      | 中国   | 51   | 3.2% |
| 4  | 德国   | 125  | 7.9%  | 4  | 北京大学         | 中国   | 41   | 2.6% |
| 5  | 法国   | 82   | 5.2%  | 5  | 芝加哥大学        | 美国   | 36   | 2.3% |
| 6  | 日本   | 70   | 4.4%  | 6  | 法国国家健康与医学研究所 | 法国   | 34   | 2.1% |
| 7  | 澳大利亚 | 64   | 4.0%  | 6  | 中山大学         | 中国   | 34   | 2.1% |
| 8  | 西班牙  | 49   | 3.1%  | 6  | 宾夕法尼亚大学      | 美国   | 34   | 2.1% |
| 9  | 韩国   | 46   | 2.9%  | 9  | 霍华休斯医学研究所    | 美国   | 32   | 2.0% |
| 10 | 意大利  | 45   | 2.8%  | 10 | 浙江大学         | 中国   | 31   | 2.0% |



1.3 重点热点前沿——“单细胞转录组测序在植物组织发育研究中的应用”

单细胞转录组测序（Single cell RNA sequencing, scRNA-seq），也称为单细胞 RNA 测序，是在单细胞水平对转录组进行测序的一项新的颠覆性技术，是研究单个细胞内基因表达的强有力的工具，可以解决在早期胚胎发育、干细胞、癌症、免疫等研究领域中的样品量极低或细胞异质性的问题，让解析单个细胞的行为、机制及其与机体的关系成为了现实。单细胞转录组测序技术的出现正在彻底

改变从组织到细胞的全转录组快照的细节，自问世以来发展势头迅猛：2009 年，北京大学汤富酬团队完成全球首例单细胞 RNA 高通量测序；2011 年，美国冷泉港实验室的 Navin 团队完成全球首例单细胞 DNA 测序；2013 年，北京大学谢晓亮团队发明 MALBAC 扩增技术；2014 年，美国富鲁达（Fluidigm）公司发布首个单细胞全自动制备系统；2015 年，哈佛医学院 McCarroll 牵头推出基于微滴包裹单细胞和捕获磁珠技术的 Drop-Seq 技术，美国细胞研究公司的 Fodor 等人推出基于微孔板的 Micro-Well 技术；2016 年，美国 10x Genomics 公司推出商业化单细

胞分析系统 Chromium；2017 年，美国 BD 公司推出单细胞分析系统 Rhapsody，人类细胞图谱计划启动；2018 年，单细胞测序被《科学》（Science）评为年度十大科学突破技术；2019 年，单细胞测序被《自然》（Nature）评为生命科学领域年度技术。随着技术的不断突破及新分析系统的持续推出，应用领域从生物医学领域拓展到了植物学领域。

该热点前沿共有 28 篇核心论文，重点研究将单细胞转录组测序技术用于拟南芥、水稻、玉米、茶、杨树等植物的组织发育研究，包括根、花序分生组织、叶肉、茎

次级维管组织等的发育。其中，被引频次最高的论文有 2 篇，均被引用了 204 次（图 3），一篇于 2019 年发表在《分子植物》（Molecular Plant）上，作者来自中国科学院分子植物科学卓越创新中心（植物生理生态研究所），利用单细胞转录组测序法揭示了拟南芥根细胞的高度异质性，并在单细胞分辨率下识别了根细胞分化过程中中间状态的表达特征。另一篇于 2019 年发表在《植物生理学》（Plant Physiology）上，作者来自美国密歇根大学，研究利用单细胞转录组测序解析植物单个细胞之间的分子关系，以单细胞分辨率提供了拟南芥根的第一代基因表达图谱。

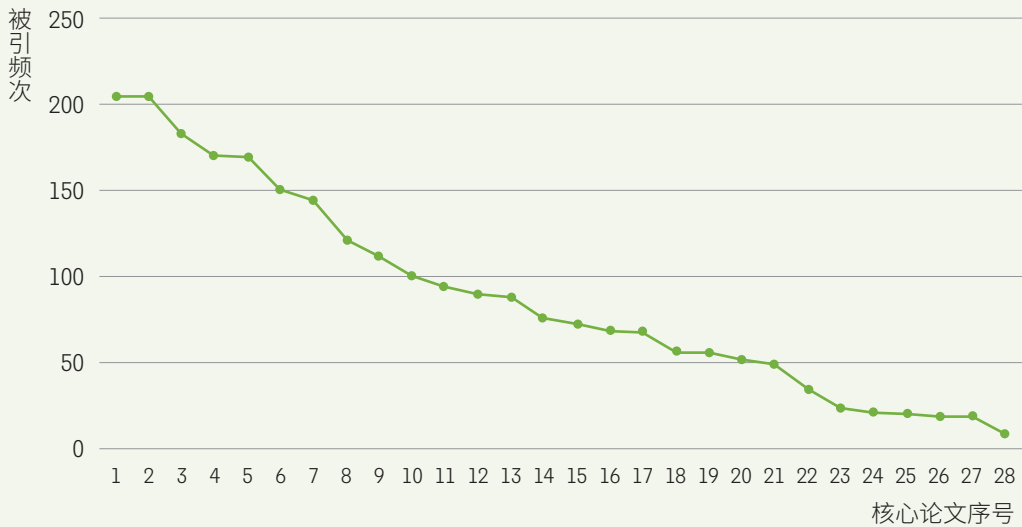


图 3 “单细胞转录组测序在植物组织发育研究中的应用”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

核心论文 Top 产出国家和机构中（表 4），美国占比最高，贡献了 15 篇论文；其次是中国，贡献了 11 篇论文；德国排名第三。中国科学院与美国的乔治亚大学和华盛顿大学是核心论文产出并列第一的机构；比利时的根特大学紧随其后，排名第四。由此反映出，美国和中国很重视单细胞转录组测序方法研究及其在植物领域中的应用。

表 4 “单细胞转录组测序在植物组织发育研究中的应用”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

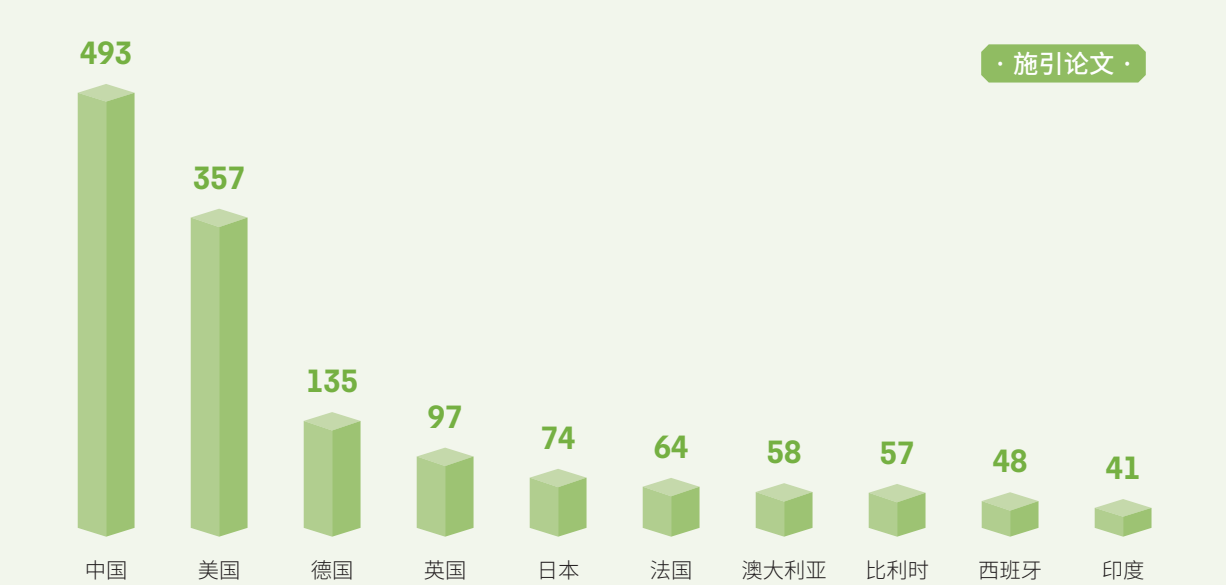
| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构      | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|---------|------|------|-------|
| 1  | 美国   | 15   | 53.6% | 1  | 中国科学院   | 中国   | 4    | 14.3% |
| 2  | 中国   | 11   | 39.3% | 1  | 乔治亚大学   | 美国   | 4    | 14.3% |
| 3  | 德国   | 6    | 21.4% | 1  | 华盛顿大学   | 美国   | 4    | 14.3% |
| 4  | 日本   | 3    | 10.7% | 4  | 根特大学    | 比利时  | 3    | 10.7% |
| 4  | 比利时  | 3    | 10.7% | 5  | 名古屋大学   | 日本   | 2    | 7.1%  |
| 6  | 英国   | 2    | 7.1%  | 5  | 河南大学    | 中国   | 2    | 7.1%  |
| 6  | 瑞士   | 2    | 7.1%  | 5  | 上海师范大学  | 中国   | 2    | 7.1%  |
| 6  | 荷兰   | 2    | 7.1%  | 5  | 杜塞尔多夫大学 | 德国   | 2    | 7.1%  |
| 9  | 芬兰   | 1    | 3.6%  | 5  | 慕尼黑工业大学 | 德国   | 2    | 7.1%  |
| 9  | 以色列  | 1    | 3.6%  | 5  | 密西根大学   | 美国   | 2    | 7.1%  |
| 9  | 新加坡  | 1    | 3.6%  | 5  | 罗格斯大学   | 美国   | 2    | 7.1%  |
| 9  | 澳大利亚 | 1    | 3.6%  | 5  | 日内瓦大学   | 瑞士   | 2    | 7.1%  |
|    |      |      |       | 5  | 埃莫里大学   | 美国   | 2    | 7.1%  |
|    |      |      |       | 5  | 上海交通大学  | 中国   | 2    | 7.1%  |
|    |      |      |       | 5  | 上海科技大学  | 中国   | 2    | 7.1%  |
|    |      |      |       | 5  | 浙江大学    | 中国   | 2    | 7.1%  |



施引论文产出国家和机构中（表 5），产出最多的是中国，其次是美国，中美远领先于其他国家，占比分别为 41.5% 和 30.0%，表明中美两国在该研究方向上的持续关注；尤其中国，核心论文贡献排名第二，而施引论文反超美国 100 多篇，位居第一。德国与其核心论文产出排名一致，依然为第三。施引机构方面，中国机构表现突出，中国科学院和中国农业科学院分别以 92 篇和 58 篇的施引论文数量，排名第一和第二；华中农业大学与比利时的根特大学并列第三。美国研究力量分散，有 3 个机构进入前 10，分列第 6、第 8 和第 10 位。

表 5 “单细胞转录组测序在植物组织发育研究中的应用” 研究前沿中施引论文的 Top10 产出国家和机构

| 排名 | 国家   | 施引论文 | 比例    | 排名 | 机构             | 所属国家 | 施引论文 | 比例   |
|----|------|------|-------|----|----------------|------|------|------|
| 1  | 中国   | 493  | 41.5% | 1  | 中国科学院          | 中国   | 92   | 7.7% |
| 2  | 美国   | 357  | 30.0% | 2  | 中国农业科学院        | 中国   | 58   | 4.9% |
| 3  | 德国   | 135  | 11.4% | 3  | 根特大学           | 比利时  | 49   | 4.1% |
| 4  | 英国   | 97   | 8.2%  | 3  | 华中农业大学         | 中国   | 49   | 4.1% |
| 5  | 日本   | 74   | 6.2%  | 5  | 法国国家农业食品与环境研究院 | 法国   | 47   | 4.0% |
| 6  | 法国   | 64   | 5.4%  | 6  | 马普学会           | 德国   | 42   | 3.5% |
| 7  | 澳大利亚 | 58   | 4.9%  | 6  | 美国农业部          | 美国   | 42   | 3.5% |
| 8  | 比利时  | 57   | 4.8%  | 8  | 法国国家科学研究中心     | 法国   | 41   | 3.4% |
| 9  | 西班牙  | 48   | 4.0%  | 8  | 乔治亚大学          | 美国   | 41   | 3.4% |
| 10 | 印度   | 41   | 3.4%  | 10 | 加州大学戴维斯分校      | 美国   | 40   | 3.4% |



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

农业科学、植物学和动物学领域有 2 个方向入选新兴前沿，是“深度迁移学习方法在作物分类和病害检测中的应用”和“生物聚合物薄膜在食品保鲜包装中的应用”（表 6）。

表 6 农业科学、植物学和动物学领域新兴前沿

| 序号 | 新兴前沿                   | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文<br>平均出版年 |
|----|------------------------|------|------|---------------|
| 1  | 深度迁移学习方法在作物分类和病害检测中的应用 | 5    | 150  | 2023.0        |
| 2  | 生物聚合物薄膜在食品保鲜包装中的应用     | 9    | 186  | 2022.9        |

### 2.2 重点新兴前沿——“深度迁移学习方法在作物分类和病害检测中的应用”

深度迁移学习（Deep Transfer Learning）是一种特定的深度学习方法，旨在通过将一个领域（源领域）上学到的知识迁移到另一个领域（目标领域），以提高目标任务的学习效率和性能，特别适用于目标领域数据稀缺或难以标注的情况。深度迁移学习已在多个领域中得到了广泛应用，包括计算机视觉中的图像分类、目标检测与分割及风格迁移，自然语言处理中的情感分析、机器翻译和文本生成，语音识别中的语音转文本和情感识别、

医学和生物信息学中的医学影像分析和基因组数据分析等。与通常在大量标注数据上进行训练的深度学习相比，深度迁移学习可以解决训练数据不足的问题，例如在某些类似生物信息和机器人的领域，由于数据采集和标注费用高昂，构建大规模标注良好的数据集非常困难，深度学习很难发挥作用，而迁移学习则会放宽训练数据必须与测试数据独立同分布的假设，这是机器学习领域的一个重要假设，称为独立同分布假设。

该新兴前沿主要开展了三个方面的研究：一是利用迁移学习开发深度学习模型（如 CNN），发现迁移学习会提高水果分类能力；二是通过迁移学习开发模型，对果实的成熟度进行分类及识别水果类型。三是对用于作物疾病分类的不同深度学习模型进行比较分析，证实深度学习模型对于作物疾病的分类有效性。

An aerial photograph of a dense, lush green forest. A winding asphalt road with yellow lane markings cuts through the trees. A small white car is visible on the road. The text '03' is overlaid in the top left corner.

# 03

## 生态与环境科学

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 生态与环境科学领域 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）。

环境科学子领域的热点前沿主要涉及新污染物、气候变化、污染物消除、环境友好材料及环境流行病学等研究方向。微塑料污染相关研究是近 10 年来环境科学的热点问题，也是在研究前沿报告中多次呈现的重要前沿方向，其相关研究在 2015-2017、2020-2023 年多次入选热点前沿和新兴前沿。2024 年微塑料相关的热点前沿有两个，分别是“人体组织微塑料污染的发现与定量检测”和“轮胎磨损颗粒的环境归趋与生态毒理”。其中“人体组织微塑料污染的发现与定量检测”正是 2023 年的新兴前沿。轮胎磨损颗粒是环境中微塑料的主要来源之一，也是一种新近受到关注的新污染物。英国一项最新测试显

示，汽车轮胎磨损产生的颗粒污染是尾气排放污染的近 2000 倍。此外，应对气候变化的固碳技术是当前环境科学中广受关注的环境技术，2024 年有两个热点前沿与固碳技术相关，分别是“二氧化碳和氮气高效催化合成尿素技术”和“二氧化碳直接空气捕获的技术经济评估”，后者是连续第二年入选热点前沿。污染物消除相关的热点前沿是“用于污染物降解的过氧单硫酸盐活化剂及活化机制”，利用过硫酸盐活化氧化消除污染物的相关前沿也在 2017-2018、2022-2023 年多次入选热点前沿。聚羟基脂肪酸酯 (PHA) 是可微生物合成的一种聚酯，由于其具有生物可降解性、生物相容性和光学性能等优良性质，现已成为科技界和工业界广泛关注的生物塑料，与之相关的热点前沿是“聚羟基脂肪酸酯生物塑料的生产、应用及生物降解特性”。在环境流行

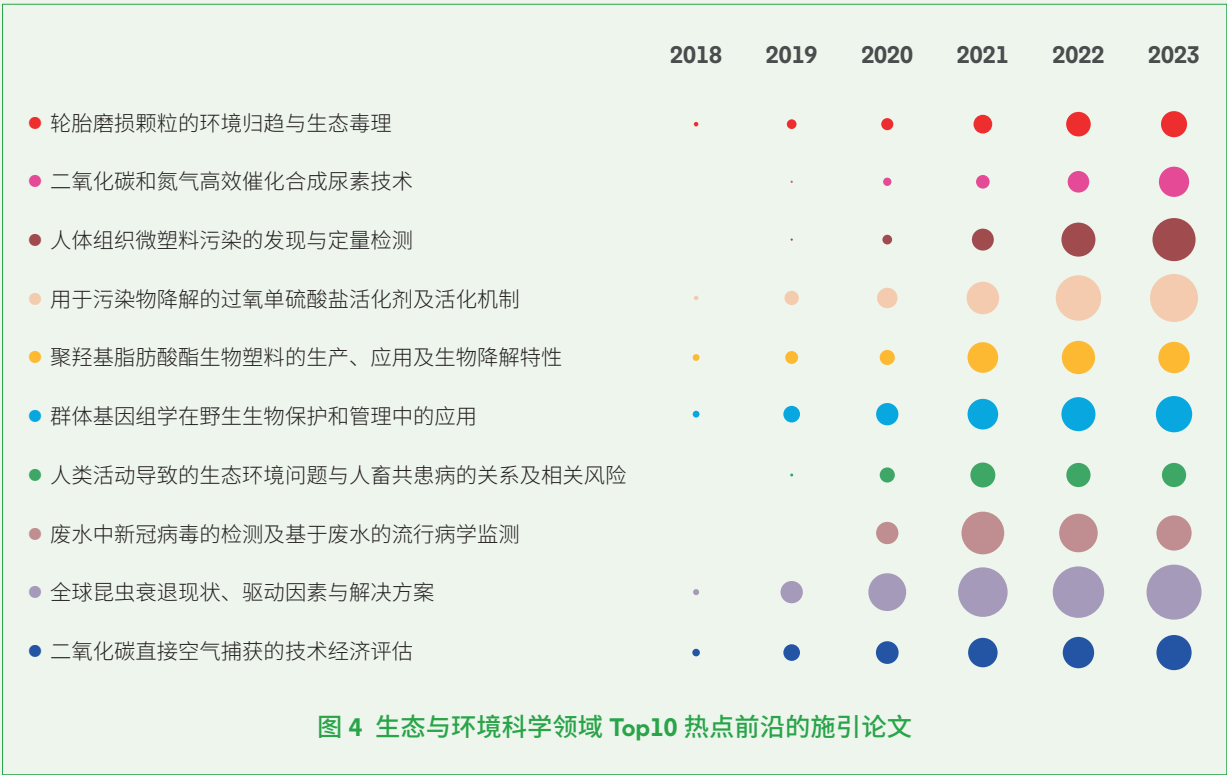
病学方向的热点前沿有两个，分别是“废水中新冠病毒的检测及基于废水的流行病学监测”和“人类活动导致的生态环境问题与人畜共患病的关系及相关风险”，其中“废水中新冠病毒的检测及基于废水的流行病学监测”已经连续三年被选为热点前沿，“人类活动导致的生态环境问题与人畜共患病的关系及相关风险”是聚焦环境问题与流行性疾病关系的研究。

生态科学子领域的热点前沿主要涉及生物多样性、生物保护两个方面的问题，具体包括“全球昆虫衰退现状、驱动因素与解决方案”和“群体基因组学在野生生物保护和管理中的应用”两个研究前沿。其中，“全球昆虫衰退现状、驱动因素与解决方案”连续第四年入选热点前沿，反映出生物多样性保护议题成为全球关注热点。



表 7 生态与环境科学领域 Top 10 热点前沿

| 序号 | 热点前沿                        | 核心论文 | 被引频次  | 核心论文平均出版年 |
|----|-----------------------------|------|-------|-----------|
| 1  | 轮胎磨损颗粒的环境归趋与生态毒理            | 18   | 1649  | 2021.7    |
| 2  | 二氧化碳和氮气高效催化合成尿素技术           | 18   | 1641  | 2021.6    |
| 3  | 人体组织微塑料污染的发现与定量检测           | 4    | 2508  | 2021.0    |
| 4  | 用于污染物降解的过氧单硫酸盐活化剂及活化机制      | 26   | 5266  | 2020.9    |
| 5  | 聚羟基脂肪酸酯生物塑料的生产、应用及生物降解特性    | 18   | 2189  | 2020.7    |
| 6  | 群体基因组学在野生生物保护和管理中的应用        | 21   | 2727  | 2020.6    |
| 7  | 人类活动导致的生态环境问题与人畜共患病的关系及相关风险 | 9    | 1256  | 2020.6    |
| 8  | 废水中新冠病毒的检测及基于废水的流行病学监测      | 48   | 10547 | 2020.4    |
| 9  | 全球昆虫衰退现状、驱动因素与解决方案          | 32   | 8032  | 2020.3    |
| 10 | 二氧化碳直接空气捕获的技术经济评估           | 10   | 2749  | 2019.9    |



1.2 重点热点前沿——“轮胎磨损颗粒的环境归趋与生态毒理”

轮胎磨损颗粒物（Tire wear particles, TWP）是轮胎与道路摩擦而产生的颗粒物，粒径通常小于 2.5μm。轮胎生产制造过程中需要大量化学品，除了橡胶，还可能添加填料、增强剂、加工助剂、缓凝剂、粘合剂和活化剂等，导致 TWP 含有多种环境污染物，TWP 还可能在热量和摩擦的作用下与路

面材料或其他交通排放物质反应生成新的成分复杂的污染物。TWP 及其转化物可沉积在道路上或路边，随着降雨径流汇集到水体中，进而进入水生生物系统，释放具有致畸和致突变的强毒性污染物，为水体生物带来健康风险。全球每年约生产 31 亿条轮胎，人均每年排放 0.81 公斤 TWP。有研究估算，这些颗粒物占进入河流、湖泊和海洋的微塑料的一半，占空气中微塑料的 80%。TWP 大量排放并进入环境，其污染及对生物的健康危害越来越受到关注。

本研究前沿共 18 篇核心论文，其中发表最早的核心论文是 2018 年德国亥姆霍兹联合会环境研究中心的 Reemtsma Thorsten 教授和奥地利维也纳大学的 Hofmann Thilo 等学者合作发表于《水研究》(Water Research) 上的一篇综述论文，该

文被引用 367 次，是被引频次最高的一篇论文。其回顾了 TWP 的性质、产生、分析、排放、环境行为及生态毒理。估算表明，欧盟每年约产生 1,327,000 吨 TWP，美国每年约产生 1,120,000 吨 TWP，0.1%~10% 的 TWP 最终进入地表水。

在 TWP 导致的污染物成分中，6PPD- 醌是一种关键的剧毒物质。本研究前沿的 18 篇论文有超过一半聚焦 6PPD- 醌的环境特征和生态毒理。6PPD- 醌的前体物是在橡胶轮胎中广泛使用的抗氧化剂 N-(1,3-二甲基丁基)-N'-苯基对苯二胺(6PPD)。6PPD 在臭氧环境中极易转化为 6PPD- 醌，其环境暴露对生物体和人体健康危害极大。本研究前沿被引频次第二高的论文来自美国和加拿大科学家 2021 年合作发表于《科学》(Science) 的研究，该文提出 6PPD- 醌是造成美国太平

洋西北部与雨水有关的鲑鱼急性死亡的主要致病毒性物质。

6PPD- 醌是橡胶抗氧化剂 6PPD 的衍生物，几乎所有的轮胎都含有 6PPD。6PPD- 醌在全球广泛存在，且达到有毒浓度。本研究前沿中一篇来自中国香港的核心论文的研究结果表明，中国城市 PM2.5 中来自 TWP 的六种新兴 PPD 和衍生物(6PPD- 醌)普遍存在，总检出率为 81%。当前迫切需要进一步开展研究，调查 TWP 相关污染及生态毒理风险。同时，全球橡胶轮胎行业也面临绿色制造转型的紧迫形式。最新通过的“欧 7”排放标准首次对轮胎排放污染作出限制。行业急需生产 6PPD 含量较低或替代 6PPD 的产品，以减少轮胎磨损颗粒带来的环境污染问题。

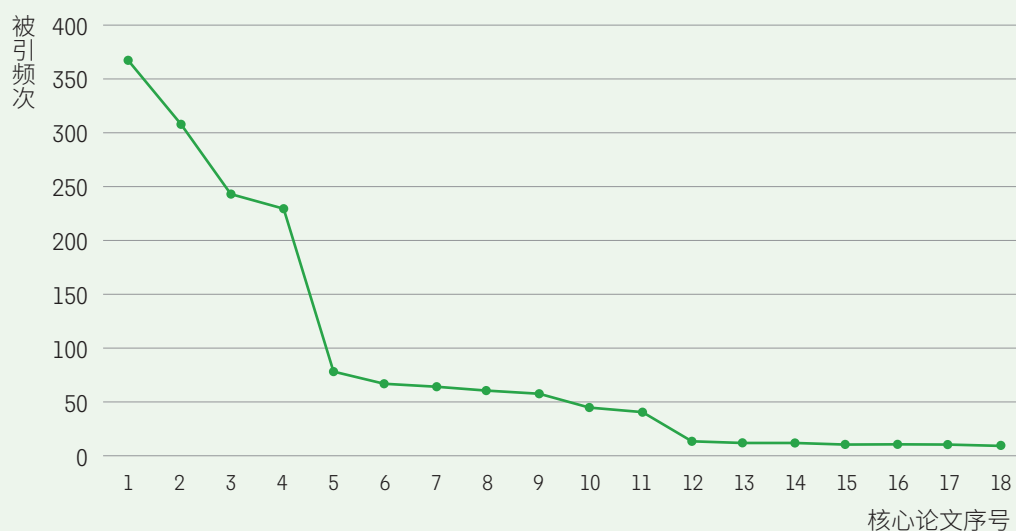
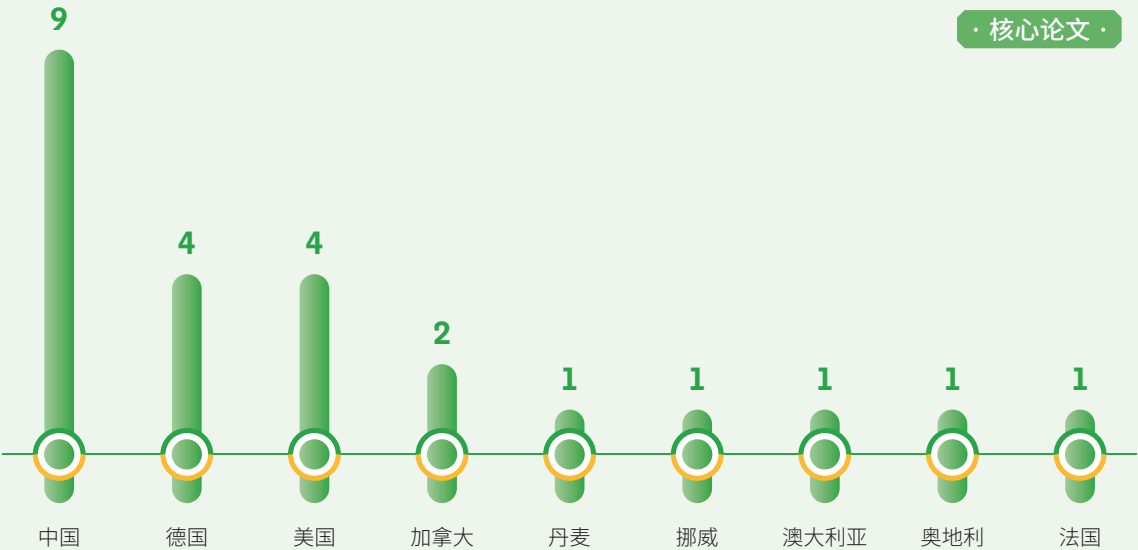


图 5 “轮胎磨损颗粒的环境归趋与生态毒理” 研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

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 9 篇，占核心论文总数的一半。美国和德国均有 4 篇核心论文，并列排第二位，核心论文占比接近四分之一。发文机构中，中国的东南大学有 4 篇核心论文，位列第一，其他机构包括中国的香港浸会大学和浙江工业大学、美国的华盛顿大学和华盛顿州立大学、德国的亥姆霍兹联合会和德国联邦高速公路研究院等，均有 2 篇核心论文。

表 8 “轮胎磨损颗粒的环境归趋与生态毒理”研究前沿中核心论文的 TOP 产出国家和机构

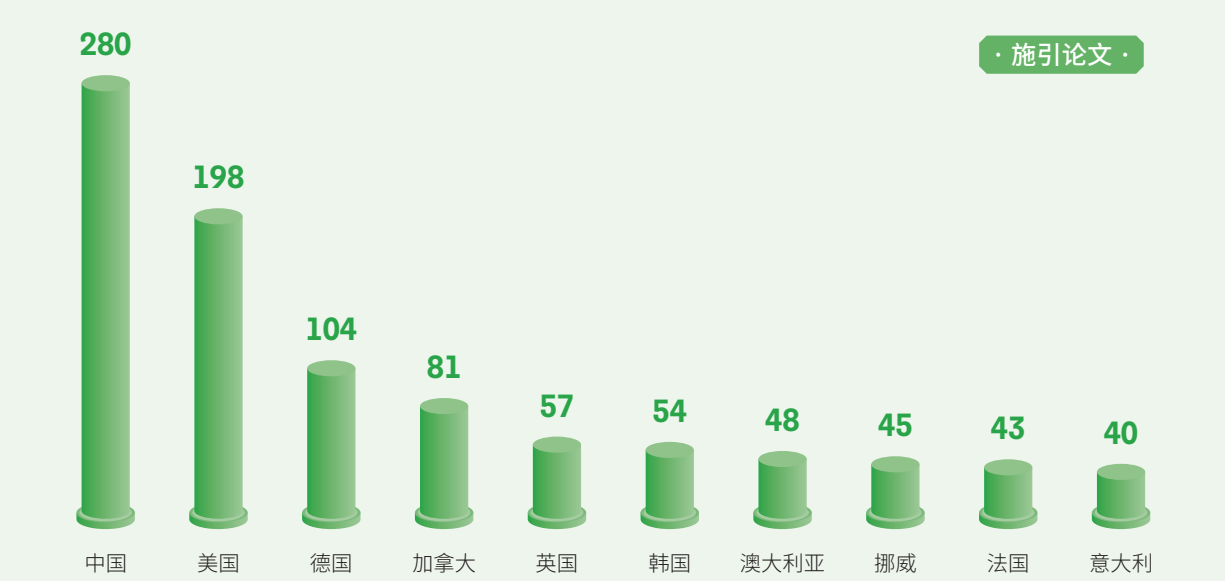
| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构          | 国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|-------------|----|------|-------|
| 1  | 中国   | 9    | 50.0% | 1  | 东南大学        | 中国 | 4    | 22.2% |
| 2  | 德国   | 4    | 22.2% | 2  | 香港浸会大学      | 中国 | 2    | 11.1% |
| 2  | 美国   | 4    | 22.2% | 2  | 华盛顿大学       | 美国 | 2    | 11.1% |
| 4  | 加拿大  | 2    | 11.1% | 2  | 浙江工业大学      | 中国 | 2    | 11.1% |
| 5  | 丹麦   | 1    | 5.6%  | 2  | 华盛顿州立大学     | 美国 | 2    | 11.1% |
| 5  | 挪威   | 1    | 5.6%  | 2  | 亥姆霍兹联合会     | 德国 | 2    | 11.1% |
| 5  | 澳大利亚 | 1    | 5.6%  | 2  | 德国联邦高速公路研究院 | 德国 | 2    | 11.1% |
| 5  | 奥地利  | 1    | 5.6%  |    |             |    |      |       |
| 5  | 法国   | 1    | 5.6%  |    |             |    |      |       |



从施引论文的来源国家和机构来看（表 9），中国仍是该前沿施引论文最多的国家，共有 280 篇，占比接近三分之一。其次，美国和德国分别以 198 篇和 104 篇施引论文排名第二、三位。施引论文的 Top 10 产出机构中，4 家机构来自中国，其中中国科学院贡献了 45 篇施引论文，数量最多。德国亥姆霍兹联合会和法国国家科学研究中心分别以 36 篇和 24 篇施引论文排第二、三位。

表 9 “轮胎磨损颗粒的环境归趋与生态毒理”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   | 280  | 30.4% | 1  | 中国科学院      | 中国   | 45   | 4.9% |
| 2  | 美国   | 198  | 21.5% | 2  | 亥姆霍兹联合会    | 德国   | 36   | 3.9% |
| 3  | 德国   | 104  | 11.3% | 3  | 法国国家科学研究中心 | 法国   | 24   | 2.6% |
| 4  | 加拿大  | 81   | 8.8%  | 4  | 多伦多大学      | 加拿大  | 19   | 2.1% |
| 5  | 英国   | 57   | 6.2%  | 5  | 挪威水资源研究所   | 挪威   | 18   | 2.0% |
| 6  | 韩国   | 54   | 5.9%  | 5  | 东南大学       | 中国   | 18   | 2.0% |
| 7  | 澳大利亚 | 48   | 5.2%  | 5  | 华盛顿大学      | 美国   | 18   | 2.0% |
| 8  | 挪威   | 45   | 4.9%  | 5  | 浙江工业大学     | 中国   | 18   | 2.0% |
| 9  | 法国   | 43   | 4.7%  | 9  | 昆士兰大学      | 澳大利亚 | 16   | 1.7% |
| 10 | 意大利  | 40   | 4.3%  | 10 | 香港浸会大学     | 中国   | 15   | 1.6% |
|    |      |      |       | 10 | 华盛顿州立大学    | 美国   | 15   | 1.6% |



1.3 重点热点前沿——“二氧化碳直接空气捕获的技术经济评估”

二氧化碳直接空气捕获 (Direct air capture, DAC) 是一种新兴的负碳技术, 一般利用风能、太阳能、地热能等低碳能源, 直接从空气中捕集低浓度的二氧化碳, 实现二氧化碳净负排放。DAC 适用于小型化石燃料燃烧装置以及交通工具等分布源、移动源的 CO<sub>2</sub> 捕集, 装置的布置地点灵活性大, 可对其他碳捕集利用与封存 (Carbon capture, utilization, and storage, CCUS) 技术过程中泄露的 CO<sub>2</sub> 进行捕集, 是实现气候变化温控目标的关键技术手段和托底保障技术,

对将全球变暖限制在 2 摄氏度范围内发挥重要作用。DAC 日益受到广泛关注。然而, DAC 在实际应用中存在捕集能耗较高、吸附材料成本高、二氧化碳吸附能力不足、工艺系统及过程有待整合优化等科学问题, 限制了当前大规模推广应用。目前, DAC 技术的发展在全球范围内还处于初步阶段, 已建设了一些技术示范项目。世界首个工业规模 DAC 工厂于 2021 年在冰岛建成, 年捕集二氧化碳达到 4000 吨。能否有效降低成本、提高效率, 是 DAC 技术未来发展和推广的关键。

本研究前沿共 10 篇核心论文, 主要聚焦 DAC 的技术工艺开发及 DAC 生命周期评估、经济评估、能源评估等技术经济评估。被引频次最高的一篇论文由哈佛大学应用物理学教授 David Keith 等美加学者于 2018 年发表在 Joule 期刊, 被引频次达到 674 次。该文介绍了强碱溶液吸附与钙回收耦合的 DAC 连续工艺, 并对该工艺进行了能源使用量估算、物料和能量模拟及成本评估。



核心论文产出国家和机构的统计结果 (表 10) 表明, 美国是该研究前沿核心论文的最大产出国, 共 5 篇, 占核心论文总数的一半。

英国紧随其后, 贡献了 4 篇核心论文。瑞士和德国均有 3 篇核心论文, 并列排第三位。发文机构中, 瑞士苏黎世联邦理工学院有 3 篇核心

文, 数量最多。其他机构包括德国的 4 个研究机构、英国的 3 个研究机构、美国的 2 个机构和奥地利的 1 个机构分别贡献了 2 篇核心论文。

表 10 “二氧化碳直接空气捕获的技术经济评估”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  | 5    | 50.0% | 1  | 苏黎世联邦理工学院        | 瑞士  | 3    | 30.0% |
| 2  | 英国  | 4    | 40.0% | 2  | 柏林工业大学           | 德国  | 2    | 20.0% |
| 3  | 瑞士  | 3    | 30.0% | 2  | 国际应用系统分析研究所      | 奥地利 | 2    | 20.0% |
| 3  | 德国  | 3    | 30.0% | 2  | 帝国理工学院           | 英国  | 2    | 20.0% |
| 5  | 奥地利 | 2    | 20.0% | 2  | 威斯康星大学麦迪逊分校      | 美国  | 2    | 20.0% |
| 5  | 加拿大 | 2    | 20.0% | 2  | 汉堡大学             | 德国  | 2    | 20.0% |
| 7  | 芬兰  | 1    | 10.0% | 2  | 利兹大学             | 英国  | 2    | 20.0% |
| 7  | 意大利 | 1    | 10.0% | 2  | 全球共同体与气候变化墨卡托研究所 | 德国  | 2    | 20.0% |
| 7  | 西班牙 | 1    | 10.0% | 2  | 德国波茨坦气候影响研究所     | 德国  | 2    | 20.0% |
| 7  | 爱尔兰 | 1    | 10.0% | 2  | 阿伯丁大学            | 英国  | 2    | 20.0% |
| 7  | 荷兰  | 1    | 10.0% | 2  | 科罗拉多矿业大学         | 美国  | 2    | 20.0% |



从施引论文的来源国家和机构来看（表 11），美国的施引论文数量最多，有 559 篇施引论文，数量约占近三分之一。英国和德国分

别以 343 篇和 293 篇论文排第二、三位。中国以 281 篇施引论文的贡献度位列第四。施引机构中，美国能源部施引论文贡献最多，共 109

篇，占施引论文总数的 5.9%。瑞士苏黎世联邦理工学院和英国帝国理工学院分别贡献 90 篇和 73 篇施引论文，位列第二、第三位。

表 11 “二氧化碳直接空气捕获的技术经济评估”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   | 559  | 30.4% | 1  | 美国能源部          | 美国  | 109  | 5.9% |
| 2  | 英国   | 343  | 18.6% | 2  | 苏黎世联邦理工学院      | 瑞士  | 90   | 4.9% |
| 3  | 德国   | 293  | 15.9% | 3  | 帝国理工学院         | 英国  | 73   | 4.0% |
| 4  | 中国   | 281  | 15.3% | 4  | 亥姆霍兹联合会        | 德国  | 71   | 3.9% |
| 5  | 加拿大  | 143  | 7.8%  | 5  | 拉彭兰塔 - 拉赫蒂工业大学 | 芬兰  | 60   | 3.3% |
| 6  | 瑞士   | 138  | 7.5%  | 6  | 国际应用系统分析研究所    | 奥地利 | 59   | 3.2% |
| 7  | 荷兰   | 136  | 7.4%  | 7  | 德国波茨坦气候影响研究所   | 德国  | 45   | 2.4% |
| 8  | 澳大利亚 | 124  | 6.7%  | 8  | 中国科学院          | 中国  | 43   | 2.3% |
| 9  | 法国   | 89   | 4.8%  | 9  | 乌得勒支大学         | 荷兰  | 42   | 2.3% |
| 10 | 意大利  | 83   | 4.5%  | 10 | 法国国家科学研究中心     | 法国  | 40   | 2.2% |





