

深海下的生命能量来源——如何唤醒“沉睡”的碳库？



野外的这些黑色岩石，一般都是海底富含有机物的沉积物固结后形成的，碳被固锁在岩石中，极难被分解变成气体

这个夏天，世界多地都经历了创纪录的高温和热浪，全球气候变暖的现实正在变得愈发清晰。我们知道，二氧化碳等温室气体在大气中的积累，是导致地球不断升温的重要原因。很多人也都知道，大气中的二氧化碳也会源源不断被植物吸收，它们会通过光合作用把二氧化碳转化为有机物。科学家们将能够大量吸收二氧化碳的地方形象地称之为碳库。

研究地球的碳储存，是应对气候变化的关键。植物充裕的森林是我们最容易想到的碳库之一。但除了森林之外，海洋其实才是最大的碳库，海洋中巨量的浮游植物在吸收二氧化碳之后会把它们以不同形式储存起来：有的进入浮游植物和海洋生物体内，随食物网循环；有的以溶解有机碳的形式溶解在水中；还有一部分会随着生物死亡而下沉，深埋在海底之下。

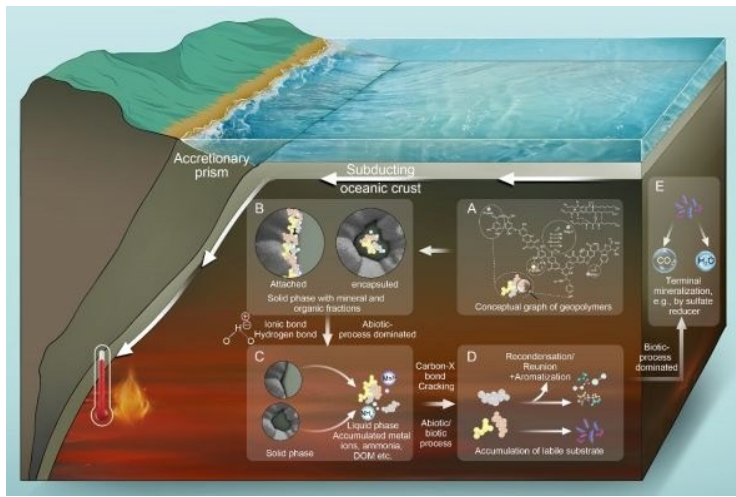
事实上，在我们脚下深处，远离阳光和空气的地方——深层沉积物便是地球最大的碳“保险箱”。因为它们在经历数百万年乃至数千万年之后就会逐渐固结变

成岩石——我们在野外见到的某些黑乎乎的岩石就是由这种海底沉积物形成的。

长期以来，人们认为有机质在经历降解后结构复杂难以被生物利用，一旦埋藏便长期“沉睡”。但新的研究却发现，这个保险箱并没有我们想象中的那么安全。

完全无光的黑暗海底一向被认为是生命的禁区，而海底再向下数百米就更不可能有生命存在了。然而科学家在过去几十年的钻探和观测中，却发现了一个惊人的事实：在深海沉积物里，居然存在着数量庞大的微生物群落，被称为深部生物圈(Deep Biosphere)，就像地球隐藏的“暗物质”生命世界。

这些微生物与我们熟悉的海洋生物完全不同。它们生活在数百米甚至上千米深的沉积物里，那里没有阳光、氧气稀少，温度却随着深度升高，可以达到100摄氏度以上。有人称它为地球的“第二个生物圈”，其生物总数量甚至与地表所有原核生物数量的总和在同一数量级，是生命在高温、黑暗等极端环境下适应和生存的奇迹。



深部碳库在加热作用下的非生物与生物耦合分解模型示意图

然而，深部生物圈始终是个谜。科学家已经知道，这些微生物大多是异养生物，需要依靠有机碳来维持生命。但问题在于：沉积物中的有机碳大多极其难以分解。那么，这些微生物到底靠什么获得能量？

在寻找答案的过程中，科学家们将目光投向了温度这一因素。随着沉积物不断被新的沉积层覆盖，它们会逐渐下沉到更深处，温度也会越来越高。会不会正是升温过程，让那些原本难以利用的有机碳分解，重新变成可以被微生物使用的能量？

