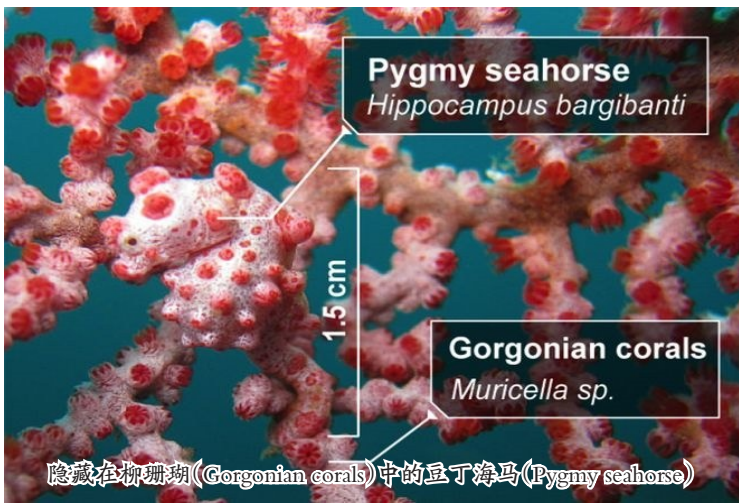


# 为了隐身，它竟主动“删除”了自己的基因？



隐藏在柳珊瑚(Gorgonian corals)中的豆丁海马(Pygmy seahorse)

在蔚蓝的海底世界里，珊瑚礁犹如万花筒般展现着大自然的多样与奇妙。它们色彩斑斓，形态各异，孕育了成千上万种海洋生物。对潜水爱好者而言，这里是梦幻般的水下乐园；而对科学家而言，这里更是一座巨大的“进化实验室”。在这片充满奇迹的生态系统中，生活着一种不起眼的小生物——豆丁海马(Hippocampus bargibanti)。它仅有米粒般大小，却能完美隐藏在珊瑚丛中，仿佛瞬间消失。潜水摄影师们常说，能找到一条豆丁海马，就像是在浩瀚海底寻得一颗宝石，偶然与之相遇，令人屏息惊叹。

但真正让科学家着迷的，并不只是这种小生灵的“隐身术”，而是它与珊瑚之间那种亲密无间的共生关系——既是保护，也是挑战。最近，中国科学院南海海洋研究所林强研究员团队联合德国康斯坦茨大学的研究人员，利用基因组学、转录组学以及CRISPR实验等多种手段，揭示了豆丁海马如何通过“舍弃”和“重塑”，适应柳珊瑚充满毒素与危险的栖息环境。这项成果，为人类首次揭开了这种极端拟态现象背后的遗传机制。

## 微缩世界里的奇迹

海马，是海洋中最独特的硬骨鱼类之一。它们挺立着身体，头部弯曲如同马首，因而得名“海马”。

与大多数鱼类不同，海马的游动姿态缓慢而优雅，仿佛在海草间轻轻摇曳。更特别的是，海马家族还流行“爸爸带娃”——雄性海马负责怀孕与育儿，这在整个动物世界都非常罕见。

而在海马家族中，豆丁海马称得上是“迷你精灵”。它是世界上已知体型最小的硬骨鱼之一，成年后全长仅有1至2厘米，比你的指甲盖还小！别看它小，五脏俱全，形态也非常精致。不同于普通海马那修长的口鼻，豆丁海马的口部短而钝，仿佛保留了幼体阶段的“稚嫩感”。科学家把这种特征叫做“幼态持续”或“未成年化”的特征，这种形态恰好让它与柳珊瑚花状突起的形态高度重合。粉色的体表、瘤状的突起，使它几乎无法区分，形成了近乎完美的伪装。

这种神奇的伪装能力，其实藏在它们的基因里。研究团队发现，豆丁海马的基因组中缺失了大量与体型大小和颌面骨骼发育相关的“保守非编码区”(CNE)。这些区域虽然不直接编码蛋白质，但常常调控关键基因的表达方式。一旦这些调控片段缺失，就可能改变骨骼的生长速度和比例，从而让豆丁海马的颌骨发育趋向短小，造就它与珊瑚触手高度相似的外貌。

更关键的是，豆丁海马体内一个叫hoxa2b的基因“失灵”了。这

个基因在许多脊椎动物中，都与颌面发育密切相关。为了验证它的作用，科研人员利用CRISPR基因编辑技术，在模式鱼类中敲除了这个基因，结果发现颌面骨骼发育发生畸形。这说明，豆丁海马的拟态形态并非单纯的“缩小”，而是遗传层面“缺失”与“突变”的结合，最终才让它实现了这身完美的“隐身套装”。