2024 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 04

## 地球科学

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

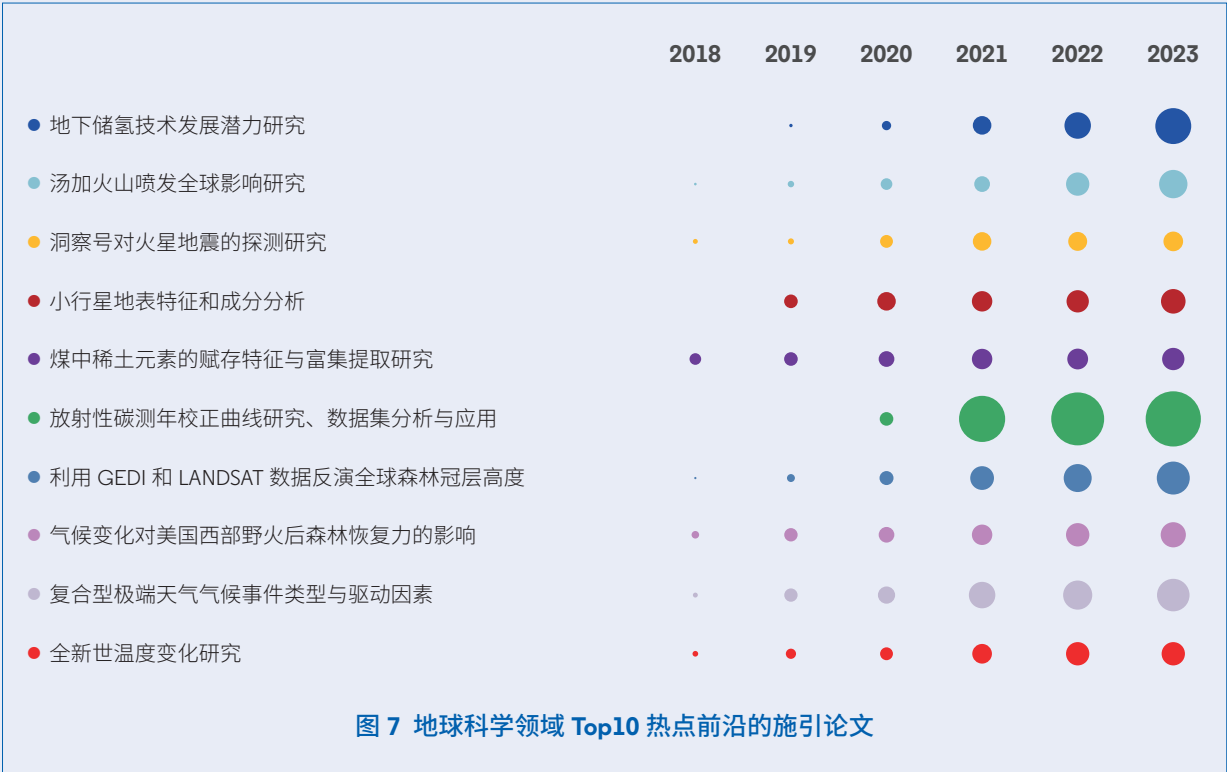
# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 地球科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

2024 年地球科学领域 Top10 热点前沿学科领域分布较为均衡，4 个热点前沿属于地质学，地理学、大气科学和行星科学各 2 个，总体聚焦新能源发展与全球气候变化。在地质学领域，地下储氢技术发展潜力研究，煤中稀土元素的赋存特征与富集提取研究，是各国愈发重视的国家战略需求，可以有效带动材料装备技术和高新产业发展。大气科学领域的复合型极端天气气候事件，以及地理学领域的气候变化对美国西部野火后森林恢复力的影响，都展现出地学界对国际社会所关注的人类活动与气候变化研究的积极响应。在行星科学领域，依托洞察号、隼鸟 2 号、起源-光谱分析-资源识别-安全-风化层探测器等重要探测平台，火星和小行星探测持续产出新的高价值发现，火星地震探测研究以及小行星地表特征和成分分析多次入选《研究前沿》报告。同时，全新世温度变化、利用卫星数据反演地球植被信息、放射性碳测年技术等基础研究和技术应用，凸显地球科学研究的巨大潜力和活力。

表 12 地球科学领域 Top 10 热点前沿

| 序号 | 热点前沿                           | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文平均出版年 |
|----|--------------------------------|------|------|-----------|
| 1  | 地下储氢技术发展潜力研究                   | 40   | 3001 | 2021.8    |
| 2  | 汤加火山喷发全球影响研究                   | 33   | 2002 | 2021.7    |
| 3  | 洞察号对火星地震的探测研究                  | 25   | 1781 | 2021.6    |
| 4  | 小行星地表特征和成分分析                   | 22   | 2507 | 2021.0    |
| 5  | 煤中稀土元素的赋存特征与富集提取研究             | 15   | 1492 | 2020.9    |
| 6  | 放射性碳测年校正曲线研究、数据集分析与应用          | 6    | 4200 | 2020.5    |
| 7  | 利用 GEDI 和 LANDSAT 数据反演全球森林冠层高度 | 16   | 1945 | 2020.4    |
| 8  | 气候变化对美国西部野火后森林恢复力的影响           | 10   | 1481 | 2020.3    |
| 9  | 复合型极端天气气候事件类型与驱动因素             | 10   | 2195 | 2020.2    |
| 10 | 全新世温度变化研究                      | 8    | 1108 | 2020.1    |



## 1.2 重点热点前沿——“地下储氢技术发展潜力研究”

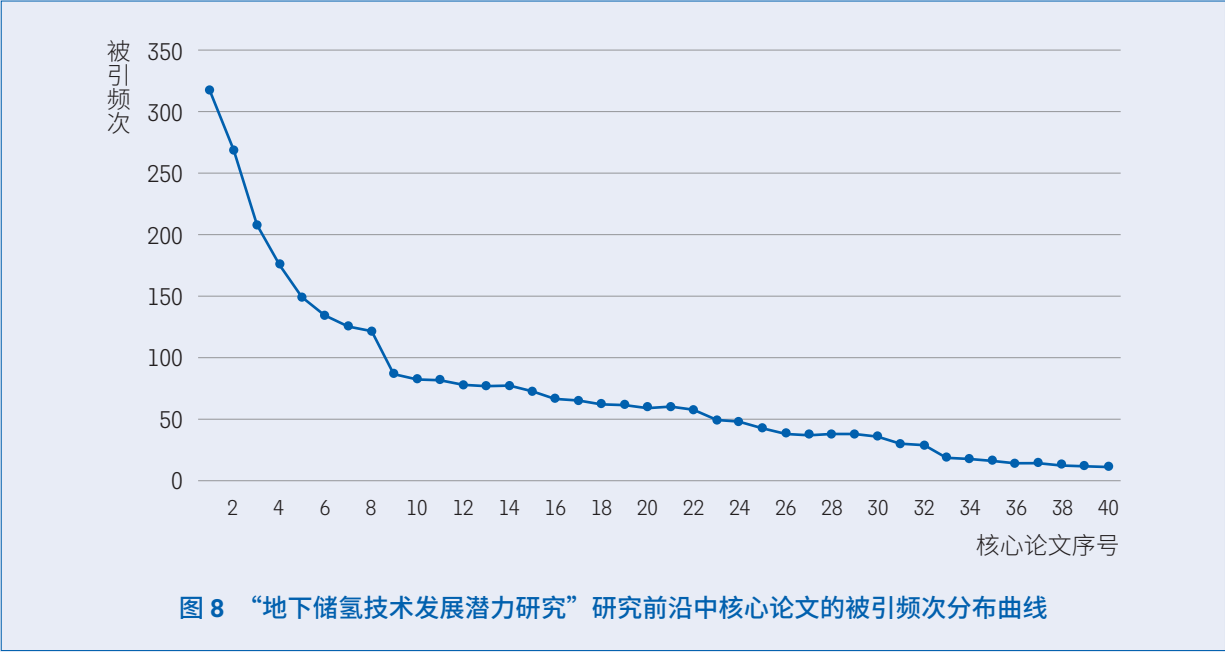
地下储氢是利用地下地质构造实现大规模氢能高压气态储存，即将氢气注入盐穴、枯竭油气藏、含水层和废弃矿井等地下场所中封闭储存，具有安全性高、成本低、规模大、周期长、可跨季节储能等优势，是未来氢能大规模储备的重要发展方向。

欧洲是全球地质储氢工程项目最为丰富的地区之一，德国、荷兰、英国、波兰等是欧洲主要的氢气生产国，自 20 世纪 70 年代开始陆续开展了盐穴储氢、枯竭气藏、含水层储氢的全尺寸实验以及工业示范，在地质选址评价、库容设计、建库工艺包以及储氢库运行监测等

方面积累了丰富的研究经验。而澳大利亚、沙特、巴西等作为拥有巨大可再生资源潜力的国家，近年来也积极谋求在迅速崛起的氢能市场中的战略定位，推进实施一系列氢能试点项目。

本热点前沿 40 篇核心论文中有 14 篇是综述文章。其中，波兰科学院在《可再生与可持续能源评论》（Renewable and Sustainable Energy Reviews）上发表的综述文章“Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects”在该前沿中被引频次最高，强调了实施地下储氢项目需要解决的地质性、工程性、经济性、法律性和社

会问题，并提出了政府、非政府组织、高校、研究机构和产业界在项目路线图中各自可以发挥的作用。其余 26 篇研究论文重点聚焦不同储氢类型的特点，以及不同地质条件、气候条件对储氢库的影响。其中，德国亚琛工业大学和德国尤里希研究中心在《国际氢能杂志》（International Journal of Hydrogen Energy）上合作发表的“Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe”一文，从规模、地质条件和储存能力等方面对欧洲地下盐层进行了适宜性评估，研究发现若只考虑陆上和近海盐穴，德国的储氢潜力最大，为 9.4 千兆瓦时，其次是波兰的 7.24 千兆瓦时。



在本热点前沿中，澳大利亚的表现最为活跃，发文量占核心论文总量的 55%，其中伊迪斯科文大学通过积极与资源型海湾国家开展国际

合作，提升学术影响。产出的 16 篇核心论文中，与沙特阿拉伯机构合作 12 篇，与伊朗合作 5 篇，与伊拉克机构合作 3 篇。该校专门设

立了可持续能源与资源中心，聚焦地质储氢和甲烷 / 氢气转化等研究领域。



表 13 “地下储氢技术发展潜力研究”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

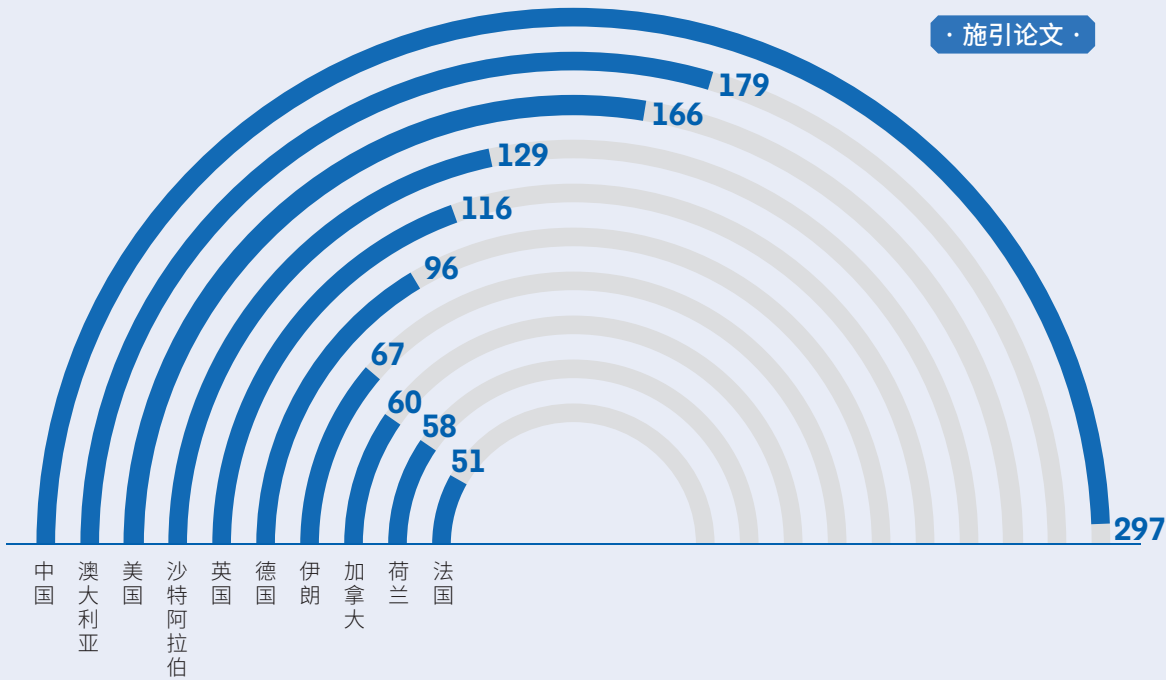
| 排名 | 国家    | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构          | 所属国家  | 核心论文 | 比例    |
|----|-------|------|-------|----|-------------|-------|------|-------|
| 1  | 澳大利亚  | 22   | 55.0% | 1  | 伊迪斯科文大学     | 澳大利亚  | 16   | 40.0% |
| 2  | 沙特阿拉伯 | 12   | 30.0% | 2  | 阿卜杜拉国王科技大学  | 沙特阿拉伯 | 8    | 20.0% |
| 3  | 英国    | 7    | 17.5% | 3  | 科廷大学        | 澳大利亚  | 6    | 15.0% |
| 4  | 荷兰    | 6    | 15.0% | 3  | 法赫德国王石油矿产大学 | 沙特阿拉伯 | 6    | 15.0% |
| 5  | 马来西亚  | 5    | 12.5% | 5  | 爱丁堡大学       | 英国    | 5    | 12.5% |
| 5  | 伊朗    | 5    | 12.5% | 6  | 帝国理工学院      | 英国    | 4    | 10.0% |
| 7  | 美国    | 4    | 10.0% | 6  | 代夫特工业大学     | 荷兰    | 4    | 10.0% |
| 7  | 中国    | 4    | 10.0% | 8  | 联邦科学与工业研究组织 | 澳大利亚  | 3    | 7.5%  |
| 9  | 伊拉克   | 3    | 7.5%  | 8  | 马来西亚思特雅大学   | 马来西亚  | 3    | 7.5%  |
| 9  | 挪威    | 3    | 7.5%  | 8  | 国油科技大学      | 马来西亚  | 3    | 7.5%  |
|    |       |      |       | 8  | 阿米尔卡比尔技术大学  | 伊朗    | 3    | 7.5%  |



从施引论文的角度看（表 14），中国表现远超其他国家，表现出了对该领域的高度关注，其后依次为澳大利亚、美国、沙特阿拉伯等。在 Top 施引论文产出机构中，对核心论文有突出贡献的伊迪斯科文大学以 101 篇的施引论文数量位列第一。中国石油大学也出现在施引论文 Top 机构中，排名第四。

表 14 “地下储氢技术发展潜力研究” 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  | 中国    | 297  | 27.1% | 1  | 伊迪斯科文大学     | 澳大利亚     | 101  | 9.2% |
| 2  | 澳大利亚  | 179  | 16.4% | 2  | 法赫德国王石油矿产大学 | 沙特阿拉伯    | 79   | 7.2% |
| 3  | 美国    | 166  | 15.2% | 3  | 科廷大学        | 澳大利亚     | 53   | 4.8% |
| 4  | 沙特阿拉伯 | 129  | 11.8% | 4  | 中国石油大学      | 中国       | 52   | 4.8% |
| 5  | 英国    | 116  | 10.6% | 5  | 阿卜杜拉国王科技大学  | 沙特阿拉伯    | 50   | 4.6% |
| 6  | 德国    | 96   | 8.8%  | 6  | 中国科学院       | 中国       | 39   | 3.6% |
| 7  | 伊朗    | 67   | 6.1%  | 7  | 美国能源部       | 美国       | 29   | 2.7% |
| 8  | 加拿大   | 60   | 5.5%  | 8  | 亥姆霍兹联合会     | 德国       | 28   | 2.6% |
| 9  | 荷兰    | 58   | 5.3%  | 9  | 代夫特工业大学     | 荷兰       | 27   | 2.5% |
| 10 | 法国    | 51   | 4.7%  | 9  | 哈里发大学       | 阿拉伯联合酋长国 | 27   | 2.5% |



1.3 重点热点前沿——“全新世温度变化研究”

全新世是地质时代的最新阶段，也是当前我们正在经历的现代间冰期。研究全新世温度变化趋势，对于理解地球系统的大规模气候变化的机制和时间尺度尤为关键，同时还有助于为在自然气候变化的长期背景下评估当前以全球变暖为主要特征的气候环境问题、特别是人为活动的影响，并制定气候变化应对策略，提供重要的科学依据。

气候模式模拟和代用指标重建是全新世温度变化领域的主要研究工具和手段。但越来越多的研究发现，气候模式模拟和代用指标重建结果之间存在严重分歧，特别是在在北半球中-高纬度地区。全新世期间的长期增温/降温趋势存在较大争议，成为近10年来困扰古气

候学家的“全新世温度变化之谜”。

本热点前沿包含的8篇核心论文集中阐释了通过改进气候模式和发展代用指标，深化对全新世温度变化的认知和解析。其中，最受关注的研究主题是代用指标记录与模式对比的融合问题。研究表明，古气候数据同化方法的应用对于弥合记录与模式之间的差异发挥了重要作用。核心论文中，由联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告的主要成员 Jessica E. Tierney 教授参与的“Globally resolved surface temperatures since the last glacial maximum”一文年篇均被引频次最高，该论文构建了自末次冰期以来的全球地表温度变化趋势，并揭示

了其两种主要的驱动机制——冰盖和温室气体的辐射强迫以及大洋翻转环流和季节日照变化的叠加；研究还显示20世纪和21世纪的变暖速度和幅度异乎寻常，进而引发广泛关注。在气候模式模拟和代用指标重建两条技术路线的发展方面，相关核心论文强调综合多种定量化重建方法，以及多种代用指标数据的集成，并开发了一种把季节温度转换为年度温度的方法，以完善全新世温度演变研究。在模型评估方面，有关研究对新一轮“国际耦合模型比较计划”下“国际古气候模拟比较计划”（PMIP4-CMIP6）的模拟结果进行了评估和对比，结果表明，最先进的模型模拟的气候变化趋势与理论和观测结果基本一致。

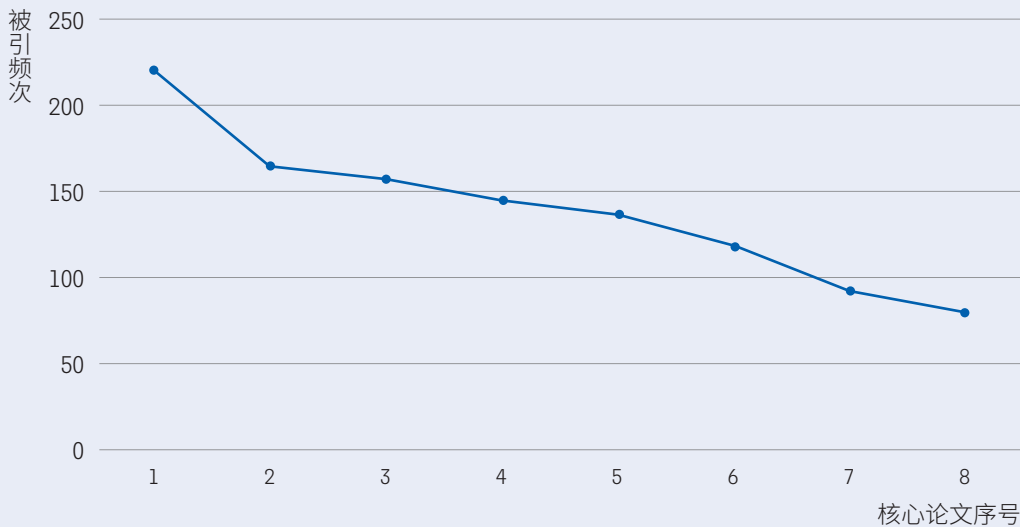


图9 “全新世温度变化研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

多国参与“全新世温度变化研究”热点前沿的研发工作，在核心论文的贡献上，美国处于领先优势地位，亚利桑那大学、美国国家大气研究中心、亥姆霍兹联合会、俄罗斯科学院、法国国家科学研究中心等美欧顶尖研究机构包揽 Top 产出机构排行榜。中国科学院、西北大学、南京师范大学、青岛海洋科学与技术试点国家实验室、南京信息工程大学、台湾大学等也参与了相关研究工作。

表 15 “全新世温度变化研究”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  | 亚利桑那大学            | 美国   | 4    | 50.0% |
| 2  | 德国  | 4    | 50.0% | 1  | 美国国家大气研究中心        | 美国   | 4    | 50.0% |
| 3  | 法国  | 3    | 37.5% | 1  | 亥姆霍兹联合会           | 德国   | 4    | 50.0% |
| 3  | 俄罗斯 | 3    | 37.5% | 4  | 巴黎西岱大学            | 法国   | 3    | 37.5% |
| 3  | 中国  | 3    | 37.5% | 4  | 法国国家科学研究中心        | 法国   | 3    | 37.5% |
| 3  | 英国  | 3    | 37.5% | 4  | 巴黎 - 萨克雷大学        | 法国   | 3    | 37.5% |
| 3  | 加拿大 | 3    | 37.5% | 4  | 原子能源与替代能源委员会      | 法国   | 3    | 37.5% |
| 8  | 瑞士  | 2    | 25.0% | 4  | 北亚利桑那大学           | 美国   | 3    | 37.5% |
| 8  | 日本  | 2    | 25.0% | 4  | 密西根大学             | 美国   | 3    | 37.5% |
| 8  | 瑞典  | 2    | 25.0% | 4  | 马普学会              | 德国   | 3    | 37.5% |
| 8  | 挪威  | 2    | 25.0% | 4  | 阿尔弗雷德·魏格纳极地与海洋研究所 | 德国   | 3    | 37.5% |
|    |     |      |       | 4  | 俄罗斯科学院            | 俄罗斯  | 3    | 37.5% |

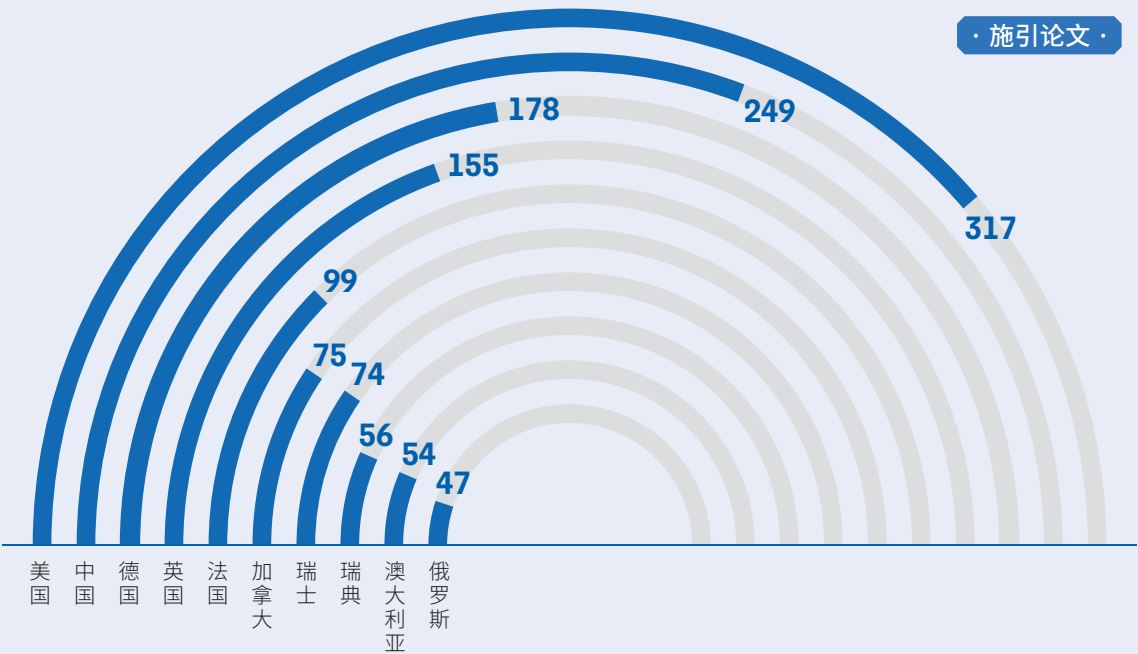


从施引论文的角度看（表 16），美国仍然位列首位。中国高度关注相关前沿方向的研究进展，中国科学院的施引论文数量最多，兰州大学也榜上有名。德国亥姆霍兹联合会、阿尔弗雷德·魏格纳极地

地与海洋研究所，法国国家科学研究中心，美国亚利桑那大学等机构后继研究产出也较为丰硕。

表 16 “全新世温度变化研究”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   | 317  | 40.7% | 1  | 中国科学院                 | 中国   | 140  | 18.0% |
| 2  | 中国   | 249  | 32.0% | 2  | 亥姆霍兹联合会               | 德国   | 101  | 13.0% |
| 3  | 德国   | 178  | 22.8% | 3  | 法国国家科学研究中心            | 法国   | 91   | 11.7% |
| 4  | 英国   | 155  | 19.9% | 4  | 阿尔弗雷德·魏格纳极<br>地与海洋研究所 | 德国   | 75   | 9.6%  |
| 5  | 法国   | 99   | 12.7% | 5  | 不来梅大学                 | 德国   | 49   | 6.3%  |
| 6  | 加拿大  | 75   | 9.6%  | 6  | 巴黎西岱大学                | 法国   | 48   | 6.2%  |
| 7  | 瑞士   | 74   | 9.5%  | 7  | 亚利桑那大学                | 美国   | 46   | 5.9%  |
| 8  | 瑞典   | 56   | 7.2%  | 7  | 巴黎 - 萨克雷大学            | 法国   | 46   | 5.9%  |
| 9  | 澳大利亚 | 54   | 6.9%  | 9  | 原子能源与替代能源委<br>员会      | 法国   | 42   | 5.4%  |
| 10 | 俄罗斯  | 47   | 6.0%  | 10 | 兰州大学                  | 中国   | 39   | 5.0%  |





2024 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 05

## 临床医学

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

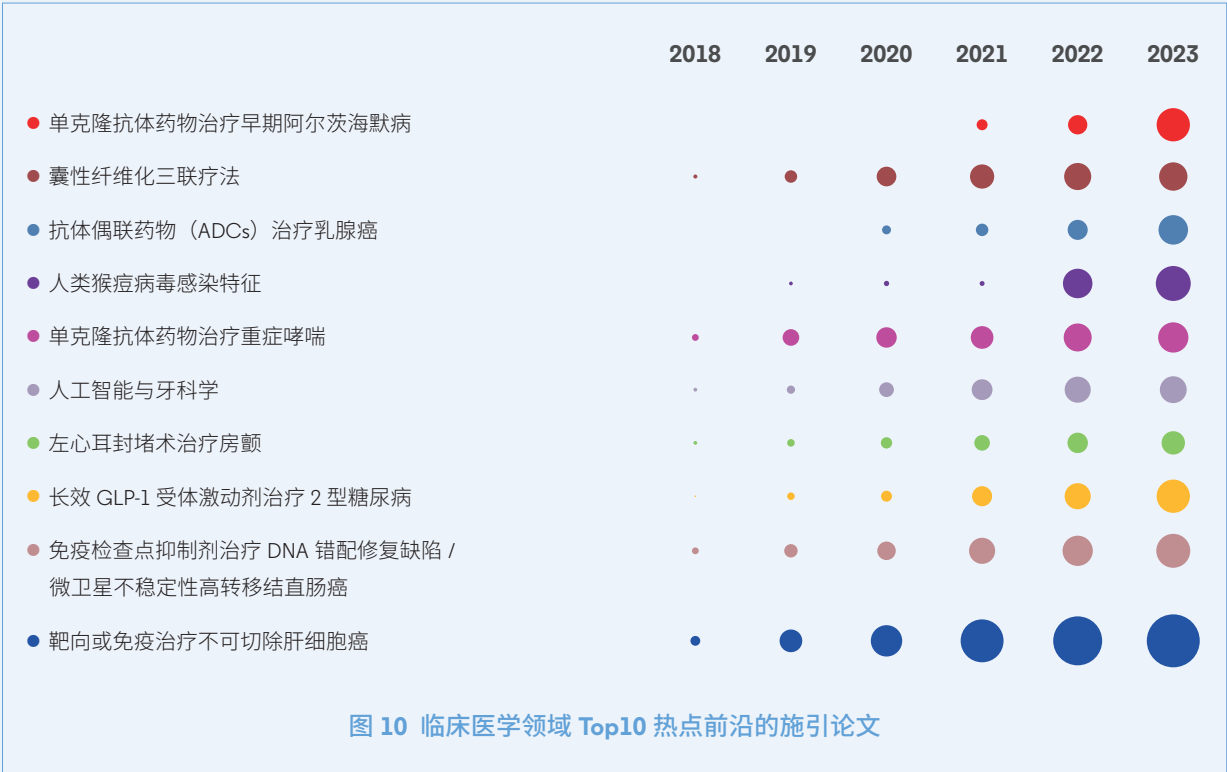
# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 临床医学领域 Top 10 热点前沿发展态势

临床医学领域十大热点前沿主要集中在免疫疗法或分子靶向药物在肿瘤、阿尔茨海默病、哮喘、糖尿病等疾病治疗中的应用，基本延续了近些年免疫疗法和分子靶向治疗肿瘤等疑难病症的研究热度。还涉及人工智能在临床医学（如牙科学）中的应用现状和前景，并有望在人工智能蓬勃发展的大背景下，成为今后临床医学研究新的热点领域。此外左心耳封堵术是通过微创介入手术治疗预防心房颤动导致卒中的重大创新技术，多项临床研究证实该项技术能一定程度解决终生抗凝增加出血风险的问题。而热点前沿“人类感染猴痘病毒的特征”则是从 2023 年新兴前沿“猴痘感染暴发”发展而来的。

表 17 临床医学领域 Top 10 热点前沿

| 序号 | 热点前沿                                   | 核心论文 | 被引频次  | 核心论文平均出版年 |
|----|----------------------------------------|------|-------|-----------|
| 1  | 单克隆抗体药物治疗早期阿尔茨海默病                      | 13   | 2197  | 2022.2    |
| 2  | 囊性纤维化三联疗法                              | 42   | 4869  | 2021.6    |
| 3  | 抗体偶联药物（ADCs）治疗乳腺癌                      | 27   | 3466  | 2021.4    |
| 4  | 人类猴痘病毒感染特征                             | 23   | 5587  | 2021.2    |
| 5  | 单克隆抗体药物治疗重症哮喘                          | 40   | 5581  | 2021.2    |
| 6  | 人工智能与牙科学                               | 36   | 2958  | 2021.2    |
| 7  | 左心耳封堵术治疗房颤                             | 24   | 2215  | 2021.2    |
| 8  | 长效 GLP-1 受体激动剂治疗 2 型糖尿病                | 21   | 4776  | 2021.1    |
| 9  | 免疫检查点抑制剂治疗 DNA 错配修复缺陷 / 微卫星不稳定性高转移结直肠癌 | 11   | 4403  | 2021.0    |
| 10 | 靶向或免疫治疗不可切除肝细胞癌                        | 40   | 17831 | 2020.9    |



1.2 重点热点前沿——“单克隆抗体药物治疗早期阿尔茨海默病”

阿尔茨海默病 (Alzheimer's disease, AD) 起病隐匿，是一种进行性、不可逆的致命性神经退行性疾病，是老年期痴呆的最主要类型，临床主要表现为记忆下降、认知障碍、精神行为异常和生活功能减退。 $\beta$  淀粉样蛋白（以下简称为 A $\beta$ ）沉积在 AD 的发病机制中起关键作用。清除 A $\beta$  低聚物（可溶性聚集物）和 A $\beta$  斑块（不溶性细胞外聚集物）会延缓 AD 相关病程。因此一些可减少 A $\beta$  沉积的单克隆抗体类药物成为 AD 新药研发的热门方向，国际多家制药公司均有涉足。

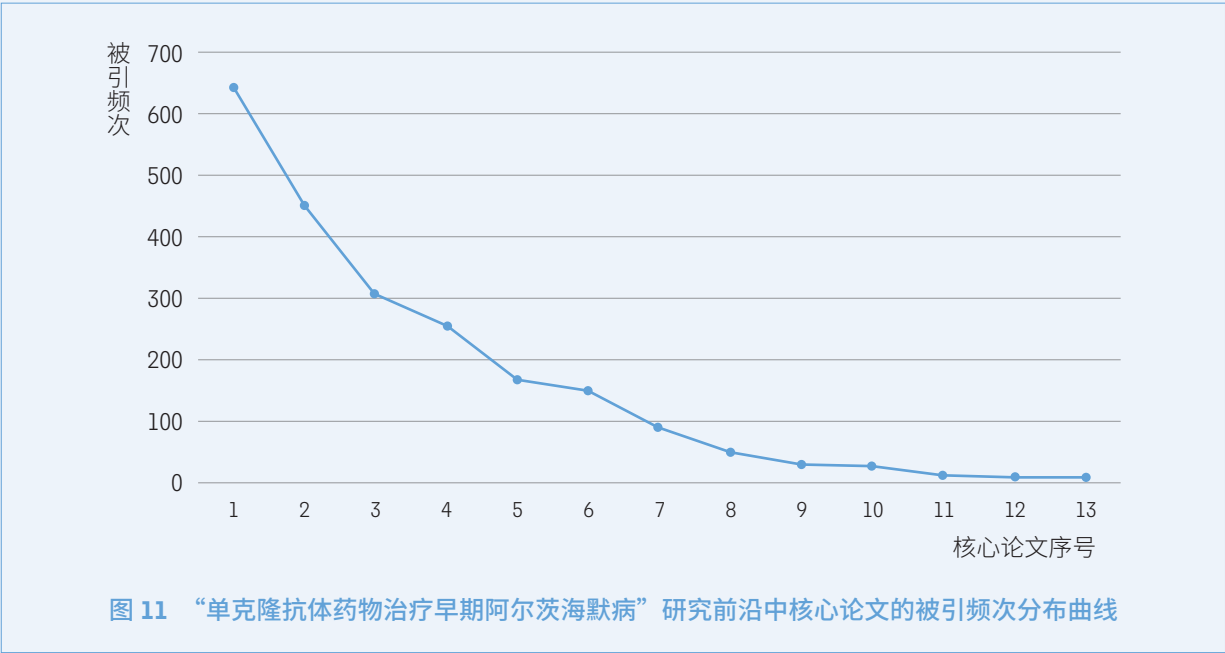
“单克隆抗体药物治疗早期阿尔茨海默病”热点前沿包括 13 篇核心论文，涉及仑卡奈单抗 (Lecanemab)、多纳单抗 (Donanemab)、阿杜那单抗 (Aducanumab) 克瑞尼珠单抗 (Crenezumab)、苏兰组单抗 (Solanezumab) 等多种单抗类 AD 药物的临床试验，评估这些药物的有效性和安全性，试验结果有好有坏。阿杜那单抗虽然在 2021 年 6 月获得美国 FDA 附条件批准，但 2022 年发表在《阿尔茨海默病预防杂志》的两项 III 期临床试验结果存在矛盾，导致该药的临床疗效和安全性备受争议。目前最成功的 AD

新药当属仑卡奈单抗，可靶向结合可溶性聚集性淀粉样蛋白  $\beta$  (A $\beta$ )，进而清除脑内 A $\beta$ ，发挥治疗作用。被引频次最高的核心论文是 2022 年发表于《新英格兰医学杂志》(New England Journal of Medicine) 的一项为期 18 个月的 III 期临床试验，提示仑卡奈单抗的临床疗效达到了主要临床终点和全部关键次要临床终点，并具有良好的耐受性，输液相关反应为其最常见不良事件。因此仑卡奈单抗在 2023 年 1 月首先获得美国 FDA 完全批准上市，并被《科学》(Science) 列为 2023 年度十大科学突破之一。此外多纳单抗也经过多轮临床试验的论证，于

2024 年 7 月获批美国上市。但这些药物上市时间很短，后续仍需更长时间更大规模的临床试验来进一步确定其治疗早期阿尔茨海默病的有效性和安全性，尤其需对淀粉样蛋白

相关影像异常（ARIA）如水肿、出血等不良反应予以关注。另一方面，克瑞尼珠单抗和苏兰组单抗则因为临床试验结果未能证实其有效性，而宣告研发失败。鉴于阿尔茨

海默病的发病机制尚未完全明确，因此 AD 药物研发从来都不是一帆风顺的，未来仍有很长的路要走。



该热点前沿核心论文 Top 产出国家中，美国贡献了 80% 以上的核心论文，在阿尔茨海默病的新药研发领域优势明显。Top 产出机构超

过半数来自美国，耶鲁大学、南加利福尼亚大学、布朗大学位居前三位。耶鲁大学发表的仑卡奈单抗 III 期临床研究结果是被引频次最高的

核心论文，也直接推动仑卡奈单抗获得美国 FDA 完全批准上市。



表 18 “单克隆抗体药物治疗早期阿尔茨海默病”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   | 84.6% | 1  | 耶鲁大学     | 美国   | 5    | 38.5% |
| 2  | 英国   | 6    | 46.2% | 2  | 南加利福尼亚大学 | 美国   | 4    | 30.8% |
| 3  | 澳大利亚 | 5    | 38.5% | 2  | 布朗大学     | 美国   | 4    | 30.8% |
| 4  | 瑞典   | 4    | 30.8% | 2  | 墨尔本大学    | 澳大利亚 | 4    | 30.8% |
| 5  | 法国   | 3    | 23.1% | 2  | 礼来公司     | 美国   | 4    | 30.8% |
| 5  | 加拿大  | 3    | 23.1% | 6  | 东京大学     | 日本   | 3    | 23.1% |
| 5  | 日本   | 3    | 23.1% | 6  | 罗德岛巴特勒医院 | 美国   | 3    | 23.1% |
| 8  | 德国   | 2    | 15.4% | 6  | 哈佛大学     | 美国   | 3    | 23.1% |
| 8  | 意大利  | 2    | 15.4% | 6  | 图卢兹大学    | 法国   | 3    | 23.1% |
| 8  | 西班牙  | 2    | 15.4% |    |          |      |      |       |
| 8  | 瑞士   | 2    | 15.4% |    |          |      |      |       |



施引论文方面，美国贡献过半数，远超其他国家，反映其在 AD 新药研发领域研究活跃，发展态势

良好。中国在该领域也贡献了 167 篇施引论文，说明对该研究方向一直在关注和跟进。Top10 产出机构

则由 6 家美国机构和 4 家欧洲机构所包揽。

表 19 “单克隆抗体药物治疗早期阿尔茨海默病” 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   | 707  | 52.7% | 1  | 哈佛大学      | 美国   | 114  | 8.5% |
| 2  | 英国   | 215  | 16.0% | 2  | 伦敦大学学院    | 英国   | 93   | 6.9% |
| 3  | 中国   | 167  | 12.4% | 3  | 加州大学旧金山分校 | 美国   | 72   | 5.4% |
| 4  | 瑞典   | 120  | 8.9%  | 4  | 圣路易斯华盛顿大学 | 美国   | 66   | 4.9% |
| 5  | 德国   | 112  | 8.3%  | 5  | 马萨诸塞州综合医院 | 美国   | 62   | 4.6% |
| 6  | 意大利  | 99   | 7.4%  | 6  | 南加利福尼亚大学  | 美国   | 59   | 4.4% |
| 7  | 加拿大  | 95   | 7.1%  | 7  | 梅奥医学中心    | 美国   | 57   | 4.2% |
| 8  | 荷兰   | 81   | 6.0%  | 8  | 哥德堡大学     | 瑞典   | 47   | 3.5% |
| 9  | 澳大利亚 | 74   | 5.5%  | 9  | 阿姆斯特丹自由大学 | 荷兰   | 46   | 3.4% |
| 10 | 日本   | 74   | 5.5%  | 10 | 亥姆霍兹联合会   | 德国   | 45   | 3.4% |



1.3 重点热点前沿——“靶向或免疫治疗不可切除肝细胞癌”

肝细胞癌作为原发性肝癌中最常见的病理类型，起病隐匿、进展迅速、预后极差，严重威胁人类健康和生命。大多数患者确诊时已是晚期，无法接受根治性手术。对这些不可切除肝细胞癌（unresectable hepatocellular carcinoma, uHCC）患者而言，除了经肝动脉化疗栓塞（TACE）、射频消融等局部治疗

方法，系统性药物治疗也是延长生存时间及改善生活质量的重要方法之一。随着多种靶向药和免疫检查点抑制剂等新药相继应用于临床，uHCC 系统性药物治疗也经历了从最初的靶向单药、免疫单药，到现在免靶联合治疗的阶段，患者生存期有了明显延长，进一步稳固了系统性药物治疗在肝癌治疗中的地位。

“靶向或免疫治疗不可切除肝细胞癌”热点前沿重点关注索拉非尼 (sorafenib)、仑伐替尼 (lenvatinib)、贝伐珠单抗 (bevacizumab) 等靶向药，以及阿替利珠单抗 (atezolizumab)、帕博利珠单抗 (pembrolizumab)、卡瑞利珠单抗 (camrelizumab) 等

免疫检查点抑制剂治疗不可切除或晚期肝细胞癌的临床有效性及安全性。多靶点抗肿瘤药索拉非尼作为最早用于不可切除肝细胞癌一线治疗的靶向药，其单药疗效并不显著，患者中位生存期仅延长了近 3 个月。2018 年《柳叶刀》(the Lancet) 发表的 RFLECT 研究结果提示，另一个靶向药仑伐替尼治疗不可切除肝癌的疗效优于索拉非尼，继而成为第二个 uHCC 一线治疗靶向药，打破了索拉非尼多年来一枝独秀的局面。同时期免疫检查点抑制剂的快速发展，也将晚期肝细胞癌系统治疗带入了免疫治疗阶段，帕博利珠单抗等免疫检查点抑制剂均在临床研究中显示出较好的效果。2018 年《柳叶刀肿瘤学》(The Lancet