为了验证这一假设，我们团队(中国科学院华南植物园)，2025年8月20日发表在《Science Advances》的研究发现，深海沉积物中的碳循环机制会随温度升高发生根本性逆转，这完美解释了微生物在高温环境下的存活之谜。

我们团队选取了来自日本南海海槽的7.8百万年前沉积物样品。研究人员在实验室里模拟了沉积物埋藏过程中可能经历的温度环境：

20摄氏度：作为自然状态的对照；

35摄氏度：中温环境；

55摄氏度：高温环境；

85摄氏度：极端高温环境。

我们利用先进的分析方法，包括三维荧光光谱和超高分辨质谱，追踪沉积物中溶解有机碳(DOC)的数量和分子组成，并检测乙酸、氢气等小分子的变化。通过这样的实验设计，我们团队希望回答一个关键问题：沉积物中的碳，是否会因温度升高而被重新激活，从而成为深部微生物赖以生存的能量来源？

实验结果显示，温度确实扮演了重要角色：

当温度超过35摄氏度，原本储存碳的“矿物碳泵”开始反向释放有机碳，便于生物水解利用；

达到55摄氏度时，“微生物碳泵”也发生逆转，原本被微生物固定并埋藏的难降解有机碳被重新活化；

而当温度突破85摄氏度，难降解的有机碳会在非生物过程主导下“再加速”降解，分解为乙酸、氢

气等小分子产物。

也就是说，这些微生物不再依赖传统的复杂共生关系，而是直接利用这些非生物过程产生的简单分子维持独立生存，重构出一条简化却高效的新型碳降解链条。这一“碳反转”机制揭示了深部生物圈的能量来源，阐明了一个曾被认为是“不可能存在生命”的高温世界是如何通过地球化学过程与生命过程的耦合，最终支撑起一个顽强而神秘的深层生态系统。

我们团队进一步估算，这部分碳的活化所产生的生物可以利用碳比例可超过总有机碳的0.25% (包括非生物释放、生物代谢及已代谢矿化过程的总和)。尽管这一比例看似微小，但考虑到次表层沉积物中的有机碳总量高达15000000Gt(相比之下，全球海水的总碳量仅39000Gt)，因升温过程而转变为可利用有机碳的量依然可观。

这项研究的重要发现之一，是为深部生物圈的存活之谜提供了答案。过去，科学家一直困惑：既然深埋的有机碳几乎难以降解，那这些生活在数百万年沉积物中的微生物是靠什么活下去的？现在我们知道，随着沉积物温度逐渐升高，难降解的有机碳会被逐步分解，释放出乙酸、氢气等简单分子，成为微生物的直接能量来源。也就是说，微生物的生命活动并不是凭空发生的，而是与沉积物中碳的温度驱动转化紧密联系在一起。

另一方面，这一发现也改变了我们对全球碳循环的理解。长期以来，海底沉积物被视为一个稳定的“碳保险箱”，似乎可以把碳牢牢封存在地球深处。然而，这项研究表明，当温度超过一定阈值，这个保险箱并非绝对安全，部分碳会被重新释放并进入生物利用链条。这种温度触发的“碳逆转”，可能在全球范围内影响深部碳的长期储存和释放。

科学家把牙线变成了“无针疫苗”，怎么做到的？

每次拿起牙线清洁牙缝时，你或许只会想到“避免蛀牙、少听牙医唠叨”；每次面对疫苗接种的针头时，你或许总会下意识地把紧拳头。但很少有人会把这两件事联系起来——直到一群工程师在实验室里，把牙线变成了能抵御流感的无针疫苗载体。

2025年7月22日，《自然-生物医学工程》(Nature Biomedical Engineering)刊登了一项颠覆认知的研究：美国北卡罗来纳州立大学和得克萨斯理工大学的团队开发出一种特殊牙线，能将灭活病毒或蛋白质抗原精准递送到牙龈缝隙(龈沟)，在小鼠身上成功激发了抵御流感的全面免疫反应。这项研究不仅让“无针疫苗”多了一种新奇思路，更让我们重新审视：那些习以为常的日常用品，或许藏着改变医疗方式的“密码”。