## 伴随珊瑚的生存赌注

柳珊瑚为豆丁海马提供了绝佳的掩护和依赖。它们枝条丛生、色彩艳丽，使豆丁海马得以隐藏在其中，免受天敌的侵袭。对于这样一个体型微小、行动缓慢的生物来说，伪装几乎是唯一的生存手段。

但这份保护并非没有代价。柳珊瑚属于刺胞动物，它们会分泌强效的毒素，这些毒素在自然界中堪称“致命武器”。普通鱼类若与其长时间接触，轻则中毒，重则死亡。但豆丁海马却能在一片危险的“毒林”里安然无恙，甚至以此为家。

研究团队通过基因组比对发现，豆丁海马的神经传导和离子通道相关基因发生了快速进化。换句话说，它们的神经系统很可能在长期与珊瑚毒素的博弈中逐渐形成了耐受机制。快速进化的基因集中在与神经信号传递、离子通道调节相关的部分。这使豆丁海马能够在毒素环境中保持正常的神经活动。这种能力不仅让它们适应了柳珊瑚的毒素，还为它们提供了独特的生存优势，使其能在其他生物望而却步的环境中繁衍生息。

这是一场冒险的共生。对豆丁海马而言，每一次与柳珊瑚的亲密接触，都像是一场生存的“赌注”：要么中毒淘汰，要么适应毒素，赢得生存。而豆丁海马“赌”赢了——它们通过基因的改写，换来了在致命毒林中安逸生活的能力。

## 当免疫系统选择“舍弃”

在豆丁海马的基因组里，科研人员还有一个惊人的发现：它们缺失了大量免疫相关基因，尤其是主要组织相容性复合体(MHC)基因。MHC在脊椎动物的免疫系统

中举足轻重，负责识别“自我”与“外来”，是抵御病原体的第一道防线。按理说，失去这些基因的生物应当更易感染疾病，生存几率大幅下降。但豆丁海马却“反其道而行之”，在自然选择中保留下了这种“免疫精简”的策略。

它们是怎么存活下来的呢？这背后的奥秘在于柳珊瑚的抗菌代谢物。柳珊瑚分泌出的化学物质具有抗菌、抗病毒甚至抗真菌的作用，等于为豆丁海马提供了一层“外部免疫”。有了这种保护，豆丁海马就不再需要维持复杂的免疫系统，于是选择了能量成本更低的“基因舍弃”。这种现象恰好印证了生物学中的“黑皇后假说(Black Queen Hypothesis)”——在共生关系中，某些物种通过放弃代价高昂的功能，转而依赖伙伴来提供服务，从而获得更高效的生存模式。

更巧妙的是，这种免疫基因的缺失还为豆丁海马的特殊繁殖方式——“雌性体内怀孕”提供了可能。雌性豆丁海马的胚胎植入腹腔内发育，如果免疫系统过于强大，可能会把胚胎当成“外来入侵”进行攻击。而免疫基因的缺失，恰好降低了这种排斥风险，让雌性怀孕成为可能。可以说，豆丁海马在与珊瑚的共生过程中，通过“借力”与“舍弃”，不仅安全住进了毒珊瑚，还顺利解决了繁殖的难题。

## 拟态的遗传密码

豆丁海马身体上那些粉色的瘤状突起，常常让人误以为是珊瑚的一部分。科学家发现，这些突起并非偶然，而是由背后活跃的基因精准调控形成的。在这些瘤状组织中，胶原蛋白和角蛋白基因高度活跃，它们让突起保持了柔韧与弹性，就像雕刻刀在身体表面塑造出的伪装装饰。同时，与色素沉积相关的基因(如mc1r、mitf)在这些组织中同样表现活跃，使得豆丁海马的体色能够紧密贴合珊瑚的颜色。

这种拟态并不仅仅是“保护色”，更更像是一种遗传上的雕刻艺术。历经数百万年的进化，豆丁海马的身体已经成为柳珊瑚的镜像，外形与色彩的契合达到近乎完

美。它们利用基因塑造的“伪装”，骗过天敌的眼睛，成功隐藏了自己。对海洋生态而言，这种拟态不仅展示了个体的生存智慧，也反映出海洋生态系统中的深度互动：物种之间彼此塑造、相互博弈，共同编织出复杂而和谐的生命之网。