Oncology) 发表的一项 III 期临床试验结果提示，帕博利珠单抗对先前接受过索拉非尼治疗的晚期肝细胞癌患者有效且耐受，可作为不可切除肝细胞癌二线治疗的新选择。被引频次最高达 3005 次的核心论文是 2020 年《新英格兰医学杂志》(New England Journal of Medicine) 公布的 IMbrave150 研究，发现在不可切除肝细胞癌患者中，阿替利珠单抗联合贝伐珠单抗的总生存期和无进展生存期显著优于索拉非尼，目前已被国际各大临床指南列入晚期肝细胞癌一线推荐。该研究在全球首先采用了靶向联合免疫治疗不可切除肝细胞癌的新模式，开启了 uHCC 系统性药物治疗的新格局。

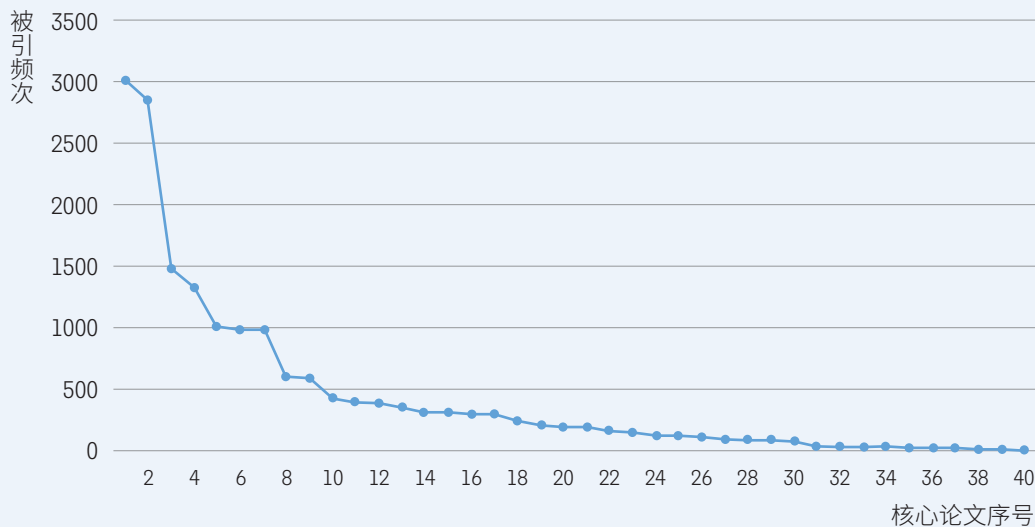
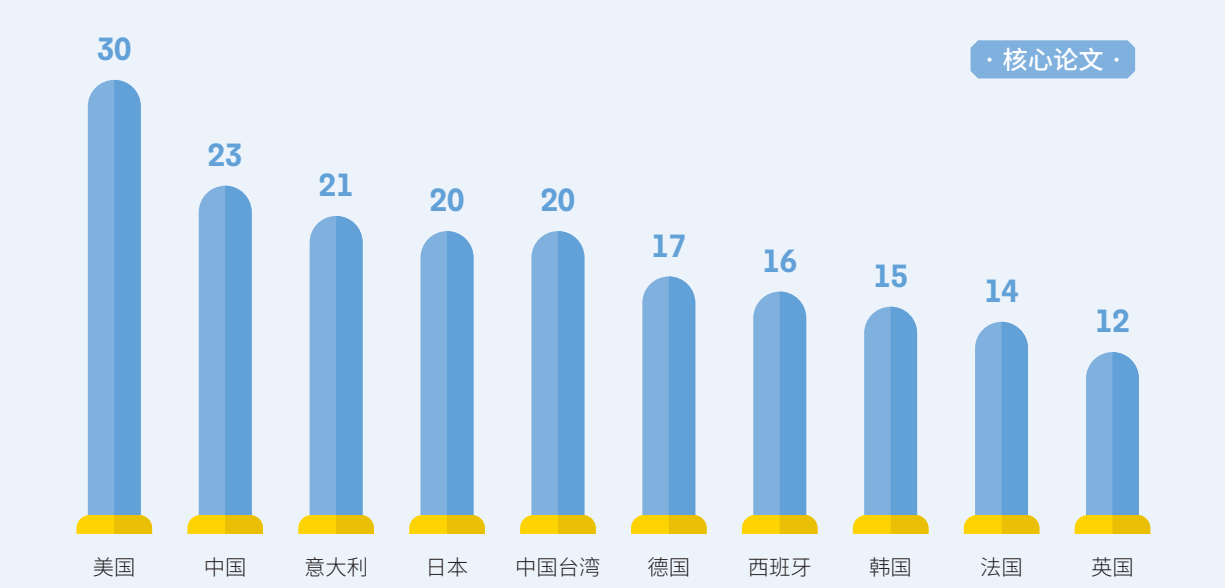


图 12 “靶向或免疫治疗不可切除肝细胞癌”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

该热点前沿 40 篇核心论文 Top 产出国家 / 地区中，美国贡献最大，中国紧随其后，位居第二，亚洲其他国家和地区如日本、中国台湾、韩国也都上榜，说明亚洲国家或地区作为肝癌高发区，总体上对肝癌治疗研究更为重视，研究热度更高。Top 产出机构近半数来自亚洲，体现出同样的趋势。

表 20 “靶向或免疫治疗不可切除肝细胞癌” 研究前沿中核心论文的 Top 产出国家 / 地区和机构

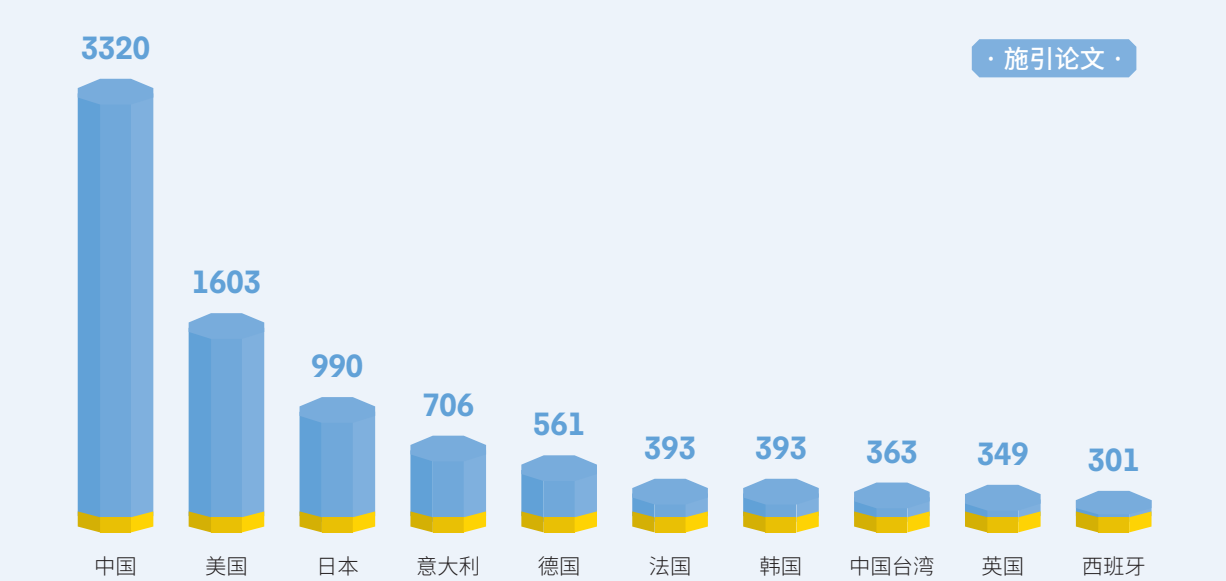
| 排名 | 国家 / 地区 | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构                | 所属国家 / 地区 | 核心论文 | 比例    |
|----|---------|------|-------|----|-------------------|-----------|------|-------|
| 1  | 美国      | 30   | 75.0% | 1  | 近畿大学              | 日本        | 17   | 42.5% |
| 2  | 中国      | 23   | 57.5% | 2  | 国立台湾大学            | 中国台湾      | 14   | 35.0% |
| 3  | 意大利     | 21   | 52.5% | 3  | 加州大学洛杉矶分校         | 美国        | 13   | 32.5% |
| 4  | 日本      | 20   | 50.0% | 4  | 马萨诸塞州综合医院         | 美国        | 11   | 27.5% |
| 4  | 中国台湾    | 20   | 50.0% | 4  | 肝脏和消化疾病生物医学研究网络中心 | 西班牙       | 11   | 27.5% |
| 6  | 德国      | 17   | 42.5% | 4  | 巴塞罗那大学            | 西班牙       | 11   | 27.5% |
| 7  | 西班牙     | 16   | 40.0% | 4  | 哈佛大学              | 美国        | 11   | 27.5% |
| 8  | 韩国      | 15   | 37.5% | 4  | 仁爱大学              | 意大利       | 11   | 27.5% |
| 9  | 法国      | 14   | 35.0% | 9  | 蔚山大学              | 韩国        | 10   | 25.0% |
| 10 | 英国      | 12   | 30.0% | 9  | 巴塞罗那医院            | 西班牙       | 10   | 25.0% |



施引论文方面，中国贡献率最高，占比近半数，明显超过第二位的美国；施引论文 Top10 产出机构中有 7 家来自中国，中山大学、复旦大学、浙江大学、中国医学科学院北京协和医学院等国内知名高校位居榜单前列，反映其在肝细胞癌系统治疗方面的研究非常活跃，发展态势良好。

表 21 “靶向或免疫治疗不可切除肝细胞癌”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      | 3320 | 44.0% | 1  | 中山大学               | 中国   | 358  | 4.7% |
| 2  | 美国      | 1603 | 21.2% | 2  | 复旦大学               | 中国   | 318  | 4.2% |
| 3  | 日本      | 990  | 13.1% | 3  | 浙江大学               | 中国   | 252  | 3.3% |
| 4  | 意大利     | 706  | 9.4%  | 4  | 中国医学科学院<br>北京协和医学院 | 中国   | 224  | 3.0% |
| 5  | 德国      | 561  | 7.4%  | 5  | 哈佛大学               | 美国   | 198  | 2.6% |
| 6  | 法国      | 393  | 5.2%  | 5  | 近畿大学               | 日本   | 198  | 2.6% |
| 7  | 韩国      | 393  | 5.2%  | 7  | 华中科技大学             | 中国   | 191  | 2.5% |
| 8  | 中国台湾    | 363  | 4.8%  | 8  | 法国国家健康<br>与医学研究所   | 法国   | 182  | 2.4% |
| 9  | 英国      | 349  | 4.6%  | 9  | 中国科学院              | 中国   | 174  | 2.3% |
| 10 | 西班牙     | 301  | 4.0%  | 10 | 海军军医大学             | 中国   | 163  | 2.2% |



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

临床医学领域 2024 年入选的 4 个新兴前沿主要涉及非胰岛素类降糖药治疗肥胖或 2 型糖尿病、急性大面积缺血性脑卒中的血管内治疗、单抗类药物治疗斑块型银屑病、可穿戴超声系统的应用 4 个方面，具体研究方向如表 22 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“可穿戴超声系统的应用”前沿作为重点分析对象。

表 22 临床医学领域新兴前沿

| 序号 | 新兴前沿                 | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文平均出版年 |
|----|----------------------|------|------|-----------|
| 1  | 非胰岛素类降糖药治疗肥胖或 2 型糖尿病 | 8    | 190  | 2023.0    |
| 2  | 急性大面积缺血性脑卒中的血管内治疗    | 3    | 405  | 2022.7    |
| 3  | 单抗类药物治疗斑块型银屑病        | 15   | 318  | 2022.7    |
| 4  | 可穿戴超声系统的应用           | 3    | 175  | 2022.7    |

### 2.2 重点新兴前沿——“可穿戴超声系统的应用”

近年来伴随生活水平的提高和科学技术的进步，移动医疗逐步兴起，新材料、集成电路、人工智能领域不断进步，使得医疗设备向微型化、便携化直至可穿戴化发展成为可能。超声技术作为一种快速、简便、无创无辐射的诊断工具，自诞生之日起就在医疗领域有着广泛应用。而结合可穿戴和超声技术的可穿戴超声系统既能方便临床医生评估组织和器官功能，诊断各种疾病，也可长时间地工作，从而使临床医生及时检测病患健康状况，观察疾病进展。因此，可穿戴超声系统在临床诊疗和日常监护中具有极其重要的作用和发展前景。

“可穿戴超声系统的应用”重点新兴前沿的研究内容包括用于不同器官长期连续成像的生物粘性超声的开发、可佩戴式心脏超声成像仪的开发以及完全集成的可穿戴超声系统对移动物体深层组织的监测作用等。通过对文献内容的解读发现，现阶段开发的可穿戴超声系统具有非侵入性、低功耗、小型化、高穿透深度和高分辨率等优势，主要依托深度学习模型和机器学习技术，对包括血管、肌肉、心脏、胃肠道、膈肌和肺在内的内部器官以及深层组织的生理信号（例如中心血压、心率和心输出量）进行连续三维式成像、监测、评估，对人体皮肤伤害小，应用前景广阔，可成为各种疾病的便携式诊断和监测工具，提供关于健康和疾病的重要信息，同时使面向医疗物联网的深层组织信号的连续自主监测成为可能，其特点和发展趋势包括：（1）小型化、无线化，提升佩戴舒适性；（2）智慧医疗，引入临床需求提高实用性；（3）光声成像，互补互验扩大应用范围；（4）AI 诊断，大幅提高效率；（5）先进材料，实现力学与成像双重突破；（6）与其它医学成像方法如磁共振成像（MRI）和计算机断层扫描（CT）相比，更安全、更便宜、用途更广。

# 06

## 生物科学



2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

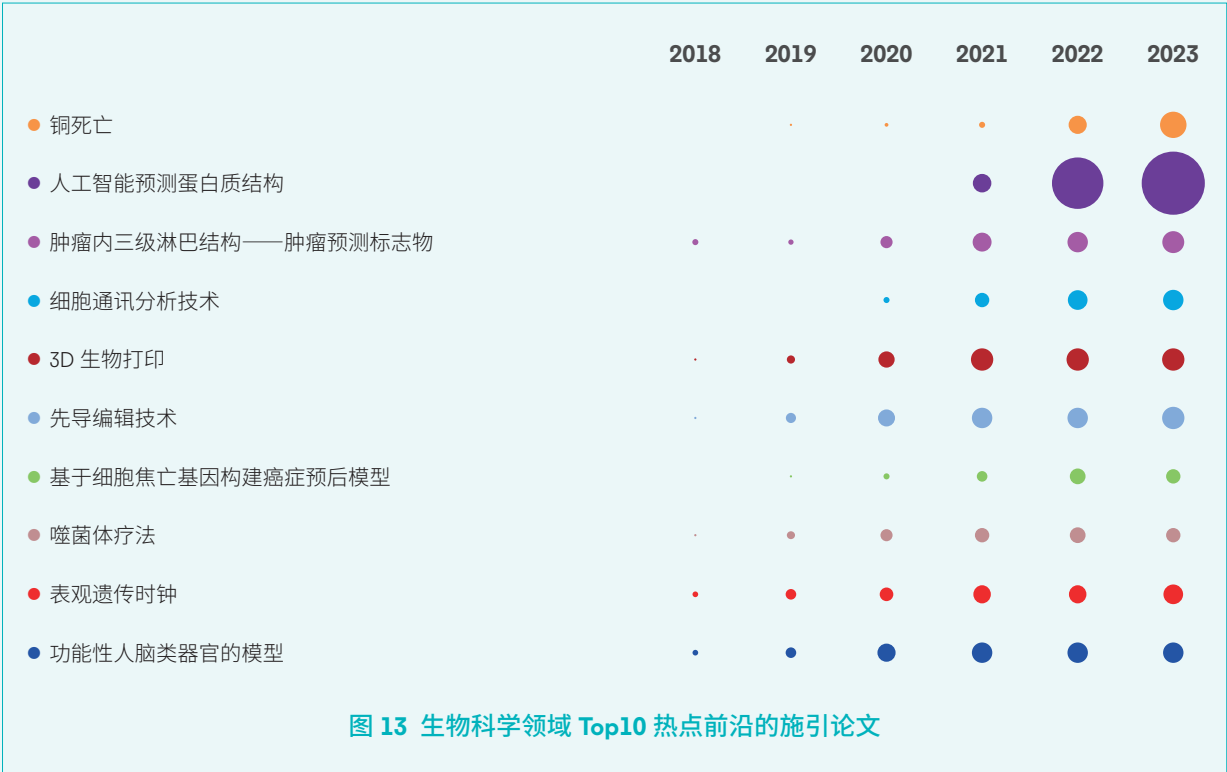
# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 生物科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

生物科学领域位居前十位的热点前沿包括先导编辑技术、人工智能预测蛋白质结构、细胞通讯分析技术、细胞死亡、类器官、疾病和死亡风险的预测标志物、噬菌体疗法等相关研究。基因编辑技术一直是历年来生物科学领域研究前沿的热门主题，近年来，基因组编辑技术也在不断地更新和完善，先导编辑技术 2023 年入选热点前沿，2024 年再次入选。人工智能（AlphaFold 等）预测蛋白质结构，这一重大技术飞跃引起了生物学领域研究范式的改变，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并延续至 2024 年。2023 年，细胞通讯分析技术作为单细胞测序分析技术的辅助技术进入热点前沿。2024 年仍入选热点前沿。细胞死亡也是近年来的研究热点，其中铜死亡（Cuproptosis）在 2023 年成为新兴前沿，2024 年入选热点前沿；细胞焦亡（Pyroptosis）的研究热度也迅猛上升，2024 年入选的热点前沿是“基于细胞焦亡相关基因构建癌症预后模型”。此外，“细胞焦亡的关键效应因子——GSDMs 家族”也入选新兴前沿。作为一种新型模型，类器官在科学研究领域具有非常大的潜力，2024 年类器官有 2 个热点前沿入选，“功能性人脑类器官的模型”聚焦人脑类器官研究，“3D 生物打印”展现了在心脏、肝脏和骨骼等类器官的探索。疾病和死亡风险的预测标志物方面在 2024 年有 2 个新入选的热点前沿，包括“肿瘤内三级淋巴结构——肿瘤预测标志物”和“表观遗传时钟”。“噬菌体疗法”作为对抗抗生素耐药性细菌的新方法，也在 2024 年新入选热点前沿。

表 23 生物科学领域 Top 10 热点前沿

| 序号 | 热点前沿               | 核心论文 | 被引频次  | 核心论文平均出版年 |
|----|--------------------|------|-------|-----------|
| 1  | 铜死亡                | 30   | 3832  | 2021.8    |
| 2  | 人工智能预测蛋白质结构        | 5    | 16580 | 2021.2    |
| 3  | 肿瘤内三级淋巴结构——肿瘤预测标志物 | 15   | 4907  | 2020.6    |
| 4  | 细胞通讯分析技术           | 5    | 2197  | 2020.4    |
| 5  | 3D 生物打印            | 20   | 5304  | 2020.3    |
| 6  | 先导编辑技术             | 29   | 7510  | 2020.2    |
| 7  | 基于细胞焦亡相关基因构建癌症预后模型 | 6    | 1826  | 2020.2    |
| 8  | 噬菌体疗法              | 11   | 2740  | 2020.0    |
| 9  | 表观遗传时钟             | 13   | 4424  | 2019.9    |
| 10 | 功能性人脑类器官的模型        | 29   | 6581  | 2019.6    |



## 1.2 重点热点前沿——“表观遗传时钟”

衰老是一个复杂的过程，其特征是细胞、亚细胞和核层面的各种变化，细胞不可逆地停止分裂并进入永久性生长停滞状态而不经历细胞死亡的过程。用于测量生理年龄的常见生物标志物包括 DNA 甲基化、端粒长度、转录组学数据、蛋白质组学数据、代谢组学数据等。DNA 甲基化年龄（DNA methylation age，简称 DNAmAge）被认为是目前最可靠的指标之一。同时 DNA 甲基化也是研究最广泛的表观遗传现象，在生长、发育和衰老中起着至关重要的作用。目前 DNA 甲基化模式已被广泛用作衡量生物年龄的指标，称为表观遗传时钟（Epigenetic clock）。

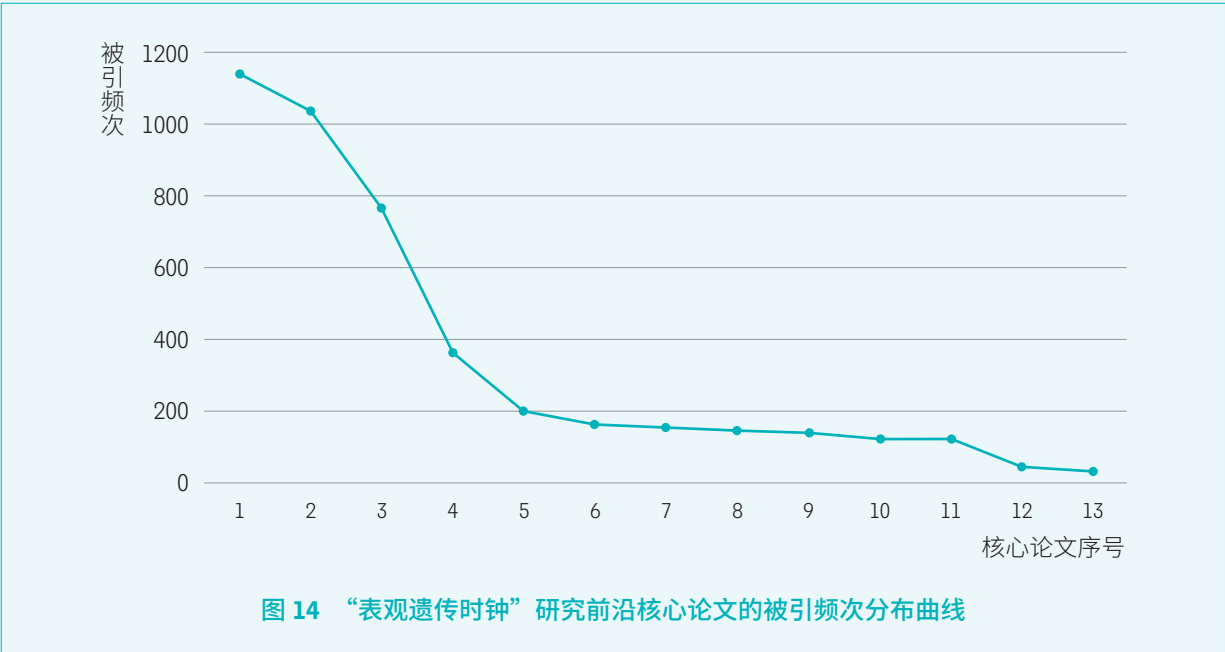
表观遗传时钟是一种基于 DNA 甲基化的强大生物标志物，被开发用来追踪人口研究中的衰老、临床试验和个人健康应用，旨在测定机体的生物年龄，能较为精准地预测人类年龄相关的发病率和死亡率，以及机体健康的其它方面。表观遗传时钟开创了衰老领域分子研究的新时代。

常用的三代表观遗传时钟包括，第一代：Horvath 时钟（2013 年）和 Hannum 时钟（2013 年）；第二代：PhenoAge（2018 年）和 GrimAge（2019 年）；第三代：DunedinPoAm（2020 年）和 DunedinPACE（2022 年）。该研究

前沿的 13 篇核心论文中包括对第一代时钟的综述、第二代和第三代时钟的提出和比较的相关研究。

第一代 Horvath 时钟和 Hannum 时钟是根据实际年龄进行的评估，因此它们也被划定为年龄时钟。而第二代 DNAm PhenoAge 和 DNAm GrimAge 则是应用衰老标志物进行的预测，所以它们被划定为死亡率时钟。第三代是 DunedinPoAm 和 DunedinPACE，使用纵向表型训练数据来衡量生物衰老的速度，可以划定为衰老速率时钟。第三代表观遗传时钟显示出更高的灵敏度和可靠性。

表观遗传时钟相关主题最新的研究趋势是预测准确度持续提高，涵盖种类持续拓展，搭建起了细胞级→多组织→多器官→多时钟整合平台的综合格局。随着表观遗传时钟相关的各项研究不断深入，不难看出其正在成为研究整个生命周期的健康、发育和衰老的强大工具，相信其还具有更多的可能性与无尽的潜力等待发现！



从核心论文的产出国家和机构来看，美国参与贡献了该前沿所有的核心论文，在该领域处于领先地位，其次是英国贡献了 8 篇核心论文，中国参与了 2 篇。Top10 产出机构中有 7 家来自美国，其中，哥伦比亚大学贡献的核心论文数最多，达到 7 篇，占比超过一半。伦敦大学国王学院、加州大学洛杉矶分校排名第二，其次是杜克大学（表 24）。



表 24 “表观遗传时钟”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

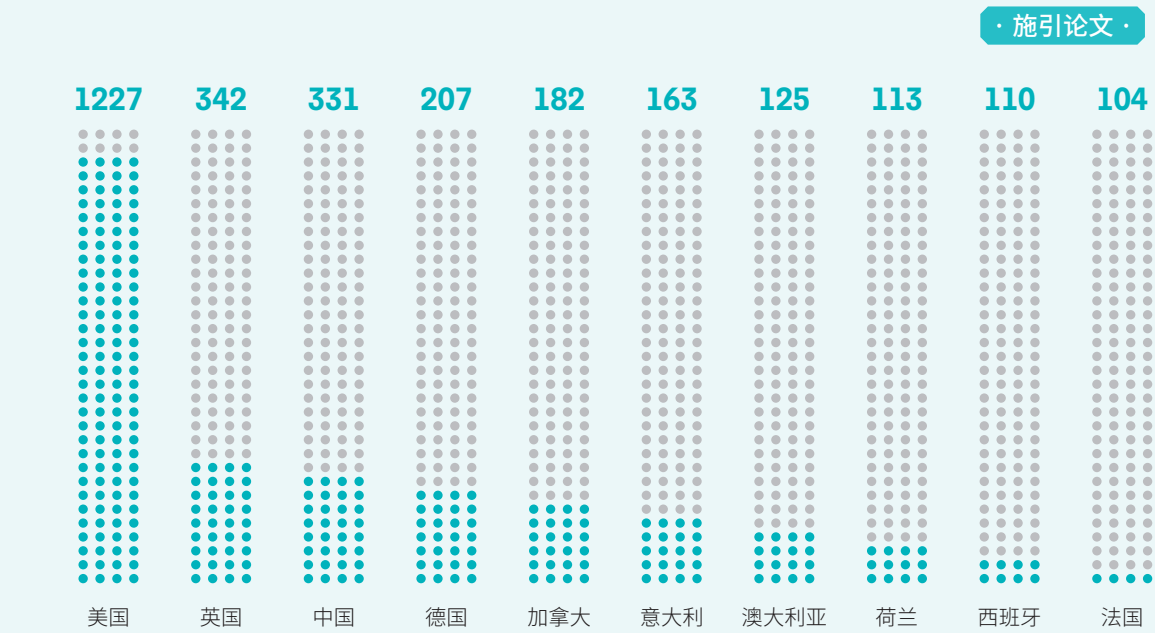
| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例     | 排名 | 机构           | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|--------|----|--------------|------|------|-------|
| 1  | 美国   | 13   | 100.0% | 1  | 哥伦比亚大学       | 美国   | 7    | 53.8% |
| 2  | 英国   | 8    | 61.5%  | 2  | 伦敦大学国王学院     | 英国   | 5    | 38.5% |
| 3  | 荷兰   | 3    | 23.1%  | 2  | 加州大学洛杉矶分校    | 美国   | 5    | 38.5% |
| 3  | 意大利  | 3    | 23.1%  | 4  | 杜克大学         | 美国   | 4    | 30.8% |
| 3  | 新西兰  | 3    | 23.1%  | 5  | 奥塔哥大学        | 新西兰  | 3    | 23.1% |
| 6  | 瑞典   | 2    | 15.4%  | 5  | 哈佛大学         | 美国   | 3    | 23.1% |
| 6  | 德国   | 2    | 15.4%  | 5  | 耶鲁大学         | 美国   | 3    | 23.1% |
| 6  | 中国   | 2    | 15.4%  | 5  | 北卡罗来纳大学教堂山分校 | 美国   | 3    | 23.1% |
| 9  | 澳大利亚 | 1    | 7.7%   | 5  | 埃克塞特大学       | 英国   | 3    | 23.1% |
| 9  | 法国   | 1    | 7.7%   | 5  | 美国国立卫生研究院    | 美国   | 3    | 23.1% |
| 9  | 爱尔兰  | 1    | 7.7%   |    |              |      |      |       |
| 9  | 丹麦   | 1    | 7.7%   |    |              |      |      |       |
| 9  | 加拿大  | 1    | 7.7%   |    |              |      |      |       |



从施引论文的分布来看（表 25），美国是最活跃的国家，参与发表了 1227 篇施引论文，占比超过一半而且远超其他国家。其次是英国和中国，积极跟进该研究方向并参与发表了 342 和 331 篇施引论文。施引论文的前十名产出机构中，美国机构占 8 家，其他 2 所机构是瑞典的卡罗林斯卡学院和德国的亥姆霍兹联合会。

表 25 “表观遗传时钟”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   | 1227 | 53.3% | 1  | 加州大学洛杉矶分校    | 美国   | 175  | 7.6% |
| 2  | 英国   | 342  | 14.9% | 2  | 哈佛大学         | 美国   | 174  | 7.6% |
| 3  | 中国   | 331  | 14.4% | 3  | 美国国立卫生研究院    | 美国   | 131  | 5.7% |
| 4  | 德国   | 207  | 9.0%  | 4  | 哥伦比亚大学       | 美国   | 119  | 5.2% |
| 5  | 加拿大  | 182  | 7.9%  | 5  | 耶鲁大学         | 美国   | 81   | 3.5% |
| 6  | 意大利  | 163  | 7.1%  | 6  | 卡罗林斯卡学院      | 瑞典   | 74   | 3.2% |
| 7  | 澳大利亚 | 125  | 5.4%  | 6  | 北卡罗来纳大学教堂山分校 | 美国   | 74   | 3.2% |
| 8  | 荷兰   | 113  | 4.9%  | 8  | 亥姆霍兹联合会      | 德国   | 68   | 3.0% |
| 9  | 西班牙  | 110  | 4.8%  | 8  | 斯坦福大学        | 美国   | 68   | 3.0% |
| 10 | 法国   | 104  | 4.5%  | 10 | 西北大学（美国）     | 美国   | 64   | 2.8% |



1.3 重点热点前沿——“功能性人脑类器官的模型”

类器官 (Organoids) 是将具有干性潜能的细胞在体外进行 3D 培养，形成多种特异性细胞类型集合的微器官团，能够体外再现真实器官的三维构造及生理功能。类器官的分化、自组织和形成独特、复杂、生物学相关结构的能力使它们成为体外发育、疾病发病机制和药物筛选平台的理想模型。人脑类器官 (Brain organoid) 是在体外培养的具有与人脑类似结构的三维神经

组织，在揭密人类神经发育和神经精神疾病的遗传基础方面展现出了相较于动物模型的明显优势。

该前沿的 29 篇核心论文研究报道了模拟不同脑区发育的人脑类器官的培养方案，包括模拟皮层、中脑和视网膜等的发育。同时也研究证实了人脑类器官能够很好地模拟神经发生，神经元迁移，皮层分层及神经环路建立等体内过程。相

关研究成功构建了具有血管样结构的人脑类器官、以及构建了具有小胶质细胞发育和功能的人脑类器官，也有研究构建了多系统协同作用的人脑类器官，在解决缺乏血管化结构、缺乏免疫细胞、器官系统化程度低等人脑类器官“三大难点”上取得了突破性的成果，推动了人脑类器官研究的发展。

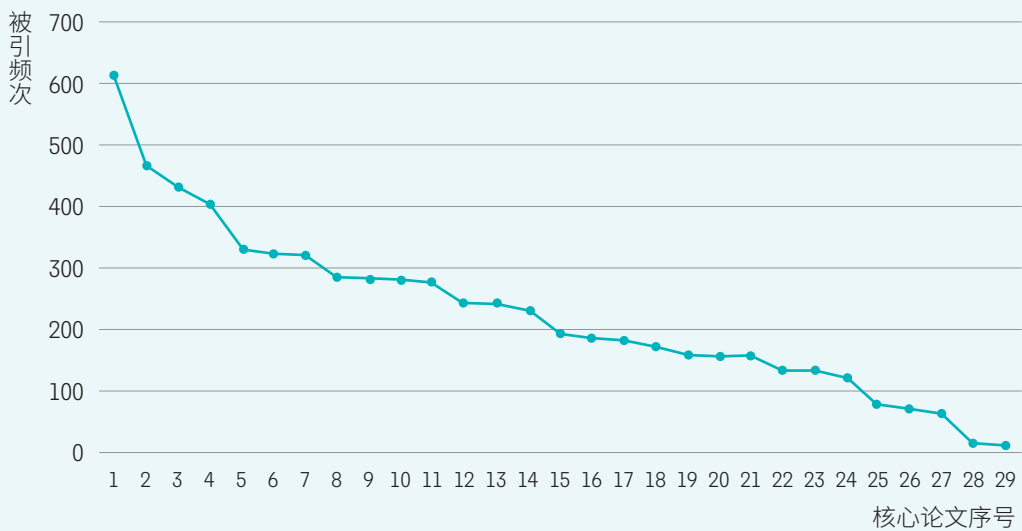


图 15 “功能性人脑类器官的模型”研究前沿核心论文的被引频次分布曲线

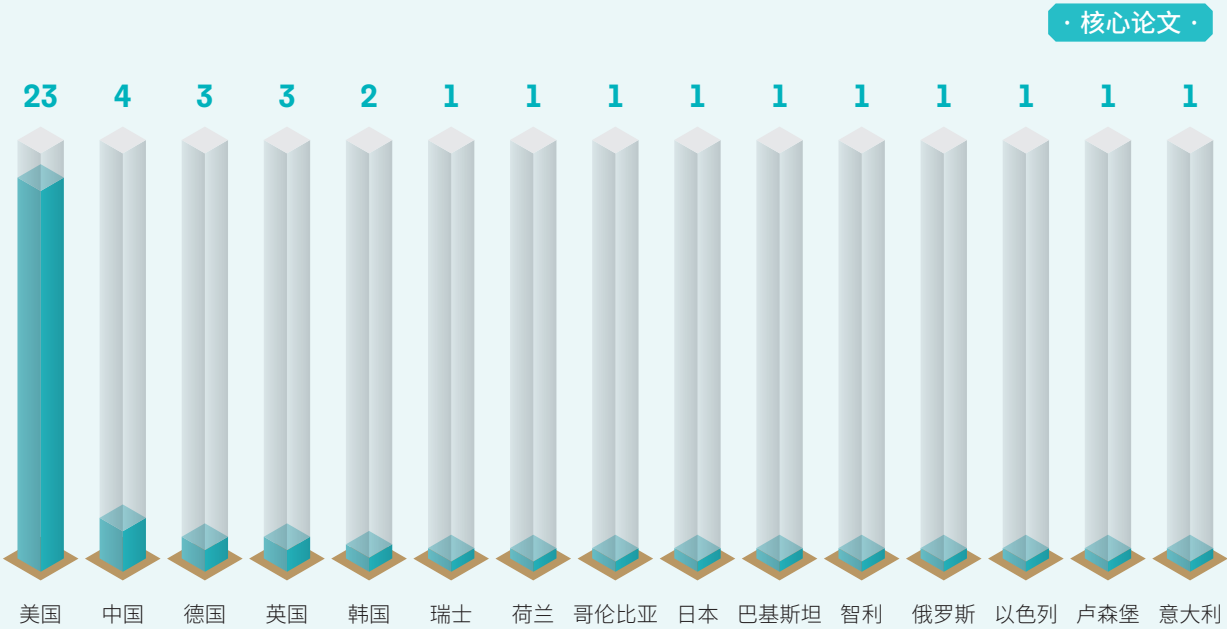
从核心论文的分布来看，美国贡献了 79.3% 的核心论文，在该前沿领域占据绝对优势，中国核心论

文产出第二，但仅仅占 13.8%，与美国有较大差距。Top 产出机构（含并列 12 家）中的 10 家机构均来自

美国，斯坦福大学参与发表 6 篇核心论文，位列首位，中国科学院排名第二。

表 26 “功能性人脑类器官的模型” 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   | 23   | 79.3% | 1  | 斯坦福大学      | 美国   | 6    | 20.7% |
| 2  | 中国   | 4    | 13.8% | 2  | 中国科学院      | 中国   | 4    | 13.8% |
| 3  | 德国   | 3    | 10.3% | 3  | 哈佛大学       | 美国   | 3    | 10.3% |
| 3  | 英国   | 3    | 10.3% | 3  | 加州大学洛杉矶分校  | 美国   | 3    | 10.3% |
| 5  | 韩国   | 2    | 6.9%  | 3  | 宾夕法尼亚大学    | 美国   | 3    | 10.3% |
| 6  | 瑞士   | 1    | 3.4%  | 3  | 加州大学圣迭戈分校  | 美国   | 3    | 10.3% |
| 6  | 荷兰   | 1    | 3.4%  | 7  | 麻省理工学院     | 美国   | 2    | 6.9%  |
| 6  | 哥伦比亚 | 1    | 3.4%  | 7  | 加州大学旧金山分校  | 美国   | 2    | 6.9%  |
| 6  | 日本   | 1    | 3.4%  | 7  | 加州大学圣克鲁兹分校 | 美国   | 2    | 6.9%  |
| 6  | 巴基斯坦 | 1    | 3.4%  | 7  | 索尔克生物研究所   | 美国   | 2    | 6.9%  |
| 6  | 智利   | 1    | 3.4%  | 7  | 马普学会       | 德国   | 2    | 6.9%  |
| 6  | 俄罗斯  | 1    | 3.4%  | 7  | 约翰·霍普金斯大学  | 美国   | 2    | 6.9%  |
| 6  | 以色列  | 1    | 3.4%  |    |            |      |      |       |
| 6  | 卢森堡  | 1    | 3.4%  |    |            |      |      |       |
| 6  | 意大利  | 1    | 3.4%  |    |            |      |      |       |

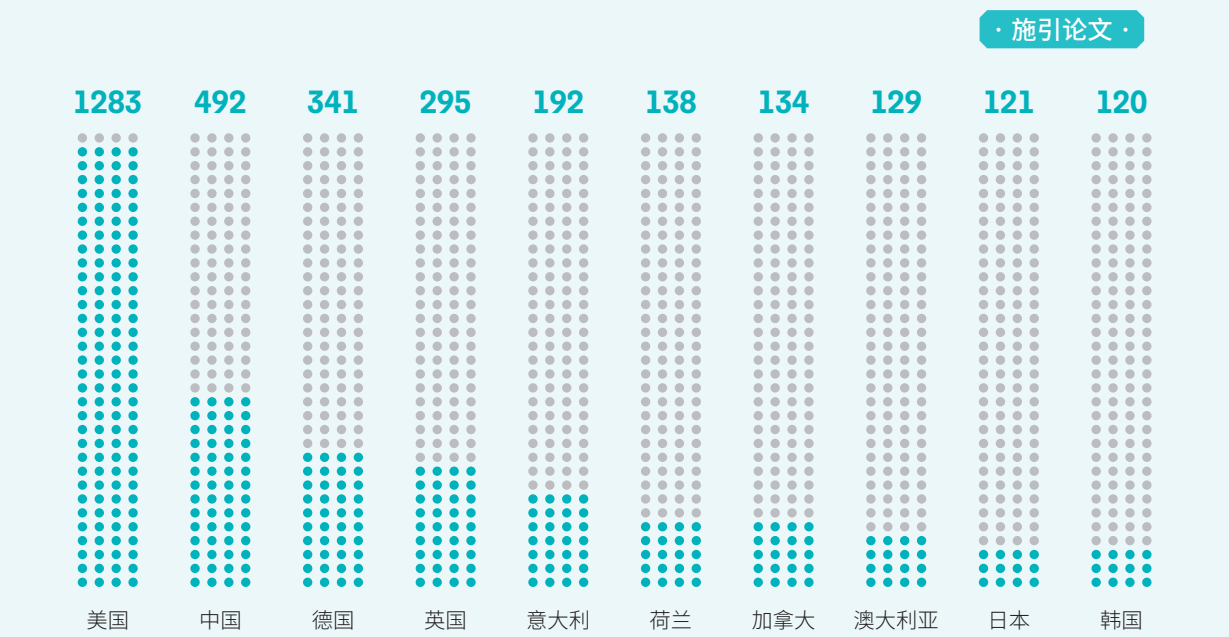


从施引论文的分布来看，美国表现最活跃，贡献了 1283 篇，其次是中国，贡献了 492 篇施引论文（表 27）。Top10 施引机构中，7 家机构来自美国，2 家来自德国，另有 1 家来自中国。施引论文数最多的机构是哈佛大学，2 家德国的机构马普学会和亥姆霍兹联合会分