告别“打针痛”：为何科学家执着于无针疫苗？

要理解牙线疫苗的价值，我们得先搞清楚一个问题：人类为什么执着于开发无针疫苗？

传统注射疫苗是医学史上的伟大发明，但它并非完美。我们熟悉的流感疫苗、乙肝疫苗大多通过肌肉注射给药——护士用针头将含有抗原的药液注入上臂三角肌，药液中的抗原分子被肌肉中的免疫细胞识别，进而激发全身免疫反应。这种方式虽然有效，却存在不少“痛点”：

使用门槛高：肌肉注射需要专业医护人员操作，无法在家自行完成，这在医疗资源匮乏的地区或大规模疫苗接种场景(如流感季)中，很容易造成“接种拥堵”；

依从性差：研究显示，20-30%的年轻人和近半数少年儿童对针头有恐惧心理，很多人会因为害怕打针而拒绝接种疫苗；

难以覆盖黏膜免疫：像流感、新冠、麻疹等病毒，大多通过鼻腔、口腔、呼吸道黏膜入侵人体，而肌肉注射激发的免疫反应主要集中在血液和组织中，对黏膜表面的“第一道防线”保护不足，这也是为什么有些人打了流感疫苗，仍有可能轻微感染的原因之一。

因此，科学家们早在20世纪90年代就开始探索“无针疫苗递送”，目标是找到一种能避开针头、又能精准激发免疫反应的方式。最初的思路很直接：既然病毒从黏膜入侵，那就在黏膜部位接种疫苗。比如鼻喷流感疫苗，就是把抗原通过鼻腔喷入，试图激发鼻黏膜免疫。

但这条路远比想象中难走。口鼻黏膜是人体最挑剔的部位之一，它们对外来分子的防御能力远超我们的预期。黏膜表面覆盖着一层黏稠的黏液层，就像一张“滤网”，能粘住大部分外来颗粒；黏液中还含有多“消化酶”，会把蛋白质类的抗原分子分解成碎片——这意味着，鼻喷疫苗中的抗原往往还没接触到免疫细胞，就被黏膜的“防御部队”消灭了。多年来，尽管有不少黏膜递送疫苗的尝试，但要么免疫效果微弱，要么需要添加大量佐剂(增强免疫反应的物质)，副作用风险增加，始终难以大规模应用。

“疫苗黄金通道”：牙龈沟的意外发现

就在科学家们为黏膜递送的难题发愁时，北卡罗来纳州立大学的工程师哈文德·吉尔(Harvinder Gill)偶然看到了一篇关于牙龈生理结构的论文——文中提到，牙齿与牙龈之间的“龈沟”(Gingival Sulcus)，是人体吸收分子能力最强的部位之一。这就像灵光一现：既然龈沟渗透性这么高，那我们能不能将其用于疫苗接种呢？毕竟，没

人会拒绝用牙线这种日常工具来接种疫苗吧？

要理解牙线疫苗的原理，我们得先认识一下“龈沟”这个特殊部位。

你可以对着镜子仔细看一下自己的牙齿：在牙齿和牙龈的交界处，有一条细细的缝隙，这就是龈沟。它的深度通常只有0.5-2毫米，看起来微不足道，却是口腔健康的“晴雨表”——牙龈炎、牙周炎等疾病，往往最先从龈沟开始。但很少有人知道，龈沟的生理结构，天生就适合作为“药物递送通道”。

首先，龈沟黏膜极薄，渗透性强。其次，龈沟周围布满免疫细胞。最重要的是，龈沟避开了口鼻黏膜的强防御。虽然龈沟也属于口腔黏膜，但它不像鼻腔、咽喉那样有大量黏液和消化酶，抗原在这里不会被快速分解，有足够的时间被免疫细胞“捕捉”。

