

探月工程四期首席科学家王赤：用坚韧的脚步丈量太阳系的深邃

■本报记者 崔雪芹 赵宇彤

“我国实施探月工程和行星探测工程以来，实现了人类航天器首次软着陆月球背面并开展就位和巡视探测、人类首次取回月球背面样品等壮举。”日前，中国科学院院士、中国科学院国家空间科学中心主任王赤在接受《中国科学报》专访时表示，工程技术的突破给中国科学家带来前所未有的研究机遇。

然而，作为探月工程四期首席科学家，王赤深知，我国深空探测飞速发展的同时，还藏着技术瓶颈、人才储备不足、国际合作和原始创新能力不强等隐忧。

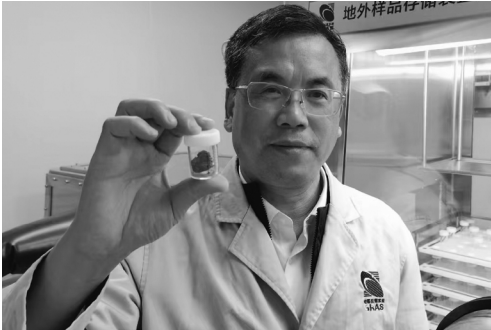
转变的关键阶段

《中国科学报》：近年来，我国深空探测领域取得了哪些成果？

王赤：截至目前，我国共向国内外科学团队发放9批月球样品。自发放以来，百余项成果在《科学》《自然》《国家科学评论》等国内外重要学术期刊发表，研究成果主要涉及月球样品玄武岩年代学和成因、月球样品物理化学特性、太空风化作用、撞击过程与撞击玻璃等方面。很多成果价值很高，获得学术界高度评价，如在月球样品年龄、源区性质和水含量等方面的研究取得重大成果，发现月球在20亿年前后还发生过岩浆喷发作用，证实月球最年轻玄武岩年龄为20亿年，把月球演化理论的时间轴推迟了8亿至10亿年，被国际同行认为是“里程碑式发现”。

《中国科学报》：取得系列成果后，当前我国深空探测在国际上处于什么水平？

王赤：近年来，我国空间科学不断产出重大



手执月壤样品的王赤。
中国科学院国家空间科学中心供图

原创成果，深空探测能力发展迅速，国际影响力日益增加，呈现突破态势，正处于从“跟跑”“并跑”向“并跑”“领跑”转变的关键阶段。

然而也存在关键问题和挑战：一是原始创新能力有待提升，争取获得更多世界级的标志性成果，创建原创科学思路和方法，形成中国学派；二是技术瓶颈有待突破，需要加快发展大推力可重复使用运载技术、深空能源、测控与通信技术，以及极端环境适应性技术；三是尖端人才培养与储备，迫切需要建立学科复合型、创新型人才队伍，特别是能胜任长周期、高强度攻关任务的领军人才和工程师；四是国际合作的话语权有待加强。

科学与工程“两条腿走路”

《中国科学报》：你提到工程技术的突破给科

学研究带来新机遇。深空探测任务中，如何平衡二者的关系？

王赤：我国航天工程从无到有，从弱到强，走出了一条中国特色的发展道路。

1970年4月24日，我国第一颗人造地球卫星“东方红一号”发射成功。当时的要求现在看来很简单，“上得去、抓得住、听得到、看得见”，尚未顾及科学探测需求；上世纪90年代，我国地球轨道卫星技术发展趋于成熟，开始论证空间科学卫星和月球探测的科学需求；进入新世纪，深空探测的科学目标也在不断提升，从月球遥感探测到月表巡视勘察，再到月球采样返回，牵引我国深空探测工程实现了从地球走向月球、从月球迈向深空的技术跨越。

同时，正因为有了这些工程技术的突破和支撑，科学家能够提出火星、小行星、木星乃至太阳系边际等更多的科学目标和科学探测任务。深空探测任务中，科学目标和工程技术是相辅相成、互相促进的关系。

