

分子手术刀迭代升级 应用场景日益丰富

基因编辑，迈向精准医疗新阶段

李旭

从重组DNA到CRISPR，再到碱基与引导编辑，基因编辑的发展史，正是一部追求“越来越精准、越来越安全”的技术演进史。

从“体外修复”到“体内维修”的临床跨越

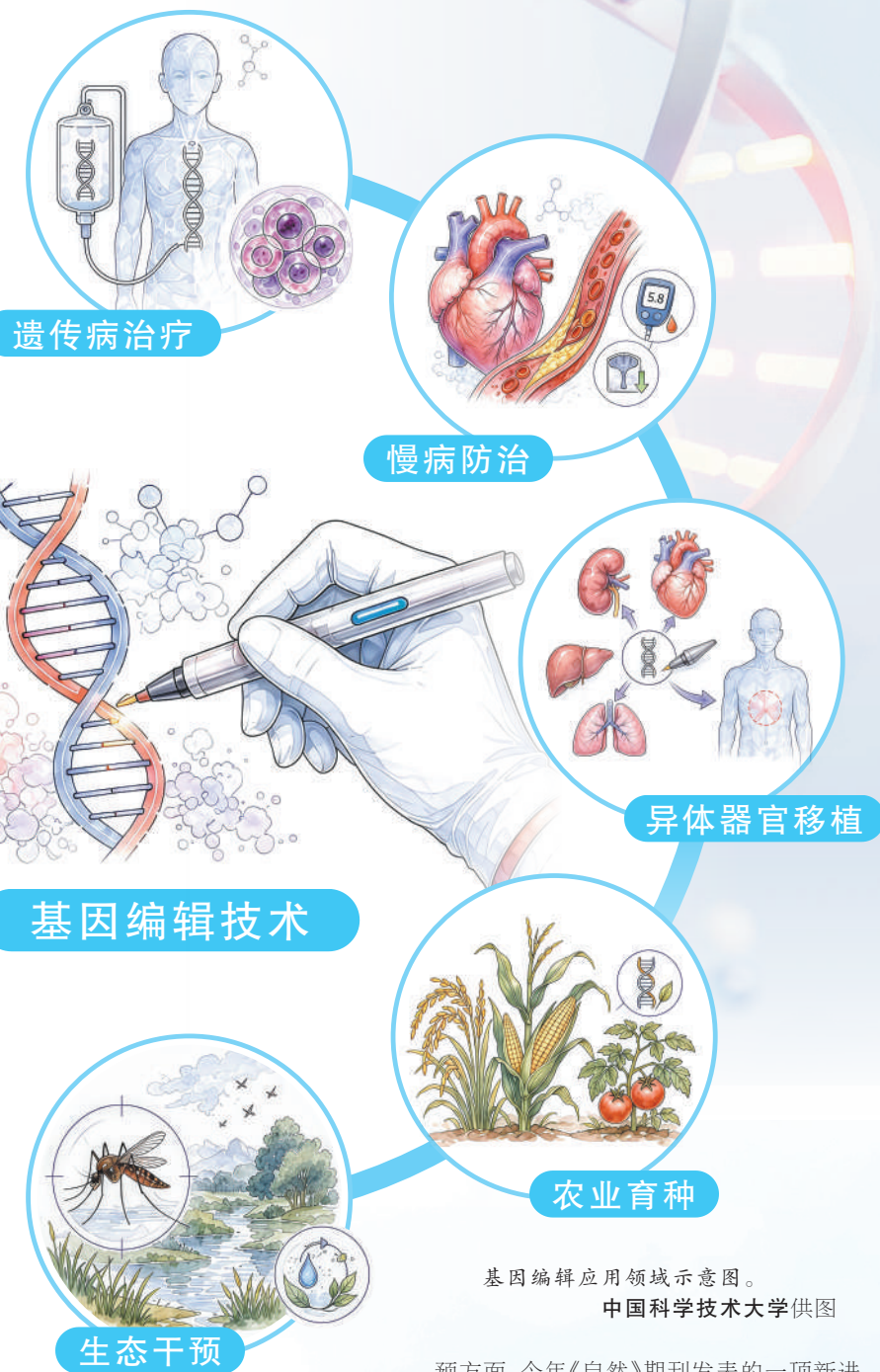
为了将这些分子层面的修改应用到患者身上，科学家们已开辟出“体外”和“体内”两条编辑路径。所谓体外编辑，是先将患者的目标细胞取出，在实验室环境里完成修改、检测和筛选，确认无误后再回输到患者体内。这种方式就像把故障汽车开进专门的修理厂，修好并检测合格后再重新上路。它的优势是可控性强、安全性高，目前主要应用于血液和免疫系统疾病。

