

# 昆虫翅膀演化百年悬案迎来有力解答

■本报记者 张楠

蝴蝶在花丛中起舞，蜜蜂穿梭采蜜，蜻蜓掠过池塘水面，蜉蝣在黄昏短暂飞舞……

这些我们习以为常的小虫子，其实藏着一个个困扰了昆虫学家 100 多年的“终极谜题”：地球上最早学会飞行的昆虫是什么模样？蜉蝣、蜻蜓与新翅类昆虫之间，究竟谁与谁亲缘更近？

这个被称为“古翅类难题”的百年悬案，终于迎来迄今最有力的解答。

中国科学院南京地质古生物研究所研究员蔡晨阳团队联合南京师范大学生命科学院教授周长发团队，利用大规模系统发育基因组学与化石证据，确认了“古翅类”的单系性，描绘出有翅昆虫起源与早期演化的清晰图景。近日，相关论文发表于美国《国家科学院院刊》。

## 昆虫翅膀的“家族罗生门”

昆虫是地球上物种多样性最高的动物类群，已命名物种超过 100 万种，占全部已描述动物物种总数的一半以上。从热带雨林到荒漠戈壁，昆虫的成功离不开一项关键革新——翅的出现。翅膀赋予昆虫高效的逃逸机制、强大的扩散能力，使它们得以占领三维空间。然而，有翅昆虫的早期演化关系长期悬而未决。

蔡晨阳告诉《中国科学报》，现存有翅昆虫大致分为三大支系：蜉蝣目、蜻蜓目和新翅类。

蜉蝣就是人们常说的“朝生暮死”的虫子，幼虫在水中生活数年，一旦羽化为成虫，寿命往往只有短短数小时到几天，唯一的使命就是交配繁衍。蜻蜓目是自然界的顶尖飞行高手，拥有极强的空中操控能力，可以在空中急停、悬



现生蜉蝣。 课题组供图

停、倒飞，捕猎成功率极高。二者的共同特点是翅膀无法折叠，停息时只能保持平展或竖立，被统称为“古翅类”。

新翅类则包含蝴蝶、蜜蜂、甲虫、苍蝇、蚊子等绝大多数我们熟悉的昆虫。它们拥有一项独门“黑科技”：翅膀可以向后折叠，安静地收在背部与腹部上方。围绕这 3 支类群的亲缘关系，学界长期存在 3 种假说：古翅类假说，蜉蝣与蜻蜓为姊妹群；交叉翅类假说，蜻蜓单独分出，蜉蝣与新翅类更近；后翅类假说，蜉蝣单独分出，蜻蜓与新翅类更近。

百余年来，形态化石与分子数据轮番登场，始终无法形成统一结论。

## “小虫”补齐关键拼图

“想要解开这个百年谜题，单纯依靠肉眼观察化石形态或少量基因片段远远不够，必须依靠大规模的基因组数据，尤其是补齐过去长期缺失的关键类群。”蔡晨阳表示。

破局的关键，藏在水边那些朝生暮死的小虫身上。

蜉蝣是古翅类的两大代表之一，但全球蜉蝣基因组资源长期匮乏，导致大量研究因取样不足而结论不稳。

这一次，研究团队充分利用我国丰富的现生蜉蝣物种资源，一次性新测定了 16 种本土蜉蝣的核基因组，让这个长期被忽视的关键类群首次实现规模化基因组覆盖。

有了这块缺失已久的拼图，团队整合了 101 种昆虫的基因组与转录组数据，筛选出 1367 个通用单拷贝直系同源核基因，构建两套独立的超大氨基酸矩阵。他们同时采用串联法、溯祖法，搭配位点同质性、异质性等多种演化模型，反复开展拓扑检验与模拟分析。

多重独立分析结果高度一致：蜉蝣目与蜻蜓目确实是亲缘很近的“亲姐妹”，二者共同构成古翅类，整体作为新翅类的姐妹支系。

那么，为什么过去的研究总是“各执一词”？团队通过信号解剖与数据模拟找到了根源。“通俗地说，不同基因片段保留了不一样的远古“记忆碎片”，科学家抽到的碎片不同，得到的结论自然不同。”蔡晨阳介绍说。