但相比技术发展，我国深空领域的基础科学研究力量还显薄弱，学科发展还在成长期，这已成为制约我国抢占深空探测制高点的关键因素。

《中国科学报》：面向未来，我国探月工程和深空探测有哪些目标和规划？

王赤：我从科学目标的角度介绍一下。

在月球探测方面，未来我国还将继续实施探月工程四期嫦娥七号、嫦娥八号任务，开展月球水冰、深部物质、内部结构、环境资源等探测和月面实验，并以月球为平台对地球开展大范围、全尺度科学探测，初步构建月球科研站基本型。围绕月球地质、巡天揭秘、日地联系、科学实验、资源利用等科学探测主题，在月球上构建开展月

球科学探测、资源利用、月基观测、基础科学实验、技术验证等多学科多目标科研活动的长期自主运行、短期有人参与的综合性科学实验设施。

在行星探测方面，围绕太阳系起源与演化、太阳活动对地球的影响、地外生命探寻等空间科学重大前沿，论证实施天问三号火星采样返回、天问四号木星系探测、太阳极轨天文台等一系列任务，力争取得一批重大原创性科学成果，提高我国空间科学、空间技术和空间应用的水平。

《中国科学报》：你多次强调应推动我国小行星防御构想尽快落地实现，在这方面有哪些目标和规划？

王赤：小行星是太阳系内环绕太阳运动的小天体，主要分布在火星与木星轨道之间的主小行星带。小行星的探测及研究主要集中在其本身特性、太阳系形成历史约束信息，以及对人类潜在威胁等方面。人类已发现3.7万余颗近地小行星。根据近地小行星的理论群体模型，目前人类已对95%以上直径达1000米级的近地小行星完成编目工作。然而，仍有大量中小尺寸的近地小行星尚未被编目。

动能撞击是当前应对中小尺寸近地小行星现实、可行的在轨处置手段之一。我国正在论证小行星防御在轨验证任务，希望通过动能撞击的方式，改变一颗直径约30米近地小行星的轨道，通过地基与天基设备的联合观测，对撞击效果进行全面评估，揭示其破碎解体机制，化解潜在风险和威胁。

“好奇心永远比地球引力更强”

《中国科学报》：人工智能(AI)技术的发展为

深空探测带来哪些机遇和挑战？

王赤：我们现在正处于一个智能化工业革命的萌发期，AI也许就是下一次工业革命到来的前兆。

AI不是深空探测的简单工具，而是引发其范式变革的驱动力量，是目前生产力范式改变的催化剂，目标是实现真正的“智能探测”。智能化自主化控制将是未来深空探测的方向。特别是地球到木星甚至是太阳系边际，距离非常远，地面运控团队不可能实时操控，因此探测器需要智能化，能更加自主地执行任务。

此外，要实现从“数据泛滥”到“知识发现”的科学突破。深空探测产生的数据量呈指数级增长，AI要实现“星上智能处理”，在数据下传前对其进行智能筛选，只将“有价值”的异常事件或关键特征数据传回地球，并从海量数据中挖掘出人难以发现的微弱规律和关联，加速科学产出。

同时，赋能新型任务，开启全新探索维度。例如，通过AI协同工作，实现对行星全球或多点位的同步、立体探测，以及在极端环境下的持久探测等。

但AI本身也有局限性，更多的是基于统计规律的现有知识的归纳和利用。这些挑战不仅是技术性的，更是系统性和基础性的。

《中国科学报》：面对新技术和新挑战，未来深空探测需要哪类青年人才？

王赤：我国深空探测领域研究既是基础研究，又具有航天工程特点。因此，从人才类型上，既需要科学家，也需要航天工程师，建设复合型团队；从人才跨度上，需要多个学科、来自多家单位，甚至跨地域跨国家的各方面人才，建设综合型的团队；从人才层次上，需要战略科学家、科技领军人才、青年科技人才、卓越工程师、高素质技术技能人才，建设规模宏大、结构合理、素质优良的团队。

