

挑战复杂流动世纪难题

“聚焦前沿科学问题”系列报道之五

◎本报记者 李林旭

大风中的飞沙走石、江河中的险滩急流、火山喷发的熔岩巨龙、大气中的乱云飞渡、星系中的黑洞喷流、浩瀚宇宙中的星际穿梭、热核聚变中的等离子体流……这些都是自然界和工程领域广泛存在的多尺度非平衡流动现象。

作为一个困扰科学界数百年的难题，复杂流动现象背后的机理至今仍未被攻克，其中湍流更是被美国物理学家费曼称为“经典物理学中最后一个尚未解决的重要问题”。而在破解神秘流动谜团的道路上，一群科学家留下了自己的名字——奥斯本·雷诺、路德维希·玻尔兹曼、伊利亚·普里高津、冯·卡门、钱学森、周培源、王承书……

如今，解决这一世纪难题的接力棒交到了当代科学家手中。由中国科协发布的2024十大前沿科学问题中，由中国力学学会推荐的“多尺度非平衡流动的输运机理”位列其中。这一问题当前研究进展如何？未来如何突破？科技日报记者就此采访了相关专家学者。

常规流体力学无法解释

从微观角度来看，流动的本质是分子的运动与相互作用。然而，巨量分子运动与碰撞的系统效应在宏观上表现出多尺度、非平衡特征，形成复杂的流动结构。尤其是稀薄气体和湍流，存在着显著非平衡流动现象。

“多尺度非平衡流动的输运机理是一个十分具有挑战性的前沿基础科学难题。”该问题提出者、香港科技大学数学系主任、冠名教授徐昆接受记者采访时说，这类流动系统非常复杂，涉及不同空间尺

度、不同时间尺度和流动的非平衡。现有的经典理论和模型在处理非平衡效应时存在局限性，需要建立更加基础和统一的理论框架来描述和预测这类复杂流动。

因其复杂，多尺度非平衡流动经常给人一种神秘的感觉；因其难解，这种流动又平添了一种莫测的色彩。

“这类流动之所以让人感到神秘莫测，是因为它的复杂性、多样性和挑战性。”西北工业大学航空学院教授钟诚文告诉记者，它的流动结构极其复杂，存在形式极其多样，精准预测极具挑战。

“在极高速、极高温、微纳尺度等极端条件下，存在着强烈的多尺度非平衡流动现象，且存在多物理化学场耦合，这时常规的流体力学理论已不再适用，亟须建立新的理论和模型。”中国科学院力学研究所研究员张勇豪向记者解释，这一前沿科学问题并不仅限于流体力学范畴，还涉及数学、物理、化学、材料等诸多学科。

徐昆认为，对这一问题的探索应聚焦多尺度非平衡流动“是什么”“为什么”“有什么”这三大问题，即多尺度非平衡流动的具体表现特征、形成和演化机制，以及不同流动产生非平衡的机理是否具有共性。

应用场景涵盖诸多领域

中国力学学会的推荐词写道：开展稀薄气体、湍流等多尺度非平衡流动现象研究，探索非平衡流动输运机制，建立气体分子或流体微团间相互作用与宏观流动特性的联系，能够增强对复杂非平衡流动形成机理的认识，为航空航天关键技术奠定理论基础。

飞得更高、更快、更远、更稳是人类不懈的追求。从莱特兄弟首次实现动力飞

行拉开人类翱翔天空的大幕，到嫦娥六号实现人类首次月球背面采样返回，航空航天发展的每一步都与力学、数学等基础科学研究密切相关。

“航空航天领域是多尺度非平衡流动问题研究的一大典型应用场景。”中国科学院大学工程科学学院教授王智慧说，当前，新型空天飞行器研发方兴未艾。对多尺度非平衡流动问题的深入研究，有助于设计出更先进的空天飞机、更高级的宇宙飞船、更精准的再入飞行器。

对这一前沿科学问题的研究，不仅在航空航天领域至关重要，在一些关系国计民生的工业场景中也有迫切现实需求。“它在物理上非常深刻，在数学上非常有难度，在工程上非常重要。”南方科技大学力学与航空航天工程系副教授吴雷说，核物理领域也是多尺度非平衡流动问题研究极其重要的应用场景之一，惯性约束核聚变过程就与这一问题密切相关，其在湍流、稀薄流和非平衡辐射相互作用的场景，亟须发展新模型和新方法。

“小至微纳制造，大至深空探测，都需要对多尺度非平衡流动问题进行更深入探索。”徐昆说，在微机电系统、天体物理、环境等众多领域，这一问题研究的突破可为相关应用场景提供理论基础和设计指导，推动工程应用与技术创新。

理论计算实验缺一不可

当前，对多尺度非平衡流动问题的研究主要包含三个方面：理论分析和建模、数值模拟、实验测试和分析。

近年来，我国科学家在这些领域作出不少实质性贡献，提出和发展了统一气体动力学格式、非平衡相变流动的分子动力学模型、多尺度流动的高性能算法、受限空间非平衡输运理论、高温非平