最后一块拼图来自化石。研究选取 13 个可靠的昆虫化石作为时间校准点，开展分子钟分歧时间估算。结果显示，现存有翅昆虫的共同祖先在早泥盆世已经出现；而其中蜉蝣与蜻蜓的共同

祖先则要到晚泥盆世才分化形成。这意味着，早在泥盆纪的远古陆地，昆虫就已经飞上天空，远远早于脊椎动物演化出飞行能力。

## 一次起源，两条道路

这项研究不仅解决了古翅类难题，更重塑了人们对昆虫翅膀演化的理解。同时，研究证实了一个关键结论：有翅昆虫在整个演化历史中只起源过一次，但此后，两支类群走上了截然不同的道路。

新翅类演化出一套精巧的微型关节结构——第三腋片。依靠这块小骨片上附着的肌肉，昆虫可以旋转翅基，将后翅折叠收于腹部上方。

这一创新带来了巨大的生态优势：休息、爬行、钻缝隙时，折叠翅膀可保护翅膜，极大拓展生存空间，为石炭纪之后新翅类的爆发式大辐射奠定了形态与生态基础。

而古翅类则选择了另一条路线。它们没有演化出折叠翅膀的腋片关节，而是各自特化出刚性、稳定的翅基结构。蜉蝣依靠宽大的翅膀实现滑翔；蜻蜓则依靠这套刚性翅基，完成高速、高机动性的空中捕食飞行。

两种截然不同的飞行方案，都源自同一次翅膀起源事件，只是在后续演化中走向了不同方向。

蔡晨阳表示，团队下一步将继续攻克昆虫系统学领域尚未彻底厘清的重要昆虫类群内部演化问题，例如蜜蜂、蚂蚁、胡蜂等膜翅目昆虫类群，以及苍蝇、蚊子等双翅目昆虫类群。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1073/pnas.2614706123>

# 我国建成全球首个一体化大型模式动物科技基础设施

本报讯(记者李晨、张楠)10 月 22 日,受国家发展和改革委员会委托,教育部会同中国科学院在北京组织召开了模式动物表型与遗传研究国家重大科技基础设施项目(以下简称模式动物重大设施)验收会。

模式动物重大设施是国家“十二五”期间部署的重大科技基础设施项目之一,中国农业大学和中国科学院昆明动物研究所为共同项目法人单位,分别在河北涿州(猪设施)和云南昆明(灵长类设施)建设。该项目主要建设模式动物生产与培育、表型分析、遗传分析、信息处理与智能自动化管控 4 个系统,构建了从分子到细胞、从组织到整体、从胚胎发育到成体行为的全方位研究体系,实现了模式动物研究的标准化、规模化、自动化、智能化、精准化深度融合与技术范式革新。

模式动物重大设施首席科学家,中国科学院院士、清华大学教授孟安明介绍,这是全球首个“遗传—表型—临床”一体化大型模式动物科技基础设施。模式动物重大设施覆盖了普通级与 SPF(无特定病原体)级猪及灵长类动物培育与生物安全保障体系;搭建了全球首个跨尺度、多维度、多模态表型分析及高通量遗传分析平台,具备国际领先、自主可控的规模化基因修饰猪与灵长类动物

## 科学家用纳米级“积木”搭出超强材料

本报讯(记者崔雪芹)近日,浙江大学副教授许震、教授高超团队与清华大学教授徐志平团队合作,在石墨烯膜中发现了“层间折叠卡扣”的新结构与新机制,首次实现了石墨烯膜的高强、高韧与高弹性“三合一”性能突破。相关研究成果发表于《自然》。

高超、许震团队经过长期研究,在一次“意外”的探索实验中,采用低温氧化策略成功制备出表面具有丰富折叠结构的新型多层氧化石墨烯片。这种材料具有独特的内外差异结构:表层形成折叠条带,内部则保留石墨的有序堆叠结构。该纳米片平均厚度为 9.1 纳米,表面折叠厚度在 2 纳米左右。

与传统平直堆叠不同,这些折叠结构能够在层间形成软的“机械卡扣”,使材料在受力时能够发生可逆的弹性形变且有效阻止层间滑移失效。团队以此为“积木单元”,组装出层间彼此咬合的石墨烯膜。该膜的拉伸强度能够达到 2.9 吉帕,韧性达到 84.5 兆焦每立方米,并具有高达 5%的弹性应变,实现了强度、韧性和弹性的协同提升,打破了传统层状材料力学性能的纪录。