《中国科学报》：给有志于从事深空探测的青年人一句寄语，你会说什么？

王赤：愿你的好奇心永远比地球引力更强，用坚韧的脚步丈量太阳系的深邃；深空是人类最终的边疆，而你们将是第一批抵达的足迹。

2025 ACM 中国图灵大会在深开幕

本报讯(记者刁雯蕙 通讯员杨佳林)近日,以“智汇鹏城·图灵新章”为主题的2025 ACM中国图灵大会在深圳开幕。大会由国际计算机学会(ACM)主办、中国计算机学会(CCF)协办、深圳大学承办。

图灵奖被称为“计算机界诺贝尔奖”,ACM中国图灵大会自创办以来,已成功举办6届。大会每年邀请多位图灵奖得主及中外院士专家分享前沿洞察,为学术界与产业界构建深度交流的创新生态。

本届大会的特邀报告聚焦多个关键领域。图灵奖获得者约翰·霍普克罗夫特从人才培养角度切入,深刻阐释了信息时代的教育变革与人才竞争新格局。中国工程院院士郑纬民在报告中指出人工智能的局限性,提出高性能计算+人工智能的融合创新路径,并展示了这一技术路径在突破高维问题精度瓶颈方面的进展。中国科学院院士吕建在报告中以软件科技与教育工作者的视角进行了数智时代与变革重塑的初探,为数智化转型提供了前瞻性思考。图灵奖获得者约瑟夫·希发基思则从系统层面探讨了自治系统中的人工智能应用,为智能系统的未来发展指明了方向。

本届大会设置了跨学科对话环节,来自学术界与产业界的专家就多个前沿议题展开深入探讨。此外,大会还设置了2场主论坛、14场专题论坛,涵盖人工智能、大数据、网络安全等多个前沿方向。



一群小海龟爬向大海。
南沙站供图

从 2025 诺贝尔经济学奖看未来的经济增长

■杜鹏

10月13日,瑞典皇家科学院称,过去两个世纪,世界历史上首次出现持续的经济增长,这使无数人摆脱贫困,并为今天的繁荣奠定了基础。今年的诺贝尔经济学奖得主乔尔·莫基尔、菲利普·阿吉翁和彼得·豪伊特解释了创新如何为进一步的增长提供动力。

3位经济学家的研究共同回答了经济学的核心问题:长期经济增长的根本源泉是什么?他们的答案不是资本、劳动力的简单积累,而是知识、技术与创新。他们在约瑟夫·熊彼特的思想基础上,将“创新”从经济增长的一个外在因素,转变为一个可以在主流经济增长模型中严格分析的内生核心变量。

3 位经济学家的主要思想

莫基尔将推动经济发展的知识称为“有用知识”,并将其划分为两个相互关联但又截然不同的类别。一是命题知识,即关于“是什么”和“为什么”的知识;二是指令知识,即关于“如何做”的知识。在工业革命之前,技术进步多来自工匠的试错和经验积累,即指令知识,但这种方式具有很大的偶然性和局限性。16至17世纪的科学革命极大扩展了人类的“命题知识”存量,为指令知识提供了新方向。指令知识反过来验证和丰富命题知识,推动科学探索的深入。

阿吉翁和豪伊特核心的学术贡献在于为熊彼特的“创造性破坏”思想构建了一个严谨的数学模型,从而创立了“熊彼特式增长理论”。在他们的模型中,经济增长是由一代又一代的创业者或企业通过研发活动推动的。成功

的企业通过创新获得暂时性的垄断利润,这一利润激励会驱动下一轮创新,以“破坏”当前的垄断。经济增长正是在持续竞争中实现的,这就需要构建一套能够最大限度激发个人和企业创新潜力的生态系统。他们的模型得出结论,最优的创新环境是“可竞争的市场”,即市场存在竞争威胁,但创新成功者能获得足够的利润回报,这为反垄断政策和知识产权制度的设计提供了有效指导。