衡流

衡流，再

衡流，再

衡流

衡流

衡流

衡流

衡流

衡流

衡流

衡流

我研究团队开发出太阳能提锂新技术

科技日报讯（记者金凤）记者近日从南京大学获悉，该校教授朱嘉、中国科学院院士陈骏等学者开发了一种界面光热盐湖提锂装置，该装置能高效利用太阳能，以高选择性、低能耗、低碳排放的方式从盐湖水中提取锂。相关论文近日发表于国际期刊《科学》。

作为全球能源转型中的战略性关键金属，锂广泛应用于电动汽车电池和可再生能源储能系统。盐湖型锂矿是全球锂资源的重要来源，但由于复杂盐湖化学条件和极高环境保护要求，难以大规模开发利用，这成为我国锂矿开采的难题。

论文共同第一作者、南京大学特聘研究员宋琰介绍，青藏高原拥有极其丰富的盐湖资源，蕴藏着巨大锂储量，发展绿色、环保、可持续的盐湖提锂新技术，具有重要经济价值和战略意义。

经过多年摸索后，团队注意到自然界中盐生植物高效提取特定物质的能力。在盐碱环境下，盐生植物能通过蒸腾作用，选择性地吸收盐分和水分。宋琰说，这种“选择性吸收—储存—释放”机制，使盐生植物能在极端盐碱环境中维持正常的新陈代谢和生长。这为开发高效、可持续的盐湖锂资源提取技术提供了重要仿

生学

生学

生学

生学

生学

生学

重庆特异埋藏化石库发现4.36亿年前鱼化石

“从鱼到人”演化史补上初始一环

◎本报记者 雍黎

重庆特异埋藏化石库又有新发现。近日，重庆市规划和自然资源局发布消息，该局和中国科学院古脊椎动物与古人类研究所牵头开展的重庆特异埋藏化石库新化石材料研究再获新进展，研究人员发现了无颌鱼类新科成员——双叉苗家鱼。目前，该研究论文在线发表于《古

脊椎动物学报》。

新增土家鱼科

重庆特异埋藏化石库由重庆市规划和自然资源局及中国科学院院士、中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室主任朱敏团队合作发现，该化石库的发现代表我国在世界有颌类起源与早期演化研究方向取得重大突破，大大改变了人

们对脊椎动物早期演化的传统认知。相关论文在2022年9月以封面论文的形式发表于《自然》，引起国际学界广泛关注。

本次发现的盔甲鱼类双叉苗家鱼，为重庆特异埋藏化石库再添无颌鱼类新成员。研究发现，双叉苗家鱼属于盔甲鱼类中的真盔甲鱼类，具有真盔甲鱼类典型的细长中背孔与头甲侧线系统排列方式，其头甲侧管末端呈现出二分叉状态，种名“双叉”由此得来。

重庆地质矿产研究院正高级工程师、矿产资源分院副总工程师陈阳介绍，团队通过详细的比较解剖学研究，发现双叉苗家鱼和灵动土家鱼关系密切，具有中背管短、侧管末端分叉等相似特征。系统发育分析显示，双叉苗家鱼与灵动土家鱼共同组成一个单系类群，被命名为土家鱼科。

陈阳说，土家鱼科为探索我国本土物种——盔甲鱼类的身体结构演化提供了方向，为认识志留纪鱼类侧线系统的形态、躯体侧线系统与头甲侧线的连接方式提供了新的关键科学信息。

土家鱼科已灭绝近4.36亿年，是继洞洞鱼科之后，重庆命名的第二个科级古生物分类单元。土家鱼科的建立为脊椎动物“生命演化之树”增添了粗壮枝干。

探究四肢雏形

“从鱼到人”究竟是如何演化的？学界普遍认为，有颌鱼类其中一支登上陆

地演化出两栖类，再演化出爬行类，其中的一支似哺乳爬行类进化为哺乳类。

这一过程中的重要一环是，在泥盆纪，肉鳍鱼类的偶鳍演化为最早的四肢，登上了陆地，变成了两栖类。但偶鳍何时出现，又如何演化？这是困扰科学家多年的问题。所有的有颌类都有偶鳍，这证明偶鳍和颌骨的出现时间可能较为接近，而此前发现的所有无颌甲鱼类都没有偶鳍，所以如果能在无颌类中找到类似偶鳍功能的器官，对探索偶鳍起源至关重要。

重庆特异埋藏化石库中发现了全球第一条有完整身体保存的盔甲鱼类化石——灵动土家鱼，为探索偶鳍的起源提供了关键化石证据。灵动土家鱼之后，此次在双叉苗家鱼身体腹面两侧同样发现了成对鳍褶，这可能代表着腹部鳍褶在盔甲鱼中广泛存在。6000万年以后，这对鳍褶可能演化为登上陆地的四肢，成为脊椎动物称霸地球的“左膀右臂”。因此，鳍褶可能是脊椎动物“四肢的雏形”。