## 从个体到生态的启示

豆丁海马的故事，不仅仅是一个物种的生存奇迹，更向我们揭示了生命适应环境的惊人策略。通过基因“删减”与“重塑”，在充满毒素与危险的环境中找到生存空间。从微缩体型到短吻形态，从免疫基因的舍弃到色彩的拟态，豆丁海马用自身的进化书写了一部与环境共生的传奇。

然而，但这种高度专一的依赖，也让它们的命运变得脆弱。豆丁海马几乎完全依赖柳珊瑚而生存，一旦珊瑚因气候变化、海水酸化或白化而大量死亡，它们也将失去唯一的庇护所。科学家们指出，这种依赖让豆丁海马成为气候变化的“风向标”。它们的生死存亡，折射出珊瑚礁生态系统的兴衰，也提醒人类更加迫切地保护这一脆弱的海洋生态。

## 隐身术的背后

潜水者常说，能在浩瀚的珊瑚丛中找到一只豆丁海马，就像是收到了大海亲手送出的隐藏礼物。它们安静地依偎在珊瑚的怀抱中，仿佛与环境融为一体。这种神奇的隐身术提醒着我们：生命的智慧，并不只属于强大的捕食者，也属于那些懂得融入与舍弃的微小生灵。

豆丁海马在进化中放弃了强健的免疫系统，放弃了长吻与庞大体型，却因此赢得了伪装、繁殖与共生的优势。它们在珊瑚之间的“隐身术”，背后是一段漫长而奇妙的进化史。

科学的意义，或许正体现在这里：在揭示生命奥秘的同时，更让我们学会敬畏自然的选择，而这份敬畏，终将提醒我们：保护好每一株珊瑚，和每一个依赖它生存的微小生命。

# 从解码生命到设计生命，看生物技术如何改变世界

在人类追寻自然奥秘的历史长河中，生物技术始终占据着极为特殊的位置。它不仅让我们看清了生命最深处的密码，也正在重新塑造着我们的世界。试想，如果没有DNA双螺旋的发现，我们或许至今还无法破解遗传的奥秘；如果没有基因编辑技术的飞跃，许多疾病仍然无药可医；如果没有人工智能的加入，生命研究也许还要在实验室里慢慢试错。

从DNA双螺旋的发现到基因编辑技术的飞跃，从显微镜下的微生物观察到人工智能赋能的虚拟细胞工厂，短短几十年间，生物技术以前所未有的速度改变着我们的生活。它不再只是科研人员的“象牙塔实验”，而是关乎疾病治疗、粮食安全、能源转型乃至全球竞争的战略科技。究竟是什么力量，让这一领域在如此短的时间里爆发出惊人的能量？接下来，就让我们一起走近“生命的黑匣子”。

## 从“读懂生命”到“设计生命”

20世纪中叶，人类逐渐揭开生命密码的神秘面纱。1953年，沃森和克里克提出DNA双螺旋结构，揭示了遗传信息的基本载体。这一发现不仅让我们看见了生命的核心“代码”，也催生了现代分子生物学的兴起。

在随后的几十年里，科学家不断发明新工具来“阅读”这本生命的书。1970年代，限制性内切酶的应用与重组DNA技术的建立，让科学家第一次能够像编辑

文本一样“剪切与拼接”基因。到了1985年，聚合酶链式反应(PCR)的发明，更是让DNA扩增变得前所未有的高效。今天，它已经成为生命科学实验室里最常用的“基本操作”，同时也广泛应用于司法鉴定、传染病诊断和考古研究。

1990年，人类基因组计划启动。这是一场前所未有的国际合作，历时13年，最终绘制出完整的人类基因图谱，标志着我们真正走进了“基因组时代”。这幅图谱就像一本详尽的说明书，为理解生命、探索疾病和改造生物提供了基础。

然而，科学并没有止步于“读懂”。2012年，CRISPR-Cas9系统的发现可谓里程碑式的突破。它就像一把精巧的分子剪刀，可以在DNA的特定位置精准切割，再通过细胞自身的修复机制完成“删除、插入或替换”。与传统方法相比，它更便宜、更高效、更精准，迅速成为实验室和产业界的明星工具，被广泛应用于作物改良、动物模型建立，甚至遗传病治疗的探索中。