经济增长与技术创新关系的研究历程

关于经济增长与技术创新关系的研究,在历史上经历了漫长的演进过程。其思想溯源可以追溯到18世纪的亚当·斯密。20世纪初,熊彼特在《经济发展理论》等著作中提出“创新理论”和“创造性破坏”概念,第一次将创新置于经济分析的中心。但在他的时代,这一思想并未被主流经济学所接纳,也缺乏严谨的数学模型。

20世纪50年代,罗伯特·索洛建立了新古典增长模型,为分析经济增长提供了第一个严谨的数学框架。在模型中,技术进步被假定为一个“外生变量”。尽管如此,实证表明了技术进步是经济增长的主要源泉,这极大激发了经济学界对技术创新的研究热情。索洛也因其在增长理论上的贡献获得1987年诺贝尔经济学奖。

自此,打开“技术”这个黑箱成为过去经济增长研究的主旋律。主流经济学的发展方向是将索洛模型中“外生”的技术进步拓展为的内生增长理论。除了莫基尔、阿吉翁和

豪伊特的工作以外,保罗·罗默提出的知识驱动模型、罗伯特·卢卡斯的人力资本模型也是典型代表,罗默由此获得2018年诺贝尔经济学奖。

值得一提的是,演化经济学也是理解技术创新过程一个极其重要的视角。演化经济学并不试图在新古典的均衡框架内修修补补,而是提出一个全新分析范式,主要思想涉及技术演化、路径依赖和国家创新体系。从新古典的“外生给定”发展到内生增长理论的“有目的投资”,再到演化经济学的“不确定的、系统的、路径依赖的演化过程”,我们对这一复杂现象的理解不断深化和贴近现实。经济学为我们理解真实世界中的创新、企业行为和结构性变化提供了不可或缺的洞见,进而构建了创新驱动发展的知识基础。

对中国的现实意义

“创新”的概念对中国而言并不陌生。20世纪90年代,经济全球化加速发展,以信息技术为代表的新科技革命席卷全球,“知识经济”成为发达国家经济增长的主要驱动力。1997年亚洲金融危机让中国决策层深刻认识到,必须依靠内生的科技创新能力来提升国民经济的内在素质和抗风险能力。

1997年12月,中国科学院向中央提交了《迎接知识经济时代,建设国家创新体系》的报告。报告指出,“在知识经济时代,国家的创新能力,包括知识创新和技术创新能力,是决定一个国家在国际竞争和世界总格局中的地位的重要因素”。中央领导随后作

出批示,提出要建设“我们自己的创新体系”。1999年8月,全国技术创新大会提出将完善和发展国家创新体系当作一项长期战略任务。2006年出台的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》正式提出建设中国特色的国家创新体系。

理解经济增长的内在机制对中国当前实施创新驱动发展战略仍具有重要意义。经济增长并非理所当然,需要文化和制度来支持“创造性破坏”。在从“追赶型”创新转向“前沿开拓型”创新的过程中,迫切需要构建一个能够激发、容纳并利用“创造性破坏”这一强大力量的生态系统。本质上,这是一场深刻的“生产关系”调整,以适应和解放“创新”这一最活跃的生产力。这意味着政府的角色从“运动员”和“裁判员”转向“园丁”和“土壤守护者”,让创新的种子破土而出,并最终形成一片生生不息、自我强化的“创新雨林”。

此外,构建“可竞争性市场”迫在眉睫。应强化反垄断,促进公平竞争,防止平台企业利用市场优势扼杀初创企业;优化知识产权保护,在保护创新者收益和促进知识扩散之间保持一种张力。同时,还需要构建多元化的人才体系,创新既需要顶尖的“创新者”(科学家、工程师),也需要庞大的“技能型人才”(高技能工匠、技术工人)将创意转化为现实。另外,应大力发展职业教育和终身教育体系,为劳动力市场快速提供适应技术变革的技能型人才,帮助劳动者在“创造性破坏”的阵痛中顺利转型。

(作者系中国科学院科技战略咨询研究院研究员)