别排名第六和第八名，中国科学院排名第七，共发表 76 篇施引论文。

表 27 “功能性人脑类器官的模型”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   | 1283 | 43.4% | 1  | 哈佛大学      | 美国   | 176  | 6.0% |
| 2  | 中国   | 492  | 16.7% | 2  | 加州大学圣迭戈分校 | 美国   | 97   | 3.3% |
| 3  | 德国   | 314  | 10.6% | 3  | 麻省理工学院    | 美国   | 90   | 3.0% |
| 4  | 英国   | 295  | 10.0% | 4  | 斯坦福大学     | 美国   | 87   | 2.9% |
| 5  | 意大利  | 192  | 6.5%  | 5  | 加州大学旧金山分校 | 美国   | 84   | 2.8% |
| 6  | 荷兰   | 138  | 4.7%  | 6  | 马普学会      | 德国   | 79   | 2.7% |
| 7  | 加拿大  | 134  | 4.5%  | 7  | 中国科学院     | 中国   | 76   | 2.6% |
| 8  | 澳大利亚 | 129  | 4.4%  | 8  | 亥姆霍兹联合会   | 德国   | 70   | 2.4% |
| 9  | 日本   | 121  | 4.1%  | 9  | 博德研究所     | 美国   | 66   | 2.2% |
| 10 | 韩国   | 120  | 4.1%  | 9  | 宾夕法尼亚大学   | 美国   | 66   | 2.2% |



## 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“TRACERx 研究详解肺癌的进展和转移路径”、“细胞焦亡的关键效应因子——GSDMs 家族”、“高效的 CRISPR-CAS12A 启动子编辑系统”和“ $\alpha$ -突触核蛋白作为帕金森病预测生物标志物”。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“细胞焦亡的关键效应因子——GSDMs 家族”前沿进行重点解读。

表 28 生物科学领域新兴前沿

| 序号 | 新兴前沿                         | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文平均出版年 |
|----|------------------------------|------|------|-----------|
| 1  | TRACERx 研究详解肺癌的进展和转移路径       | 7    | 163  | 2023.0    |
| 2  | 细胞焦亡的关键效应因子——GSDMs 家族        | 8    | 174  | 2022.9    |
| 3  | 高效的 CRISPR-CAS12A 启动子编辑系统    | 7    | 153  | 2022.9    |
| 4  | $\alpha$ -突触核蛋白作为帕金森病预测生物标志物 | 5    | 165  | 2022.6    |

### 2.2 重点新兴前沿——“细胞焦亡的关键效应因子——GSDMs 家族”

细胞焦亡 (Pyroptosis) 是一种裂解性的细胞程序性死亡，由 gasdermin (GSDM) 蛋白受上游信号激活后释放其 N 端结构域在细胞膜上打孔引发，具有高度促炎的免疫学特征。

人类 GSDMs 蛋白家族拥有 6 名成员，包括 GSDMA、GSDMB、GSDMC、GSDMD、GSDME（又名 DFNA5）和 DFNB59（又名 PJVK）。其中 GSDM A/B/C/D/E 的 N 端片段 (N-terminal fragment, NT) 具有膜穿孔活性。GSDMD 介导的细胞焦亡在拮抗病原感染的先天免疫反应中起重要作用，而其它一些 GSDM（包括 GSDMB 和 GSDME）介导的细胞焦亡则在抗肿瘤免疫中扮演着重要角色。

近年来一些研究（包括发表在 2022 年的一篇核心论文）对 GSDMB 的焦亡功能提出了质疑。研究表明，与其它 GSDMs 蛋白不同的是，GSDMB 不会引发细胞焦亡，尤其是在上皮细胞中，但其却会保持胃肠道的健康，因此表明这些蛋白酶表现出细胞焦亡的抑制机制。

2023 年的几篇核心论文报道 GSDMB 至少有五种可变剪接异构体 GSDMB1-5，它们同样被 IpaH7.8 靶向，但表现出截然不同的焦亡活性，当 GSDMB 成孔 N 端结构域通过 Granzyme-A 切割释放时，它会引发癌症细胞死亡，但未切割的 GSDMB 会促进多种促肿瘤作用（侵袭、转移和耐药性）。而之前的研

究使用了不同的异构体。因此解释了文献中关于 GSDMB NT 膜穿孔活性看似相互冲突的结果。

这些研究表明不同 GSDMB 可变剪接异构体在杀伤性淋巴细胞介导的细胞焦亡及抗肿瘤免疫中的不同功能，并揭示肿瘤细胞可通过操控 GSDMB 可变剪接从而逃避细胞焦亡的全新机制。GSDMB 的可变剪接是一个可能的新药物靶点，操控肿瘤细胞中 GSDMB 的可变剪接从而上调毒性 GSDMB 异构体表达可能会提高抗肿瘤免疫反应。总之，这些研究对理解 GSDMB 亚型在癌症或其他病理中的复杂作用以及 GSDMB 靶向治疗的未来设计具有重要意义。

# 07

## 化学与材料科学

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿主要分布在能源化学、催化与表界面化学、材料化学等研究方向。能源化学方向有四项，太阳能电池、燃料电池、液流电池、金属离子电池各有一项入选。催化与表界面化学方向有三项，过渡金属催化、电催化和吸附材料各有一项入选。材料化学方向有两项，均与发光材料相关，分别为碳量子点发光材料和有机窄谱带发光材料。此外，镧系单分子磁体研究也进入了榜单。

表 29 化学与材料科学领域 Top 10 热点前沿

| 序号 | 研究前沿              | 核心论文 | 被引频次  | 核心论文平均出版年 |
|----|-------------------|------|-------|-----------|
| 1  | 碳量子点发光材料          | 36   | 4092  | 2021.1    |
| 2  | 硒化锑薄膜太阳能电池        | 15   | 2241  | 2021.1    |
| 3  | 酸性析氧电催化剂          | 32   | 6134  | 2020.4    |
| 4  | 有机窄谱带发光材料         | 23   | 4243  | 2020.4    |
| 5  | 过渡金属催化的烯烃双官能团化反应  | 36   | 6370  | 2020.0    |
| 6  | 阴离子交换膜燃料电池和水电解池   | 26   | 6016  | 2020.0    |
| 7  | 吸附式大气集水研究         | 27   | 5174  | 2020.0    |
| 8  | 氧化还原液流电池          | 23   | 4118  | 2020.0    |
| 9  | 水系锌离子电池无枝晶锌金属负极设计 | 41   | 19689 | 2019.8    |
| 10 | 镧系单分子磁体           | 20   | 5090  | 2019.8    |

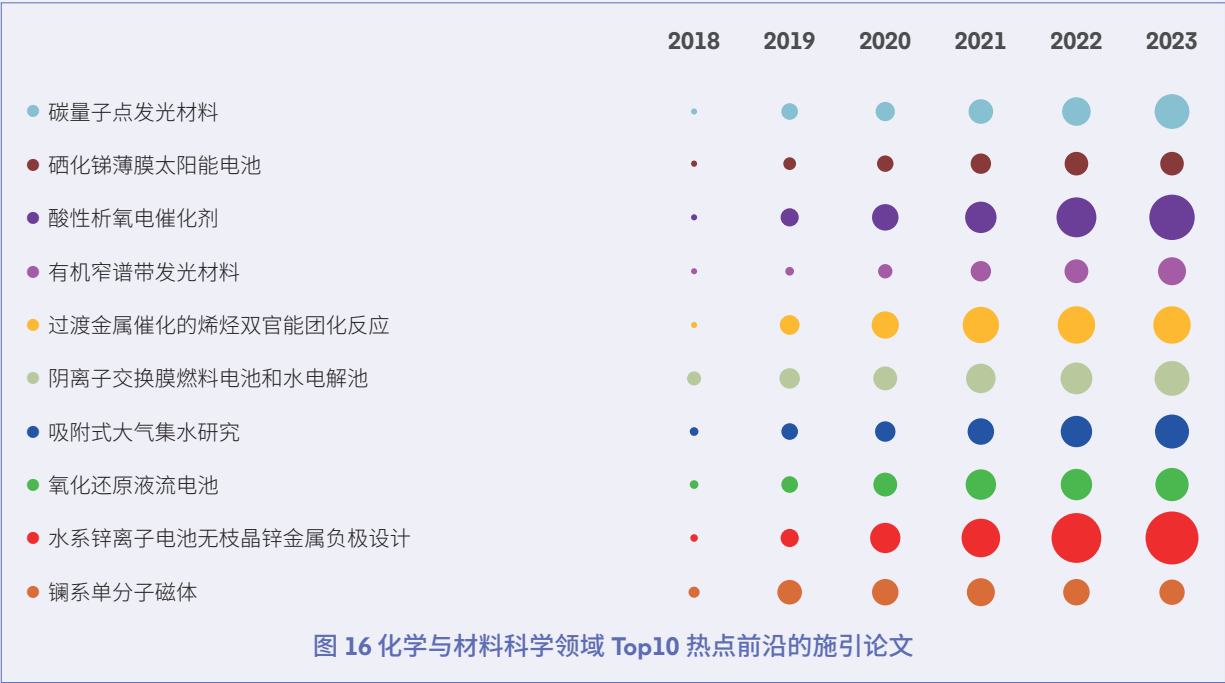


图 16 化学与材料科学领域 Top10 热点前沿的施引论文

1.2 重点热点前沿——“水系锌离子电池无枝晶锌金属负极设计”

水系锌离子电池因金属锌的储量丰富、环境友好、理论电容量高（820 mAh/g）、氧化还原电位低（-0.762 V vs 标准氢电极）和水系电解液的本征安全性等优势，在大规模储能领域具有广阔的应用前景。然而，锌金属负极存在枝晶生长、腐蚀、析氢等问题。特别是锌枝晶的生长不仅会导致电池内部短路，而且会促进腐蚀、析氢等副反

应的发生，是限制高性能水系锌离子电池发展的主要瓶颈。

该前沿的 41 篇核心论文开发了多种策略以抑制锌枝晶的生长，包括电解液优化（电解液添加剂、共晶电解质、高浓度电解质等）、表面改性、电极结构设计等。被引频次最高的一篇论文来自美国马里兰大学帕克分校、美国陆军研究实

验室和美国国家标准与技术研究院。在该论文中，研究人员设计了由高浓度锌离子和锂盐组成的水系电解液，不仅能在接近 100% 库仑效率下实现无枝晶的锌沉积 / 剥离，而且能够在开放环境中留住水分，可与  $\text{Zn/LiMn}_2\text{O}_4$  或  $\text{Zn/O}_2$  体系组成高性能水系锌离子电池。

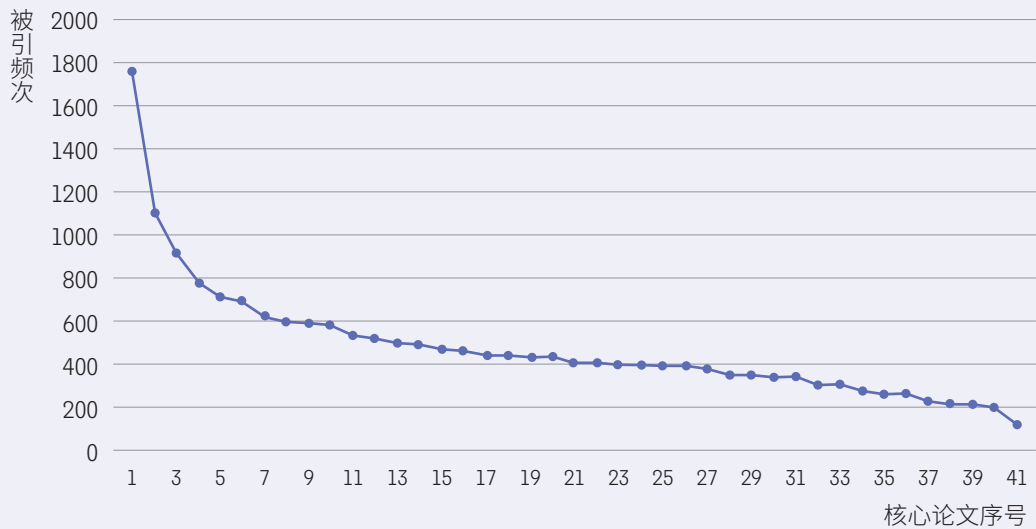


图 17 “水系锌离子电池无枝晶锌金属负极设计”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

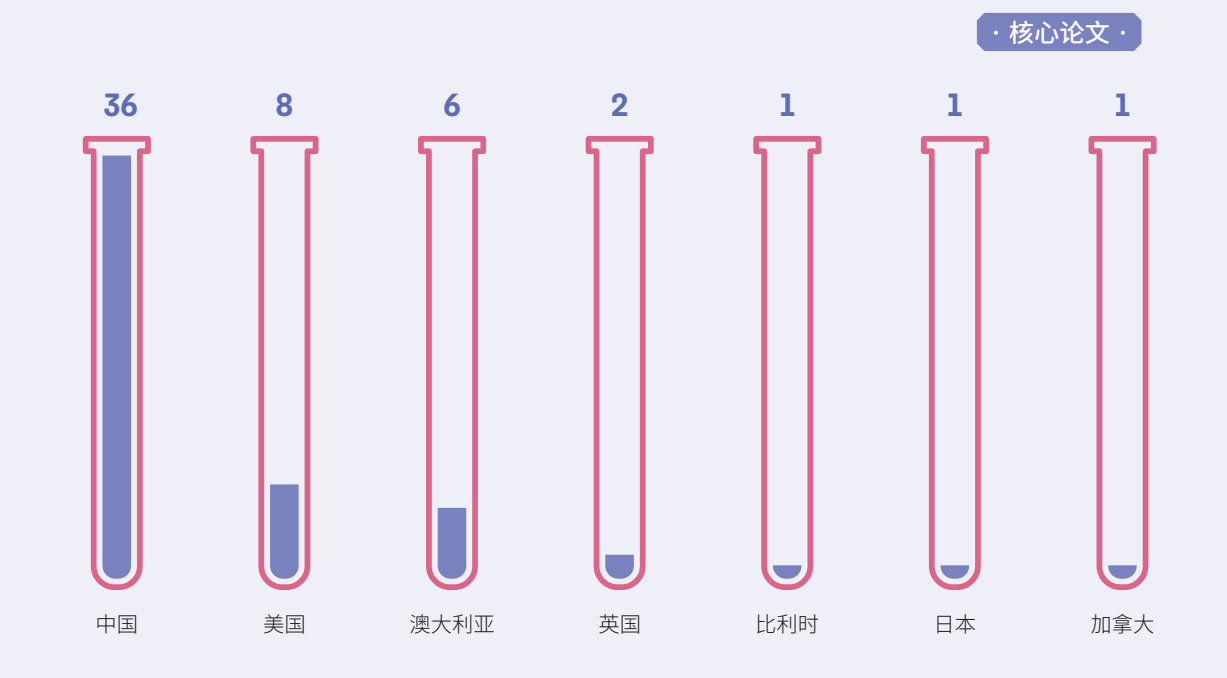
如表 30 所示，在该前沿中，中国贡献了 36 篇核心论文，数量明显多于榜单上的其他国家，美国

和澳大利亚分别列在第二、三位。具体到机构层面，8 家中国机构进入前十榜单。其中，中国科学院贡

献了 7 篇核心论文，位列第一。

表 30 “水系锌离子电池无枝晶锌金属负极设计”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

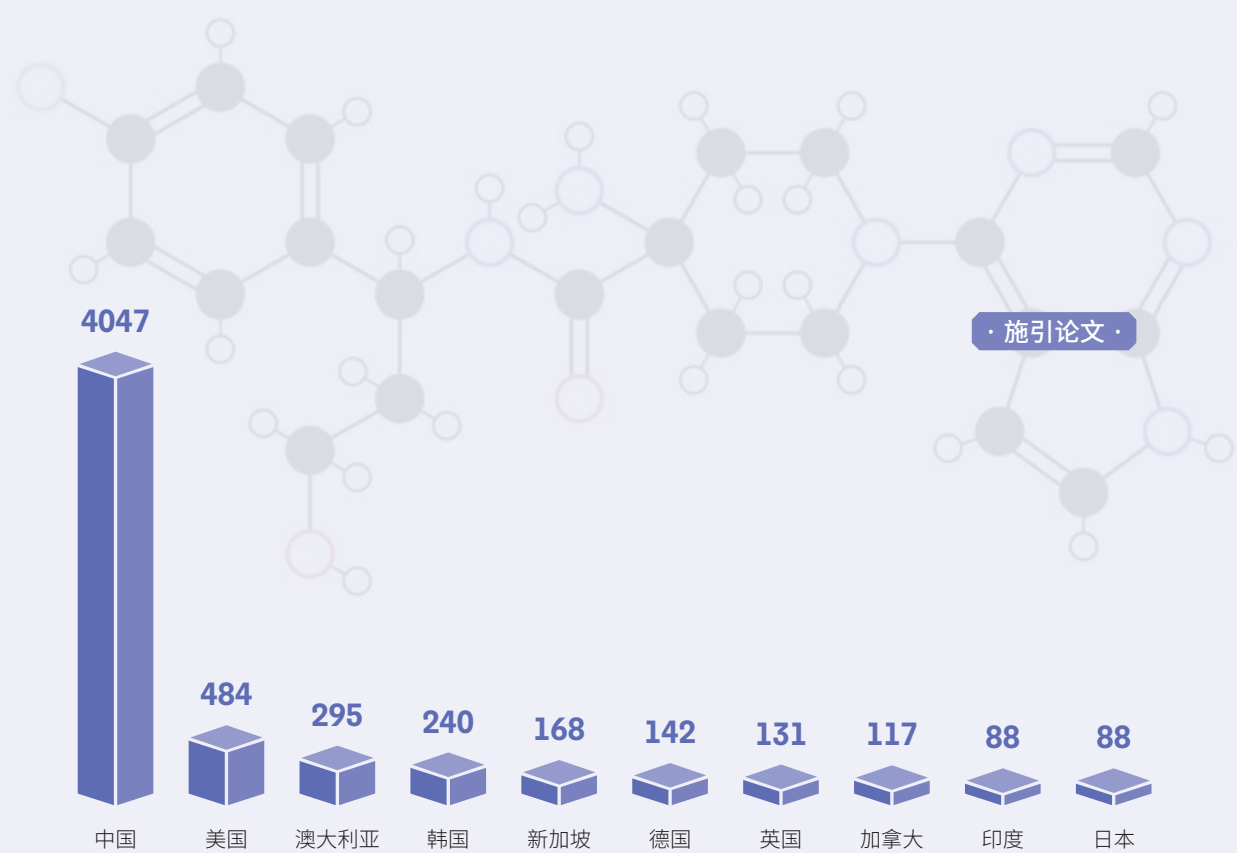
| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构     | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|--------|------|------|-------|
| 1  | 中国   | 36   | 87.8% | 1  | 中国科学院  | 中国   | 7    | 17.1% |
| 2  | 美国   | 8    | 19.5% | 2  | 中南大学   | 中国   | 6    | 14.6% |
| 3  | 澳大利亚 | 6    | 14.6% | 3  | 香港城市大学 | 中国   | 4    | 9.8%  |
| 4  | 英国   | 2    | 4.9%  | 3  | 上海大学   | 中国   | 4    | 9.8%  |
| 5  | 比利时  | 1    | 2.4%  | 3  | 卧龙岗大学  | 澳大利亚 | 4    | 9.8%  |
| 5  | 日本   | 1    | 2.4%  | 6  | 复旦大学   | 中国   | 3    | 7.3%  |
| 5  | 加拿大  | 1    | 2.4%  | 6  | 南开大学   | 中国   | 3    | 7.3%  |
|    |      |      |       | 6  | 中山大学   | 中国   | 3    | 7.3%  |
|    |      |      |       | 6  | 天津大学   | 中国   | 3    | 7.3%  |
|    |      |      |       | 6  | 马里兰大学  | 美国   | 3    | 7.3%  |



在施引论文方面，如表 31 所示，中国在总量上遥遥领先，美国、澳大利亚分列第二、三位。施引论文前十机构全部来自中国，反映了中国对该研究方向的高度关注与持续跟进。

表 31 “水系锌离子电池无枝晶锌金属负极设计”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   | 4047 | 82.8% | 1  | 中国科学院    | 中国   | 678  | 13.9% |
| 2  | 美国   | 484  | 9.9%  | 2  | 中南大学     | 中国   | 306  | 6.3%  |
| 3  | 澳大利亚 | 295  | 6.0%  | 3  | 中国科学技术大学 | 中国   | 234  | 4.8%  |
| 4  | 韩国   | 240  | 4.9%  | 4  | 香港城市大学   | 中国   | 198  | 4.1%  |
| 5  | 新加坡  | 168  | 3.4%  | 5  | 南开大学     | 中国   | 168  | 3.4%  |
| 6  | 德国   | 142  | 2.9%  | 6  | 清华大学     | 中国   | 142  | 2.9%  |
| 7  | 英国   | 131  | 2.7%  | 6  | 郑州大学     | 中国   | 142  | 2.9%  |
| 8  | 加拿大  | 117  | 2.4%  | 8  | 湖南大学     | 中国   | 133  | 2.7%  |
| 9  | 印度   | 88   | 1.8%  | 9  | 哈尔滨工业大学  | 中国   | 124  | 2.5%  |
| 9  | 日本   | 88   | 1.8%  | 10 | 复旦大学     | 中国   | 119  | 2.4%  |



### 1.3 重点热点前沿——“吸附式大气集水研究”

水是生命之源，然而世界三分之一的人口面临缺水压力。而且，许多面临水资源短缺的国家都是内陆国家，难以使用海水淡化的方法获取淡水。虽然空气中存在大量水蒸气，但通过结露技术集水非常耗能且不切实际，尤其是在相对湿度较低的地区。相比之下，基于吸附的太阳热能驱动的大气集水技术能够在低湿度条件下捕获水蒸气，是一种解决干旱、内陆、偏远

地区水资源短缺问题的有效方法。

该前沿的 27 篇核心论文从吸附剂材料设计、器件结构设计等角度研究提高吸附式大气集水器件的产水效率，主要是前者。提出的吸附剂材料包括金属有机框架化合物（MOF）、共价有机框架化合物、聚合物水凝胶、纳米核壳结构材料等类型。被引频次最高的四篇论文全部来自美国加州大学伯克利分校

Omar M. Yaghi 教授团队。在被引频次最高的论文中，Yaghi 教授团队讨论了用于吸附水的 MOF 的关键化学和结构因素，介绍了 MOF 吸附水机制以及精细调节其吸附行为的策略，并针对用于大气集水的 MOF，提出了相应筛选方法，概述了用于大气集水器件的下一代 MOF 的设计概念。

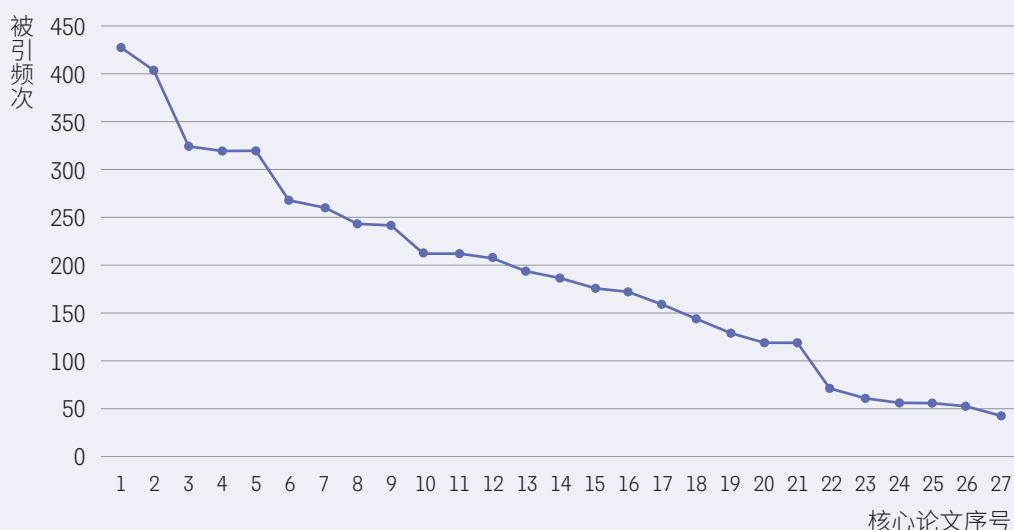


图 18 “吸附式大气集水研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

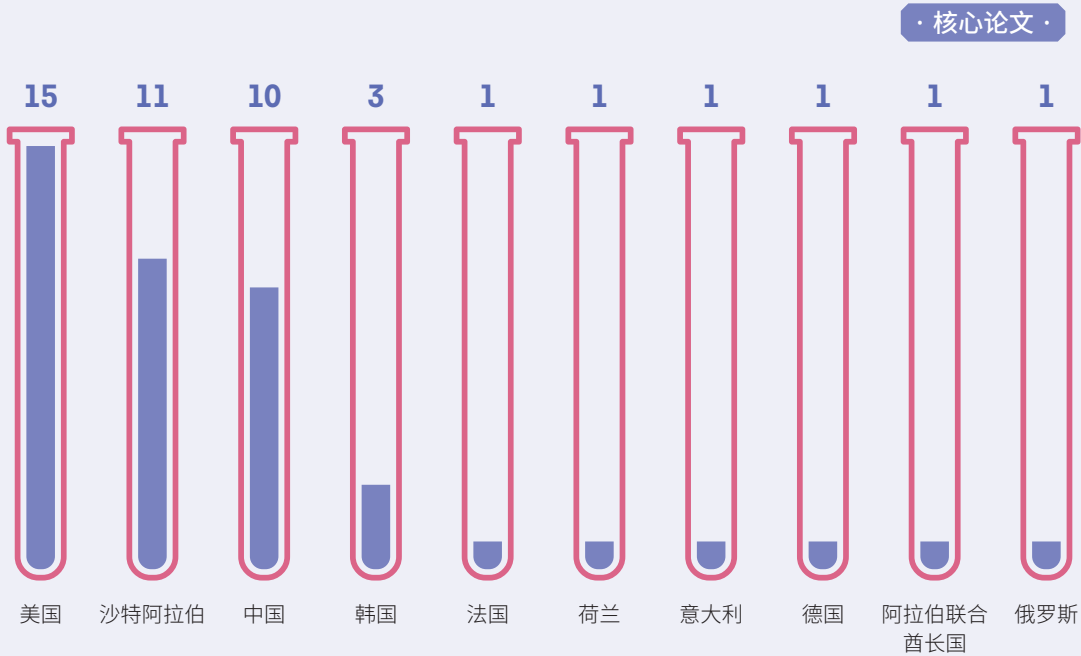
如表 32 所示，该前沿的 27 篇核心论文来自 10 个国家，反映了该前沿技术的重要价值受到普遍关注。特别是两个沙漠国家进入榜单，说明了该技术对当地具有重要的现实意义。美国贡献了 15 篇核心论文，位列第一，主要发文机构包括

加州大学伯克利分校、劳伦斯伯克利国家实验室、德克萨斯大学奥斯汀分校、麻省理工学院，分列机构排行榜的第一、三、四、七位。沙特阿拉伯以 11 篇核心论文位居榜单第二位，但其中 7 篇论文来自阿卜杜勒·阿齐兹国王科技城与加州

大学伯克利分校的合作，前者也因此位居机构排行榜第二位。中国贡献了 10 篇论文，位居榜单第三位，其中 4 篇来自上海交通大学，该机构与德克萨斯大学奥斯汀分校、阿卜杜拉国王科技大学并列机构排行榜第四位。

表 32 “吸附式大气集水研究”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       | 15   | 55.6% | 1  | 加州大学伯克利分校     | 美国    | 9    | 33.3% |
| 2  | 沙特阿拉伯    | 11   | 40.7% | 2  | 阿卜杜勒-阿齐兹国王科技城 | 沙特阿拉伯 | 7    | 25.9% |
| 3  | 中国       | 10   | 37.0% | 3  | 劳伦斯伯克利国家实验室   | 美国    | 5    | 18.5% |
| 4  | 韩国       | 3    | 11.1% | 4  | 德克萨斯大学奥斯汀分校   | 美国    | 4    | 14.8% |
| 5  | 法国       | 1    | 3.7%  | 4  | 上海交通大学        | 中国    | 4    | 14.8% |
| 5  | 荷兰       | 1    | 3.7%  | 4  | 阿卜杜拉国王科技大学    | 沙特阿拉伯 | 4    | 14.8% |
| 5  | 意大利      | 1    | 3.7%  | 7  | 麻省理工学院        | 美国    | 3    | 11.1% |
| 5  | 德国       | 1    | 3.7%  | 8  | 韩国科学技术研究院     | 韩国    | 2    | 7.4%  |
| 5  | 阿拉伯联合酋长国 | 1    | 3.7%  | 8  | 香港理工大学        | 中国    | 2    | 7.4%  |
| 5  | 俄罗斯      | 1    | 3.7%  | 8  | 犹他大学          | 美国    | 2    | 7.4%  |



在施引论文方面，如表 33 所示，中国在总量上远高于其他国家，体现了中国对该研究方向的密切关

注，美国、德国分列第二、三位。在施引论文前十机构中，中国有 5 家机构上榜，其中中国科学院位居

第一，美国有 2 家机构进入榜单，新加坡、法国、沙特阿拉伯各有 1 家机构进入榜单。

表 33 “吸附式大气集水研究”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  | 中国    | 1176 | 54.1% | 1  | 中国科学院      | 中国    | 155  | 7.1% |
| 2  | 美国    | 395  | 18.2% | 2  | 上海交通大学     | 中国    | 107  | 4.9% |
| 3  | 德国    | 129  | 5.9%  | 3  | 新加坡国立大学    | 新加坡   | 65   | 3.0% |
| 4  | 印度    | 113  | 5.2%  | 4  | 浙江大学       | 中国    | 64   | 2.9% |
| 5  | 英国    | 112  | 5.2%  | 5  | 法国国家科学研究中心 | 法国    | 63   | 2.9% |
| 6  | 韩国    | 101  | 4.6%  | 6  | 华中科技大学     | 中国    | 43   | 2.0% |
| 7  | 沙特阿拉伯 | 91   | 4.2%  | 6  | 加州大学伯克利分校  | 美国    | 43   | 2.0% |
| 7  | 新加坡   | 91   | 4.2%  | 8  | 阿卜杜拉国王科技大学 | 沙特阿拉伯 | 41   | 1.9% |
| 9  | 法国    | 72   | 3.3%  | 9  | 西北大学       | 美国    | 39   | 1.8% |
| 10 | 日本    | 71   | 3.3%  | 9  | 天津大学       | 中国    | 39   | 1.8% |



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

在化学与材料科学领域共有 3 项研究入选新兴前沿，涉及有机太阳能电池、有机晶体管、锂金属电池三个方向。

表 34 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  | 用于高效有机太阳能电池的小分子受体材料 | 8    | 252  | 2022.8    |
| 2  | 有机电化学晶体管            | 6    | 239  | 2022.7    |
| 3  | 用于锂金属电池的聚合物固态电解质    | 9    | 336  | 2022.6    |

### 2.2 重点新兴前沿——“有机电化学晶体管”

作为一种基于有机混合离子—电子导体的晶体管技术，有机电化学晶体管具有高灵敏度、快速响应速度、低工作电压、高跨导、良好的生物相容性等优点，在逻辑电路、传感器件、健康检测和仿生电子等领域具有良好的应用前景。该新兴前沿的 6 篇论文来自中国、瑞典、美国、沙特阿拉伯四个国家，内容包括有机电化学晶体管的制备和表

征以及在传感、人工脉冲神经元、逻辑电路等领域的应用。被引频次最高的一篇论文来自林雪平大学等瑞典研究机构，该论文报道了基于全印刷有机电化学晶体管的具有离子调制尖峰的有机电化学神经元。研究人员将人工神经元与捕蝇草相连，使用微弱的电生理信号刺激人工神经元，人工神经元产生反应后成功诱导捕蝇草闭合了叶片。此外，

在中美合作发表在《自然》(Nature) 杂志的一篇高被引论文中，通过合成新的电活性和离子渗透性半导体聚合物以及电活性混合层界面工程，研究人员构造了垂直架构有机电化学晶体管，该结构在 p 型和 n 型操作模式下均表现出前所未有的性能。





2024 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 08

## 物理学



2024 研究前沿 RESEARCH FRONT

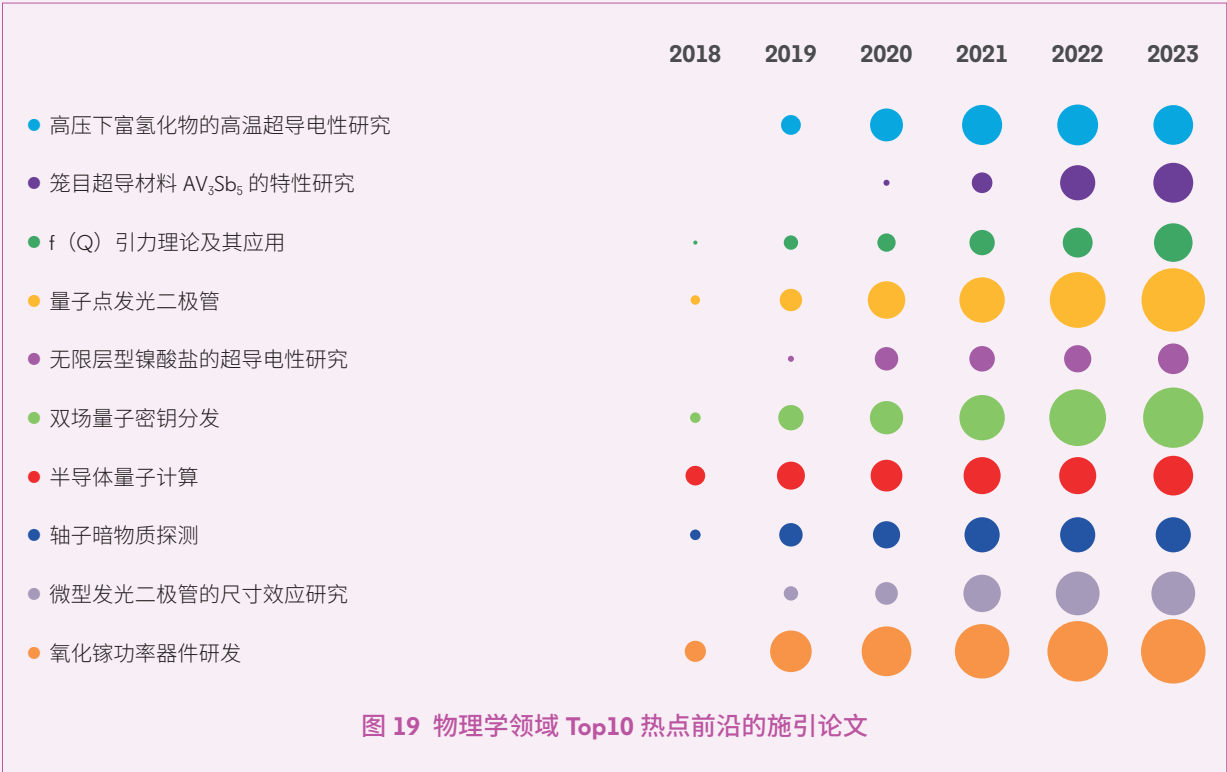
# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 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、半导体物理、量子物理和高能物理。凝聚态物理方面的热点前沿有 3 个，新型超导材料的研究依然保持了很高的热度，富氢化物连续四年入选热点前沿，笼目超导材料  $AV_3Sb_5$  和无限层型镍酸盐也连续两年入选热点前沿。理论物理方面聚焦修改的引力理论研究，即  $f(Q)$  引力理论。半导体物理方面涌现 3 个新出现的热点前沿，包括量子点发光二极管、微型发光二极管（MicroLED）以及氧化镓功率器件。量子物理方面的热点前沿有 2 个，双场量子密钥分发持续入选热点前沿，半导体量子计算是新出现的热点前沿。高能物理方面，暗物质粒子候选者之一的轴子备受关注，轴子暗物质探测成为了新的热点前沿。

表 35 物理学领域 Top 10 热点前沿

| 序号 | 热点前沿                    | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文平均出版年 |
|----|-------------------------|------|------|-----------|
| 1  | 高压下富氢化物的高温超导电性研究        | 30   | 4046 | 2021.5    |
| 2  | 笼目超导材料 $AV_3Sb_5$ 的特性研究 | 45   | 5694 | 2021.1    |
| 3  | $f(Q)$ 引力理论及其应用         | 26   | 2320 | 2021.1    |
| 4  | 量子点发光二极管                | 24   | 4059 | 2020.8    |
| 5  | 无限层型镍酸盐的超导电性研究          | 25   | 2820 | 2020.7    |
| 6  | 双场量子密钥分发                | 36   | 5682 | 2020.6    |
| 7  | 半导体量子计算                 | 23   | 3736 | 2020.2    |
| 8  | 轴子暗物质探测                 | 17   | 2630 | 2020.2    |
| 9  | 微型发光二极管的尺寸效应研究          | 15   | 2360 | 2020.1    |
| 10 | 氧化镓功率器件研发               | 44   | 7990 | 2020.0    |



1.2 重点热点前沿——“半导体量子计算”

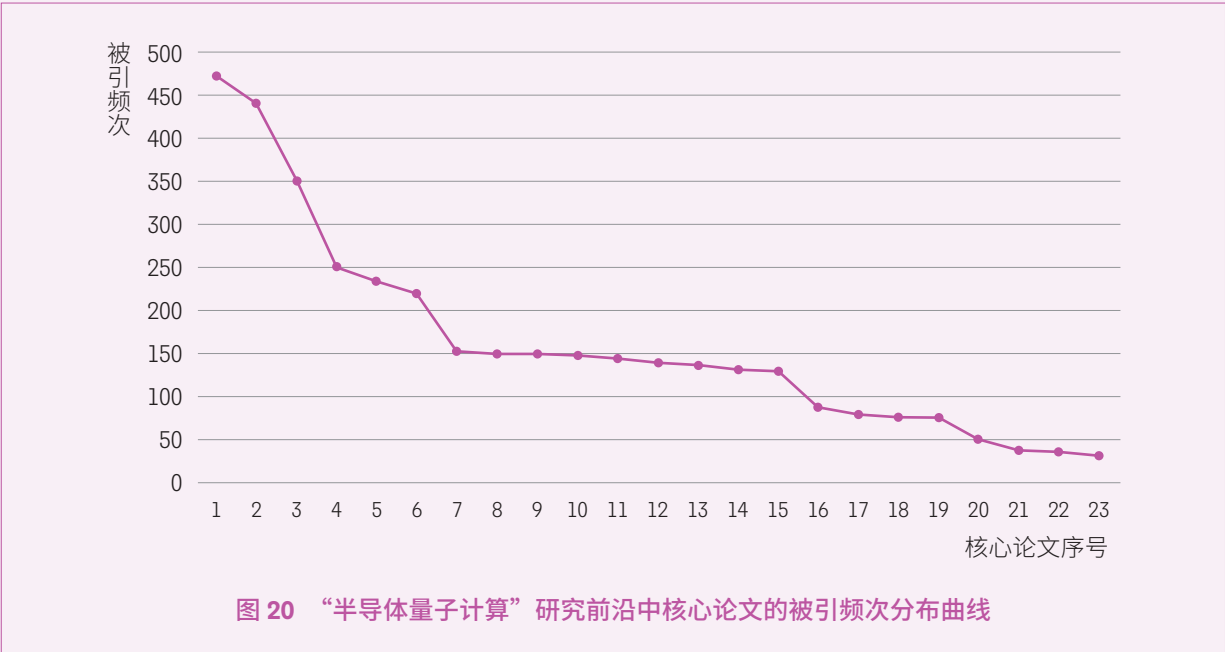
与经典计算相比，量子计算具有指数级的潜在计算速度优势，因此，世界主要国家都在大力推进量子计算的发展。量子计算有多种技术路线，目前呈现出并行发展的态势。半导体量子计算是主要的技术路线之一，可与现代半导体工艺技术兼容，受到了全球高校、科研机构、大型企业的广泛关注。

半导体量子计算中，硅基自旋量子比特是当前的热门研究方向，主要聚焦量子比特的操作保真度和量子比特的集成。近年来，硅基自旋量子比特的研究取得了一系列重大的突破。在量子比特的操作保真度中，先后实现了超过容错阈值的

单电子自旋量子比特门操作保真度（99.9% 以上）、99% 以上的两量子比特门操作保真度，以及实现锗空穴量子比特及其超快操控等重大进展。在量子比特的集成中，取得了自旋量子比特与超导腔的强耦合、四量子比特处理器、六量子比特处理器，以及高于 1K 温度下的自旋量子比特操控等突破。尽管半导体量子计算已取得了长足的发展，但目前仍处于探索阶段，其不断发展将助力通用量子计算机的实现。