创制能力;构建了模式动物全生命周期数字管控平台,实现了从动物资源保藏、模型创制、表型检测、遗传测定到数据挖掘的全链条技术体系。

与此同时,项目团队成功研制了国际一流、国内首创的“灵长类动物磁纳米粒子—CT 融合成像设备”“大动物正电子发射计算机断层显像设备”等高端科学仪器,有效实现了国产化替代。

试运行期间,模式动物重大设施已产出一批标志性成果:成功创建了阿尔茨海默病、帕金森病、肥厚型心肌病、新冠肺炎等系列基因修饰动物模型;牵头发起“灵长类基因组计划”,成果入选中国生命科学十大进展;牵头组织的“国际模式猪科学计划”列入科技部重点专项储备项目;建立的精准繁育育种技术方案,已服务广东、福建及云南等地 20 余家头部企业。

国家验收委员会同意该项目通过国家验收,认为该项目按指标、全面、高质量完成了国家发展和改革委员会批复的各项建设任务,建成了国际先进、系统完备、特色鲜明的猪和灵长类动物表型与遗传研究设施。模式动物重大设施在模式动物资源保育、基因组解析、基因修饰动物模型构建、表型测定设备研制等方面均达到国际先进水平。

联合团队通过力学计算和分子模拟发现,材料受拉时相邻折叠逐渐接触并相互挤压,将部分“拉力”转化为层间“推力”,形成“Pull-to-Push(由拉转推)”的力链转换。基于此,团队提出“shear-lock(剪切互锁)”力学模型,实现强度与韧性的协同提升,并拓展了材料在大应变、高应力下的弹性性能。

据研究人员介绍,联合团队首次实现在单个二维片层中构筑原子尺度空间折叠构型,制备出表层折叠、芯层规整堆叠的新型多层石墨烯片,并以此作为组装基元,实现从“平面堆叠”向“空间构型组装”的转变,为二维片层材料的空间构型设计开辟了新范式。团队还打破了传统二维材料强度与韧性力学性能的边界,构筑出兼具高强度、高韧性和高弹性的石墨烯薄膜。该薄膜展现出优异的综合力学性能,为航空航天轻量化结构、高性能复合材料及抗冲击防护装备等领域提供了新的材料设计思路。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1038/s41586-026-11109-y>

## 硬 X 射线自由电子激光装置实现首次出光

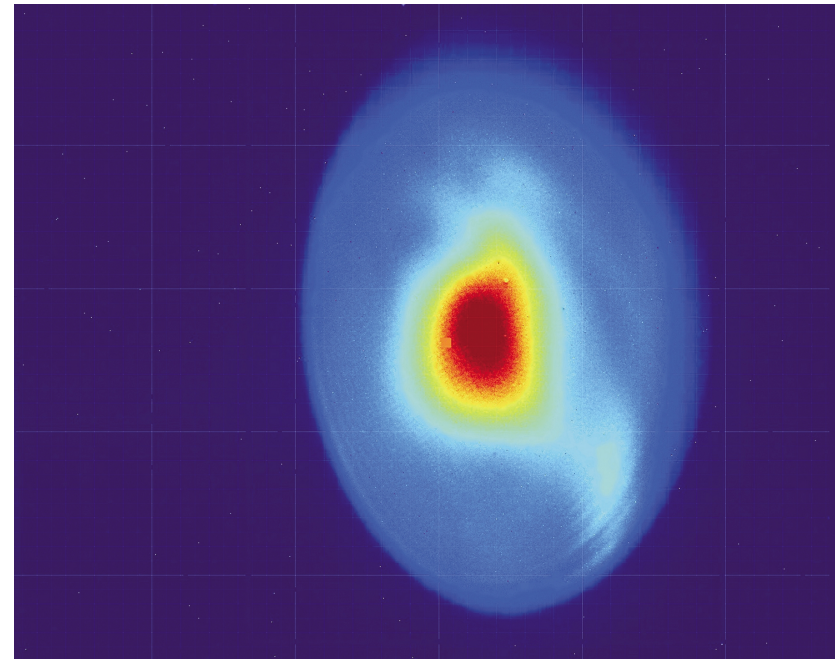
本报讯(记者江庆龄)近日,位于上海的国家重大科技基础设施——硬 X 射线自由电子激光装置(SHINE)建设取得突破性进展。该装置采用 4 吉电子伏特(GeV)连续波超导直线加速器产生的电子束,驱动 18 台 4 米长、磁周期为 55 毫米的波荡器线,成功实现自由电子激光首次出光。