发现·进展

华东理工大学

首次制备聚合物三角形纳米环

本报讯(见习记者江庆龄)华东理工大学材料学院教授林嘉平、蔡春华团队首次制备出形貌均匀的聚合物三角形纳米环,并提出内应力驱动纳米环拓扑形貌转变的新机理,丰富了聚合物纳米环的形貌调控手段,为复杂纳米结构的构建提供了新策略。相关研究近日发表于《德国应用化学》。

自然界中存在的纳米环往往为非圆形结构,聚合物自组装是制备纳米环的有效方法,但其拓扑形貌大多为圆形,非圆形尤其是多边形纳米环的制备及形成机制研究仍面临挑战。

研究团队通过聚酰胺均聚物聚γ-苡基-L-谷氨酸酯(PBLG)溶液自组装方法,制备出均匀形貌的近等边三角形纳米环。该纳米环并非平面结构,具有右手手性特征,且其手性与PBLG聚合物的手性特性有关。在类似实验条件下,PBDG(PBLG的对映体,具有相反手性)可以形成相似形貌的左手性三角形纳米环。

该三角形纳米环在溶液中能稳定存在,且其形成过程可逆,可通过调节有机溶剂和水的比例实现圆形纳米环与三角形纳米环之间的可逆转变。

机理研究表明,向溶液中加入水时,疏水PBLG界面上升,组装形成纳米纤维;进一步提高水量后,聚合物分子链收缩产生内部应力,驱动纳米纤维卷曲形成圆形纳米环;继续提高水量后,聚合物链趋向于更紧密堆积,内部应力促使圆形环变形折叠最终形成三角形结构。在更高的水量下,三角形拓扑结构保持不变。

相关论文信息: <https://doi.org/10.1002/anie.202508525>

中山大学等

温度每升高 1℃，帝企鹅就要搬家 73 米

本报讯(记者朱汉斌 通讯员曹宁)中山大学遥感科学与技术学院教授程晓团队联合美国蒙大拿大学研究人员,创新性构建了“粪便指数”,借助卫星对帝企鹅粪便集中进行观测,成功追踪了帝企鹅过去11年的繁殖栖息地变迁情况。近日相关成果发表于《环境遥感》。

“我们的研究结果显示,受气候变化影响,帝企鹅正频繁地‘搬家’。”论文第一作者、中山大学遥感科学与技术学院博士研究生林泓介绍,帝企鹅无法像鸟类那样飞行,也不会筑巢,只能依赖稳定的冰面进行繁殖。一个帝企鹅家庭今年可能在某片区域养育宝宝,明年就可能搬到几公里之外。

林泓开发了一种基于卫星影像的自动检测方法,通过检测帝企鹅粪便,以30米的空分辨率绘制出帝企鹅繁殖地,精度高达94.8%。借助这一“天眼”,研究团队系统追踪了2013年至2023年间帝企鹅繁殖栖息地的变迁。

研究发现,部分帝企鹅较为幸运,其栖息地周边有岛屿、高大冰崖或搁浅冰山作为屏障,附近还有适合捕食的开放水域。这些地方形成了低风速的“微气候”,既安全又便于觅食,因此这些帝企鹅很少搬家,栖息地通常能连续使用长达7年。然而,在缺乏稳定屏障的区域,如南极半岛的斯迈利岛,帝企鹅的家园更容易遭到破坏。这表明,气候变化与地貌特征、食物供给相互叠加,共同影响帝企鹅的生存。

研究显示,高温、暴雪、风暴和低频冰密集度这4种极端气候事件,对帝企鹅栖息地的占据时长和分散程度有显著影响。受这些气候因素影响的帝企鹅群体,其“家园”分布通常更为破碎、短暂。温度每升高1℃,帝企鹅栖息地平均迁移距离增加73米;降雪每增加1厘米,迁移距离增加66米;风暴和低频冰密集度对栖息地迁移的影响则呈现出非单调性。

相关论文信息: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114984>