去年12月，美国普里梅医药公司开发了一款名为PM359的细胞产品，研究人员先从患者体内提取造血干细胞，在体外精准修补其中关键基因上缺失的两个碱基，然后再回输到患者体内。修复后的免疫细胞恢复了杀菌能力，重新具备了战斗力，这被认为是引导编辑技术的首次临床应用。今年4月，《新英格兰医学杂志》发表了美国埃迪塔斯医药公司开发的体外编辑自体造血干细胞疗法reni-cel的临床数据。这种疗法用于治疗镰状细胞病（俗称“镰刀型贫血”），它使用了一种识别位点和切口形状都不同于Cas9的新一代基因剪刀CRISPR-Cas12a，通过精准修改基因开关，重新激活了患者体内原本沉睡的胎儿血红蛋白生产机制。

然而，体外编辑流程复杂，成本高昂，且不适用于肝脏、心脏等难以取出细胞的器官。因此，对于更广泛的疾病，科学家更倾向于采用体内编辑策略。体内编辑更像是派出一支精准的“维修队”，直接进入身体内部的目标组织进行现场修复。除了前文提到的中方团队开发的YOLT-101疗法，美国英捷利疗法公司于今年4月研发了一款名为lonvo-z的基因编辑新药，在治疗遗传性血管性水肿的三期临床试验中取得积极结果。这种罕见病患者因为基因缺陷，体内会过量产生一种物质，使身体面临反复且危险的水肿。这款新药只需单次静脉输注，就能进入体内把导致发病的基因“关掉”，从源头上阻止致病物质的产生。目前，该药已正式向美国食品药品监督管理局(FDA)提交上市申请。

由于要在人体内部直接作业，如何精准、安全地投递“编辑器”是成功的关键。目前，科学家常借助脂质纳米颗粒或病毒载体作为“摆渡车”。而为了让“编辑器”顺利装入容量有限的载体，如何使其小型化也成为近两年相关领域的重要攻关方向。

值得注意的是，CRISPR工具箱正在走出修复基因这一条单一路径。今年5月，美国犹他大学领衔的国际团队在《自然》期刊发表了一项新成果，将Cas12家族成员Cas12a2开发为一种“定向细胞清除工具”：它能识别目标细胞中特定的RNA信号，并在被激活后启动强烈DNA切割，使携带相应信号的癌变细胞或病毒感染细胞走向死亡。同期，《自然·生物技术》期刊发表的两项研究则显示，香港科技大学和美国佛罗里达大学团队分别用人工设计的DNA向导替代传统RNA向导，得以更稳定、更低成本地引导Cas12蛋白识别RNA



基因编辑应用领域示意图。中国科学技术大学供图

目标，用于快速疾病检测和细胞功能的临时调控。

从生命医学到其他领域的应用场景

当前，基因编辑技术的影响半径越来越广泛。在器官移植领域，基因编辑正在打破异种移植的坚冰。科学实验表明，在将猪的某些器官移植到人体时，通过基因编辑修改猪的特定基因后，可以极大降低人体免疫排斥。我国科学家已先后完成活体患者基因编辑猪辅助肝移植、活体患者基因编辑猪肾移植的早期尝试。2025年8月，中国研究团队发表了世界首个将基因编辑猪肺成功移植到脑死亡人体内的案例成果，被国际专家誉为相关领域的“一个里程碑”。2025年，FDA正式批准了首批测试基因编辑猪肾移植人体的临床试验。

在农业与生态领域，基因编辑的潜力同样令人瞩目。2025年，印度批准了首批利用基因编辑技术剪裁出的水稻品种。其最大特点是“不含外源DNA”，经过精准修饰后，这些水稻有的增强了抗旱耐盐能力，有的则实现了早熟节水。在生态干

科技大观

当前，AI(人工智能)正以前所未有的速度融入经济社会发展各领域。过去两年，全球AI应用每日处理的信息量激增近300倍，AI手机、AI眼镜、文生视频等应用已渗透到人们的日常生活，超3000万个智能体深度赋能工业制造、金融交易等，成为提质增效的新引擎。然而，随着AI设备需要传输的数据量呈指数级增长，一个关键问题随之而来：现有的网络还扛得住吗？

