

2026 十大突破性技术

深度解读“基因复活”技术： 复活灭绝物种，人类打开了上帝模式？

2025年初，德州生物技术独角兽 Colossal Biosciences 高调登上了《时代》周刊封面。封面图片极具视觉冲击力：一只拥有雪白皮毛的犬科动物，目光深邃，被描述为约一万年游荡在北美大陆的“恐狼”。

虽然 Colossal 声称这是古老物种的回归，但严谨的科学界迅速给出了更为冷静的解释：这并非真正的恐狼复生，而是一只经过精密基因工程改造的灰狼。科学家在它的基因组中，精确插入了约 20 处从古骨化石中提取并解码的恐狼 DNA 片段。

为了培育出这只所谓的“恐狼”，首先是基因组解码与比对，科学家们从分别拥有 1.3 万年和 7.2 万年历史的恐狼遗骸（牙齿和耳骨）中提取出古代 DNA 片段，通过高深度测序解析了恐狼的完整基因组，并将其与现代灰狼的约 1.9 万个基因进行对比，锁定了决定物种差异的关键位点；其次是精准基因编辑，研究人员并未直接拼接古代 DNA，而是采用了一种微创的细胞采集方式，从现代灰狼的血液中提取内皮祖细胞（EPCs），并利用基因编辑技术对其中的 14 个关键基因进行了 20 处改写，使其遗传编码与恐狼保持一致。

随后进入体细胞核移植与胚胎培育阶段，科学家将这些经过编辑的细胞核植入去核的卵细胞中，在实验室培育出工程化胚胎；最后是跨物种代孕，这些胚胎被植入作为代孕母亲的混合品种猎犬子宫内，经过约 65 天的妊娠，最终通过预定的剖腹产手术产下了带有恐狼特征的幼崽。这些幼崽在外部特征上展现出了恐狼标志性的强壮肩部、更大的头骨与牙齿，以及独特的嚎叫方式。

这只“嵌合体”生物的出现，标志着基因复活技术已经走过了理论验证阶段，进入了早期原型展示的关键时期。这也迫使我们必须以一种更加理性、客观的视角，去审视这项入选《麻省理工科技评论》“十大突破性技术”的前沿领域——它究竟是满足人类好奇心的昂贵游戏，还是拯救地球生态与人类健康的必要手段？

从本质上讲，基因复活并非字面意义上的“死而复生”。在现代遗传学语境下，它更准确的定义应当是“功能性代理物种的构建”或“古老遗传性状的恢复”。得益于现代遗传学、基因编辑以及体细胞核移植（克隆）技术的飞速发展，科学家们正在让 DNA 实现物理意义上的“时空穿越”。

这场技术革命的基础，始于早已灭绝生物的基因序列库。近年来，随着测序技术的普及与古 DNA 提取工艺的突破，这些数据库的规模经历了爆炸式扩容。从博物馆尘封标本中的渡渡鸟，到西伯利亚冻土层中保存完好的猛犸象组织，甚至是古人类骸骨中的遗传物质，都在被科学家逐一数字化。这些古老的 ATCG 编码，成为了连接过去与未来的桥梁。

目前，基因复活技术主要通过三条路径并行推进：一是利用近亲物种进行“回溯育种”，但这仅能恢复表型；二是利用冷冻活体细胞进行“克隆”，这受限于样本的保存状况；三是目前最主流的“基因组工程”，即在现存近亲物种的基因组上，利用基因编辑加入古生物的关键性状基因。

Colossal 的“恐狼”正是这一路线的产物。这种技术的真正野心，远不止于满足人类对史前巨兽的好奇心，更是为现代医疗与生态拯救开辟了全新路径。

在医疗领域，基因复活技术展现出显著潜力。佐治亚州立大学的研究团队在 2025 年夏天利用这一技术，尝试恢复人类在数百万年前演化中丢失的一种酶，这种酶缺失被视为痛风的根源。通过将古