“重庆特异埋藏化石库是生命科学和地球科学的一个‘无价之宝’。”朱敏说，化石库中4.36亿年前的远古鱼类，以特异埋藏的方式被完好保存下来，让科研人员有机会一睹数亿年前脊椎动物“远祖”的奇特面貌，有机会研究一些过去未知的演化信息，如颌的起源、偶鳍雏形等身体构型的早期演化，填补“从鱼到人”演化史上缺失的初始环节，改变对生命演化的传统认知。

新知

◎本报记者 陆成宽

古人是怎样发酵奶制品的？古DNA研究给出答案。

记者近日从中国科学院古脊椎动物与古人类研究所获悉，利用古DNA技术，我国科研人员在国际上首次开展古代奶制品全基因组研究，揭示奶制品发酵技术的交流扩散历史。相关研究论文在线发表于国际学术期刊《细胞》。

食品发酵是人类历史上最早利用微生物进行生产活动的实践之一，发酵奶制品可能是最早出现的发酵食品。尽管人类食用发酵奶制品历史悠久，但目前人们对应用发酵微生物的历史，以及发酵微生物本身的演化过程知之甚少。幸运的是，古DNA技术为破解这些谜题带来了新希望。

此次，中国科学院古脊椎动物与古人类研究所研究员付巧妹团队联合中国科学院大学人文学院教授杨益民，以及新疆文物考古研究所、新疆大学、国家文物局考古研究中心、北京大学第三医院等单位科研人员，对新疆小河墓地出土的“最古老奶酪”展开了系统性古微生物基因组研究。

新疆小河墓地出土的“最古老奶酪”，此前已被科研人员鉴定为开菲尔奶酪，它源自开菲尔酸奶，由类似酒曲的开菲尔粒在奶中发酵而成。然而，经岁月冲刷，“最古老奶酪”中的乳酸菌含量仅有0.43%—0.55%，很难捕获。付巧妹团队历经11年探索，自主设计了乳酸菌全基因组位点探针，从样本中能捕获富集到64%—80%的乳酸菌，让“最古老奶酪”的全基因组研究成为可能。

本项研究中，科研人员从距今约3500年的3例古老奶酪样本中，提取出高质量的古代开菲尔奶酪中的乳酸菌基因组。研究发现，样本中的微生物群落与欧洲菌株属于不同分支，这揭示开菲尔乳酸菌另一独立的、东亚内陆传播路线。

同时，通过探索开菲尔乳酸菌适应性演化历程，科研人员厘清了新疆塔里木盆地古人群的生活方式、技术文化的交流和发展过程，以及古人群与开菲尔乳酸菌的协同演化历史。

对此，国际相关专家评价，“这是很罕见的挖掘全新数据的古DNA研究”“这一首例来自考古样本的共生微生物基因组研究意义重大，为欧亚草原中部人群的迁徙交流与微生物驯化历史带来新认识”。

付巧妹介绍，这项研究以与人类活动和生业模式息息相关的共生微生物为突破口，用前所未有的古分子证据，揭开古人群对微生物的应用驯化和传播交流历史，从分子机制层面厘清相关菌株的引入、传播和演变历程，为深入理解相关人群技术文化的交流发展与环境高度动态的相互作用，提供了全新思路和独特视角。



中国科学院古脊椎动物与古人类研究所研究员付巧妹在该所古DNA超净室中对奶酪样本进行实验。

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所供图

新研究发现 灵长类特有细胞亚型

科技日报讯（记者罗云鹏）记者近日从华大生命科学研究院获悉，该院与中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心等单位的科研人员，进行了跨物种小鼠时空组学研究，并发现灵长类特有细胞亚型，这种细胞亚型或与学习等高级认知功能密切相关。相关研究论文近日发表于国际学术期刊《科学》。

研究中，科研人员通过时空组学和单细胞组学技术，构建出猕猴、狨猴和小鼠的小脑空间转录组图谱。图谱就像详细的高清小脑“地图”，展示了小脑中各种细胞的种类、基因表达情况、空间分布以及它们之间的相互关系。通过深入分析，研究人员在高清小脑“地图”上发现了两种新的细胞亚型——在灵长类动物（猕猴和狨猴）小脑中存在的特殊浦肯野细胞亚型，其并不存在于小鼠小脑中。

科研人员发现，这两种亚型的显著区别之一在于GRID2基因的表达水平。在GRID2基因高表达的浦肯野细胞中，与学习相关的神经信号通路的基因表达显著更高，这意味着该种细胞亚型可能与学习等高级认知功能密切相关。

此外，在研究中，科研人员通过对小鼠、狨猴和猕猴磁共振功能成像数据进行数据分析，发现3个物种在小脑前、后叶不同空间位置具有神经连接差异，而从基因表达梯度上来看，同样具有小脑前、后叶的显著差异。这表明基因表达与小脑皮层内的功能连接性有密切关系。

总的来说，这项研究通过构建不同物种小脑空间转录组图谱并进行深入分析，揭示了小脑结构上一些新奥秘，特别是浦肯野细胞的亚型差异以及空间转录组与功能连接的紧密关联。

据悉，这些发现将为未来进一步研究小脑的功能和相关疾病机制提供线索和方向。

古DNA研究揭开「最古老奶酪」之谜



双叉苗家鱼生态复原图。重庆市规划和自然资源局供图