AI应用的爆发式增长，对移动通信网络提出了三大核心要求。首先，上传速度要更快。过去我们用网络下载音乐、电影，更关注下行速度。但现在，智能眼镜、机器人等AI终端都配备了摄像头和传感器，需要实时将图像、视频、环境数据传回云端。例如，智能眼镜需要将看到的画面传给AI分析，机器人需要将操作过程的数据反馈给云端，这就要求即使在信号最差的角度，上行速率也要从原来的5—20Mbps(兆比特每秒)至少提升至50Mbps，以确保AI能够始终快速“看清”并做出精准反应。其次，延迟要更低。许多依赖云端算力交互的AI应用，如工厂里的具身机器人，都需要终端和云端实时配合。焊接时，机器人接收指令稍有延迟，焊缝就可能出现问题；远程操控设备时，一点延迟都可能引发安全问题。这就要求网络延迟从几百毫秒缩短至几十毫秒，做到“指令一出，立刻执行”。第三，连接数量要更多。未来的智慧城市，从街头路灯到安防巡检，各类终端均需实时在线，每平方公里需要连接数千个终端。就像给城市装上灵敏的神经，每一个角落都能实时传递信息，这样才能实现精准治理。

这些现实需求，既对移动通信提出新课题，更打开了价值跃升的新空间。当前，6G全球统一标准正处于凝聚共识的关键定义期，首版技术规范预计于2029年一季度后正式冻结。届时，技术纲领确定后，核心指标与演进路径将就此展开。与此同时，AI发展的浪潮滚滚向前，产业需要一个既能即时响应智能需求，又能无缝衔接未来的频段。U6GHz(6千兆赫兹频段的上半部分)是目前业界公认的“黄金频段”，兼具广覆盖优势和大量特性，就像一条宽敞又好用的信息高速公路，刚好能满足AI对高速、大连接、低延迟的需求。在代际更迭的关键窗口期，它一端连着当下，适应AI发展的迫切需要；一端通向未来，通过在5G-A阶段的先行部署，为6G平滑演进做好技术验证与能力储备，确保网络能力有序传承、稳步升级。2023年，世界无线电通信大会已明确其国际移动通信频段定位。

目前，全球已有超过20个国家将U6GHz频段规划用于移动通信。阿联酋已率先完成频谱发放并启动了全球首个商用网络。欧洲、中东、亚太等地区的多家运营商也积极进行现网测试，验证了该频段在城市环境下的信号穿透力与网络容量。近日，工业和信息化部批复U6GHz的IMT-2030测试许可，展开典型场景和关键性能指标的技术试验。

在产业链方面，支持U6GHz的基站和终端设备在今年已具备商用条件并启动部署。2026年世界移动通信大会期间，华为发布了U6GHz全系列产品，全球多家主流设备商也展示了U6GHz频段的原型系统。同时，在芯片层面，高通等主流平台已完成U6GHz适配；在终端层面，支持该频段的CPE(客户终端设备)已具备商用条件，相关智能手机也预计在明年面世。

为了让这段“黄金频谱”更好用，科技企业也在不断创新，着力提升U6GHz频段的用户体验，并有效降低规模部署成本。比如，针对高频段信号衰减快、覆盖难等问题，华为采用超大规模天线阵列技术和智能调度算法，将信号能量聚集成极窄的波束精准“照射”到终端，实时捕捉用户位置，让信号更稳、体验更好。为降低部署门槛，新一代基站设备在架构设计上实现了轻量化与小型化，并通过绿色架构降低能耗。此外，业界也正积极探索频谱共享等前沿技术方案，通过同一套硬件设备可支持不同代际的频谱共享与功能升级。这些技术将使U6GHz充分释放大带宽潜能，助力运营商实现“一次投资、两代受益”的发展目标。

AI越强大，越需要高速、稳定、泛在的网络支撑。当AI遇见下一代网络，连接的将不只是更快的网络，更是为智能社会构筑起万物智联的“数字底座”。前瞻布局U6GHz端到端产业链，既回应当下AI应用发展的迫切需求，也推动产业从5G-A向6G有序演进，是支持数字经济高质量发展的战略支点。面向未来，运营商、设备商、终端及芯片厂商等全产业链应当携手聚力，跃升网络能力，繁荣产业生态，共同开启万物智联新图景。

(作者为华为无线网络产品线副总裁)

全球变暖但湖泊冬季冰下水温更低

据新华社赫尔辛基电(记者朱昊晨、徐谦)气候变化正改变湖泊生态系统，但其影响并非全面“变暖”。一项针对芬兰湖泊的长期研究显示，气候变暖导致秋季湖泊表层水温升高，冰冻时间推迟，但这反而可能使冬季湖泊冰下水温变得更低。

这项由加拿大约克大学、芬兰环境研究所和芬兰大学等机构共同完成的研究报告发现，湖泊结冰时间与冬季冰下底层水温之间存在负相关关系。也就是说，在秋季较暖、湖泊结冰较晚的年份，冬季冰下底层水温往往比秋季较冷、结冰较早的年份更低。