基因植入肝细胞，科学家旨在重启代谢途径，从而根治这一慢性疾病。

这一应用源于对古人类基因组的深度分析，如尼安德特人 DNA 中发现的免疫相关基因，可能为现代药物开发提供新靶点；此外，灭绝微生物的基因复活可用于抗生素研发。

2025 年的一项专利揭示，使用深度学习算法从灭绝蛋白质组中识别 41 种抗菌肽，这些肽显示出协同作用，可能对抗耐药细菌。这一领域还包括“分子去灭绝”（molecular de-extinction），即复活灭绝的蛋白质或代谢途径，用于合成新型药物或疫苗，潜在市场价值巨大。

生态保护是基因复活技术的另一主要应用领域。非营利机构 Revive & Restore 在 2025 年克隆了黑足貂，这些克隆体携带了现存野生种群中已消失的遗传变异，帮助缓解近亲繁殖导致的灭绝风险。通过从冷冻细胞中复活古老基因多样性，该技术为濒危物种的繁衍提供了技术支持。

例如，Colossal 与澳大利亚大学合作，成功创建袋狼的干细胞，这可能在 8 年内将袋狼后代重新引入野生环境。类似地，植物基因复活用于恢复生态系统，如从古种子中提取耐气候变化的基因，注入现代作物以增强森林或草原的恢复力。2025 年的一项研究显示，基因编辑可将相关物种的耐热或抗病基因引入濒危物种，帮助它们适应全球变暖。

从产业化现状来看，基因复活仍处于早期阶段，主要由少数公司和机构主导。

产业界以 Colossal Biosciences 为核心，该公司成立于 2021 年，总部位于美国德克萨斯州达拉斯，已融资超过 5.55 亿美元，2025 年估值超 100 亿美元。公司重点推进猛犸象、袋狼、渡渡鸟、恐狼、南岛巨恐鸟等物种的复活，通过基因编辑、古 DNA 整合和克隆技术创建功能性后代，并计划于 2028 年产出猛犸象杂交个体。其已通过衍生企业实现了变现，如 Form Bio 提供 AI 驱动的计算生物学平台，用于药物开发，Breaking 使用工程微生物降解塑料废物；

与此同时，Revive & Restore 等非营利组织则聚焦保护应用，已成功克隆濒危物种，并与政府合作建立基因库；学术界则在古 DNA 测序与伦理框架构建上提供了不可或缺的支持。

哈佛大学 Wyss 研究所、加州大学圣克鲁兹分校古基因组学实验室以及墨尔本大学 TIGRR 实验室等机构，不仅解码了灭绝物种的完整蓝图，更在 Andrew Pask、Oliver Ryder 等学者的带领下，突破了有袋类胚胎体外发育和细胞重编程等科学瓶颈。

然而，大多数项目仍停留在实验室阶段，尚未实现大规模野生释放，也并未实现大规模盈利，但其衍生出的技术，如高通量基因编辑系统、人工子宫技术以及大规模细胞重编程平台等，已经在辅助生殖和器官再生市场显现出巨大的商业潜力。

高通量基因编辑系统已成为辅助生殖领域的重要工具。这种系统主要基于 CRISPR-Cas9 等精确编辑平台，能够在多个基因位点同时进行修改，从而高效地优化胚胎遗传特征。在辅助生殖中，高通量基因编辑被用于胚胎筛选和修正遗传缺陷，例如针对单基因遗传病的夫妇，通过编辑体外受精胚胎中的致病基因，避免后代遗传疾病。

Colossal 为袋狼和猛犸象开发的体外发育系统模拟子宫环境，通过精密微流控和气体控制维持胚胎发育，已在 2025 年实现袋狼胚胎中妊娠发育。其在辅助生殖的扩展应用涉及部分 ectogenesis，即

从子宫中转移早产胎儿到人工系统继续发育。

传统辅助生殖依赖代孕或移植，但人工子宫允许胚胎在体外完整发育，避免伦理和法律争议。目前，部分 ectogenesis 系统已进入动物试验阶段，如 2024 年，郑州大学第一附属医院团队完成了世界首例“去 ECMO 人造子宫”试验，成功让一只胎龄 4 个月的羊崽在人造子宫里存活了 90 分钟。