从被引频次看（图 20），23 篇核心论文中被引频次最高的论文是 2018 年日本理化学研究所（RIKEN）实现将单电子自旋量子

比特门操作保真度提高到 99.9% 以上的研究，被引频次为 471 次。紧随其后是 2018 年荷兰代尔夫特理工大学实现可编程两量子比特处理器、2018 年美国普林斯顿大学实现受控非（CNOT）门以及 2018 年普林斯顿大学实现自旋量子比特与超导腔的强耦合的论文，被引频次分别为 439、350、250 次。此外，2019 年荷兰代尔夫特理工大学实现自旋量子比特与超导腔的强耦合、2020 年澳大利亚新南威尔士大学实现高于 1K 温度下的自旋量子比特操控、2021 年荷兰代尔夫特理工大学实现四量子比特锗量子处理器等研究，也获得了广泛的引用。



在核心论文产出方面（表 36），荷兰和美国表现最活跃，是核心论文的主要产出国家。23 篇核心论文中，荷兰贡献 12 篇，占核心论文总量的 52.2%，美国参与的有 11 篇，占核心论文总量的 47.8%。日本、澳大利亚等也有不错的表现。核心论文贡献最多的机构是荷兰代尔夫特理工大学，荷兰国家应用科学研究院和美国普林斯顿大学位列核心论文产出机构的第二和第三位。Top 产出机构中，来自美国的有 5 所，日本的有 3 所，荷兰和加拿大各 2 所，澳大利亚、中国和德国各 1 所。

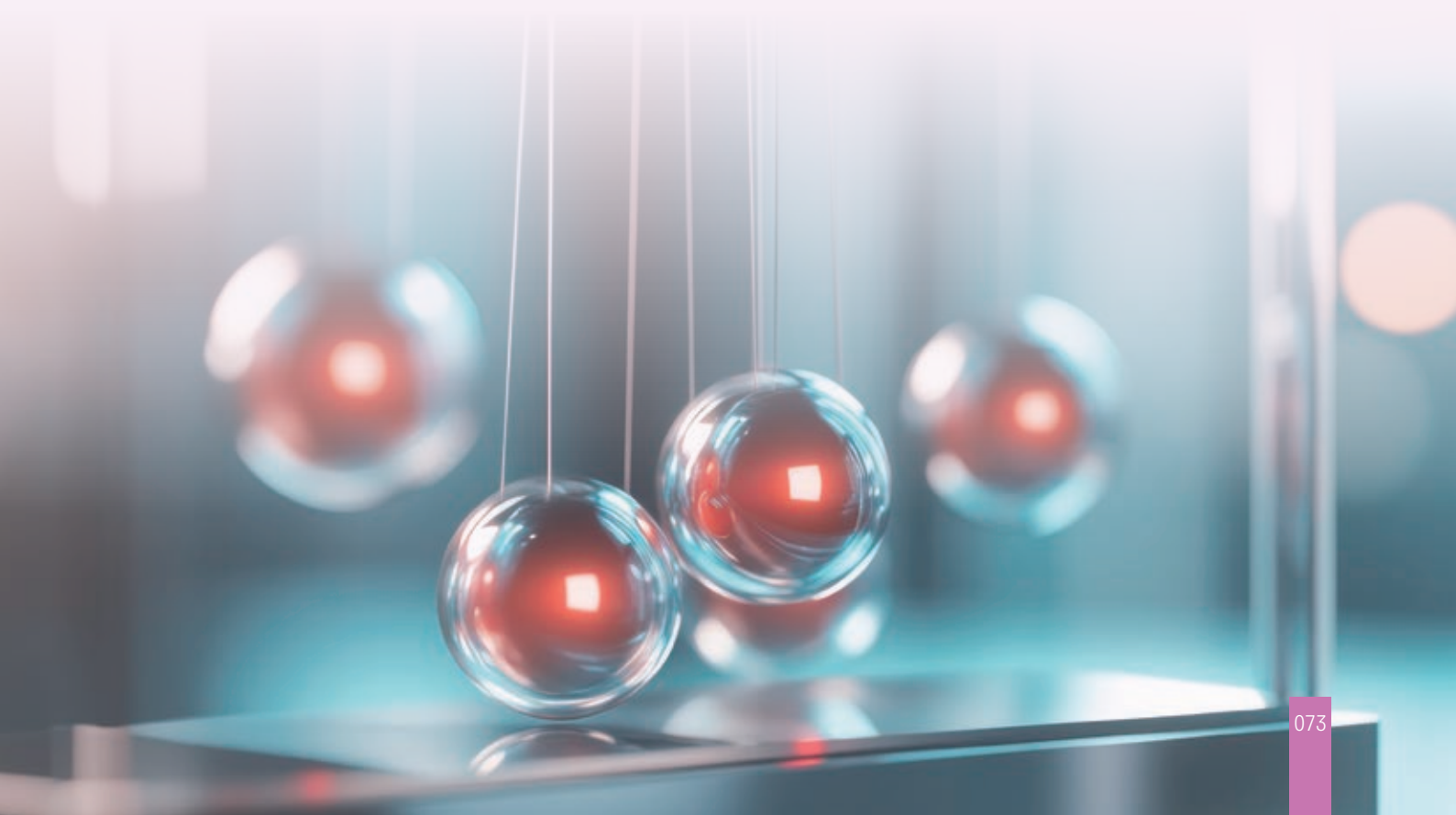
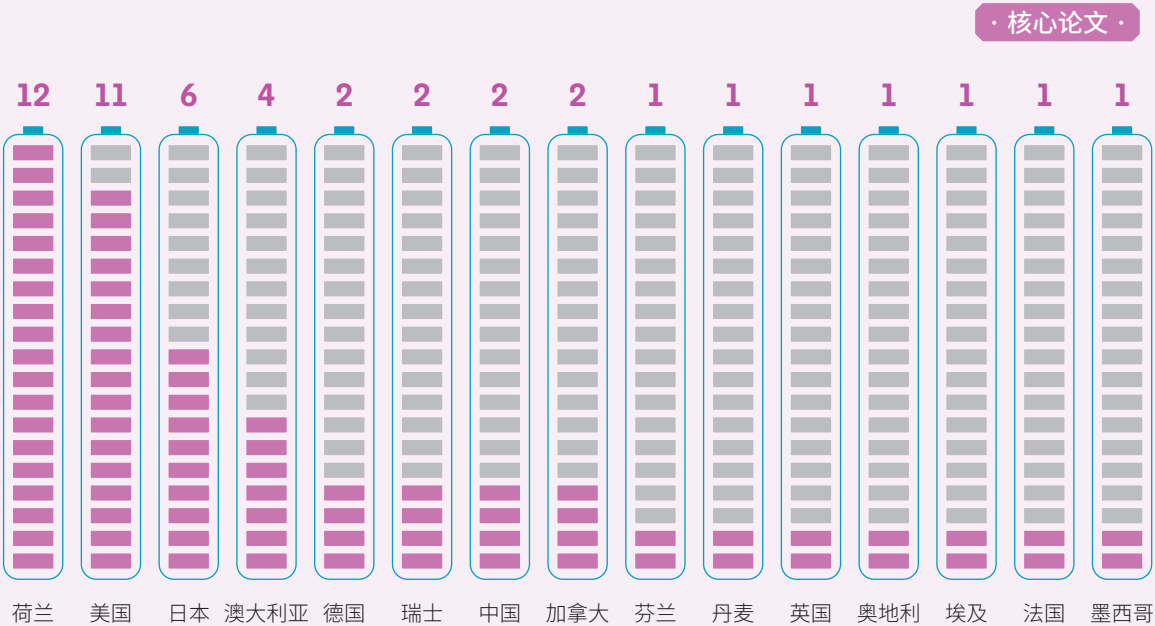


表 36 “半导体量子计算”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

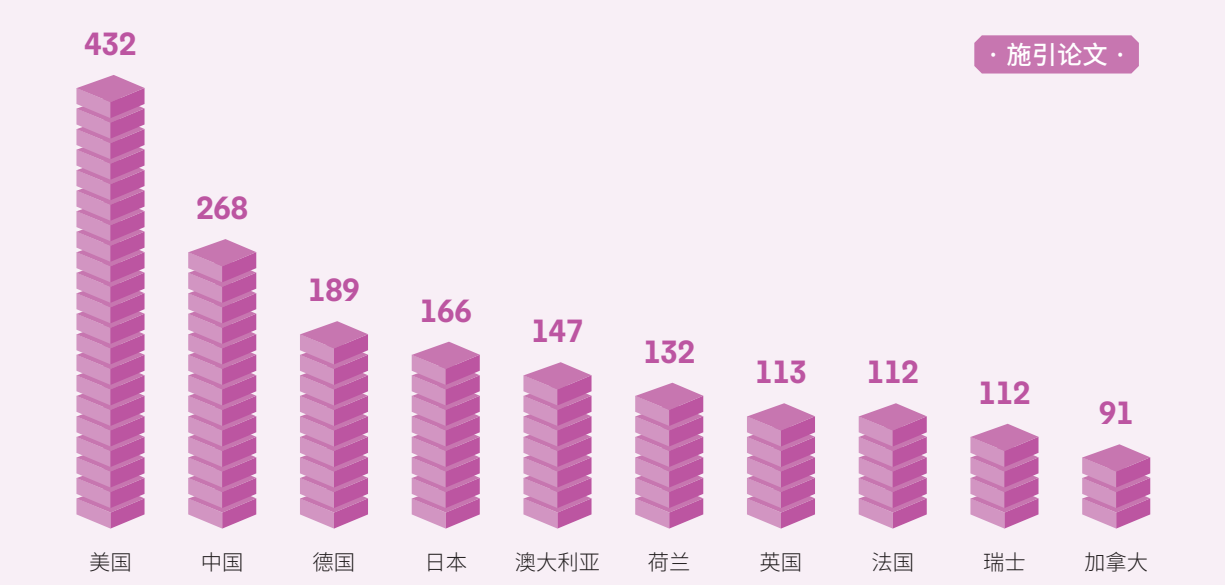
| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构           | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|--------------|------|------|-------|
| 1  | 荷兰   | 12   | 52.2% | 1  | 代尔夫特理工大学     | 荷兰   | 12   | 52.2% |
| 2  | 美国   | 11   | 47.8% | 2  | 荷兰国家应用科学研究院  | 荷兰   | 8    | 34.8% |
| 3  | 日本   | 6    | 26.1% | 3  | 普林斯顿大学       | 美国   | 5    | 21.7% |
| 4  | 澳大利亚 | 4    | 17.4% | 4  | 新南威尔士大学      | 澳大利亚 | 4    | 17.4% |
| 5  | 德国   | 2    | 8.7%  | 4  | 庆应义塾大学       | 日本   | 4    | 17.4% |
| 5  | 瑞士   | 2    | 8.7%  | 6  | 美国国家标准与技术研究院 | 美国   | 3    | 13.0% |
| 5  | 中国   | 2    | 8.7%  | 6  | 英特尔公司        | 美国   | 3    | 13.0% |
| 5  | 加拿大  | 2    | 8.7%  | 8  | 加拿大高等研究院     | 加拿大  | 2    | 8.7%  |
| 9  | 芬兰   | 1    | 4.3%  | 8  | 东京大学         | 日本   | 2    | 8.7%  |
| 9  | 丹麦   | 1    | 4.3%  | 8  | 中国科学院        | 中国   | 2    | 8.7%  |
| 9  | 英国   | 1    | 4.3%  | 8  | 理化学研究所       | 日本   | 2    | 8.7%  |
| 9  | 奥地利  | 1    | 4.3%  | 8  | 舍布鲁克大学       | 加拿大  | 2    | 8.7%  |
| 9  | 埃及   | 1    | 4.3%  | 8  | 桑迪亚国家实验室     | 美国   | 2    | 8.7%  |
| 9  | 法国   | 1    | 4.3%  | 8  | 康斯坦茨大学       | 德国   | 2    | 8.7%  |
| 9  | 墨西哥  | 1    | 4.3%  | 8  | 马里兰大学帕克分校    | 美国   | 2    | 8.7%  |



分析该热点前沿施引论文的国家和机构（表 37）可以发现，美国是最活跃的国家，远超其他国家。中国、德国、日本、澳大利亚、荷兰紧随其后。施引论文总量排名前 10 的机构中，中国科学院的施引论文最多，紧随其后的是澳大利亚新南威尔士大学和荷兰代尔夫特理工大学。这些 Top 施引机构中，来自法国的机构有 4 家，中国有 2 家，澳大利亚、荷兰、瑞士和德国各有 1 家。

表 37 “半导体量子计算”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   | 432  | 30.9% | 1  | 中国科学院          | 中国   | 119  | 8.5% |
| 2  | 中国   | 268  | 19.2% | 2  | 新南威尔士大学        | 澳大利亚 | 114  | 8.2% |
| 3  | 德国   | 189  | 13.5% | 3  | 代尔夫特理工大学       | 荷兰   | 112  | 8.0% |
| 4  | 日本   | 166  | 11.9% | 4  | 原子能与替代能源委员会    | 法国   | 67   | 4.8% |
| 5  | 澳大利亚 | 147  | 10.5% | 5  | 格勒诺布尔大学        | 法国   | 66   | 4.7% |
| 6  | 荷兰   | 132  | 9.4%  | 5  | 中国科学技术大学       | 中国   | 66   | 4.7% |
| 7  | 英国   | 113  | 8.1%  | 7  | 格勒诺布尔 - 阿尔卑斯大学 | 法国   | 65   | 4.7% |
| 8  | 法国   | 112  | 8.0%  | 8  | 法国国家科学研究中心     | 法国   | 63   | 4.5% |
| 8  | 瑞士   | 112  | 8.0%  | 9  | 巴塞尔大学          | 瑞士   | 54   | 3.9% |
| 10 | 加拿大  | 91   | 6.5%  | 10 | 亥姆霍兹联合会        | 德国   | 52   | 3.7% |



1.3 重点热点前沿——“轴子暗物质探测”

暗物质是当代物理学和宇宙学研究中最重要的未解之谜之一。多年来，大质量弱相互作用粒子（WIMP）一直是暗物质粒子的主要候选者，国际多个暗物质搜寻实验都以 WIMP 为目标。近年来，暗物质粒子的另一个候选者——轴子，引起了广泛的关注。不少国家已经部署轴子暗物质实验，包括美国轴子暗物质实验（ADMX）、美国 HAYSTAC 实验、韩国 CULTASK 实验、德国 MADMAX 实验等，这些实验陆续取得了不错的成果，使

轴子暗物质探测成为了新的研究热点。

从被引频次看（图 21），17 篇核心论文中被引频次最高的论文是 2018 年西班牙萨拉戈萨大学关于搜寻轴子的新实验方法的综述文章，被引频次为 443 次。随后是 2018 年美国 ADMX 合作组报道的排除了 2.66-2.82  $\mu\text{eV}$  质量范围内轴子存在的可能性的实验结果以及 2020 年意大利国家核物理研究院关于量子色动力学轴子模型的综述

文章，被引频次分别为 320 和 314 次。此外，2020 年 ADMX 合作组排除了 2.81-3.31  $\mu\text{eV}$  质量范围内轴子存在的可能性的实验结果，耶鲁大学 2018 年通过 HAYSTAC 实验排除 23.15-24.0  $\mu\text{eV}$  质量范围内轴子存在的可能性以及 2021 年排除 16.96-17.12  $\mu\text{eV}$  和 17.14-17.28  $\mu\text{eV}$  质量范围内轴子存在的可能性的研究，2019 年美国麻省理工学院发布的 ABRACADABRA 实验的首个实验结果等，也受到了高度的关注。

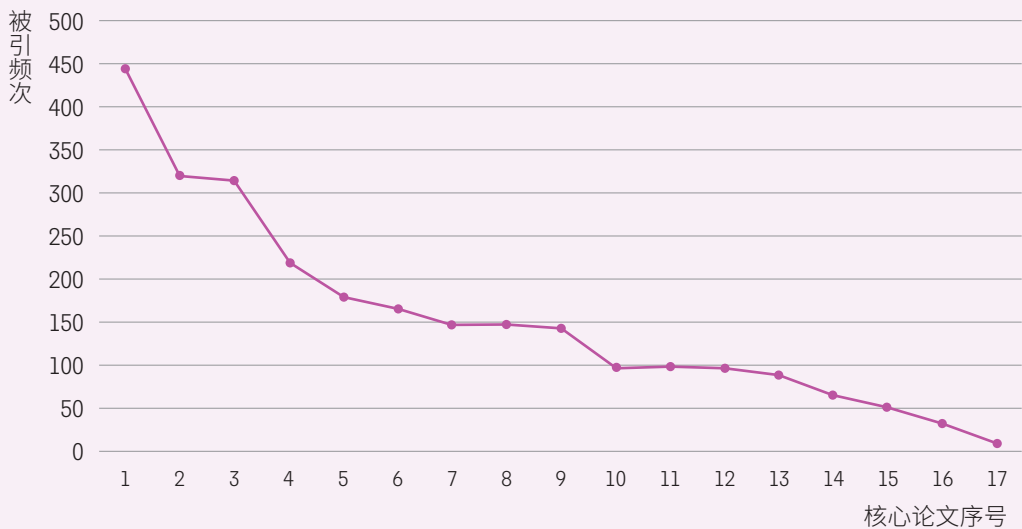


图 21 “轴子暗物质探测”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

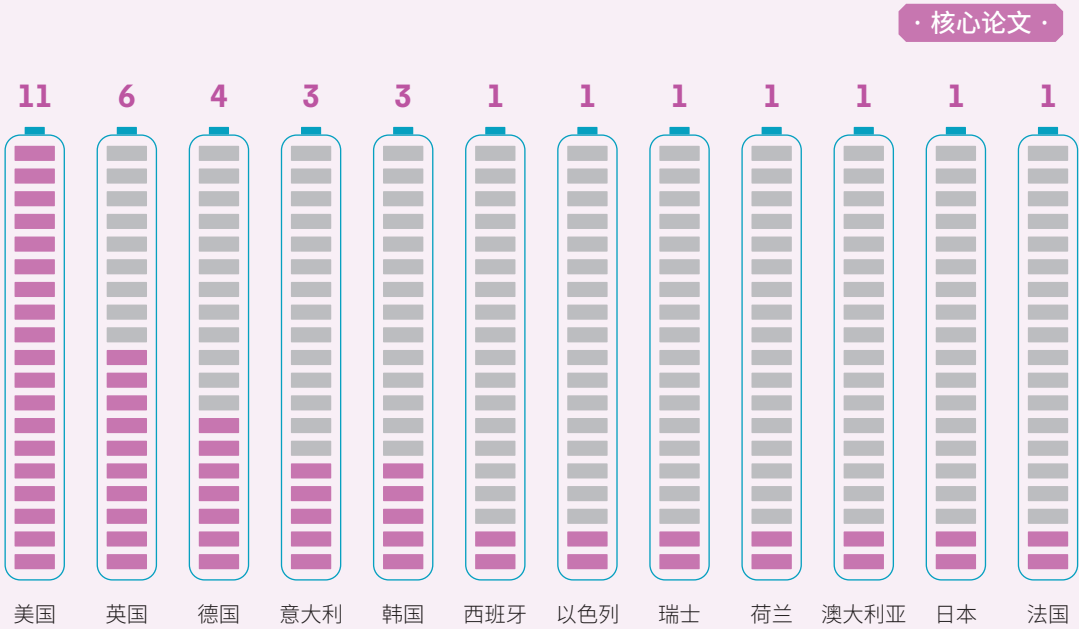
在这个热点前沿中，美国表现最活跃，是核心论文的主要产出国家，参与了 17 篇核心论文中的 11 篇，占核心论文总量的 64.7%（表

38）。英国、德国、意大利、韩国等的表现也较为突出。参与核心论文最多的前 6 家机构都是美国机构，加州大学伯克利分校、芝加哥

大学和劳伦斯利弗莫尔国家实验室排名前列。表 38 中的 Top 产出机构中（含并列共 13 家），来自美国的有 9 家，韩国 3 家，英国 1 家。

表 38 “轴子暗物质探测”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构           | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|--------------|------|------|-------|
| 1  | 美国   | 11   | 64.7% | 1  | 加州大学伯克利分校    | 美国   | 7    | 41.2% |
| 2  | 英国   | 6    | 35.3% | 2  | 芝加哥大学        | 美国   | 5    | 29.4% |
| 3  | 德国   | 4    | 23.5% | 2  | 劳伦斯利弗莫尔国家实验室 | 美国   | 5    | 29.4% |
| 4  | 意大利  | 3    | 17.6% | 4  | 美国国家标准与技术研究院 | 美国   | 4    | 23.5% |
| 4  | 韩国   | 3    | 17.6% | 4  | 佛罗里达大学       | 美国   | 4    | 23.5% |
| 6  | 西班牙  | 1    | 5.9%  | 4  | 费米国立加速器实验室   | 美国   | 4    | 23.5% |
| 6  | 以色列  | 1    | 5.9%  | 7  | 韩国科学技术研究院    | 韩国   | 3    | 17.6% |
| 6  | 瑞士   | 1    | 5.9%  | 7  | 西北太平洋国家实验室   | 美国   | 3    | 17.6% |
| 6  | 荷兰   | 1    | 5.9%  | 7  | 密西根大学        | 美国   | 3    | 17.6% |
| 6  | 澳大利亚 | 1    | 5.9%  | 7  | 韩国航空宇宙研究院    | 韩国   | 3    | 17.6% |
| 6  | 日本   | 1    | 5.9%  | 7  | 韩国基础科学研究所    | 韩国   | 3    | 17.6% |
| 6  | 法国   | 1    | 5.9%  | 7  | 华盛顿大学        | 美国   | 3    | 17.6% |
|    |      |      |       | 7  | 谢菲尔德大学       | 英国   | 3    | 17.6% |

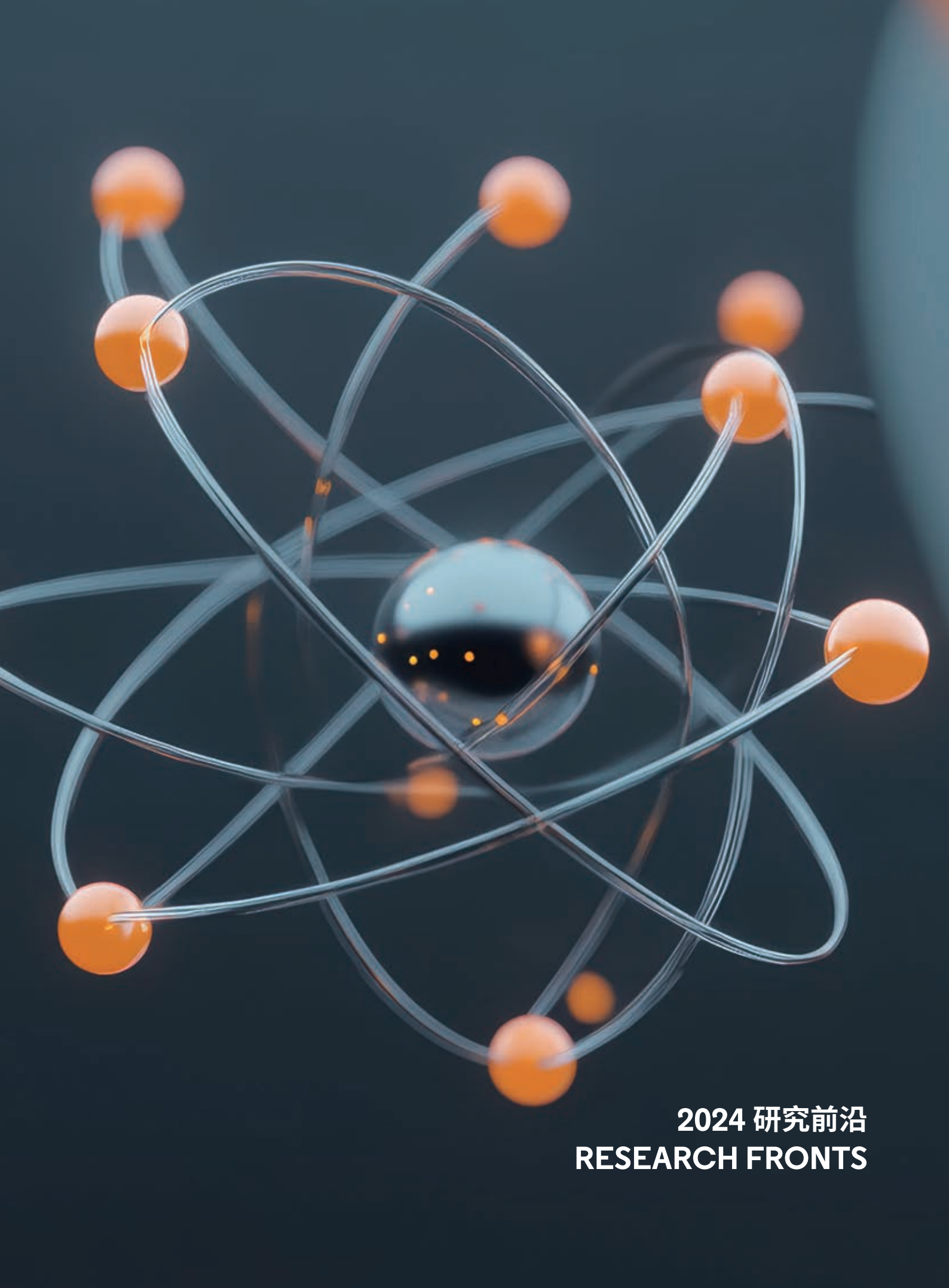


该前沿施引论文 Top 产出国家 (表 39) 中,美国仍是最活跃的国家, 远超其他国家。德国、意大利、中国紧随其后。施引论文总量排名前 10 的机构中, 意大利国家核物理研究院的施引论文最多, 随后是德国亥姆霍兹联合会、西班牙高等科学研究理事会和加州大学伯克利分校。Top10 施引论文产出机构中, 来自美国的机构有 3 家, 德国有 2 家, 意大利、西班牙、日本、法国、中国各有 1 家。

表 39 “轴子暗物质探测”研究前沿中施引论文的 Top 产出国家和机构

| 排名 | 国家   | 施引论文 | 比例    | 排名 | 机构           | 所属国家 | 施引论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|--------------|------|------|-------|
| 1  | 美国   | 468  | 38.3% | 1  | 意大利国家核物理研究院  | 意大利  | 183  | 15.0% |
| 2  | 德国   | 274  | 22.4% | 2  | 亥姆霍兹联合会      | 德国   | 102  | 8.4%  |
| 3  | 意大利  | 219  | 17.9% | 3  | 西班牙高等科学研究理事会 | 西班牙  | 98   | 8.0%  |
| 4  | 中国   | 161  | 13.2% | 4  | 加州大学伯克利分校    | 美国   | 88   | 7.2%  |
| 5  | 西班牙  | 155  | 12.7% | 5  | 东京大学         | 日本   | 81   | 6.6%  |
| 6  | 英国   | 152  | 12.4% | 6  | 芝加哥大学        | 美国   | 75   | 6.1%  |
| 7  | 日本   | 144  | 11.8% | 7  | 法国国家科学研究中心   | 法国   | 74   | 6.1%  |
| 8  | 法国   | 88   | 7.2%  | 8  | 马普学会         | 德国   | 73   | 6.0%  |
| 8  | 俄罗斯  | 88   | 7.2%  | 9  | 斯坦福大学        | 美国   | 67   | 5.5%  |
| 10 | 澳大利亚 | 69   | 5.7%  | 10 | 中国科学院        | 中国   | 65   | 5.3%  |
| 10 | 瑞士   | 69   | 5.7%  |    |              |      |      |       |





2024 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 09

## 天文学与天体物理学

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

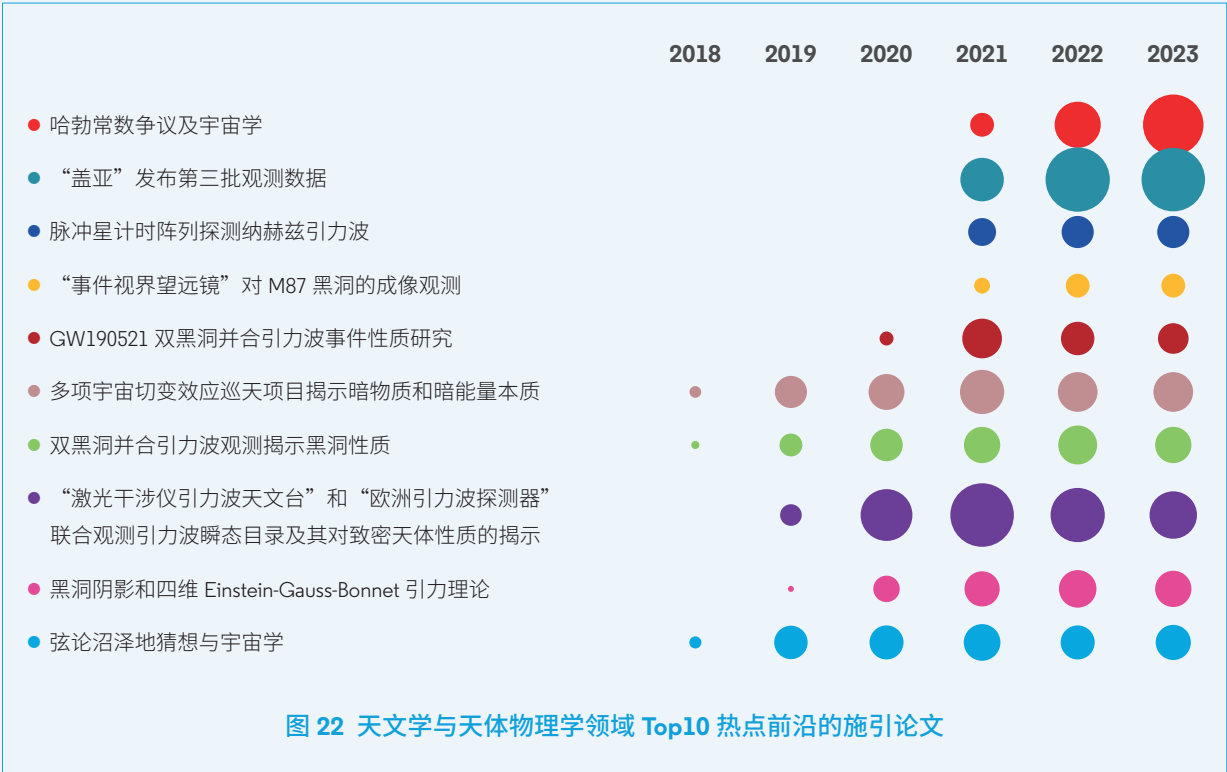
# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 天文学与天体物理学领域 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关注引力波、宇宙学、黑洞、暗物质和暗能量、银河系巡天等研究主题。引力波探测及理论研究表现最为突出，涌现出脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波、GW190521 双黑洞并合引力波事件性质研究、双黑洞并合引力波观测揭示黑洞性质、“激光干涉仪引力波天文台”和“欧洲引力波探测器”联合观测引力波瞬态目录及其对致密天体性质的揭示、黑洞阴影和四维 Einstein-Gauss-Bonnet 引力理论等多个热点前沿。宇宙学研究方面，哈勃常数争议及宇宙学首次上榜，弦论沼泽地猜想与宇宙学再次上榜。黑洞、暗物质和暗能量研究主题仍然备受关注，相关热点前沿包括：“事件视界望远镜”对 M87 黑洞的成像观测、多项宇宙切变效应巡天项目揭示暗物质和暗能量本质。此外，“盖亚”银河系巡天任务发布阶段成果再次上榜。

表 40 天文学与天体物理学领域 Top 10 热点前沿

| 序号 | 热点前沿                                            | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文平均出版年 |
|----|-------------------------------------------------|------|------|-----------|
| 1  | 哈勃常数争议及宇宙学                                      | 10   | 2120 | 2021.7    |
| 2  | “盖亚”发布第三批观测数据                                   | 6    | 2869 | 2021.0    |
| 3  | 脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波                                 | 6    | 1117 | 2021.0    |
| 4  | “事件视界望远镜”对 M87 黑洞的成像观测                          | 2    | 368  | 2021.0    |
| 5  | GW190521 双黑洞并合引力波事件性质研究                         | 5    | 1037 | 2020.6    |
| 6  | 多项宇宙切变效应巡天项目揭示暗物质和暗能量本质                         | 13   | 2961 | 2020.2    |
| 7  | 双黑洞并合引力波观测揭示黑洞性质                                | 27   | 3238 | 2020.1    |
| 8  | “激光干涉仪引力波天文台”和“欧洲引力波探测器”联合观测引力波瞬态目录及其对致密天体性质的揭示 | 4    | 3358 | 2020.0    |
| 9  | 黑洞阴影和四维 Einstein-Gauss-Bonnet 引力理论              | 19   | 2674 | 2020.0    |
| 10 | 弦论沼泽地猜想与宇宙学                                     | 15   | 3047 | 2019.5    |



## 1.2 重点热点前沿——“哈勃常数争议及宇宙学”

1929 年，美国天文学家 Edwin Hubble 发现距离地球越遥远的星系远离地球的速度越快，表明宇宙正在加速膨胀。Hubble 随后建立了利用一种亮度周期性变化的恒星——造父变星（Cepheid）作为“标准烛光”来计算天体距离的方法，并推算出星系远离速度增加值与距离之比为  $500 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ （后被称为哈勃常数）。20 世纪 80 年代，Hubble 的学术继承人 Allan Sandage 利用观测能力更强的天文望远镜，发现 Hubble 的计算结果偏高，并将哈勃常数修正为  $50 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  左右。

背景（CMB）推算出的哈勃常数与根据传统天文学方法计算出的数值不相符，导致了天文和物理学界的激烈争论。宇宙微波背景可看做宇宙大爆炸的“余辉”，通过测量宇宙微波背景温度和偏振的各向异性，并结合  $\Lambda$ CDM 宇宙学模型可推算宇宙膨胀速率。根据欧洲空间局（ESA）“普朗克”（Planck）任务数据推算出的哈勃常数为  $67.27 \pm 0.60 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。2022 年，诺贝尔物理学奖得主 Adam Riess 团队利用对造父变星与超新星的观测数据，计算得出的哈勃常数约为  $73.04 \pm 1.04 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。

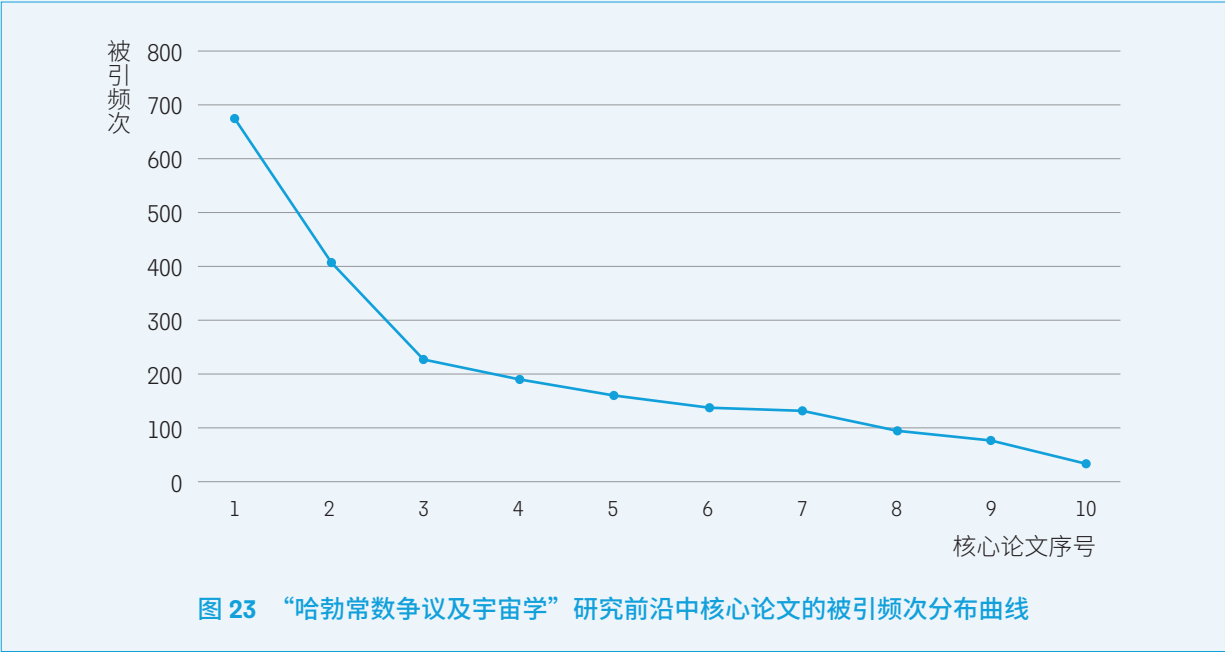
哈勃常数值要高于基于宇宙微波背景辐射方法的测量结果。多数科学家认为这一差别无法用统计学误差来解释，这一谜题即“哈勃常数争议”。如果这两种计算结果均被其他技术验证是正确的，那么宇宙学定律可能需要改写，并可能蕴含着超越广义相对论和量子力学的新物理的线索。

热点前沿“哈勃常数争议及宇宙学”包括 10 篇核心论文，内容聚焦不同研究团队利用多种方法测量哈勃常数的最新进展，以及为调和哈勃常数争议而提出的各种解决方案。其中被引频次最高的一篇核心论文来自约翰·霍普金斯大学物

2015 年以来，根据宇宙微波

基于“标准烛光”方法测得的

理学家 Adam Riess 领导的“基于超新星、哈勃常数研究暗能量状态方程” (SH0ES) 国际科学合作项目。2022 年，该团队基于“哈勃空间望远镜” (HST) 近 30 年的观测结果，对哈勃常数进行了重大更新，测得结果的不确定度已达 1% 水平，出错几率仅百万分之一。其他核心论文还包括利用宇宙微波背景功率谱数据、重子声学振荡、Pantheon+ 超新星数据等方法开展的哈勃常数测量研究。



根据核心论文的产出国家和产出机构的分析，美国在该领域的表现最为突出，美国主导或参与了大部分研究工作，贡献了 8 篇核心论文。法国和英国作为该领域研究的第二梯队，分别贡献了 7 篇和 5 篇核心论文。作为 SH0ES 国际科学合作项目的发起机构，约翰·霍普金斯大学无疑是该领域贡献最多核心论文的机构。法国国家科学研究中心和索邦大学等法国机构在该领域也有突出表现。由于该领域的多篇核心论文均由全球多个科研机构合作完成，涉及国家和机构众多，具体细节不再一一列举，但也凸显了国际合作在推动该领域研究的重要作用。

表 41 “哈勃常数争议及宇宙学”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

| 排名 | 国家  | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构         | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|-----|------|-------|----|------------|------|------|-------|
| 1  | 美国  | 8    | 80.0% | 1  | 约翰·霍普金斯大学  | 美国   | 7    | 70.0% |
| 2  | 法国  | 7    | 70.0% | 1  | 法国国家科学研究中心 | 法国   | 7    | 70.0% |
| 3  | 英国  | 5    | 50.0% | 3  | 索邦大学       | 法国   | 5    | 50.0% |
| 4  | 荷兰  | 4    | 40.0% |    |            |      |      |       |
| 4  | 希腊  | 4    | 40.0% |    |            |      |      |       |
| 4  | 西班牙 | 4    | 40.0% |    |            |      |      |       |
| 4  | 印度  | 4    | 40.0% |    |            |      |      |       |
| 4  | 德国  | 4    | 40.0% |    |            |      |      |       |
| 4  | 意大利 | 4    | 40.0% |    |            |      |      |       |
| 4  | 加拿大 | 4    | 40.0% |    |            |      |      |       |
| 4  | 中国  | 4    | 40.0% |    |            |      |      |       |
| 4  | 挪威  | 4    | 40.0% |    |            |      |      |       |



在施引论文方面，美国的施引论文量仍处于领先地位，占比 29.0%。中国位居第四，表现出良好的发展态势。Top 10 施引论文产出机构的前三席分别为意大利国家核物理研究院、法国国家科学研究中心以及中国科学院。美国有三家机构登上 Top 10 施引论文产出机构榜，其中美国能源部排名第六，约翰·霍普金斯大学和芝加哥大学并列第七。

表 42 “哈勃常数争议及宇宙学”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  | 355  | 29.0% | 1  | 意大利国家核物理研究院  | 意大利  | 132  | 10.8% |
| 2  | 英国  | 220  | 18.0% | 2  | 法国国家科学研究中心   | 法国   | 128  | 10.5% |
| 3  | 意大利 | 207  | 16.9% | 3  | 中国科学院        | 中国   | 92   | 7.5%  |
| 4  | 中国  | 196  | 16.0% | 4  | 意大利国家天体物理研究所 | 意大利  | 79   | 6.5%  |
| 5  | 印度  | 169  | 13.8% | 5  | 西班牙高等科学研究理事会 | 西班牙  | 76   | 6.2%  |
| 6  | 西班牙 | 142  | 11.6% | 6  | 美国能源部        | 美国   | 57   | 4.7%  |
| 7  | 法国  | 141  | 11.5% | 7  | 约翰·霍普金斯大学    | 美国   | 55   | 4.5%  |
| 8  | 德国  | 138  | 11.3% | 7  | 马普学会         | 德国   | 55   | 4.5%  |
| 9  | 日本  | 93   | 7.6%  | 7  | 芝加哥大学        | 美国   | 55   | 4.5%  |
| 10 | 巴西  | 88   | 7.2%  | 10 | 剑桥大学         | 英国   | 54   | 4.4%  |