研究人员解释称，秋季湖泊无冰期延长后，湖水会持续向大气散发热量。到冬季湖泊最终结冰时，冰下水温可能已降至更低水平。

湖泊水温变化对生态系统具有重要影响。研究人员说，在低温环境中，从浮游生物到鱼类，许多生物往往活动减弱，其代谢、生长和繁殖等生理过程也可能受到抑制。

德国政府发布“高科技议程”路线图

据新华社柏林电 德国政府近日正式发布“德国高科技议程”详细路线图，明确了关乎德国经济实力、竞争力和技术主权的关键技术发展方向。

本次发布的路线图对相关关键技术设定了具体发展路径和目标。例如，在量子技术领域，德国计划到2030年研发出两台达到欧洲顶尖水平的纠缠量子计算机；在生物技术领域，目标是到2028年批准首个mRNA癌症免疫疗法；在人工智能领域，德国计划到2030年实现本国10%的经济产出基于人工智能。

本版责编：王慧 黄发红 孔歌 版式设计：蔡华伟

当AI遇见下一代网络

赵东

创新汇

最小二维码 数据存千年

本报记者 黄发红 刘赫

二维码能有多小？近期，奥地利维也纳工业大学与德国赛拉比特数据存储公司合作，在陶瓷薄膜上成功雕刻出面积仅1.977平方微米的二维码。这项微纳存储领域的突破，被确认为目前全球最小的二维码。“我们造出了微小、稳定且可反复读取的二维码，为人类信息的长期保存打开了全新可能。”项目负责人、维也纳工业大学材料科学与技术研究所教授保罗·迈克尔霍费尔在接受本报记者采访时表示。

这枚二维码由研究人员利用聚焦离子束技术(用高速聚焦的离子流精准轰击材料表面，从而在微观世界里完成“切割”或“雕刻”图案的操作)，刻写在一种耐高温、抗腐蚀的金属陶瓷材料——氮化铝薄膜上。这种材料常用于高性能切削刀具的涂层，具备极高的稳定性。构成二维码的每

个像素尺寸仅49纳米，约为可见光波长的1/10，肉眼无法捕捉其踪迹，但在电子显微镜下，图案清晰可辨。研究团队又用校准后的扫描电子显微镜对其进行独立验证，确认二维码可以被稳定识别。

迈克尔霍费尔表示，打造“世界最小二维码”并非团队最初目标，而是研究过程中自然产生的结果。他们真正关注的是如何在极小尺度下，让信息结构长期稳定存在，并能够被可靠读取。“制造极小的微观结构并不难，但问题在于，极小尺度上，原子会移动位置或填补间隙，可能会使存储的数据丢失。如何在长时间内保持结构完整性和足够的读取对比度，一直是巨大挑战。”他表示，团队通过材料与制备工艺的创新，让微型二维码在电子显微镜下能够稳定读取，信息不会因时间推移而衰减，实现了纳米级结构

与长期稳定性的结合。新研制的二维码不仅稳固，且可重复读取，其尺寸仅为原纪录保持者的37%。

为何选择陶瓷薄膜作为存储载体？迈克尔霍费尔解释称，陶瓷薄膜在化学和热学上都极其稳定。传统电子存储的电学状态会随着时间推移衰减，而陶瓷以物理比特(微小的坑洞等物理结构)的形式存储信息，能够抵抗扩散、腐蚀与老化，无需任何能量输入便可使数据在极长时间保持稳定，彻底摆脱了能源依赖。理论上，这种存储方式可实现数千年的数据保存，解决了长期归档数据易丢失、高能耗的行业痛点。此外，这种存储方式的容量也十分可观，一个成年人手掌大小的陶瓷存储盒(100×100×20毫米)，理论上可存储约290TB(大字节)的原始数据，相当于约72个4TB移动硬盘的总存储量。

研究团队认为，这种基于纳米物理结构的存储方式，在未来并不会取代日常高速存储设备，更可能是作为一种“冷存储”技术，用于超长期、零能耗的归档场景。例如档案馆、博物馆、科研机构等需要长期保存重要数据的领域，都可能成为其潜在应用方向。同时，随着全球数据量不断增长，数据中心长期运行带来的能源消耗问题也日益受到关注，类似这种低能耗、长寿命的存储技术就能更好地应对这一难题。

北京工业大学物理与光电工程学院教授闫胤洲对本报记者表示，世界最小二维码的诞生体现了目前微纳制造领域的尖端技术水平，解决了传统加工材料表面微小结构的制造难题，在显著提升存储密度的基础上使数据记录方式发生深刻变革，为大数据时代海量信息的低成本、超长寿命数据存储提供了全新解决方案。

目前，这项技术仍处于实验室验证阶段。迈克尔霍费尔坦言：“目前的主要挑战在于，如何进一步提升写入速度、扩大制备面积并研发出更高效实用的读取方法。将实验室级别的演示成果推向工业应用，是下一阶段的核心任务。”