尽管前景广阔，基因复活技术仍面临着极高的进入壁垒。首先是技术壁垒，古 DNA 的完整解析与多位点协同编辑后的基因表达稳定性，仍是制约大规模应用的技术瓶颈；其次是法律与准入壁垒，复活出的物种在法律地位上属于“人工造物”还是“保护物种”，目前尚无定论。

更为核心的壁垒在于生态风险评估。将具有数万年前特征的物种或基因重新引入现代生态系统，可能引发无法预测的连锁反应，如新型病原体的传播或竞争失衡。这种不确定性使得监管机构在审批相关项目时极度审慎。此外，社会伦理的挑战同样严峻：人类是否有权扮演“造物主”的角色，干预自然的演化进程？这种争议不仅影响社会接受度，也直接关系到资本市场的长期预期。

总体而言，基因复活技术的意义远超出好奇心的满足。它为生物多样性保护注入新工具，在人类活动加速灭绝的时代，提供一种逆转机制。Science 的一项研究基于种群下降模型估算，许多受威胁物种的遗传多样性已损失超过 10%，脆弱物种可能损失 >9%，濒危物种 >16%，极危物种 >33%。该研究预测若种群继续下降，到 2050 年或更长期，平均遗传多样性损失可能达 19-66%（视物种而定）。

而这一技术可通过“复活”丢失变异来增强种群适应性；此外，在气候变化背景下，它有助于工程化生物以应对极端天气，如设计更耐旱的作物或更抗病的牲畜。这不仅提升农业产量，还可能缓解粮食安全危机；在医疗上，它开辟了新路径，利用灭绝基因开发针对癌症或感染病的疗法。

然而，技术的成功依赖于当前壁垒的突破：加强国际协议、增加资金透明，并优先对现有物种保护。否则，它可能成为“技术乌托邦”的又一例证，而非真正解决方案。

基因复活入选了《麻省理工科技评论》2026 年度“十大突破性技术”，我们邀请三位来自产业与科研一线的代表，围绕其关键技术路径与产业进展进行了点评。

以下评论内容均为个人见解，不代表《麻省理工科技评论》观点

基因复活技术的深层科学意义与应用潜力

“基因复活”技术，虽然被公众和媒体赋予了极具冲击力的名称，但在学术研究和探索的范畴里，它更多指的是对已灭绝生物遗传信息进行提取、解析和功能验证的一套不断发展的技术方法体系的总称。这里说的“复活”，其技术实际距离远古完整生命的重建依然非常遥远，更接近于一种基于基因编辑的关键性状模拟或演化路径的重现，其核心是利用从化石、冻土、标本中获取的远古 DNA 碎片，借助基因组测序、人工智能预测和基因编辑技术，将这些遗传信息的关键片段或功能模块，在现代近缘物种的基因组中进行重现。

例如，颇具代表性的“恐狼复活”工作，本质上是在与现代灰狼高度相似的基因组基础上，对多个与体型、毛色等表型相关的关键位点进行靶向编辑，从而在活体动物身上模拟出已灭绝恐狼的部分外部特征。



基因复活 Gene resurrection

同样，备受瞩目的“猛犸象复活计划”，其公布的技术进展包括利用多重基因编辑技术培育出携带有猛犸象毛皮特征基因的“长毛鼠”，以及将亚洲象体细胞重编程为多能干细胞，但其最终目标也并非完整复现一个史前猛犸象，而是旨在创造一个融合了猛犸象关键适应性性状（如耐寒、特殊脂肪代谢）的“功能性大象”。

这些科学实践表明，当前的“基因复活”更大程度上是古基因组学与合成生物学、发育生物学交叉融合的延伸应用，其重点在于对特定生物功能的测试与模拟。

这一系列技术进展的更深层意义，在于为我们提供了一个前所未有的研究范式。研究人员能够借此直接检验关于重大演化事件的假说，如通过调控鸟类胚胎中的基因逆向重现类似恐龙的齿状结构，为理解鸟类起源提供实证窗口；又如对猛犸象耐寒相关基因的功能解析，可能揭示哺乳动物体温调节与适应极端环境的机制。