1.3 重点热点前沿——“脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波”

脉冲星是快速旋转的中子星，原子钟，这一精准周期性成为引力波探测的关键所在。当引力波在脉冲星和地球之间传播时，其引发的时空扭曲会轻微地加速或减慢探测到的脉冲星信号。但是仅仅来自一颗脉冲星的信号可能会受到脉冲星波动或射电束与星际介质相互作用的影响。为实现更可靠的观测，天

文学家将银河系当作一个探测纳赫兹低频引力波的巨大“天线”，对银河系中的数十颗脉冲星开展综合研究，即脉冲星计时阵列（PTA）。

2023 年，多个脉冲星计时阵列国际合作组分别利用位于北美、欧洲、印度、中国、澳大利亚的射电望远镜观测数据，报道了纳赫兹引力波随机背景存在的证据。其中，中国 CPTA 合作组利用的是 500 米口径球面射电望远镜（FAST）——“中国天眼”。对低频背景引力波的探测，为研究其天体物理和宇宙

学起源开辟了新的观测窗口。研究认为，背景引力波可能源自超大质量双黑洞（SMBH）。当两个星系合并时，其中心的超大质量黑洞可能会形成双黑洞系统，两个黑洞将围绕彼此运行数千至数百万年后并合。这些超大质量天体的运动会产生纳赫兹引力波。此外，背景引力波也可能来源于早期宇宙的暴涨过程，以及与暗物质相关的新物理学现象。

热点前沿“脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波”包括 6 篇核心论

文，研究主题包括：基于北美纳赫兹引力波天文台（NANOGrav）、澳大利亚帕克斯脉冲星计时阵列（PPTA）、欧洲脉冲星计时阵列（EPTA）等的长期脉冲星计时数据搜寻纳赫兹引力波背景存在的证据，以及探究可能产生纳赫兹引力波背景的宇宙学过程之一——宇宙弦。其中被引频次最高的一篇文章基于 NANOGrav 收集的 12.5 年脉冲星计时数据集搜索各向同性随机引力波背景，发现了关于随机过程的强有力证据。

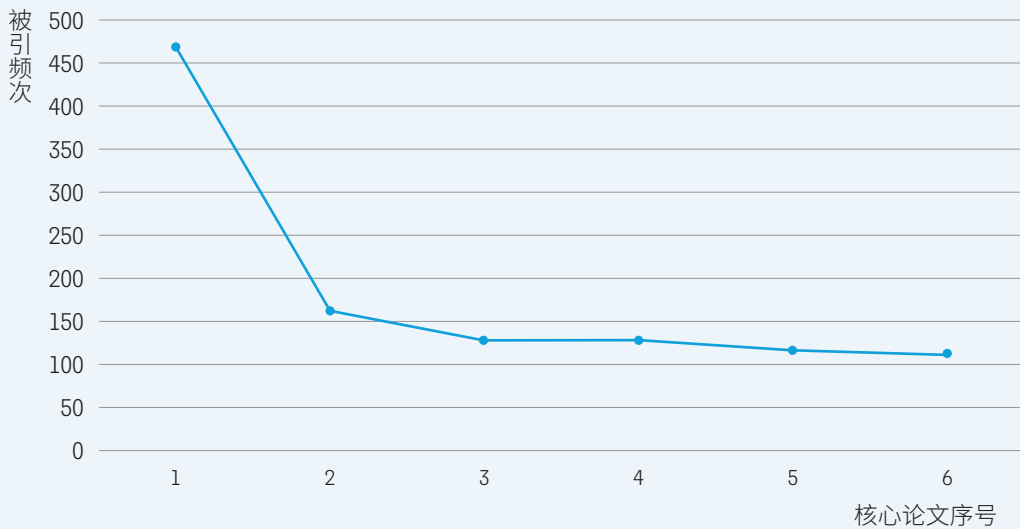


图 24 “脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

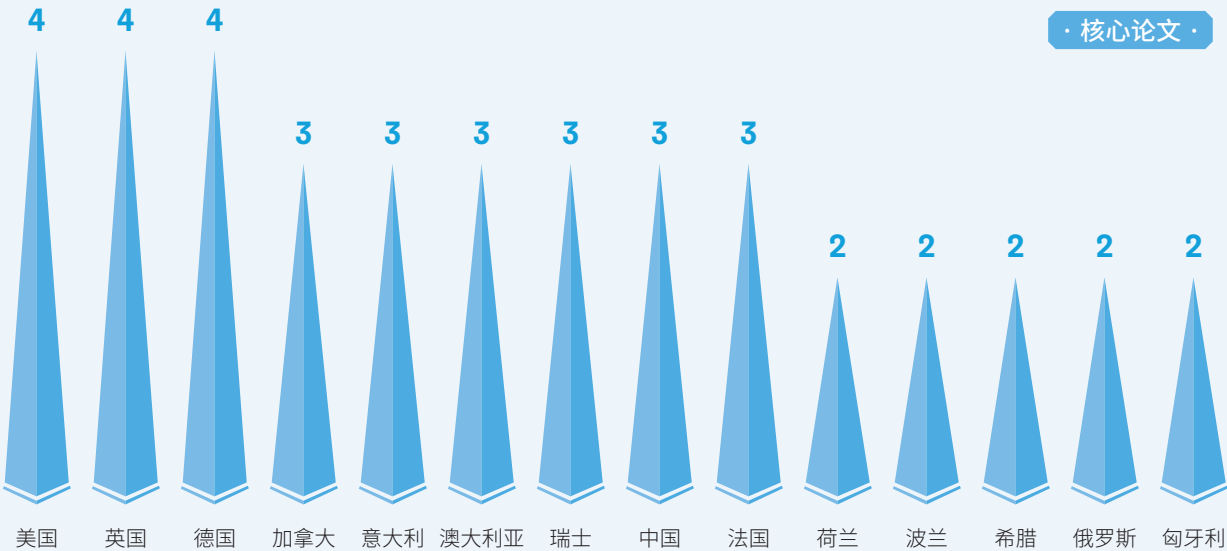
在核心论文的产出国家方面，美国、英国和德国各贡献了 4 篇，加拿大、意大利、澳大利亚、瑞士、中国和法国各贡献了 3 篇。在核心论文的产出机构方面，德国马普学

会贡献了 4 篇；法国国家科学研究中心、巴黎天文台、奥尔良大学等六所法国机构，美国国家航空航天局、美国国防部、英国曼彻斯特大学、中国科学院、欧洲核子研究组

织、加拿大多伦多大学、澳大利亚斯威本科技大学各贡献了 3 篇核心论文。

表 43 “脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

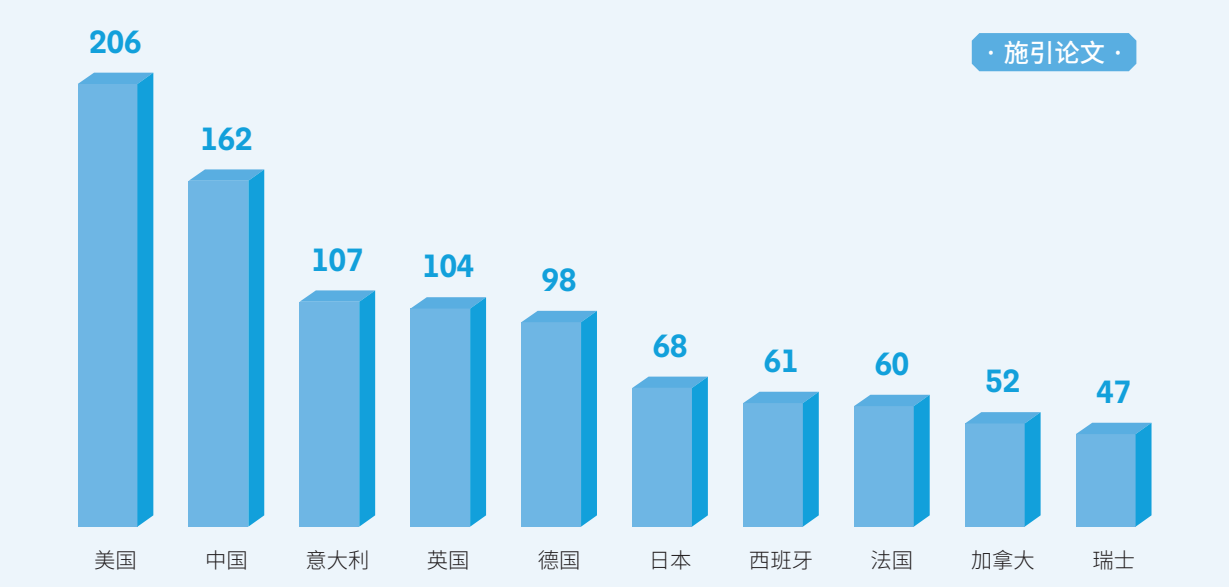
| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构                | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|-------------------|------|------|-------|
| 1  | 美国   | 4    | 66.7% | 1  | 马普学会              | 德国   | 4    | 66.7% |
| 1  | 英国   | 4    | 66.7% | 2  | 曼彻斯特大学            | 英国   | 3    | 50.0% |
| 1  | 德国   | 4    | 66.7% | 2  | 中国科学院             | 中国   | 3    | 50.0% |
| 4  | 加拿大  | 3    | 50.0% | 2  | 巴黎天文台             | 法国   | 3    | 50.0% |
| 4  | 意大利  | 3    | 50.0% | 2  | 欧洲核子研究组织          | 瑞士   | 3    | 50.0% |
| 4  | 澳大利亚 | 3    | 50.0% | 2  | 法国国家科学研究中心        | 法国   | 3    | 50.0% |
| 4  | 瑞士   | 3    | 50.0% | 2  | 奥尔良大学             | 法国   | 3    | 50.0% |
| 4  | 中国   | 3    | 50.0% | 2  | 美国国家航空航天局         | 美国   | 3    | 50.0% |
| 4  | 法国   | 3    | 50.0% | 2  | 多伦多大学             | 加拿大  | 3    | 50.0% |
| 10 | 荷兰   | 2    | 33.3% | 2  | 巴黎文理研究大学          | 法国   | 3    | 50.0% |
| 10 | 波兰   | 2    | 33.3% | 2  | 中央大区 - 卢瓦尔河谷大学联合体 | 法国   | 3    | 50.0% |
| 10 | 希腊   | 2    | 33.3% | 2  | 达芬奇大学             | 法国   | 3    | 50.0% |
| 10 | 俄罗斯  | 2    | 33.3% | 2  | 美国国防部             | 美国   | 3    | 50.0% |
| 10 | 匈牙利  | 2    | 33.3% | 2  | 斯威本科技大学           | 澳大利亚 | 3    | 50.0% |



从施引论文角度来看，美国施引论文数量领先，其次为中国、意大利、英国、德国。在施引论文的产出机构方面，意大利国家核物理研究院施引论文量最多，中国科学院、法国国家科学研究中心、德国马普学会、美国国家航空航天局次之。

表 44 “脉冲星计时阵列探测纳赫兹引力波”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  | 206  | 36.1% | 1  | 意大利国家核物理研究院 | 意大利  | 88   | 15.4% |
| 2  | 中国  | 162  | 28.4% | 2  | 中国科学院       | 中国   | 86   | 15.1% |
| 3  | 意大利 | 107  | 18.7% | 3  | 法国国家科学研究中心  | 法国   | 54   | 9.5%  |
| 4  | 英国  | 104  | 18.2% | 4  | 马普学会        | 德国   | 53   | 9.3%  |
| 5  | 德国  | 98   | 17.2% | 5  | 美国国家航空航天局   | 美国   | 42   | 7.4%  |
| 6  | 日本  | 68   | 11.9% | 6  | 巴黎文理研究大学    | 法国   | 40   | 7.0%  |
| 7  | 西班牙 | 61   | 10.7% | 7  | 加州理工学院      | 美国   | 39   | 6.8%  |
| 8  | 法国  | 60   | 10.5% | 7  | 东京大学        | 日本   | 39   | 6.8%  |
| 9  | 加拿大 | 52   | 9.1%  | 9  | 巴黎天文台       | 法国   | 37   | 6.5%  |
| 10 | 瑞士  | 47   | 8.2%  | 9  | 北京大学        | 中国   | 37   | 6.5%  |



## 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 1 项研究入选新兴前沿，即“‘詹姆斯·韦伯空间望远镜’初步成果”，下面将对其开展重点解读。

表 45 天文学与天体物理学领域新兴前沿

| 序号 | 新兴前沿              | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文<br>平均出版年 |
|----|-------------------|------|------|---------------|
| 1  | “詹姆斯·韦伯空间望远镜”初步成果 | 48   | 2066 | 2022.9        |

### 2.2 重点新兴前沿——“‘詹姆斯·韦伯空间望远镜’初步成果”

2021 年 12 月 25 日发射的“詹姆斯·韦伯空间望远镜”（JWST）是“哈勃空间望远镜”（HST）的继任者，作为新的旗舰空间科学天文台，旨在回答关于宇宙的悬而未决的问题，在天文学的各个领域取得突破性的发现。

JWST 是一台红外天基天文台，波长覆盖范围为 0.6 至 28.5 微米，具备比 HST 更宽的波长覆盖范围和更高的灵敏度。其主镜直径约为 6.5 米，是迄今建造的最大的天基望远镜。JWST 肩负四大任务目标：寻找大爆炸后形成的第一批星系或发光天体，探究星系从形成至今的演化过程，观察恒星从初始阶段到行星系统形成的过程，以及测量行星系统的物理和化学性

质（包括太阳系）并研究这些系统中存在生命的潜力。JWST 搭载了四台科学仪器，分别是近红外相机（NIRCam）、近红外光谱仪（NIRSpec）、中红外仪器（MIRI）、精细制导传感器 / 近红外成像仪和无缝光谱仪（FGS/NIRISS）。JWST 是一项国际合作任务，由美国国家航空航天局（NASA）、欧洲航天局（ESA）、加拿大航天局（CSA）共同组织实施，来自 14 个国家的数千名科学家、工程师和技术人员参与了 JWST 的设计、建造、测试、集成、发射和运行工作。2022 年 7 月，JWST 发布首批全彩图像和光谱数据，展现了前所未有的详细宇宙景观，标志着 JWST 完成了为期 6 个月的试运行，科学任务正式启动。

新兴前沿“‘詹姆斯·韦伯空间望远镜’初步成果”包括 48 篇核心论文，发表时间在 2022 至 2023 年间，集中展现了 JWST 启动运行以来所取得的重要科学发现。研究主题涉及 JWST 早期观测图像和光谱数据集中发布，基于 JWST 早期观测数据的巡天计划，以及关于宇宙再电离时期、高红移星系的观测发现等。按照任务规划，JWST 将运行 5 至 10 年，通过深入研究从大爆炸后的第一缕光，到星系、恒星和行星的形成，再到太阳系的演化的宇宙历史各个阶段，助力我们在理解宇宙和生命起源方面取得巨大飞跃。

# 10

## 数学

$$S_x = \frac{a_1(1-r^n)}{1-r} + \frac{a_2(r^n-1)}{r-1}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{N} = \frac{\sum f_i X_i}{\sum f_i}$$

$$a_n = a_1 + (n-1)d$$

$$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$$

$$P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2) - P(E_1 \cap E_2)$$

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

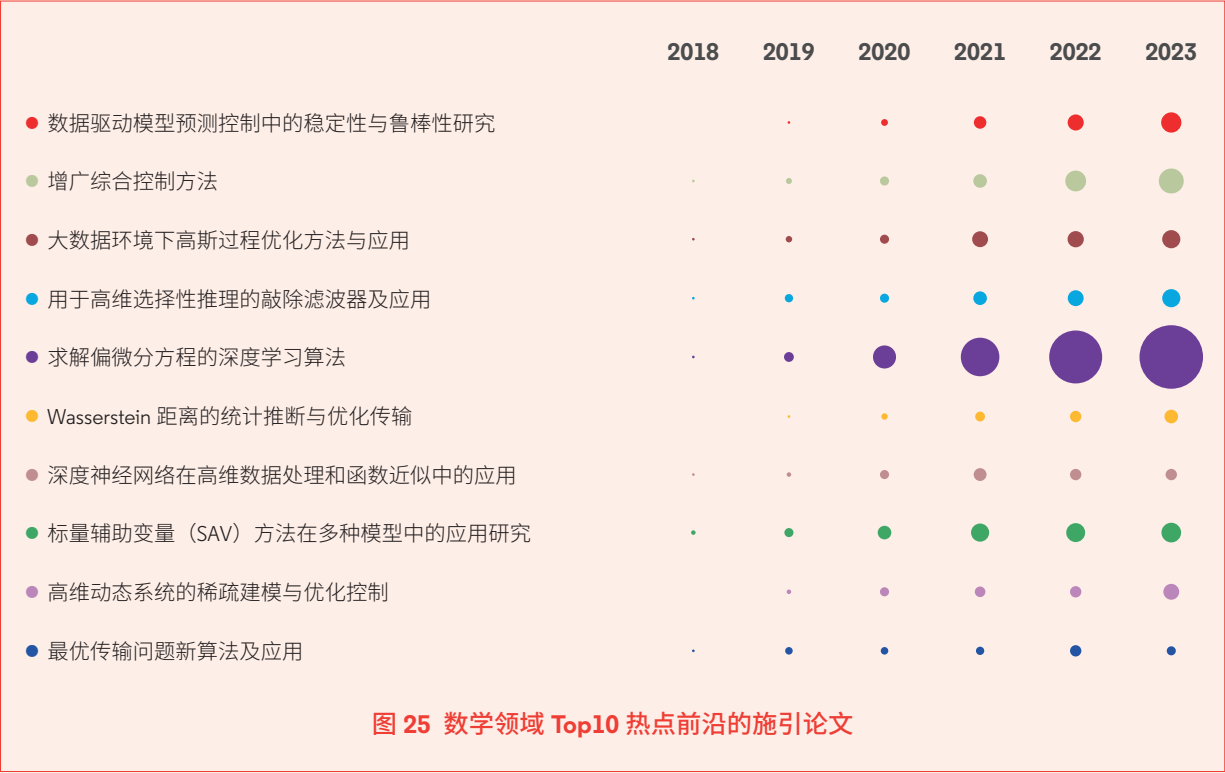
# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 数学领域 Top 10 热点前沿发展态势

数学领域位居前十位的热点前沿主要包括数据驱动模型预测控制中的稳定性与鲁棒性研究、增广综合控制方法、大数据环境下高斯过程优化方法与应用、用于高维选择性推理的敲除滤波器及应用、求解偏微分方程的深度学习算法、Wasserstein 距离的统计推断与优化传输、深度神经网络在高维数据处理和函数近似中的应用、标量辅助变量（SAV）方法在多种模型中的应用、高维动态系统的稀疏建模与优化控制、最优传输问题新算法及应用等研究方向。与往年相比，2024 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，最优传输问题新算法及应用是该领域亮点研究成果的典型代表。

表 46 数学领域 Top 10 热点前沿

| 序号 | 热点前沿                     | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文平均出版年 |
|----|--------------------------|------|------|-----------|
| 1  | 数据驱动模型预测控制中的稳定性与鲁棒性研究    | 6    | 533  | 2021.0    |
| 2  | 增广综合控制方法                 | 9    | 905  | 2020.3    |
| 3  | 大数据环境下高斯过程优化方法与应用        | 6    | 584  | 2019.8    |
| 4  | 用于高维选择性推理的敲除滤波器及应用       | 8    | 614  | 2019.4    |
| 5  | 求解偏微分方程的深度学习算法           | 9    | 7300 | 2019.2    |
| 6  | Wasserstein 距离的统计推断与优化传输 | 2    | 232  | 2019.0    |
| 7  | 深度神经网络在高维数据处理和函数近似中的应用   | 3    | 331  | 2018.7    |
| 8  | 标量辅助变量（SAV）方法在多种模型中的应用研究 | 6    | 1230 | 2018.5    |
| 9  | 高维动态系统的稀疏建模与优化控制         | 3    | 303  | 2018.3    |
| 10 | 最优传输问题新算法及应用             | 3    | 240  | 2018.0    |



1.2 重点热点前沿——“数据驱动模型预测控制中的稳定性与鲁棒性研究”

模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 是一种使用数学模型在有限时间内实时优化控制系统的技术。自 20 世纪 70 年代发端于控制理论和优化方法的结合, MPC 最初主要应用于工业过程控制和化工领域,旨在通过预测系统未来行为优化当前控制策略,以提高系统的稳定性和响应性。随着计算能力的提升和数学建模技术的进步, MPC 逐渐扩展到更广泛的应用领域,如交通控制、能源管理、机械系统和生物医学工程等。传统的 MPC 方法通常基于系统的数学模型,需要精确的系统描述和参数,这在实际应用中存在

挑战。随着数据科学和机器学习的兴起,数据驱动的方法逐渐成为研究的焦点。借助实时数据和机器学习技术,数据驱动 MPC 能够灵活适应复杂系统的动态变化,这为控制理论的发展带来了新的方向和可能。而稳定性与鲁棒性研究作为数据驱动 MPC 的核心问题,强调系统在面对动态变化、测量噪声和参数不确定性时仍能保持所需的控制性能,这不仅能深化对控制系统稳定性的理论理解,还有助于新型优化技术和鲁棒控制策略的发展。总之,该前沿方向研究可以为自动化控制系统的设计和实施提供重要的理论支持,不仅有益于推动控制理

论的前沿发展,也有利于在自动驾驶、智能制造等前沿领域发挥其显著的应用潜力。

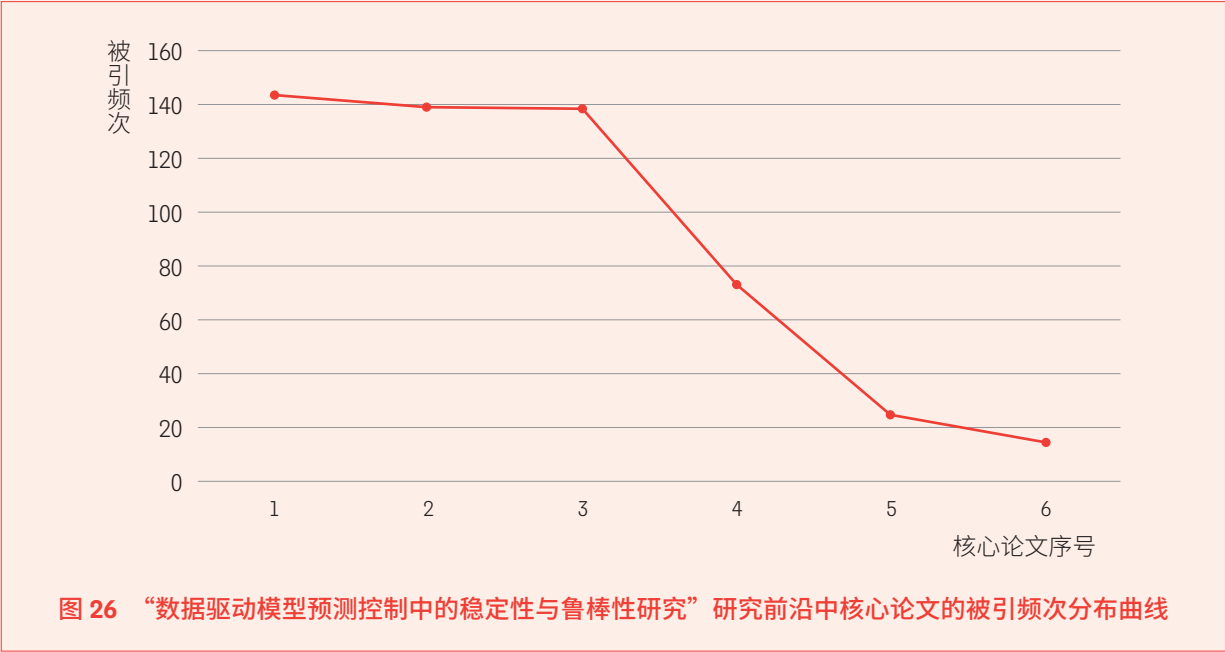
该热点前沿共包含 6 篇核心论文,研究主要集中在多样化控制策略、稳定性与鲁棒性保证、理论分析与应用检验等诸多方面。具体来看,这 6 篇论文涵盖多种数据驱动控制方法,如基于隐式模型描述、线性矩阵不等式 (LMI) 和随机矩阵理论的应用等,这些方法不仅适用于线性时不变系统,还扩展到非线性系统和不确定环境控制;着重于如何通过引入正则化和优化方法,设计稳定性和鲁棒性较强的数

据驱动 MPC 方案，这些方案在面对测量噪声和模型不确定性时能够实现闭环系统的实际指数稳定性，以提高控制系统可靠性；不仅在理论上证明了控制方案可行性，还通过大量数值实验和案例研究验证了其在实际应用中的有效性。另外，核心论文还体现了该热点前沿融合多交叉学科的趋势，特别是在动态不确定性和复杂环境处理中，数据驱动控制技术展示了与强化学习等新兴方法技术的交叉应用，为智能化和自适应性未来控制系统提供新的思路和解决方案，而且未来研究

也将着眼于进一步提升数据驱动控制技术的实用性和普适性。

值得关注的是，该研究前沿被引频次最高的 3 篇论文，作为该前沿领域的关键创新研究代表，在降低对精确系统模型依赖的情况下，提出了基于数据驱动的新型控制策略，显著提升了控制系统在不确定性和噪声条件下的稳定性和鲁棒性。具体而言，它们利用历史输入输出数据和持久激励数据，构建了无需显式系统矩阵辨识的隐式模型描述和参数化方法；通过理论证

明，验证了闭环系统在有测量噪声条件下的指数稳定性，并引入包含松弛变量和正则化项的鲁棒修改方案，增强了系统的抗扰能力；同时，将强化学习与控制理论相结合，探讨了模型在强化学习算法中的关键作用，为复杂环境下的控制策略设计提供了新思路。这些工作为数据驱动模型预测控制的稳定性与鲁棒性研究提供了新的理论和方法基础，推动了该领域的进一步发展，对理论研究和工程应用具有重要影响。



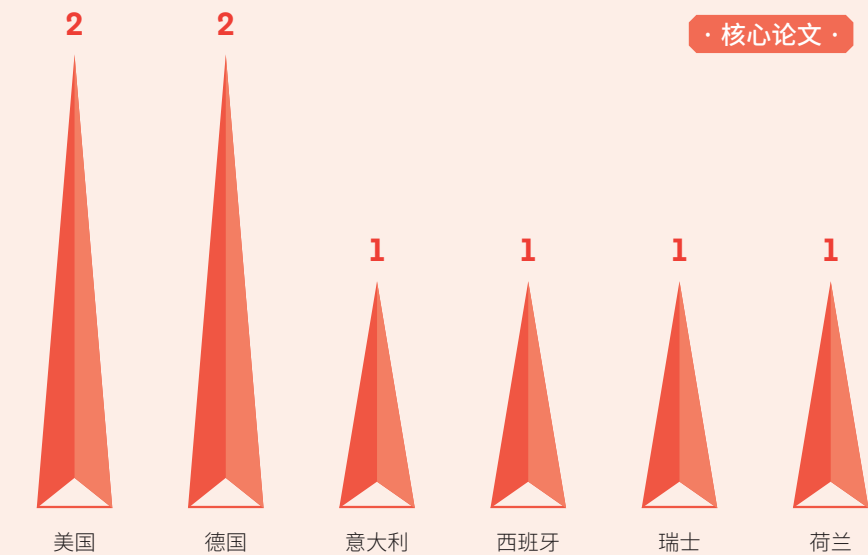
核心论文 Top 产出国家中（表 47），美国和德国各贡献了 2 篇核心论文；意大利、西班牙、瑞士和

荷兰分别贡献了 1 篇核心论文。在机构方面，德国斯图加特大学和美国加州大学伯克利分校均贡献了 2

篇核心论文；来自西班牙、德国、美国、意大利、瑞士和荷兰的其他 8 家机构各贡献了 1 篇核心论文。

表 47 “数据驱动模型预测控制中的稳定性与鲁棒性研究”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  | 2    | 33.3% | 1  | 斯图加特大学           | 德国   | 2    | 33.3% |
| 1  | 德国  | 2    | 33.3% | 1  | 加州大学伯克利分校        | 美国   | 2    | 33.3% |
| 3  | 意大利 | 1    | 16.7% | 3  | 佛罗伦萨大学           | 意大利  | 1    | 16.7% |
| 3  | 西班牙 | 1    | 16.7% | 3  | 工程数值方法<br>国际研究中心 | 西班牙  | 1    | 16.7% |
| 3  | 瑞士  | 1    | 16.7% | 3  | 苏黎世联邦理工学院        | 瑞士   | 1    | 16.7% |
| 3  | 荷兰  | 1    | 16.7% | 3  | 汉诺威莱布尼茨大学        | 德国   | 1    | 16.7% |
|    |     |      |       | 3  | 格罗宁根大学           | 荷兰   | 1    | 16.7% |
|    |     |      |       | 3  | 加泰罗尼亚研究所         | 西班牙  | 1    | 16.7% |
|    |     |      |       | 3  | 加泰罗尼亚理工大学        | 西班牙  | 1    | 16.7% |
|    |     |      |       | 3  | 加州理工学院           | 美国   | 1    | 16.7% |



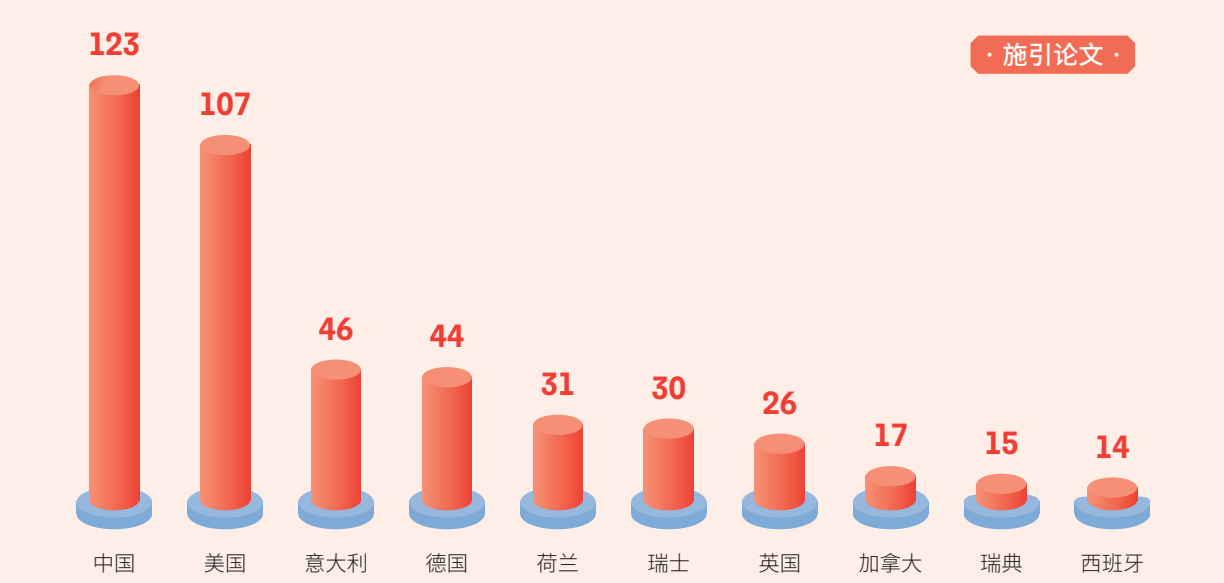
从该研究前沿的施引论文情况来看（表 48），中国是对该前沿跟踪研究最为积极活跃的国家，产出施引论文 123 篇，显示了对该研究方向的关注。美国排名施引国家第二，产出施引论文 107 篇。除中国和美国外，意大利、德国、荷

兰、瑞士的施引论文产出量处于第二梯队，分布在 30-50 篇之间，而他们同样也是核心论文的 Top 产出国家。施引论文 Top 产出机构中，瑞士的苏黎世联邦理工学院以 25 篇排名第一，德国斯图加特大学、荷兰格罗宁根大学分列第二和第三

位。值得关注的是，中国和意大利均有 3 家机构上榜，为 Top 机构最多的国家，中国上榜的机构为上海交通大学、北京理工大学和同济大学。此外，美国的加州大学伯克利分校、麻省理工学院等机构也榜上有名。

表 48 “数据驱动模型预测控制中的稳定性与鲁棒性研究”研究前沿中施引论文的 Top 产出国家和机构

| 排名 | 国家  | 施引论文 | 比例    | 排名 | 机构        | 国家  | 施引论文 | 比例   |
|----|-----|------|-------|----|-----------|-----|------|------|
| 1  | 中国  | 123  | 30.4% | 1  | 苏黎世联邦理工学院 | 瑞士  | 25   | 6.2% |
| 2  | 美国  | 107  | 26.4% | 2  | 斯图加特大学    | 德国  | 21   | 5.2% |
| 3  | 意大利 | 46   | 11.4% | 3  | 格罗宁根大学    | 荷兰  | 20   | 4.9% |
| 4  | 德国  | 44   | 10.9% | 4  | 米兰理工大学    | 意大利 | 15   | 3.7% |
| 5  | 荷兰  | 31   | 7.7%  | 5  | 加州大学伯克利分校 | 美国  | 14   | 3.5% |
| 6  | 瑞士  | 30   | 7.4%  | 6  | 上海交通大学    | 中国  | 12   | 3.0% |
| 7  | 英国  | 26   | 6.4%  | 6  | 佛罗伦萨大学    | 意大利 | 12   | 3.0% |
| 8  | 加拿大 | 17   | 4.2%  | 8  | 北京理工大学    | 中国  | 10   | 2.5% |
| 9  | 瑞典  | 15   | 3.7%  | 8  | 同济大学      | 中国  | 10   | 2.5% |
| 10 | 西班牙 | 14   | 3.5%  | 10 | 汉诺威莱布尼茨大学 | 德国  | 9    | 2.2% |
|    |     |      |       | 10 | 麻省理工学院    | 美国  | 9    | 2.2% |
|    |     |      |       | 10 | 牛津大学      | 英国  | 9    | 2.2% |
|    |     |      |       | 10 | 帕多瓦大学     | 意大利 | 9    | 2.2% |



1.3 重点热点前沿——“最优传输问题新算法及应用”

1781 年，法国数学家 Gaspard Monge 首次提出最优传输 (Optimal Transport) 问题，其动机是在工作

量最小化的情况下将给定质量的沙堆移动至另一具有规定形状的目标堆。最优传输问题的目标是找到能

够以最小的“全局”代价实现从源概率分布至目标概率分布的确定性映射，并称之为蒙日映射 (Monge

map)。诺贝尔经济学奖得主，前苏联数学家 Leonid Kantorovich 出于对二战前后所面临的资源分配和国民经济最优化问题的思考，在 1942 年重新形式化了最优传输问题，其允许将一个地点的质量分开运输到多个目标点，由此很多问题就可以从寻找最优传输映射的 Monge 问题转化为寻找最优传输计划的 Kantorovich 问题，该线性规划问题可以用网络单纯形等方法来求解。

1991 年，法国数学家 Yann Brenier 首次证明了连续形式 Monge 问题和 Kantorovich 问题的等价性。对连续分布问题最优传输的研究，使得定义任何概率测量之间的传输问题成为可能，推动了最优传输理论的发展。2013 年，法

国数学家 Marco Cuturi 使用熵正则化对最优传输距离进行熵约束，将最优传输问题转化为凸优化问题，并提出最优传输求解器 Sinkhorn 算法，在保证最优传输距离一定精度的前提下，大幅提升了最优传输的求解速度。数学家 Cedric Villani 与 Alessio Figalli 因其在最优传输理论及该理论在偏微分方程、度量几何和概率方面的应用做出的重要贡献分别荣获 2010 年和 2018 年菲尔兹奖。

尽管最优传输问题由一个工程问题所引发，但因其在各种不同规模的问题上都具有很强的可扩展性，因此被广泛应用于经济学和运筹学中的物流运输、计算机图形学中的颜色或纹理转换，以及流体动力学和统计力学等应用中。近

年来，最优传输理论的概念和方法日益渗透至机器学习领域，在基于深度学习的图像匹配、计算流体力学、经济学和医学等领域发挥出巨大作用。

热点研究前沿“最优传输问题新算法及应用”包括 3 篇核心论文，涉及最优传输问题理论及应用研究的多项重要进展：通过扩展 Sinkhorn 算法，开发出新的快速算法来逼近非平衡最优运输问题，并验证了其在二维形状修改、颜色转移和生长模型中的应用；开发出适用于一般拓扑空间中非负和有限 Radon 测度之间最优运输问题的完整理论；以及定义一种新的非负测度空间上的传输度量，从而将最优传输推广到具有不同质量的度量，并验证了该算法在图像插值中的应用。

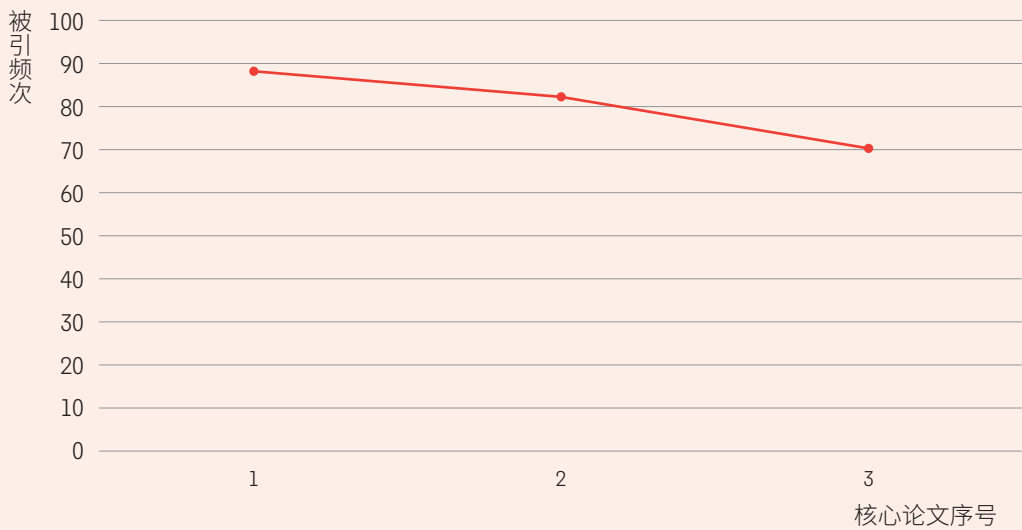
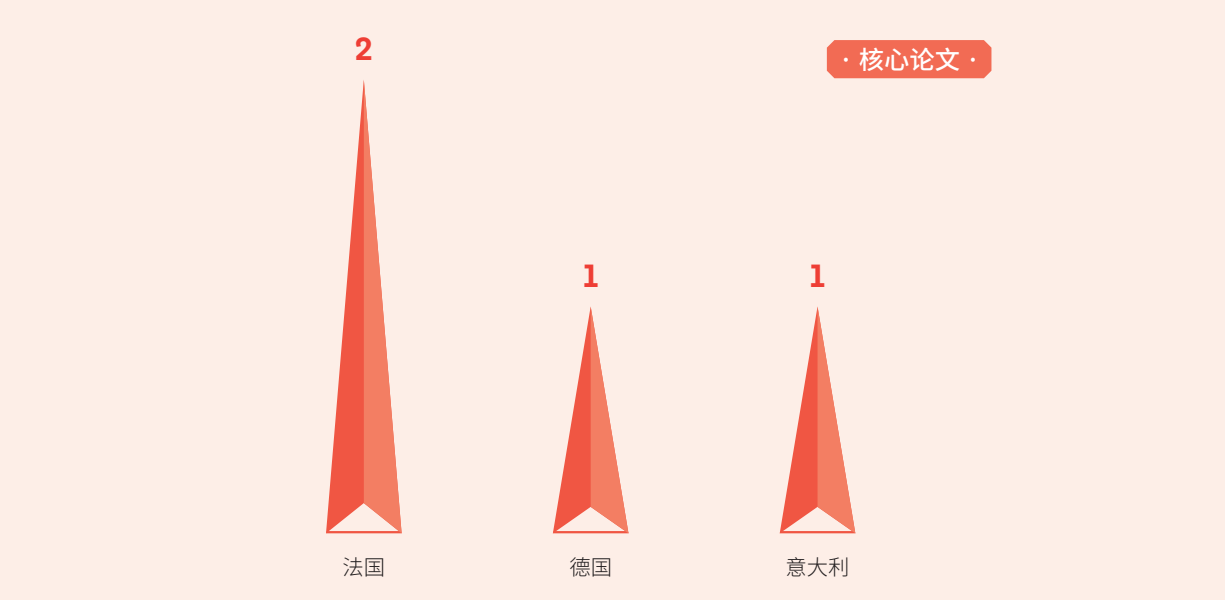


图 27 “最优传输问题新算法及应用”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

从该研究前沿核心论文产出国家和机构来看（表 49），法国独立贡献了 2 篇核心论文，通信作者均来自世界领先的纯数学和应用数学研究中心之一巴黎文理研究大学。德国、意大利合作贡献了该热点前沿的另外 1 篇核心论文，参与研究机构主要包括德国魏尔斯特拉斯研究所、德国柏林洪堡大学以及意大利帕维亚大学。

表 49 “最优传输问题新算法及应用”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

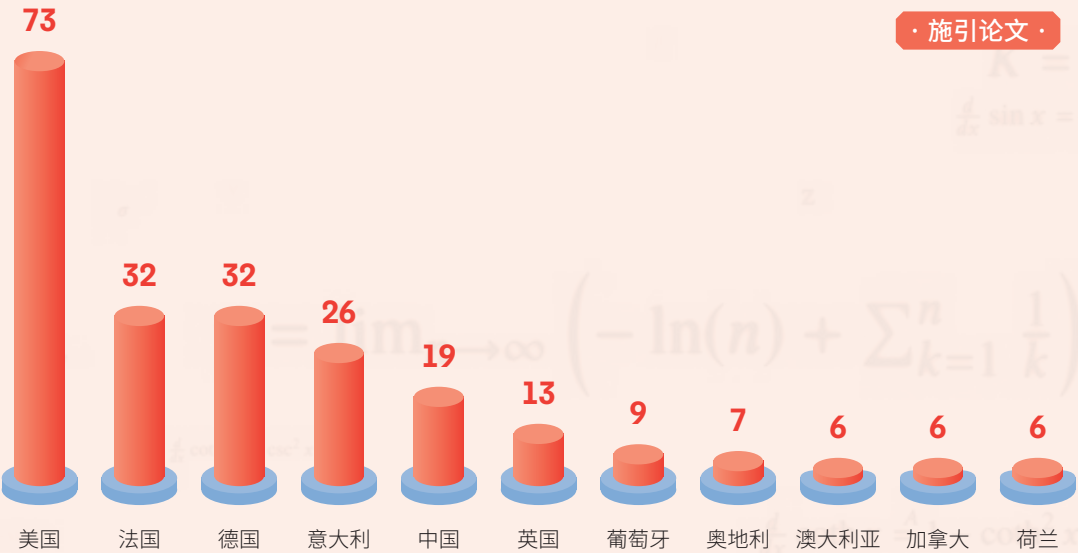
| 排名 | 国家  | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构             | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|-----|------|-------|----|----------------|------|------|-------|
| 1  | 法国  | 2    | 66.7% | 1  | 巴黎文理研究大学       | 法国   | 2    | 66.7% |
| 2  | 德国  | 1    | 33.3% | 1  | 法国国家科学研究中心     | 法国   | 2    | 66.7% |
| 2  | 意大利 | 1    | 33.3% | 3  | 魏尔斯特拉斯研究所      | 德国   | 1    | 33.3% |
|    |     |      |       | 3  | 柏林洪堡大学         | 德国   | 1    | 33.3% |
|    |     |      |       | 3  | 帕维亚大学          | 意大利  | 1    | 33.3% |
|    |     |      |       | 3  | 法国国家信息与自动化研究所  | 法国   | 1    | 33.3% |
|    |     |      |       | 3  | 巴黎 - 萨克雷高等师范学校 | 法国   | 1    | 33.3% |



从该研究前沿施引论文的角度看（表 50），美国占据领先地位，贡献了 40.1% 的施引论文。法国、德国和意大利贡献的施引论文分列第二至第四位。中国在该前沿积极跟进，施引论文数量位居第五。施引论文 Top 产出机构中，法国、美国研究机构分别占据 5 席和 3 席。贡献居于前列的典型机构包括法国国家科学研究中心、法国巴黎西岱大学、法国巴黎萨克雷大学、美国麻省理工学院、加州大学洛杉矶分校等。

表 50 “最优传输问题新算法及应用”研究前沿中施引论文的 Top 产出国家和机构

| 排名 | 国家   | 施引论文 | 比例    | 排名 | 机构            | 所属国家 | 施引论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|---------------|------|------|-------|
| 1  | 美国   | 73   | 40.1% | 1  | 法国国家科学研究中心    | 法国   | 20   | 11.0% |
| 2  | 法国   | 32   | 17.6% | 2  | 巴黎西岱大学        | 法国   | 11   | 6.0%  |
| 2  | 德国   | 32   | 17.6% | 2  | 巴黎 - 萨克雷大学    | 法国   | 11   | 6.0%  |
| 4  | 意大利  | 26   | 14.3% | 2  | 麻省理工学院        | 美国   | 11   | 6.0%  |
| 5  | 中国   | 19   | 10.4% | 5  | 加州大学洛杉矶分校     | 美国   | 10   | 5.5%  |
| 6  | 英国   | 13   | 7.1%  | 6  | 加州大学欧文分校      | 美国   | 8    | 4.4%  |
| 7  | 葡萄牙  | 9    | 4.9%  | 6  | 帕多瓦大学         | 意大利  | 8    | 4.4%  |
| 8  | 奥地利  | 7    | 3.8%  | 8  | 法国国家信息与自动化研究所 | 法国   | 7    | 3.8%  |
| 9  | 澳大利亚 | 6    | 3.3%  | 8  | 慕尼黑工业大学       | 德国   | 7    | 3.8%  |
| 9  | 加拿大  | 6    | 3.3%  |    |               |      |      |       |
| 9  | 荷兰   | 6    | 3.3%  |    |               |      |      |       |



$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)} = \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)}$$

2024 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

The background is a dynamic, abstract digital composition. It features a dense field of glowing particles in shades of blue and orange, some appearing as sharp points of light while others are blurred into bokeh. Interwoven with these particles are thin, luminous lines that suggest a complex network or data flow. The overall color palette is dominated by deep blues and vibrant oranges, creating a high-tech, futuristic atmosphere.