据了解,全球仅有两台这种类型的高重频硬 X 射线自由电子激光装置,另一台是美国正在建设的直线加速器相干光源二期高能升级装置。SHINE 预计于 2027 年底建成投用。建成后,SHINE 加速器的电子能量将达到 8GeV,首期两条波荡器线可产生光子能量覆盖 0.2~15 千电子伏特的自由电子激光辐射,光脉冲的长度可短至飞秒量级,最高重复频率可达 1 兆赫兹。装置拥有纳米级的超高空间分辨能力与飞秒级的超快时间分辨能力,可以精准捕捉原子分子快速动态变化过程,将为生命科学、量子

材料、未来能源等前沿科学领域提供微观结构解析、超快动力学研究等尖端研究手段。此外,SHINE 还将建成国际首个基于 100 拍瓦超强超短激光的实验站,实现超强激光与自由电子激光的结合,为极端强场物理、高能量密度物理等研究提供前所未有的实验条件。

SHINE 于 2018 年 4 月启动建设。上海科技大学为装置建设法人单位,牵头统筹整体建设规划,全过程工程管控、质量安全管理及后续运行开放,主要承担装置土建工程、5 个实验站以及部分光束线的建设任务。中国科学院上海高等研究院主要承担加速器、波荡器、公用设施及部分光束线的建设任务。中国科学院上海光学精密机械研究所主要承担极端口物理线站建设任务。

►SHINE 首次出光。上海科技大学供图



## 全球排放减缓,但本世纪中叶仍将突破 2℃升温阈值



本报讯 10 月 21 日,联合国环境规划署(UNEP)发布了应对气候变化进展的年度盘点报告——《2026 年排放差距报告》(以下简称报告)。报告指出,尽管去年全球温室气体排放已经放缓,但除非减排大幅提速,否则到本世纪中叶,平均气温仍将迅速突破 2℃升温阈值。

2015 年,《巴黎协定》提出,到本世纪末,应将全球平均气温较工业化前水平升高幅度控制在 2℃之内,并为把升温幅度控制在 1.5℃内而努力。

“全球升温超 1.5℃已无法避免,后果是毁灭性的。”联合国秘书长古特雷斯在公布报告时说,2026 年极端热浪、

大规模野火和致命洪水已扰乱世界大部分地区。

科学家估计,按照现行政策,本世纪全球平均气温较工业化前水平提升 2.6℃至 2.8℃,大幅超过《巴黎协定》提出的 2℃上限。即使各国兑现所有现有的减排承诺,报告预测平均气温升温幅仍将达 2.1℃。

尽管 1.5℃目标已无法实现,报告提出仍有可能出现气候过冲,即在特定时间节点前回到或低于控温目标,通过快速脱碳和扩大二氧化碳减排规模,将温度成功降下来。

报告也带来了一些好消息。初步预估显示,2025 年全球温室气体排放将与 2024 年大致相同,甚至略低于后者。这主要归因于土地利用带来的排放减少,尤其是 2024 年发生前所未有的野火后,2025 年由火灾导致的二氧化碳

排放下降。这将是自新冠疫情以来排放首次出现下降,可能代表着排放趋于平稳。但研究人员警告称,仅一年的下降并不足以确定这会是持久性的转变。

“全球排放必须下降几个百分点,才能确定已经达峰。”国际研究机构 Lauri Myllyvirta 说,“在那之前,一个特别炎热的夏季或其他周期性变化都可能使排放超过前一个峰值,即使结构性趋势是下降的。”

另一个令人鼓舞的趋势是可再生能源的使用比例正在快速提升。自 2015 年以来,全球可再生电力装机容量增量约为预期增量的 3 倍,其中太阳能光伏装机容量增量为预期的 7 倍。报告数据显示,总体上,部署可再生能源避免了全球二氧化碳排放量大幅增长,其中太阳能光伏和风能在 2025 年贡献了