要利用这条“暗门”，还需要一个合适的“载体”——怎么把疫苗精准送到龈沟里，又能让抗原停留在那里被充分吸收？对，就是牙线。

牙线的优势简直是为其量身定制：“量身定制”：它纤细柔软，能完美贴合龈沟的形状，深入到牙齿间隙；它的纤维结构有较大的表面积，适合加载抗原分子(例如通过物理吸附或化学结合的方式，把灭活病毒或蛋白质抗原“粘”在牙线上)；更重要的是，牙线是全球普及的日常用品，大多数人已经养成了用牙线清洁龈沟的习惯，不需要额外学习使用方法，依从性极高。

小鼠的“生死考验”：牙线疫苗的首次成功

想法很美好，但真的能实现吗？吉尔和论文第一作者、美国得克萨斯理工大学的化学工程师Rohan Ingrole决定用实验说话，他

们选择了流感疫苗作为“测试对象”——因为流感是全球高发的呼吸道传染病，每年导致数百万重症，对无针疫苗的需求迫切。

实验的设计并不复杂，却充满了严谨的科学逻辑：

第一步，改造牙线：将灭活的流感病毒通过静电吸附的方式加载到牙线上。

第二步，小鼠接种与观察：实验组的小鼠每两周用加载了灭活流感病毒的牙线清洁牙龈一次，每次清洁时间为1分钟(模拟人类用牙线的习惯)，总共清洁3次；对照组的小鼠则用普通牙线清洁，不加载任何抗原。

第三步，关键的“挑战实验”：在最后一次“牙线接种”的4周后，研究人员给所有小鼠鼻腔滴注了活的流感病毒，接下来的14天里，他们每天观察小鼠的存活情况、体重变化和呼吸道症状。

实验结果让整个团队都感到惊喜：存活率达到100%！实验组的小鼠全部存活，没有出现明显的呼吸道症状(如咳嗽、喘息)，体重也保持稳定。

人体初步测试：牙线疫苗的未来展望

小鼠实验的成功，让研究团队看到了临床应用的希望。但动物实验的结果不能直接推广到人类，毕竟人类的龈沟结构、口腔环境和小鼠有很大差异。因此，研究团队随后开展了一项大规模的人体初步测试，验证牙线在人类牙龈上的“递送效率”。

他们招募了27名健康志愿者(年龄在20-45岁之间，均无牙龈疾病)，给他们使用涂有彩色可食用染料(荧光素钠)的牙线棒清洁牙龈，清洁方式与时间(模拟日常使用牙线一致)。清洁后，研究人员用特殊的荧光检测仪测量牙龈组织

中染料的含量，计算递送效率。

结果显示：平均有60%的染料成功递送到了志愿者的龈沟部位，而且染料在龈沟中能停留至少2小时——这个时间足够疫苗抗原被充分吸收。更重要的是，所有志愿者都没有出现牙龈刺激、红肿等不适症状，说明这种牙线的使用是安全的。

牙线变“疫苗神器”：它将如何改变我们的生活？

尽管还有很多挑战，但我们不妨大胆畅想一下：如果牙线疫苗真的能成功应用，会给我们的生活带来哪些改变？

最直接的变化，就是疫苗接种变得更轻松。对于害怕打针的儿童来说，用牙线清洁牙龈就能完成疫苗接种，再也不用在医院里哭闹；对于行动不便的老人来说，不需要专门去医院，在家就能用牙线完成流感疫苗的“加强针”接种；对于偏远地区的人群来说，不需要依赖专业医护人员，只需分发牙线疫苗，就能完成大规模接种——这能极大提高疫苗的覆盖率，尤其是在流感、新冠等传染病流行的季节。

其次，牙科诊所可能变成“疫苗接种点”。可以想象这样的场景：你去牙科诊所洗牙，牙医检查完你的牙龈后，拿出一根加载了疫苗的牙线，帮你清洁牙龈的同时，就完成了疫苗接种。牙科医生本来就熟悉牙龈的解剖结构，操作牙线递送疫苗比普通医护人员更有优势，而且牙科诊所的分布比医院更密集，能更方便地服务大众。

更长远来看，这种牙线递送方式还有可能推动“个性化疫苗”的发展。比如，针对不同地区流行的流感菌株，厂家可以生产加载不同抗原的牙线疫苗；甚至可以根据个人的免疫状况，定制加载特定剂量抗原的牙线，实现“精准免疫”。