# 11

## 信息科学

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

## 1.1 信息科学领域 Top 10 热点前沿发展态势

信息科学领域位居前十位的热点前沿主要集中于下一代通信与网络、人工智能理论与应用、人工智能硬件创新设计等方向（表 51）。下一代通信与网络方面的热点前沿有 4 个，通信感知一体化研究成为新的热点前沿，可重构智能表面相关前沿多次出现在热点前沿中，此次的重点是 6G 等无线通信系统中的关键技术挑战。热点前沿无线网络中的高效联邦学习、UAV 在未来无线网络和边缘计算中的应用及其优化设计的主题不断持续深化。人工智能理论与应用方面的热点前沿有 4 个，其中，机器学习辅助蛋白质定向进化、基于深度学习的人员重识别研究 2 个主题首次成为热点前沿，可解释人工智能的理论基础与应用在去年可解释人工智能前沿的基础上进行了更深入的探索。类脑计算硬件创新设计方面的热点前沿有 2 个，利用忆阻器实现高效的神经网络硬件加速首次成为热点前沿，神经形态计算的硬件设计、算法创新与应用延续了去年脉冲神经网络及其神经形态芯片热点前沿主题。

表 51 信息科学领域 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  | 机器学习辅助蛋白质定向进化               | 19   | 2990  | 2020.6    |
| 2  | 无线网络中的高效联邦学习                | 22   | 5940  | 2020.4    |
| 3  | 基于深度学习的人员重识别研究              | 25   | 3899  | 2020.3    |
| 4  | 通信感知一体化研究                   | 12   | 1937  | 2020.3    |
| 5  | 可解释人工智能的理论基础与应用             | 17   | 9871  | 2019.8    |
| 6  | 可重构智能表面在 6G 等无线通信系统中的关键技术挑战 | 27   | 12404 | 2019.7    |
| 7  | 利用深度迁移学习实现高精度智能故障诊断         | 14   | 4152  | 2019.4    |
| 8  | UAV 在未来无线网络和边缘计算中的应用及其优化设计  | 36   | 9382  | 2018.9    |
| 9  | 神经形态计算的硬件设计、算法创新与应用         | 15   | 4364  | 2018.9    |
| 10 | 利用忆阻器实现高效的神经网络硬件加速          | 10   | 3684  | 2018.8    |



## 1.2 重点热点前沿——“机器学习辅助蛋白质定向进化”

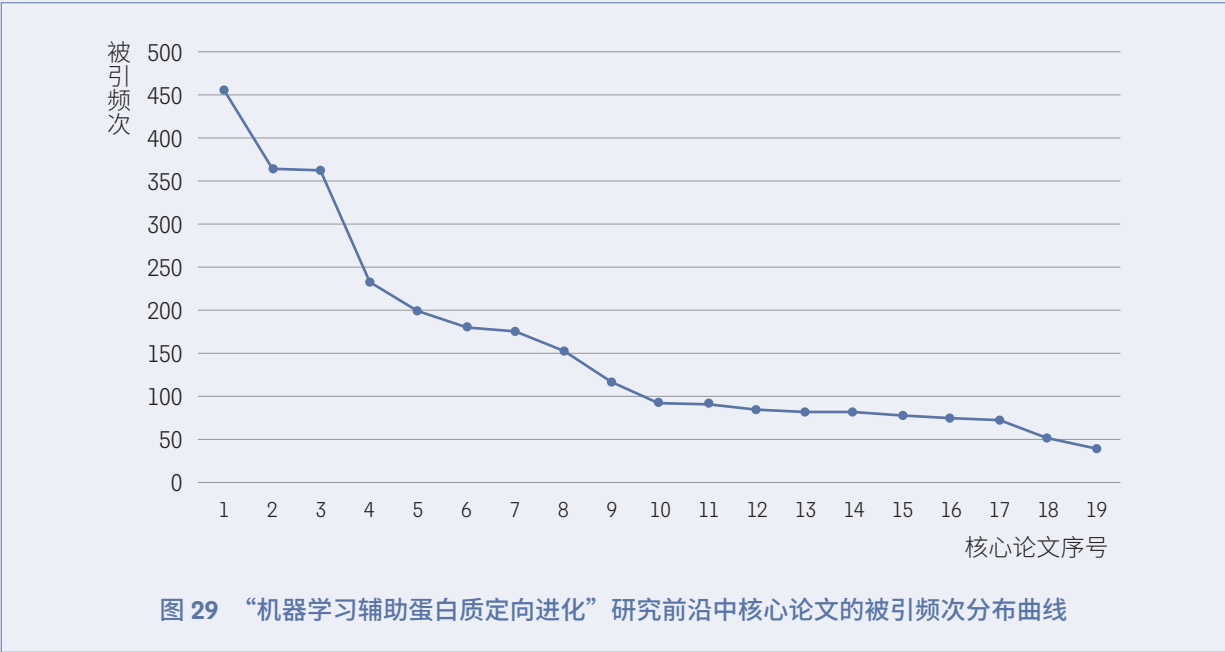
机器学习辅助蛋白质定向进化是近年来生物技术和计算科学交叉领域的热点研究方向，利用机器学习算法的强大数据处理和预测能力，优化和加速蛋白质定向进化的过程，旨在更加高效地探索蛋白质序列的突变空间，并设计出具有优良特性的蛋白质。2018 年，美国加州理工学院 Frances H. Arnold 教授因发明了酶定向进化技术荣获诺贝尔化学奖，该技术极大地提高了生物酶催化剂的蛋白质工程改造效率。然而，传统的定向进化方法存在实验成本高、筛选效率低、容易陷入局部最优等问题。机器学习辅助蛋白质定向进化通过计算机模型

模拟实验筛选过程，可以显著减少实验筛选负担，提高筛选效率，为蛋白质工程提供新的思路和方法。

机器学习辅助蛋白质定向进化的关键技术方法包括深度神经网络模型、迁移学习、多任务学习等。尽管机器学习辅助蛋白质定向进化具有巨大的应用潜力，但在实际应用中仍面临一些挑战，如数据质量参差不齐、模型复杂度较高、计算资源需求大等。未来，随着计算能力的不断提升和算法的不断优化，机器学习辅助蛋白质定向进化技术将更加成熟和完善，为蛋白质工程提供更加高效、精准的解决方案。

热点前沿“机器学习辅助蛋白质定向进化”包含 19 篇核心论文，主要探讨了机器学习技术在蛋白质工程关键领域的应用，涵盖了一系列新颖的方法和模型等，如采用深度学习架构，对蛋白质的三维结构和动态行为进行精确建模；利用机器学习模型预测蛋白质在不同环境条件下的稳定性和活性，促进新蛋白质功能的发现；利用机器学习算法对蛋白质序列进行高效设计等。Facebook 人工智能研究院的 Alexander Rives 等人发表在《美国国家科学院院刊》（PNAS）上的“Biological structure and function emerge from scaling

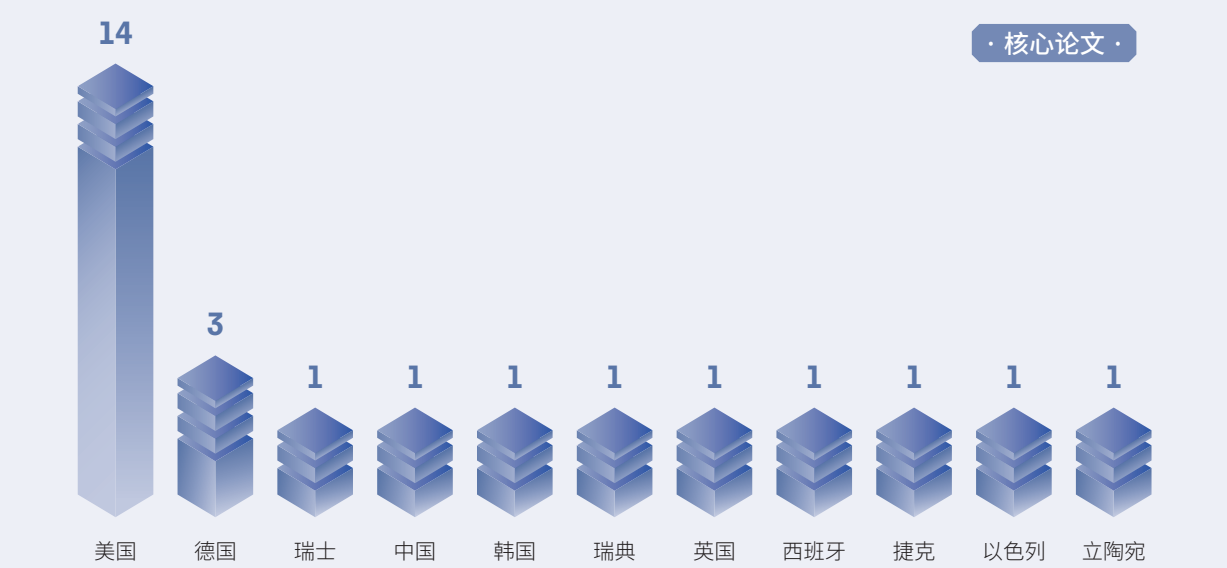
unsupervised learning to 250 million protein sequences”一文被引频次最高，达 456 次。该文将无监督学习应用于 2.5 亿个蛋白序列，成功学习到了蛋白质的生物化学特性和结构信息，证明了无监督学习在生物学领域的巨大应用潜力，为蛋白质工程研究提供了新的视角和方法。



该前沿的 19 篇核心论文中，美国贡献了 14 篇，反映了其在此研究方向上的主导和领先地位，德国贡献了 3 篇，瑞士、中国、韩国、瑞典等国家分别贡献了 1 篇。在核心论文产出机构方面，美国的机构表现突出，哈佛大学贡献了 7 篇核心论文，麻省理工学院贡献了 4 篇，加州大学伯克利分校、谷歌公司、慕尼黑工业大学、加州大学旧金山分校等机构分别贡献了 2 篇。

表 52 “机器学习辅助蛋白质定向进化”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

| 排名 | 国家  | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构        | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|-----|------|-------|----|-----------|------|------|-------|
| 1  | 美国  | 14   | 73.7% | 1  | 哈佛大学      | 美国   | 7    | 36.8% |
| 2  | 德国  | 3    | 15.8% | 2  | 麻省理工学院    | 美国   | 4    | 21.1% |
| 3  | 瑞士  | 1    | 5.3%  | 3  | 加州大学伯克利分校 | 美国   | 2    | 10.5% |
| 3  | 中国  | 1    | 5.3%  | 3  | 谷歌公司      | 美国   | 2    | 10.5% |
| 3  | 韩国  | 1    | 5.3%  | 3  | 慕尼黑工业大学   | 德国   | 2    | 10.5% |
| 3  | 瑞典  | 1    | 5.3%  | 3  | 加州大学旧金山分校 | 美国   | 2    | 10.5% |
| 3  | 英国  | 1    | 5.3%  | 3  | 美国能源部     | 美国   | 2    | 10.5% |
| 3  | 西班牙 | 1    | 5.3%  | 3  | 加州理工学院    | 美国   | 2    | 10.5% |
| 3  | 捷克  | 1    | 5.3%  |    |           |      |      |       |
| 3  | 以色列 | 1    | 5.3%  |    |           |      |      |       |
| 3  | 立陶宛 | 1    | 5.3%  |    |           |      |      |       |



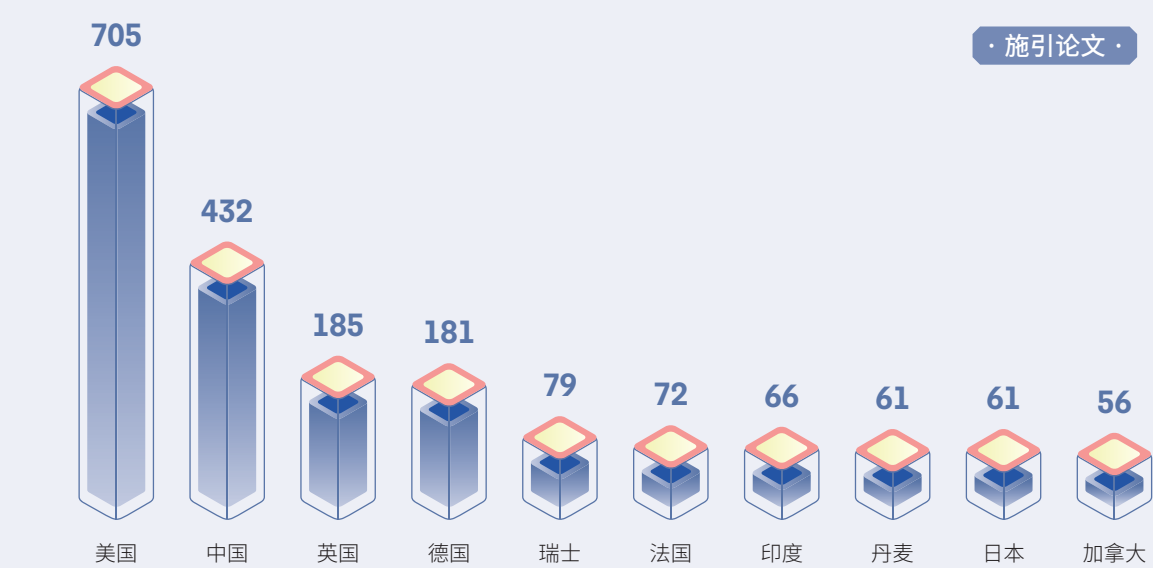
对施引论文的分析显示（表 53），施引论文产出最多的为美国，参与了 705 篇，占比达总量的 40.2%，显示了美国对该方向的持续关注。其次是中国，参与了 432

篇施引文献，之后是英国、德国、瑞士、法国等国家。从施引机构上看，哈佛大学最为活跃，排名第一，共参与 80 篇文献，中国科学院、麻省理工学院紧随其后，分别参与

了 74 篇和 73 篇文献。此外，施引机构中的斯坦福大学、法国国家科学研究中心、苏黎世联邦理工学院、剑桥大学等也是该前沿施引论文的主要产出机构。

表 53 “机器学习辅助蛋白质定向进化” 研究前沿中施引论文的 Top 产出国家和机构

| 排名 | 国家  | 施引论文 | 比例    | 排名 | 机构         | 所属国家 | 施引论文 | 比例   |
|----|-----|------|-------|----|------------|------|------|------|
| 1  | 美国  | 705  | 40.2% | 1  | 哈佛大学       | 美国   | 80   | 4.6% |
| 2  | 中国  | 432  | 24.6% | 2  | 中国科学院      | 中国   | 74   | 4.2% |
| 3  | 英国  | 185  | 10.5% | 3  | 麻省理工学院     | 美国   | 73   | 4.2% |
| 4  | 德国  | 181  | 10.3% | 4  | 斯坦福大学      | 美国   | 37   | 2.1% |
| 5  | 瑞士  | 79   | 4.5%  | 5  | 法国国家科学研究中心 | 法国   | 35   | 2.0% |
| 6  | 法国  | 72   | 4.1%  | 6  | 苏黎世联邦理工学院  | 瑞士   | 32   | 1.8% |
| 7  | 印度  | 66   | 3.8%  | 6  | 剑桥大学       | 英国   | 32   | 1.8% |
| 8  | 丹麦  | 61   | 3.5%  | 8  | 慕尼黑工业大学    | 德国   | 30   | 1.7% |
| 8  | 日本  | 61   | 3.5%  | 9  | 加州大学伯克利分校  | 美国   | 29   | 1.7% |
| 10 | 加拿大 | 56   | 3.2%  | 10 | 丹麦科技大学     | 丹麦   | 27   | 1.5% |
|    |     |      |       | 10 | 佛罗里达大学     | 美国   | 27   | 1.5% |



1.3 重点热点前沿——“通信感知一体化研究”

随着下一代无线通信系统的发展，智慧城市、智能制造、远程医疗等多种新兴应用将成为现实。这些应用有一个共同特点，就是同时需要高质量的无线通信能力和稳健且高精度的感知能力。而无线频谱资源的日益紧张、越来越多的雷达频段受到干扰等问题，都促使无线通信和传感系统向着更高的频段、

更大的天线阵列和小型化发展，从而在硬件架构、信道特性和信号处理方面变得越来越相似。这为利用无线基础设施实现传感提供了机会。通信感知一体化（ISAC）被广泛认为是 6G 通信网络的关键使能技术，将使未来网络超越传统通信，提供无处不在的传感服务来对周围环境进行测量甚至成像。该技术能够在通信与感知之间共享频谱和硬件平台，从而提升系统的频谱效率、能量效率和硬件效率，甚至可以通过通感两种功能的互相辅助、互相增益来提升彼此的性能。ISAC 在基础理论、信号处理和网络方面仍存在相当多的技术挑战，如最佳波形设计和带宽要求、最佳系统架构以及通信和感知数据融合等，因此也受到学术界和工业界的关注。

该热点前沿共有 12 篇核心论文，研究性论文和综述性文章各占一半。研究性论文主要探讨了双功能雷达通信基站的收发器架构、多输入多输出（MIMO）波束成形设计、以及基于 IEEE 802.11ad 雷达的联合车载通信雷达系统等。综述性文章主要探讨 ISAC 的应用场景、基本局限性，通信与传感之间的性能权衡，信号模型、波形设计和信号处理技术的最新进展，以及实现感知移动网络的方法和挑战等。在 12 篇核心论文中，被引频次最高的是一篇研究性论文（322 次，图 28）于 2020 年发表在《IEEE 通信学报》（IEEE Transactions on Communications），作者来自英国伦敦大学学院、美国罗格斯大学和英国南安普顿大学。该文使

用混合模拟数字波束成形技术，提出了一种用于在毫米波频段运行的双功能雷达 - 通信基站的新型收发器架构和帧结构，以及联合目标搜索和通信信道估计的新方案。在综述性文章中，被引频次最高的文章（206 次）于 2022 年发表于《IEEE 通信选定领域期刊》（IEEE Journal on Selected Areas in Communications），作者来自南方科技大学、北京邮电大学、英国伦敦大学学院、香港中文大学、华为公司、以色列魏茨曼科学研究所、意大利卡西诺和南拉齐奥大学等。文章全面回顾了 ISAC 的背景、主要应用范围和最新方法。

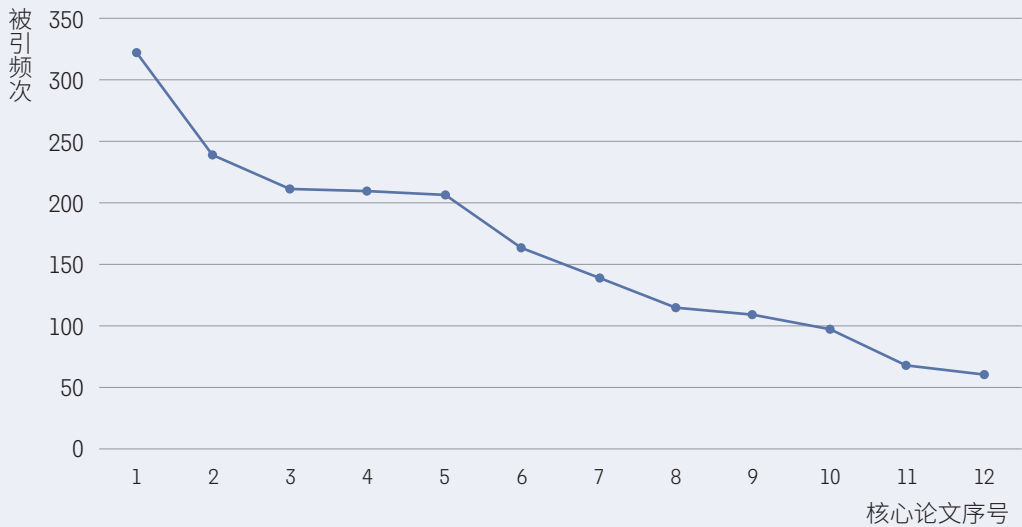


图 30 “通信感知一体化研究”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

核心论文 Top 产出国家和机构中（表 54），中国核心论文数最多，贡献了 9 篇论文；英国和美国分列二、三位。英国伦敦大学学院在核心论文 Top 机构中表现突出，名列第一。中国的南方科技大学贡献了 4 篇论文，名列第二。以色列的魏茨曼科学研究所、美国罗格斯大学和中国的北京邮电大学并列第三。由此可见，与其他国家相比，中国、英国、美国和以色列对通信传感一体化技术研究更为关注。

表 54 “通信感知一体化研究”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   | 9    | 75.0% | 1  | 伦敦大学学院     | 英国   | 7    | 58.3% |
| 2  | 英国   | 7    | 58.3% | 2  | 南方科技大学     | 中国   | 4    | 33.3% |
| 3  | 美国   | 5    | 41.7% | 3  | 魏茨曼科学研究所   | 以色列  | 3    | 25.0% |
| 4  | 以色列  | 4    | 33.3% | 3  | 罗格斯大学      | 美国   | 3    | 25.0% |
| 5  | 意大利  | 3    | 25.0% | 3  | 北京邮电大学     | 中国   | 3    | 25.0% |
| 6  | 澳大利亚 | 2    | 16.7% | 7  | 卡西诺和南拉齐奥大学 | 意大利  | 2    | 16.7% |
| 7  | 西班牙  | 1    | 8.3%  | 7  | 南安普顿大学     | 英国   | 2    | 16.7% |
| 7  | 韩国   | 1    | 8.3%  | 7  | 清华大学       | 中国   | 2    | 16.7% |
| 7  | 法国   | 1    | 8.3%  | 7  | 悉尼科技大学     | 澳大利亚 | 2    | 16.7% |
|    |      |      |       | 7  | 华为公司       | 中国   | 2    | 16.7% |
|    |      |      |       | 7  | 北京理工大学     | 中国   | 2    | 16.7% |



在施引论文的 Top 产出国家和机构中（表 55），中国遥遥领先于其他国家，表明中国在此研究方向上持续保持热情。美国和英国在施引论文体量上形成第二梯队。在施引论文机构层面，中国机构占据 Top10 机构的 8 个席位，且均为知名高校和科研机构，可见我国机构对此研究方向的重视。北京邮电大学贡献了 74 篇论文，名列第一，电子科技大学和南方科技大学紧随其后。悉尼科技大学和伦敦大学学院在核心论文和施引论文中均有所表现，在此方向有持续的产出。

表 55 “通信感知一体化研究”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  | 中国   | 647  | 67.3% | 1  | 北京邮电大学   | 中国   | 74   | 7.7% |
| 2  | 美国   | 153  | 15.9% | 2  | 电子科技大学   | 中国   | 67   | 7.0% |
| 3  | 英国   | 135  | 14.0% | 3  | 南方科技大学   | 中国   | 48   | 5.0% |
| 4  | 澳大利亚 | 91   | 9.5%  | 3  | 悉尼科技大学   | 澳大利亚 | 48   | 5.0% |
| 5  | 意大利  | 50   | 5.2%  | 5  | 东南大学     | 中国   | 45   | 4.7% |
| 6  | 德国   | 47   | 4.9%  | 6  | 西安电子科技大学 | 中国   | 44   | 4.6% |
| 7  | 加拿大  | 42   | 4.4%  | 7  | 北京理工大学   | 中国   | 42   | 4.4% |
| 8  | 韩国   | 41   | 4.3%  | 8  | 清华大学     | 中国   | 40   | 4.2% |
| 9  | 瑞典   | 34   | 3.5%  | 9  | 伦敦大学学院   | 英国   | 38   | 4.0% |
| 10 | 新加坡  | 31   | 3.2%  | 10 | 中国科学院    | 中国   | 30   | 3.1% |





```
mirror_mod.use_x = False
mirror_mod.use_y = True
mirror_mod.use_z = False
elif operation == "MIRROR Z":
    mirror_mod.use_x = False
    mirror_mod.use_y = False
    mirror_mod.use_z = True

#selection at the end, add back the d
mirror_ob.select=1
modifier_ob.select=1
bpy.context.scene.objects.active = modifier_ob
print("Selected" + str(modifier_ob)) # mo
mirror_ob.select = 0
```

2024 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 12

## 经济学、心理学 及其他社会科学

2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS



# 1. 热点前沿及重点热点前沿解读

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

位居前 10 位的热点前沿体现出数智技术与经济学、心理学及其他社会学的交叉融合，关注人类健康和气候环境主题等研究趋势。

在数智技术交叉融合方向共有 4 个热点前沿，如“脑电图数据分析在神经科学、心理学、认知科学中的应用”“深度学习算法与金融预测、资产定价”“零工经济的算法、人力资源及平台管理”3 个热点前沿将人工智能、大数据技术方法应用于心理学、经济学、社会学研究问题；“人工智能伦理准则”研究热点则从技术的发展和运用是否符合伦理道德标准和社会治理要求角度开展理论及实践研究。

在人类健康及气候环境主题方面，“COVID-19 对不同人群的心理健康影响”“社会结构因素与健康差异关系研究”“超加工食品消费问题”共 3 个热点前沿从心理健康、食品健康、社会健康水平等方面开展研究；“气候变化与投资决策”“人类活动对气候变化及生物多样性等影响”这 2 个热点前沿从气候环境角度进行经济及生物多样性方面研究。

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  | 政策变化评估及特定事件影响研究                | 30   | 5871 | 2021.0    |
| 2  | COVID-19 对不同人群的心理健康影响          | 25   | 3335 | 2020.7    |
| 3  | 气候变化与投资决策                      | 18   | 2728 | 2020.7    |
| 4  | 人类活动对气候变化、生物多样性等影响             | 7    | 1396 | 2020.6    |
| 5  | 社会结构因素与健康差异关系研究                | 10   | 1295 | 2020.6    |
| 6  | 脑电图（EEG）数据分析在神经科学、心理学、认知科学中的应用 | 8    | 1217 | 2020.4    |
| 7  | 深度学习算法与金融预测、资产定价               | 14   | 2085 | 2020.2    |
| 8  | 超加工食品消费问题                      | 35   | 7505 | 2019.5    |
| 9  | 零工经济的算法、人力资源及平台管理              | 13   | 2177 | 2019.2    |
| 10 | 人工智能伦理准则                       | 5    | 1286 | 2019.2    |



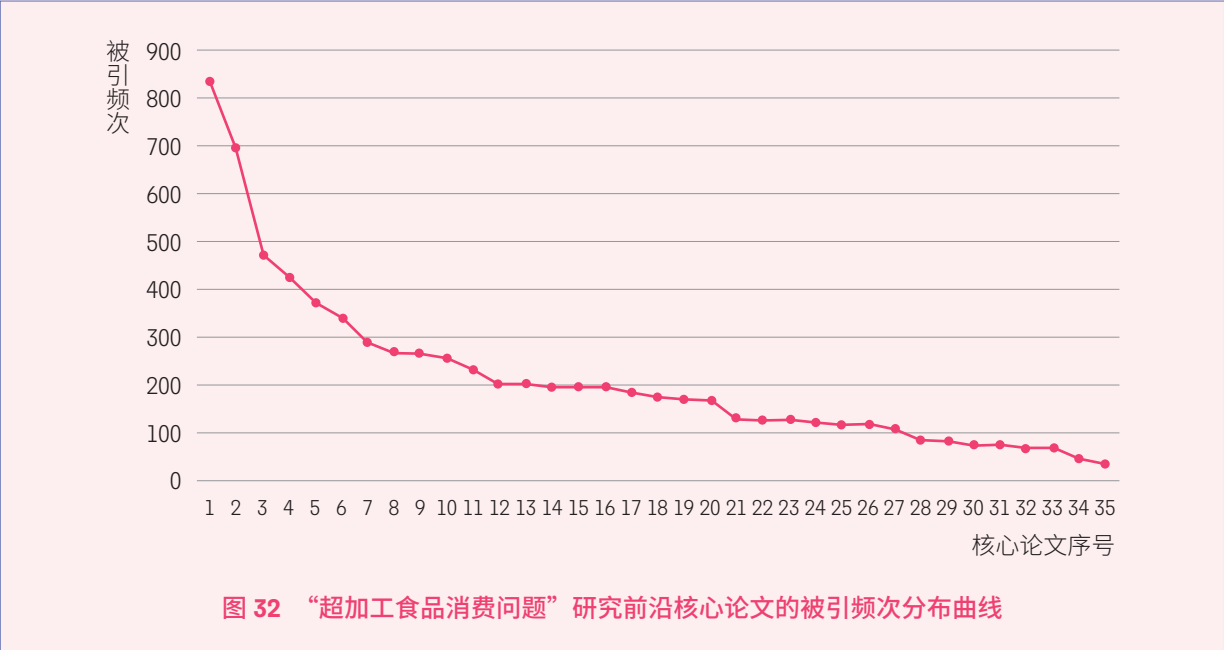
## 1.2 重点热点前沿——“超加工食品消费问题”

超加工食品以美味、方便、保质期稳定且价格实惠的特点备受追捧。如今，在高收入国家以及越来越多的中等收入国家，超加工食品/加工食品已占膳食总能量的 50% 以上。然而，越来越多的研究表明，超加工食品消费与非传染性疾病风险增长相关联，构成了公共卫生挑战。在此背景下，超加工食品消费问题引发了学者们的广泛关注，不同研究从概念辨析、疾病风险、社

会影响等角度开展了深入分析。

该热点前沿共有 35 篇核心论文（图 32），其中 5 篇论文从概念辨析角度开展相关研究；9 篇论文开展了关于超加工食品消费对人口结构、死亡率、公共健康状况等相关社会影响分析；21 篇论文从定性及定量角度进行超加工食品消费与非传染性疾病相关联系的研究，其中与肥胖疾病相关研究最

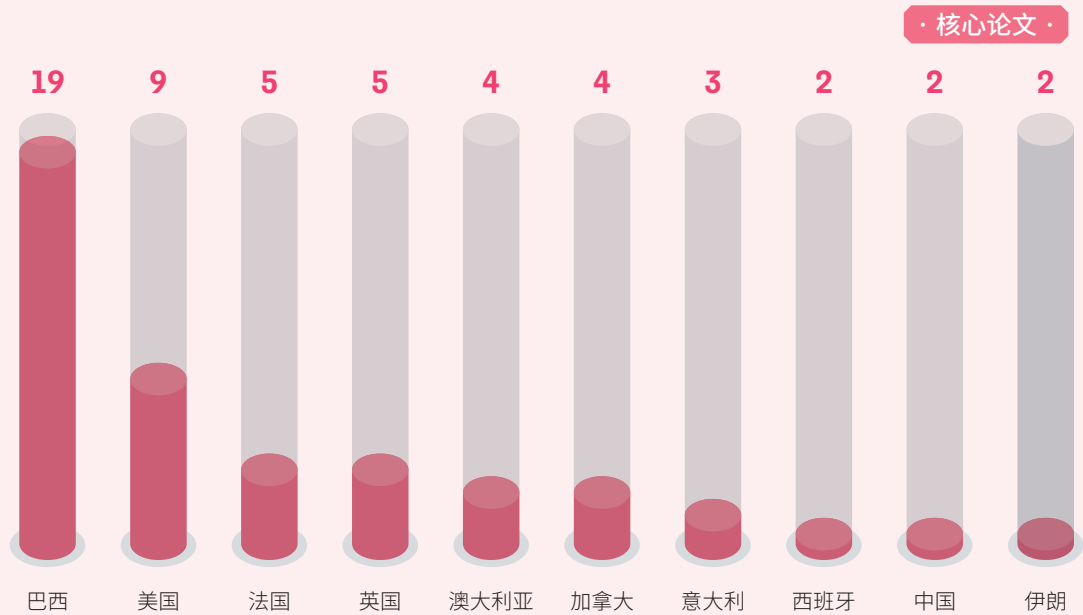
多。被引频次最高的论文是巴西圣保罗大学与加拿大蒙特利尔大学合作发表于《公共卫生营养》（Public Health Nutrition）上的关于超加工食品是什么以及如何识别的研究，被引频次为 830 次。该研究提供了一份较为清晰而简单的指南，旨在识别超加工食品，论文中指出识别超加工产品的一种实用方法是检查其成分列表是否至少包含 NOVA 超加工食品组的一项特征。



热点前沿核心论文中有 19 篇来自巴西，占有所有论文的 54.3%，美国、法国、英国等相关研究相对较多。中国贡献了 2 篇论文，排名第 8。在表 57 的核心论文产出 Top 7 家，排名第一的机构是巴西圣保罗大学。

表 57 “超加工食品消费问题”研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

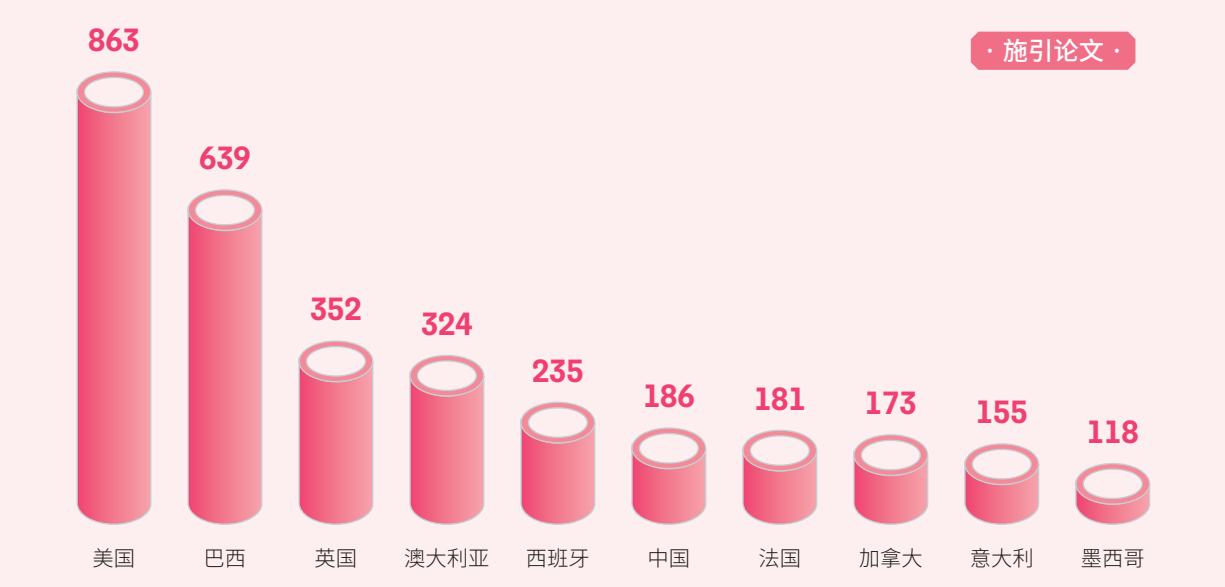
| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构             | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|----------------|------|------|-------|
| 1  | 巴西   | 19   | 54.3% | 1  | 圣保罗大学          | 巴西   | 17   | 48.6% |
| 2  | 美国   | 9    | 25.7% | 2  | 巴黎西岱大学         | 法国   | 5    | 14.3% |
| 3  | 法国   | 5    | 14.3% | 2  | 法国国立科学技术与管理大学  | 法国   | 5    | 14.3% |
| 3  | 英国   | 5    | 14.3% | 2  | 荷森姆大学          | 法国   | 5    | 14.3% |
| 5  | 澳大利亚 | 4    | 11.4% | 2  | 法国国家农业食品与环境研究院 | 法国   | 5    | 14.3% |
| 5  | 加拿大  | 4    | 11.4% | 2  | 巴黎公共援助医院       | 法国   | 5    | 14.3% |
| 7  | 意大利  | 3    | 8.6%  | 2  | 法国国家健康与医学研究所   | 法国   | 5    | 14.3% |
| 8  | 西班牙  | 2    | 5.7%  | 8  | 纽约大学           | 美国   | 4    | 11.4% |
| 8  | 中国   | 2    | 5.7%  | 8  | 迪肯大学           | 澳大利亚 | 4    | 11.4% |
| 8  | 伊朗   | 2    | 5.7%  | 8  | 巴黎第十三大学        | 法国   | 4    | 11.4% |
|    |      |      |       | 8  | 蒙特利尔大学         | 加拿大  | 4    | 11.4% |