41 亿吨二氧化碳的减排量。

但报告强调,即便如此,全球减排力度仍然不足。古特雷斯呼吁,各国政府应加快行动,通过摆脱化石燃料、扩大清洁电力和扭转森林砍伐趋势等实现减排。



2024 年至 2025 年,全球温室气体排放大致持平。 图片来源:Costfoto

■张平文

近日,在北京举办的 2026 国际科学理事会中期会员大会暨北京科学对话活动开幕式上,《中国基础研究发展报告(2026)》正式发布。这份汇聚多方数据、吸纳国际评审意见的报告,为观察我国基础研究发展现状提供了新视角。

基础研究天然具备高度国际性,关乎全人类科学进步。当前,我国基础研究成果的规模持续扩大、科研力量不断壮大,这离不开国家长期稳定的投入和对青年科研人员的持续支持。不过,基础研究是一场远征,要有足够的耐心,颠覆性成果往往需要漫长的时间沉淀,不能追求立竿见影。兴趣导向与战略导向的研究,也不能用一把尺子衡量。过度苛求“有用”,反而会扼杀颠覆性创新的萌芽。

同时我们也要看到,现实命题依然摆在面前:过度竞争的评价生态,容易让青年科研人员追逐短期成果;人工智能(AI)给学科发展和人才培养带来冲击;全球科研流动受阻,也让国际交流面临更多壁垒。这些问题,都需要在制度环境和科研生态上继续破题。

正视短板:既要厚待“冷板凳”,也要理性看待科学奖项

我国基础研究快速崛起,获得国际科学界广泛关注,但前行路上依然存在必须直面的现实课题。

社会公众常常热切关注诺贝尔奖、菲尔兹奖这类国际顶尖科学奖项。我认为,不论是大众,还是科技工作者,看待科学奖项都应保持理性与耐心。取得高水平成果只是获奖的必要条件,并非充分条件。达到同等水平的科学家数量众多,评奖本身带有评价因素。同时,不同奖项存在明显时间差。

例如,菲尔兹奖限定获奖者年龄在 40 岁以下,成果产出后短时间内就有机会参评;而诺贝尔奖存在巨大滞后效应,重大成果往往要经过几十年的实践检验才会获奖。只要持续稳定支持基

础研究,重大成果与荣誉自然会水到渠成,社会层面不宜急于求成。

更深层的挑战来自科研评价生态。基础研究是“坐冷板凳”的事业,颠覆性成果往往需要漫长的积淀。科研评价如果过于强调短期成果和竞争性指标,容易使青年科研人员承受较大的即时产出压力,不利于他们潜心开展长期探索。

破解这一困局需要双向发力。一方面要大力弘扬科学家精神,传承老一辈科学家甘于吃苦、为国担当的作风,引导科研人员摒弃急功近利心态;另一方面要完善制度环境,给青年学者提供稳定、宽松的科研土壤。颠覆性基础研究,有的需要几十年甚至上百年才能显现社会价值,今天我们国家已经具备实力去支持这类长周期探索。

面向大众科普层面,社会也需要建立对基础研究的正确认知。对于前沿导向的探索性基础研究,不宜反复追问短期应用价值,过度苛求“有用”反而会扼杀颠覆性创新的萌芽;而战略导向、市场导向的基础研究本身就从国家战略、产业现实问题中提炼而来,天然具备现实价值。不同类型基础研究应当分类看待,不能用同一套评价标尺衡量。

AI 浪潮来袭:拥抱技术变革,守住科研底线

AI 正全方位重塑科研范式,对包括数学在内的几乎所有学科、高等教育体系都造成颠覆性冲击。我是研究数学的,也观察到当下科研圈出现一种现实矛盾:不少数学教授开始顾虑怎么培养研究生——太难的题,学生做不出来,难度适中的题,AI 又可以快速给出结果。部分青年学者也很困惑,担忧数学学科的发展前景。但 AI 本身根植于数学算法与模型,AI 底层机理的破解恰恰离不开数学,这正是数字时代摆在数学界面前的复杂命题。(下转第 2 版)