在基因编辑的基础上，人类逐渐迈入“创造生命”的新阶段。2010年，美国科学家克雷格·文特尔团队成功合成了一个细菌基因组，并将其植入宿主细胞中，获得了能自主运作的“人工生命”。这一成就让合成生物学从概念走向现实。如今，合成生物学不仅仅是“复制”，更强调“设计与重构”。通过模块化设计基因回路，

研究者可以让微生物生产药物、生物燃料，甚至新型材料。生命，不再只是被动认识的对象，而逐渐成为人类能够塑造的“设计品”。可以说，生物技术的发展历程，正从“认识生命”一步步走向“重塑生命”。

## 科技何以解：生物技术的现实驱动

为什么生物技术如此重要？因为它直面的是人类最紧迫的现实挑战。

在人类健康领域，生物技术的突破正不断带来新的希望。癌症、阿尔茨海默病、罕见遗传病等长期困扰人类，而传统药物研发往往周期漫长、成本高昂。基因编辑和细胞疗法的出现，提供了个性化、精准化治疗的新可能。CAR-T细胞疗法就是一个典型案例，它通过改造患者自身的免疫细胞，使之能够精准识别并攻击癌细胞，已经在白血病治疗中取得了突破性成果。可以预见，未来的医疗将更像“量体裁衣”，根据每个人的基因特点量身定制。

除了医疗，粮食安全同样是生物技术关注的焦点。随着全球人口增长和气候变化加剧，农业面临巨大的压力。基因编辑作物的出现，让科学家能够培育出抗旱、耐盐碱的水稻和小麦，显著提高作物的适应性。与此同时，人工培养肉也正从实验室走向市场，它有望减少对土地和水资源的依赖，为人类餐桌提供更加可持续的选择。

在能源与环境方面，生物技术同样展现出强大潜力。化石燃料消耗带来的温室气体排放迫使我们寻找新的能源方案。藻类生物燃料、工程化酵母发酵产生的乙醇和丁醇，正在逐渐成为传统能源的替代品。同时，微生物修复技术也被应用于重金属污染治理和塑料降解，为环境保护提供了绿色解法。

更宏观地看，生物技术也是大国博弈的重要赛道。无论是美国的《国家生物经济蓝图》，还是中国对“生物安全”的高度重视，都表明生物技术不仅关乎科研，更关乎国家安全与国际竞争力。

## 走近“生物技术的黑匣子”

要理解生物技术为何能如此快速突破，就必须走进它的“黑匣子”。

首先是基因编辑。CRISPR-Cas9系统由一段引导RNA和一个Cas9蛋白组成，前者负责“定位”，后者像剪刀一样完成切割。切口触发细胞的修复系统，从而实现基因的删除、插入或替换。正是这种精准、高效的能力，使它迅速走红。如果说基因编辑是精巧的剪刀，那么合成生物学更像是生命的“乐高工厂”。合成生物学提出“标准化零件”的理念。基因被看作功能模块，像积木一样拼装成新的生命回路。例如，将一套生产青蒿素的基因导入酵母，便能通过发酵大量合成这种抗疟疾药物。这样的思路不仅是“模仿自然”，更是主动“重构生命”。

近年来，人工智能的加入为生物技术插上了翅膀。DeepMind的AlphaFold在短时间内预测了数百万种蛋白质结构，大大缩短了药物研发周期。多组学数据的整合，使疾病机制的解析更为精准。智能机器人走进实验室，能进行高通量实验，极大提升了药物筛选的效率。AI，就像一位永不疲倦的科研助手。

除此之外，生物制造也正在开辟新天地。科学家利用基因工程让微生物合成可降解塑料、天然橡胶替代品，甚至性能优越的人造蜘蛛丝。这些材料既环保又可持续，为未来的绿色产业提供了全新方案。

## 科学与社会的双重变革

生物技术的快速发展，不仅推动了生命科学本身的转型，也深刻影响了其他学科的进展。随着人工智能不断融入实验与研究，研究者能够通过虚拟细胞和数字孪生，在计算机中提前模拟生命过程，从而缩短实验周期、降低成本，并显著提升探索效率。

但是，社会层面的影响同样不容忽视。生物技术的突破带来新的伦理与监管挑战。基因编辑婴儿事件曾引发全球广泛震动，它提醒人们在追求科学前沿的同时，必须坚守道德与法律的底线。公众对基因隐私、生态风险的担忧，也使得政策制定者更加谨慎。可以说，生物技术不仅仅是一项科学突破，更已经成为社会治理的重要组成部分。