从施引论文来看，美国以 863 位。在施引机构层面，核心论文产出最多的巴西的圣保罗大学，其施引论文也最多，体现出了该机构对超加工食品研究方向的持续关注和贡献，其次是美国的哈佛大学和澳大利亚的迪肯大学。

表 58 “超加工食品消费问题”研究前沿中施引论文的 Top 产出国家和机构

| 排名 | 国家   | 施引论文 | 比例    | 排名 | 机构             | 所属国家 | 施引论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|----------------|------|------|-------|
| 1  | 美国   | 863  | 30.1% | 1  | 圣保罗大学          | 巴西   | 293  | 10.2% |
| 2  | 巴西   | 639  | 22.3% | 2  | 哈佛大学           | 美国   | 154  | 5.4%  |
| 3  | 英国   | 352  | 12.3% | 3  | 迪肯大学           | 澳大利亚 | 125  | 4.4%  |
| 4  | 澳大利亚 | 324  | 11.3% | 4  | 赛博公司           | 西班牙  | 107  | 3.7%  |
| 5  | 西班牙  | 235  | 8.2%  | 5  | 法国国家农业食品与环境研究院 | 法国   | 94   | 3.3%  |
| 6  | 中国   | 186  | 6.5%  | 6  | 北卡罗来纳大学        | 美国   | 85   | 3.0%  |
| 7  | 法国   | 181  | 6.3%  | 7  | 巴黎西岱大学         | 法国   | 79   | 2.8%  |
| 8  | 加拿大  | 173  | 6.0%  | 8  | 法国国家健康与医学研究所   | 法国   | 78   | 2.7%  |
| 9  | 意大利  | 155  | 5.4%  | 9  | 悉尼大学           | 澳大利亚 | 76   | 2.6%  |
| 10 | 墨西哥  | 118  | 4.1%  | 10 | 墨西哥国家公共卫生研究所   | 墨西哥  | 70   | 2.4%  |
|    |      |      |       | 10 | 米纳吉拉斯联邦大学      | 巴西   | 70   | 2.4%  |



1.3 重点热点前沿——“零工经济的算法、人力资源及平台管理”

随着互联网时代到来，催生了以零工经济为代表的新就业形态，这从根本上改变了传统的雇佣关系。依托数字平台快速发展、打破传统用工模式的零工经济已成为灵活就业的“助推器”和全民就业的“蓄水池”。零工经济一个显著的特点是由算法代替人类领导对工作者的任务过程进行实时、动态和自动化的控制，即实行算法控制，其算法控制特点对人力资源及平台管理也带来新的变革。因此，相关研究热点主要集中于零工经济的算

法控制、人力资源管理创新、平台管理挑战等主要领域。

该热点前沿共有 13 篇核心论文，4 篇论文内容涉及从算法控制角度开展的零工经济中的自主与控制关系、依赖性与不稳定性等研究；4 篇论文从人力资源管理角度探究了零工经济的劳动过程、个性化工作身份、工作环境变革等问题；5 篇论文从平台众筹性、平台组织架构、平台竞争性等角度开展零工经济的平台管理研究。被引频次最

高的论文是英国牛津大学互联网研究所发表于《工作、就业与社会》（Work, Employment and Society）的全球零工经济中的自主性和算法控制研究，被引频次为 372 次。文章开展了在线劳动力平台上零工工作质量研究，特别是平台算法控制对零工工作的影响，具体通过开展 6 个国家的半结构化访谈和跨区域调查，研究了零工工作是如何被基于平台的算法所控制及塑造。

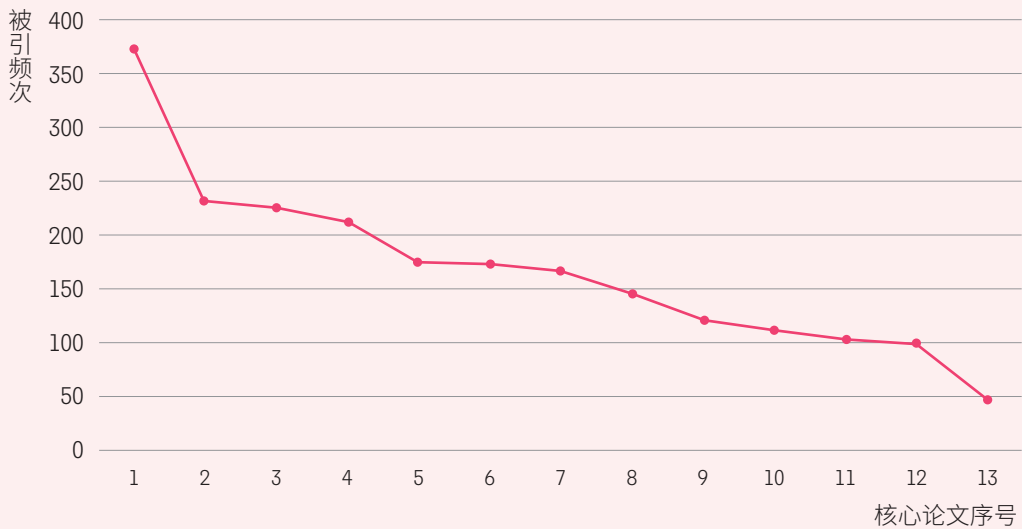


图 33 “零工经济的算法、人力资源及平台管理”研究前沿中核心论文的被引频次分布曲线

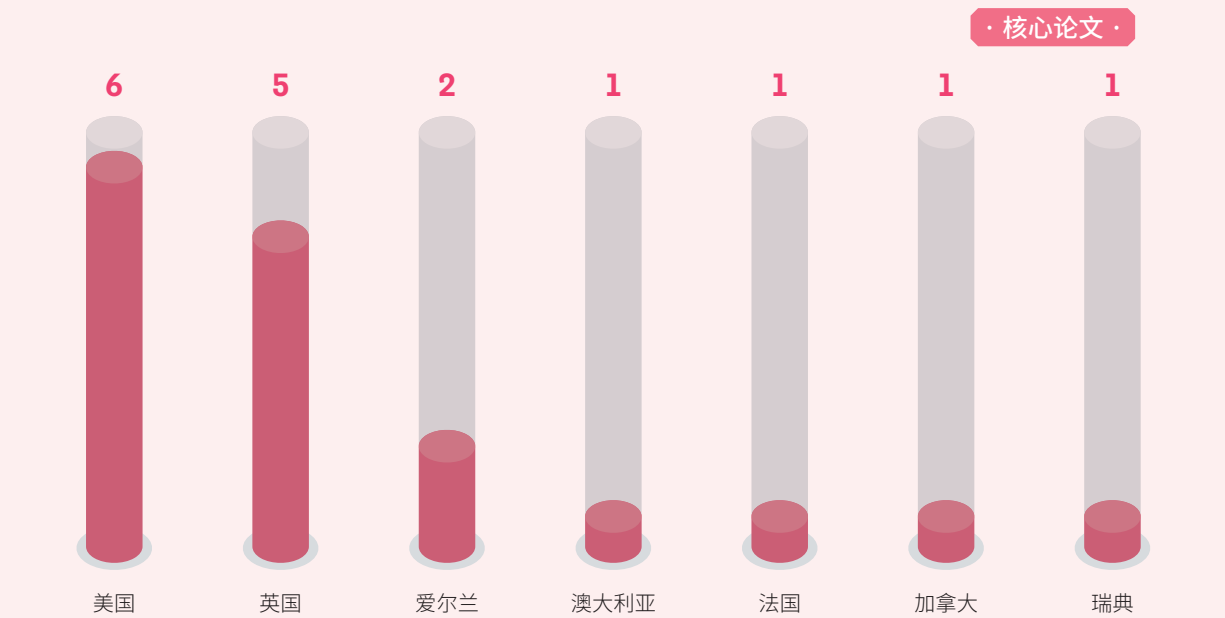
热点前沿核心论文中有 6 篇来自美国，占有所有论文的 46.2%，其次为英国 5 篇，占比 38.5%。爱尔兰、

澳大利亚、法国、加拿大、瑞典也开展了相关研究。从机构层面看，在 22 家 Top 机构中，有 10 家是美

国机构，美国的波士顿学院、密西根大学和英国的牛津大学分别贡献 2 篇核心论文（表 59）。

表 59 “零工经济的算法、人力资源及平台管理” 研究前沿中核心论文的 Top 产出国家和机构

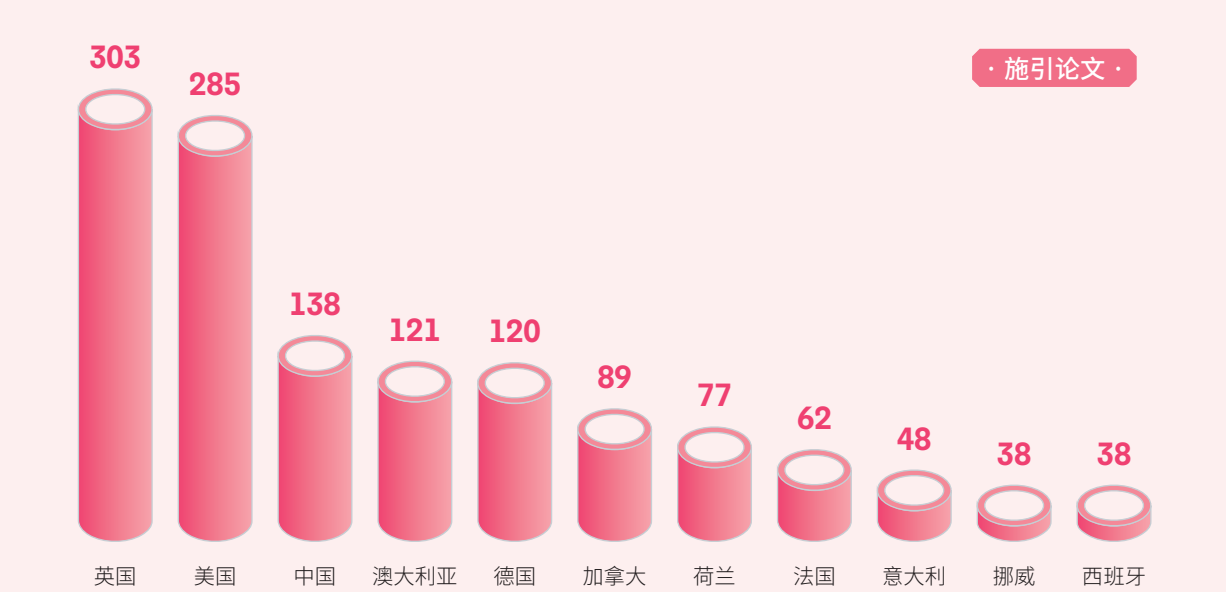
| 排名 | 国家   | 核心论文 | 比例    | 排名 | 机构         | 所属国家 | 核心论文 | 比例    |
|----|------|------|-------|----|------------|------|------|-------|
| 1  | 美国   | 6    | 46.2% | 1  | 波士顿学院      | 美国   | 2    | 15.4% |
| 2  | 英国   | 5    | 38.5% | 1  | 密西根大学      | 美国   | 2    | 15.4% |
| 3  | 爱尔兰  | 2    | 15.4% | 1  | 牛津大学       | 英国   | 2    | 15.4% |
| 4  | 澳大利亚 | 1    | 7.7%  | 4  | 耶鲁大学       | 美国   | 1    | 7.7%  |
| 4  | 法国   | 1    | 7.7%  | 4  | 奥古斯塔纳大学    | 美国   | 1    | 7.7%  |
| 4  | 加拿大  | 1    | 7.7%  | 4  | 伊利诺伊大学香槟分校 | 美国   | 1    | 7.7%  |
| 4  | 瑞典   | 1    | 7.7%  | 4  | 东北大学（美国）   | 美国   | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 宾夕法尼亚大学    | 美国   | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 迈阿密大学      | 美国   | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 哈佛大学       | 美国   | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 费尔菲尔德大学    | 美国   | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 华威大学       | 英国   | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 伦敦大学国王学院   | 英国   | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 曼彻斯特大学     | 英国   | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 伊迪斯·科文大学   | 澳大利亚 | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 悉尼大学       | 澳大利亚 | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 西澳大利亚大学    | 澳大利亚 | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 曼尼托巴大学     | 加拿大  | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 麦克马斯特大学    | 加拿大  | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 科克大学       | 爱尔兰  | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 都柏林大学      | 爱尔兰  | 1    | 7.7%  |
|    |      |      |       | 4  | 吕勒奥理工大学    | 瑞典   | 1    | 7.7%  |



从施引论文来看，英国以 303 篇施引论文位居首位，占比 25.8%；紧随其后的是美国，产出 285 篇（24.2%）；中国（11.7%）处于第三位，共计 138 篇。在施引机构层面，英国的牛津大学排名第一，美国的北卡罗来纳大学和加拿大多伦多大学施引论文并列第二，中国人民大学与哥本哈根商学院皆贡献了 17 篇施引论文，并列排名第 9。

表 60 “零工经济的算法、人力资源及平台管理”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  | 英国   | 303  | 25.8% | 1  | 牛津大学       | 英国   | 39   | 3.3% |
| 2  | 美国   | 285  | 24.2% | 2  | 北卡罗来纳大学    | 美国   | 28   | 2.4% |
| 3  | 中国   | 138  | 11.7% | 2  | 多伦多大学      | 加拿大  | 28   | 2.4% |
| 4  | 澳大利亚 | 121  | 10.3% | 4  | 悉尼大学       | 澳大利亚 | 21   | 1.8% |
| 5  | 德国   | 120  | 10.2% | 5  | BI 挪威商学院   | 挪威   | 20   | 1.7% |
| 6  | 加拿大  | 89   | 7.6%  | 5  | 鹿特丹伊拉斯姆斯大学 | 荷兰   | 20   | 1.7% |
| 7  | 荷兰   | 77   | 6.5%  | 7  | 爱丁堡大学      | 英国   | 19   | 1.6% |
| 8  | 法国   | 62   | 5.3%  | 8  | 康奈尔大学      | 美国   | 18   | 1.5% |
| 9  | 意大利  | 48   | 4.1%  | 9  | 哥本哈根商学院    | 丹麦   | 17   | 1.4% |
| 10 | 挪威   | 38   | 3.2%  | 9  | 中国人民大学     | 中国   | 17   | 1.4% |
| 10 | 西班牙  | 38   | 3.2%  |    |            |      |      |      |



## 2. 新兴前沿及重点新兴前沿解读

### 2.1 新兴前沿概述

经济学、心理学及其他社会科学领域有 1 项研究入选新兴前沿，即“生成式 AI 技术在教育领域的应用及影响”，重点解读如下。

表 61 经济学、心理学及其他社会科学领域新兴前沿

| 序号 | 新兴前沿                 | 核心论文 | 被引频次 | 核心论文<br>平均出版年 |
|----|----------------------|------|------|---------------|
| 1  | 生成式 AI 技术在教育领域的应用及影响 | 15   | 257  | 2023.0        |

### 2.2 重点新兴前沿——“生成式 AI 技术在教育领域的应用及影响”

随着人工智能的浪潮席卷全球，生成式人工智能在教育领域的应用正日益成为改革的先锋。这项技术凭借其卓越的建模和创新知识的能力，已经在学习、教学、评估和信息获取等方面引发了一场革命。特别是以 ChatGPT 为代表的大型语言模型，基于 OpenAI 的先进技术，通过监督学习和强化学习的微调，不仅极大地丰富了交互式学习体验，也拓宽了个性化教育的边界。在此背景下，数字技术领域及教育领域的研究者们正积极探索人工智能在教育教学和职场工作中的多样潜能，同时对于这项新兴技术可能引发的挑战持续保持着敏锐

的警觉。

“生成式 AI 技术在教育领域的应用及影响”新兴前沿的主要研究内容可以概况为两大方面：一是从技术应用维度探讨 AI 在教育中的应用，包括利用 AI 技术支持学习者、教师和教育行政管理者开展相关教学，生成式 AI 技术作为辅助工具，为教学提供多样化的内容和形式，例如增强个性化学习模型，虚拟角色解答问题，拓展教学场景体验等。

二是从人的维度探索相关素养的提升，即学生及老师是否对 AI

技术在教育领域可能产生的影响做好准备。一些学者对人工智能素养提升面临的深层次问题进行了剖析，具体包括：学术抄袭、教学伦理、人权、个性化、技术解方主义（techno-solutionism）、殖民主义等。

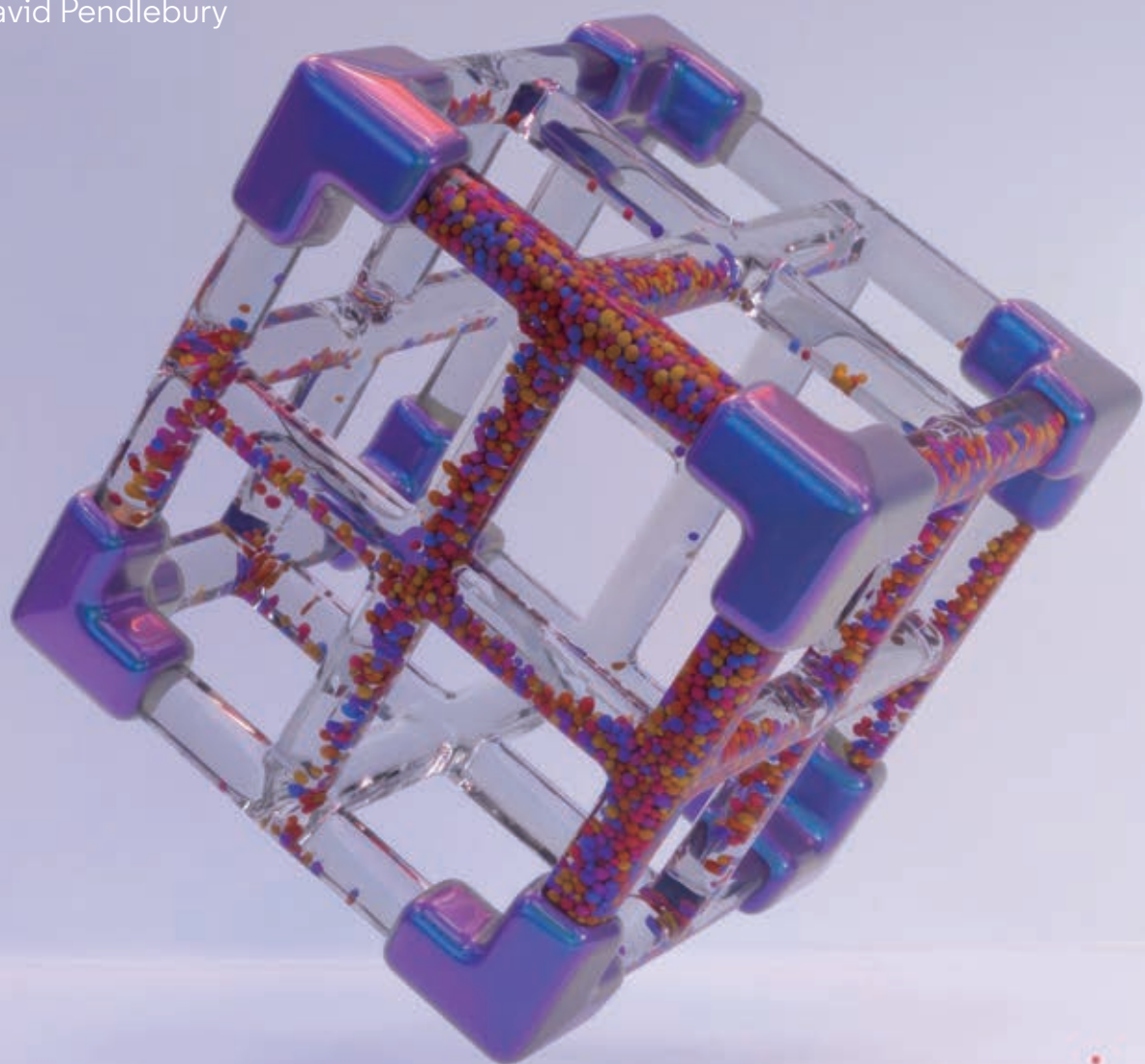
生成式 AI 技术在教育领域的应用及影响是一个充满潜力和挑战的研究主题。尽管 AI 技术是一个强大的工具，在教学、学习、管理和评估等领域的应用潜力巨大，但不可否认的是目前其在伦理影响、学术不端、隐私安全等方面具有一定局限性和挑战，相关问题需要持续关注和研究解决。

# 13

## 附录

研究前沿综述：寻找科学的结构

© 作者：David Pendlebury



2024 研究前沿 RESEARCH FRONTS

Eugene Garfield 1955 年第一次提出科学引文索引概念之际，即强调了引文索引区别于传统学科分类索引的几点优势<sup>[1]</sup>。因为引文索引会对每一篇文章的参考文献做索引，检索者就可以从一些已知的论文出发，去跟踪新近出版的引用了这些已知论文的论文。此外，无论是顺序或回溯引用论文，引文索引都是高产与高效的。

因为引文索引是基于研究人员自身的见多识广的判断，并反映在他们文章的参考文献中，而图书情报索引专家对出版物的内容并不如作者熟悉只靠分类来做索引。Garfield 将这些作者称作“引文索引部队”，同时他认为这种索引是一张“创意联盟索引”。他认为引文是各种思想、概念、主题、方法的标志：“引文索引可以精确地、毫不模糊地呈现主题，不需要过多的解释，并对术语的变化具备免疫力<sup>[2]</sup>。”除此之外，引文索引具有跨学科属性，打破了来源文献覆盖范围的局限性。引文所呈现出的联系不局限于一个或几个领域——这种联系遍布整个研究世界。对科学而言，自从学科交叉被公认为研究发现的沃土，引文索引便呈现出独特的优势。诺贝尔奖得主 Joshua Lederberg 是 Garfield 这一思想较早的支持者，他在自己的遗传学研究领域与生物化学、统计学、农业、医学的交叉互动中受益匪浅。Science Citation Index (现在的 Web

of Science) 创建于 1964 年，2024 年已有 58 个年头<sup>[3]</sup>。虽然 Science Citation Index 经过很多年才被图书情报人员以及学术圈完全认可，但是引文索引理念的影响力以及它在操作过程中产生的实质作用是无法被否认的。

虽然 Science Citation Index 的主要用途是信息检索，但是从其诞生之初，Garfield 就很清楚他的数据可以被用来分析科学研究本身。首先，他意识到论文的被引频次可以界定“影响力”显著的论文，而这些高被引论文的聚类分析结果可以指向具体的领域。不仅如此，他还深刻理解到大量的论文之间的引用与被引用揭示了科学的结构，虽然它极其复杂。他发表于 1963 年的一篇文章“Citation Indexes for Sociological and Historical Research”，论述了利用引文分析客观探寻研究前沿的方法<sup>[4]</sup>。这篇文章背后的逻辑与利用引文索引进行信息检索的逻辑如出一辙：引文不仅仅体现了智力活动之间的相互连接，还体现了研究者社会属性的相互联系，它是研究人员做出的智力判断，反映了学术领域学者行为的高度自治与自律。Garfield 在 1964 年与同事 Irving H. Sher 及 Richard J. Torpie 第一次将引文关系佐证下指向的具备影响力的相关理论按时期进行线性描述，制作出 DNA 的发现过程及其结构研究的一幅科学历史脉络图<sup>[5]</sup>。

Garfield 清楚地看到引文数据是呈现科学结构的最好素材。到目前为止，除了利用引文数据绘制了特定研究领域的历史图谱外，尚未出现一幅展示更为宏大的科学结构的图谱。

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

1965 年，Price 发表了“科学研究论文网络”一文，文中利用了大量的引文分析数据描述他所定义的“科学研究前沿”的本质<sup>[9]</sup>。之前，他使用“研究前沿”这个词语时采用的是其字面意思，即某些卓越科学家在最前沿所进行的领先研究。但是在这篇论文中，他以 N-射线

研究为例（该研究领域的生命周期很短），基于按时间顺序排列的论文及其互引模式构成的网络，从出版物的密度以及不同时期活跃度的角度对研究前沿进行了描述。Price 观察到研究前沿是建立在新近发表的“高密度”论文上，这些论文之间呈现出联系紧密的网状关系图。

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

时间到了1972年，年轻的科学史学者 Henry Small 离开位于纽约的美国物理学会，加入费城的美国科技信息所，他加入的最初动机是希望可以利用 Science Citation Index 的数据以及题名和关键词的价值。但是很快他就调整了方向，把注意力从“文字”转向了“文章间相互引用行为”，这种转变背后的动机与 Garfield 和 Price 不谋而合：引文的力量及

其发展潜力。1973年，Small 在 Garfield 1955 年介绍引文思想论文的基础上，开拓出了自己全新的方向，发表了论文“Co-citation in the scientific literature: A new measure of relationship between two documents”，这篇论文介绍了一种新的研究方法——“共被引分析”，将描述科学学科结构的研究带入了一个新的时期<sup>[11]</sup>。Small 利用两篇论文被共同被引用的次数来描述这两篇论文的相似程度，换句话说就是统计“共被引频率”来确认相似度。

他利用当时新发表的粒子物理领域的论文分析来阐述自己的方法。Small 发现，这些通过“共被引”联系在一起的论文常常在研究主题上有高度的相似度，是相互关联的思想集合。他认为基于论文被引用频率的分析，可以用来寻找领域中关键的概念、方法和实验，是进行“共被引分析”的起点。前者用客观的方式揭示了学科领域的智力、社会和社会认知结构。像 Price 做研究前沿的研究一样，Small 将最近发表的通过引用关系紧密编织在一起的论文聚成组，接着通过“共被引”分析，发现分析结果指向了自然关联在一起的“研究单元”，而不是传统定义的“学科”或较大的领域。Small 将“共被引分析”比作一部完整的电影，而不是一张孤立的图片，以表达他对该方法潜力的极大信任。他认为，通过重要

论文间的相互引用模式分析，可以呈现某个研究领域的结构图，这幅结构图会随着时间的推移而发生变化，通过研究这种不断变化的结构，“共被引分析”可以帮助我们跟踪科学研究的进展，以及评估不同研究领域的相互影响程度。

还有一位值得注意的科学家是俄罗斯研究信息科学的 Irina V. Marshakova-Shaikovich。她也在1973年提出了“共被引分析”的思想<sup>[12]</sup>。但是 Small 与 Marshakova-Shaikovich 并不了解彼此的工作，因此他们的工作可以被看作是相互独立、不谋而合的研究。科学社会学家 Robert K. Merton 将这种现象称作“共同发现”，这在科学史上是非常常见的现象，而很多人却没有意识到这种常见现象的存在<sup>[13,14]</sup>。Small 与 Marshakova-Shaikovich 都将“共被引分析”与“文献耦合”现象进行了对比，后者是 Myer Kessler 于1963年阐释的思想<sup>[15]</sup>。

“文献耦合”也是用来度量两篇论文研究内容相似程度的方法，该方法基于两篇论文中出现相同参考文献的频次来度量它们的相似程度，即如果两篇论文共同引用了同一篇参考文献，他们的研究内容就可能存在相似关系，相同的参考文献越多，相似度越大。“共被引分析”则是“文献耦合”分析的“逆”方向：不用两篇文章共同引用的参考文献频次做内容相似度研究的线

索，而是将“共同被引用”的参考文献聚类，通过“共被引分析”度量这些参考文献的相似度。“文献耦合”方法所判断两篇文章之间的相似度是“静态”的，因为当文章发表后，其文后的参考文献不会再次发生变化，也就是说两篇论文之间的相似关系被固定下来了；但是“共被引”分析是一个逆过程，你永远无法预知哪些论文会被未来发表的论文“共同被引用”，它会随着研究的发展发生动态的变化。Small更倾向于使用“共被引分析”，他认为这样的逆过程能够反映科学活动、科学家认知随着时间发生的变化<sup>[16]</sup>。

接下来的一年，即1974年，Small与位于费城Drexel University的Belver C. Griffith共同发表了两篇该领域里程碑式的著作，阐释了利用“共被引分析”寻找“研究单元”的方法，并且利用“研究单元”间的相似度做图呈现研究工作的结构<sup>[17,18]</sup>。虽然此后该方法有过一些重大的调整，但是它的基本原理与实施方式从来没有改变过。首先遴选高被引论文合集作为“共被引分析”的种子。将这样的高被引论文合集限定在一定规模范围内，这些论文被假定可以作为其相关研究领域关键概念的代表论文，对该领域起着重要的影响作用，作为寻找这些论文的线索，“被引用历史”成为关键点，利用引用频次建立的统计分析模型可以证明这些论文的确

具有学科代表性与稳定性。一旦这样的合集被筛选出来，就要对该合集做“共被引”扫描。合集中，同时被同一篇论文引用的论文被结成对，称作“共被引论文对”，当然会出现很多结不成对的“0”结果。当很多“共被引论文对”被找到时，接下来会检查这些“共被引论文对”之间是否存在“手拉手”的关系，举例来说：如果通过“共被引扫描”发现了“共被引论文对A和B”、“共被引论文对C和D”、“共被引论文对B和C”，那么由于论文B和C的共被引出现，“共被引论文对A和B”与“共被引论文对C和D”就被联系到一起了。我们就认为两个“共被引论文对”出现了一次交叉或者“拉手”。因为这一次交叉，就将这两个“共被引论文对”合并聚成簇，也就是说两个“共被引论文对”间只需要一次“拉手”就能形成联系。

通过调高或调低共被引强度阈值可以得到规模大小不同的“聚类”或者“群”。阈值越低，越多的论文得以聚类，形成的“群”越大，阈值过低则会形成不间断的“论文链”。如果调高阈值，就可以形成离散的专业领域，但是如果相似度阈值设得太高，就会形成太多分裂的“孤岛”。

在构建研究前沿方法中采用的“共被引相似度”计量方法以及共被引强度阈值随着时间的推移有

所不同。今天我们采用余弦相似性(cosine similarity)方法计量“共被引相似度”，即用共被引频次除以两篇论文的引用次数的平方根。而“共被引强度”最小阈值是相似度.1的余弦，不过这个值是可以逐渐调高的，一旦调高就会将大的“聚类”变小。通常如果研究前沿聚类核心论文超过最大值50时，我们就会这样做。反复试验表明这种做法能产生有意义的研究前沿。

现在我们做个总结，研究前沿是由一组高被引论文和引用这些论文的相关论文组成的，这些高被引论文的共被引相似度强度位于设定的阈值之上。

事实上，研究前沿聚类应该同时包含两个组成部分，一部分是通过共被引找到的核心论文，这些论文代表了该领域的奠基工作；另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”<sup>[21]</sup>。Garfield——一位实干家，他将自己的理论研究工作转化成了数据库产品，无论是信息检索还是分析领域都受益良多。这个飞行器以 1981 年出版的 ISI 科学地图：生物化学和分子生物学 (ISI Atlas of Science: Biochemistry and Molecular Biology, 1978/80) 而宣告起飞<sup>[22]</sup>，可以说这本书所呈现的工作与 Small 的工作有着内在的联系。这本书分析了 102 个研究前沿，每一个前沿都包括一张图谱，包含了前沿背后的核心论文，以及多角度展示这些论文间的相互关系。每一组核心论文被详细列出，并且给出它们的被引用次数，那些重要的施引论文也会在清单中，还会基于核心论文的被引用次数给出每个前沿的相关权重。

伴随这些分析数据的还有来自各前沿专业领域的专家撰写的综述。书的最后，是这 102 个研究前沿汇总在一起的巨大图谱，显示出他们之间的相似关系。这绝对是跨时代的工作，但对于市场来说无异于一场赌博，这就是 Garfield 的个性写真。

Small 与 Griffith 1974 年共同发

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

对 Small 与 Griffith 的工作，尤其是从以上两个维度解析通过共被引分析聚类论文图谱的工作，Price 认为“看上去这是非常深奥的工作，也是革命性的突破。”。他强调“他们的发现似乎预示着科学研究存在内在的结构与秩序，需要我们进一步去发现、辨识、诊断。我们惯常用分类、主题词的方式去描述它，看上去与它自然内在的结构是背道而驰的。如果我们真想发现科学研究结构的话，无疑需要分析海量的科学论文，生成巨型地图。这个过程是动态的，不断随着时间而变化，这使得我们在第一时间就能捕捉到它的进展与特性。”<sup>[20]</sup>

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

十年来做了各种研究与实验。1985 年，Small 发表了两篇论文介绍他关于研究前沿定义方法的重要修正：分数共被引聚类法 (Fractional Co-Citation Clustering)<sup>[25]</sup>。

根据引用论文的参考文献的多少，通过计算分数被引频次调整领域内平均引用率差异，籍此消除整体计数给高引用领域（如生物医药领域）带来的系统偏差。随着方法的改进，数学显得愈发重要，而在整数计数时代，数学曾被忽视。他还提出基于相似度可以将不同研究前沿聚类，这超越了单个研究前沿聚组的工作<sup>[26]</sup>。同年，Garfield 与 Small 发表了“The geography of science: disciplinary and national mappings”，阐述了他们研究的新进展。该论文汇集了 Science Citation Index 与 Social Sciences Citation Index 数据，勾勒出全球该领域的研究状况，从全球的整体图出发，他们还进一步探索了更小分割单位的研究图谱<sup>[27]</sup>。这些宏-聚类间的关系与具体研究内容同样重要。这些关联如同丝线，织出了科学之网。

接下来的几年里，Garfield 致力于发展他的科学历史图谱，并在 Alexander I. Pudovkin 与 Vladimir S. Istomin 的协助下，开发了 HistCite 这一软件工具。HistCite 不仅能够基于引用关系自动生成一组论文的历史图谱，提供某一特定研究领域

论文发展演化的缩略图，还可以帮助识别相关论文，这些相关论文有可能在最初检索时没有被检索到，或者没有被识别出来。因此，HistCite 不仅是一个科学历史图谱的分析软件，也是帮助论文检索的工具<sup>[28,29]</sup>。

Small 继续完善着他的共被引分析聚类方法，并且试图基于某个学科领域前沿之间显示的认知关系图谱探索更多的细节内容<sup>[30,31]</sup>。背后的驱动力是对科学统一性的强烈兴趣。为了显示这种统一性，Small 展示了通过强大的共被引关系，如何从一个研究主题漫游到另一个主题，并且跨越了学科界限，甚至从经济学跨越到天体物理学<sup>[32,33]</sup>。

对此 Small 与 E.O.Wilson 有类似的想法，后者在 1998 年出版的名为 *Consilience: The Unity of Knowledge* 的一书中表达了类似的思想<sup>[34]</sup>。上个世纪 90 年代早期，Small 发展了 Sci-Map，这是一个基于个人电脑的论文互动图形系统<sup>[35]</sup>。后来的数年中，他将研究前沿的研究数据放到了 Essential Science Indicators (ESI) 数据库中。

Essential Science Indicators (ESI) 主要用来做研究绩效分析。ESI 中的研究前沿，以及有关排名的数据每两个月更新一次。这时候，Small 对虚拟现实软件产生了极大的兴趣，因为这类软件可以产生模拟真实情况的三维虚拟图形，可以

实时处理海量数据<sup>[36,37]</sup>。例如，上世纪 90 年代末期，Small 领导了一个科学论文虚拟图形项目，在桑迪亚国家实验室成功开发了共被引分析虚拟现实软件 VxInsight<sup>[38,39]</sup>。

由于桑迪亚国家实验室高级研究经理 Charles E. Meyers 富有远见的支持，在动态实时图形化学术论文领域，该研究无疑迈出了巨大的一步，这也是一个未来发展迅速的领域。该软件可以将论文的密度及显著特征用山形描绘出来。可以放大、缩小图形的比例尺，允许用户通过这样的比例尺缩放游走在不同层级学科领域。基础数据的查询结果被突出显示，一目了然。

事实上，上世纪 90 年代末期对于科学图谱研究来说是一个转折点，之后，有关如何界定研究领域，以及领域间关系的可视化研究都得到了迅猛发展。全球现在有很多学术中心致力于科学图谱的研究，他们使用的方法与工具不尽相同。

印第安纳大学的 Katy Borner 教授在其 2010 年出版的一本书：*Atlas of Science — Visualizing What We Know* 中对该领域过去 10 年取得的进展做了总结，当然这本书的名字听上去似曾相识<sup>[40]</sup>。

从共被引聚类生成科学图谱诞生，到今天这个领域如此繁荣，大约经历了 25 年的时间。很有意思的是，引文思想从产生到 Science

Citation Index 的商业成功也大约经历了 25 年。当我们回顾这个进程时，清楚地看到相对于它们所处的时代来说两者都有些超前。如果说 Science Citation Index 面临的挑战来自于图书馆界根深蒂固的传统思想与模式（进一步说就是来自研究人员检索论文的习惯性行为），那么，科学图谱，作为一个全新的领域，之所以迟迟未被采纳，其原因应归为，在当时的条件下，缺乏获取研究所需的大量数据的渠道，并受到落后的数据存储、运算、分析技术的限制。直到上世纪 90 年代，这些问题才得到根本解决。目前正以前所未有的速度为分析工作提供海量的分析数据，个人计算机与软件的发展也使个人计算机可以胜任这些分析工作。今天，我们利用 Web of Science 进行信息检索、结果分析、研究前沿分析、图谱生成，以及科学活动分析，它不仅拥有了用户，还拥有了忠诚的拥趸与宣传者。

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

## 参考文献

- [1] Eugene Garfield. Citation indexes for science: a new dimension in documentation through association of ideas. *Science*, 122 (3159): 108-111, 1955.
- [2] Eugene Garfield. *Citation Indexing: its Theory and Application in Science, Technology, and Humanities*. 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-Shaikovitch. 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.



2024 研究前沿  
RESEARCH FRONTS

# 报告研究团队

## 指导专家：

潘教峰 刘细文 王 利

## 总体组：

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

## 前沿解读组（前沿命名与重点前沿解读分析）：

|                |             |
|----------------|-------------|
| 农业科学、植物学和动物学   | 袁建霞         |
| 生态与环境科学        | 邢 颖         |
| 地球科学           | 范唯唯 杨 帆     |
| 临床医学           | 冀玉静 李军莲 李 阳 |
| 生物科学           | 周秋菊         |
| 化学与材料科学        | 边文越         |
| 物理学            | 黄龙光         |
| 天文学与天体物理学      | 王海名 韩 淋     |
| 数学             | 王海名 孙 震     |
| 信息科学           | 王海霞 白如江     |
| 经济学、心理学及其他社会科学 | 王文君         |

## 英文翻译组：

|                     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 袁建霞                 | 邢 颖 | 周秋菊 | 范唯唯 | 王海名 | 杨 帆 | 李军莲 | 冀玉静 |
| 边文越                 | 黄龙光 | 韩 淋 | 王海霞 | 孙 震 | 白如江 | 李 阳 | 王文君 |
| Christopher M. King | 岳卫平 | 王 娜 | 黄庭颖 | 马亚鹏 | 孙 敏 | 王 振 |     |
| 王思茗                 | 危 期 | 熊 洋 | 袁庆文 |     |     |     |     |

## 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，聚焦科技和学科发展战略、科技和创新政策、生态文明和可持续发展战略、系统分析与管理、科技战略情报、智库科学与工程、综合交叉研究等领域，汇聚国内外优秀人才，建设开放合作的战略与政策国际研究网络，为国家宏观决策提供科学依据和咨询建议。

## 中国科学院文献情报中心简介

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

## 科睿唯安简介

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

### **中国科学院科技战略咨询研究院**

地址：北京市海淀区中关村北一条 15 号

邮编：100190

网址：<http://www.casisd.cn/>

### **中国科学院文献情报中心**

地址：北京市中关村北四环西路 33 号

邮编：100190

网址：<http://www.las.ac.cn/>

### **科睿唯安 中国办公室**

地址：北京市海淀区科学院南路 2 号融科资讯中心 C 座北楼 610 单元

邮编：100190

电话：+86 10 57601200

传真：+86 10 82862008

邮箱：[info.china@clarivate.com](mailto:info.china@clarivate.com)

网址：<http://clarivate.com.cn/>