在医学领域，对尼安德特人等灭绝古人类基因组的功能性研究，有助于理解某些现代免疫性、代谢性疾病的古老遗传起源，为探索其病理机制提供新的演化视角。此外，在生态保护方面，从已灭绝物种基因组中挖掘出的适应性遗传变异，理论上也能对现存濒危种群的遗传多样性恢复与适应性管理提供潜在的基因资源。

然而，随着技术的不断发展，其引发的伦理关注与生态风险也日益凸显，这迫使我们必须在推动科学前沿的同时，在更广泛的社会共识中去审慎界定其应用的边界，并在修复过去与保护当下之间做出权衡。

古生物复活技术的实现路径、现实困境与伦理边界

结合古化石 DNA 采集，基因组测序，基因编辑和体细胞核移植技术，将古基因在现存近似物种中实现功能重现，是一项充满挑战和探索的工作。其潜在应用在于：第一，重现已灭绝物种的生物学特性，也就是所谓的“物种复活”。这一定程度可以理解为通过基因编辑方式定向改造现存物种的基因组，难度大且复活的“程度”有限；第二，针对当前濒危物种的生物学特性和生存环境，通过远古物种优势基因在其体内的“复活”，降低该物种的生存风险从而保护物种。

然而，这一进程中潜藏着严峻的瓶颈与风险。从技术层面看，有效获得信息完整的古基因组序列极具挑战，化石资源的匮乏、DNA 片段的识别与扩增、以及避免污染的深度测序都是难以跨越的关隘；

同时，匹配远古基因供体与现存受体物种（如恐狼与灰狼）亦是成败关键，体细胞核移植技术的高门槛决定了其能否在受体中高效实现功能重现仍存疑；更为深层的是定义与伦理风险，获得古基因的新生生物究竟应如何定义，这构成了科学、伦理与监管的多重挑战。

基于此，该技术的应用边界与关键观察点必须得到严格界定。在濒危物种保护研究中，应侧重于优势基因的有限“复活”以实现物种保育；在进化学研究中，则应以现存生物为模型，通过复活特定基因来回溯古生物的生物学性状；最核心的原则在于，对于携带复活基因的新生生物必须实施严格监管并有效控制其种群，在确保生态风险完全可控之前，绝不宜让其回归野外环境。

论古生物复活研究的伦理、监管与社会共识

古生物复活是一项极具创新性的前沿研究平台，其核心技术包括古生物基因组测序技术、DNA 合成技术、多位点基因编辑技术以及哺乳动物克隆技术。这些技术不仅在现有领域具有广泛应用，更在古生物复活这一领域展现出独特价值。从生态学角度来看，古生物复活技术可能为某些缺失的生态链环节提供补充，特别是在应对气候变化方面具有潜在应用价值。

当前，基因编辑技术展现出了广阔的应用前景。其核心挑战在于如何精准调控基因表达以实现特定性状的重建，以及如何从单一基因修饰的细胞出发，通过核移植、体细胞克隆或人工子宫等技术手段实现完整生物体的重构。

生命科学技术的发展速度往往超出预期，尤其是在 AI 驱动的数据分析能力加持下，基因组预测和功能解析的准确性得到了显著提升。与传统机械工程不同，生物工程具有内在的反馈调节机制，只需施加适当的干预即可引导其向预期方向演化。因此，如何开发和应用这些干预手段是未来研究的关键。

基于当前技术发展趋势，我相信在未来 3-5 年内，古生物复活相关的技术平台将实现重大突破。与此同时，如何将更好地应用于医疗健康、环境保护、粮食安全和工业制造等领域将是下一步的重要课题。在此过程中，不可忽视的是必须注重生物伦理规范、法律监管和社会共识的建设，确保这一领域的研究和应用能够健康、有序地发展。只有通过多学科交叉融合和国际合作机制的建立，才能真正推动古生物复活技术走向成熟。