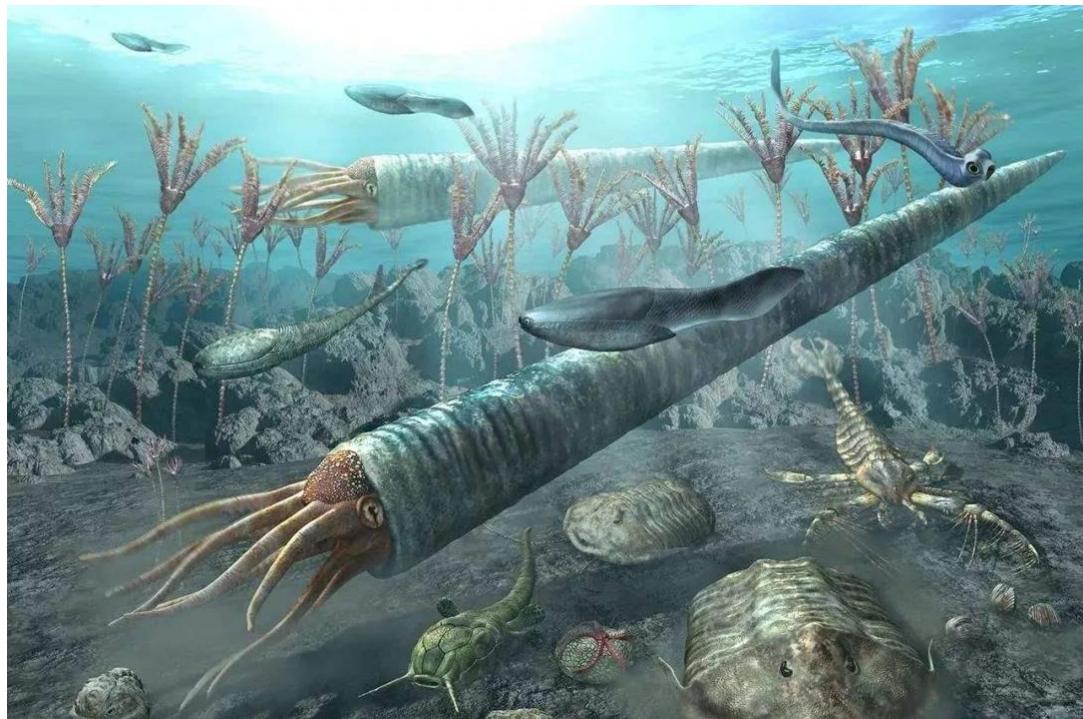


在消毒产品层出不穷的今天，次氯酸消毒液却常被误读——有人将其与“84消毒液”（次氯酸钠）混为一谈，甚至质疑其安全性。殊不知，这种看似陌生的消毒剂，实则是人体免疫系统的“天然盟友”，是海洋对地球生命的亿万年馈赠，更是进化赋予生命最经济、最智慧的防御选择。

## 次氯酸的前世今生

早在遥远的显生宙古生代，生命体与细菌的持续对抗催生了一场静默而深刻的革命——基于氧化杀菌作用的先天免疫防御系统悄然而生。从海洋中的无脊椎动物到天空翱翔的鸟类，从微小的节肢动物到两栖类、爬行动物，直至人类，这一精妙的防御机制在进化长河中不断优化，最终在高级生命体中形成以“髓过氧化酶（MPO）-次氯酸（HOCl）”为核心的先天免疫防御体系。这一体系如同忠诚的卫士，始终坚守在免疫战场的最前沿，为守护生命筑起了一道坚不可摧的防线，在亿万年的生命演化历程中立下了不可磨灭的功绩。



## 起源

距今 35 亿年前，一种名为蓝藻（又称蓝细菌）的神奇生物，成为终结古菌统治时代的关键力量，它通过叶绿素进行光合作用，释放出氧气，逐渐改变生命体赖以生存的厌氧环境，开启了一段充满传奇与转折的演化历程，引领生命演化新方向：这一看似微小的改变，却为距今 24 亿年的“大氧化事件”（GOE），以及由此引发的距今约 5 亿年的寒武纪生命大爆发埋下伏笔。原本冤家对头的需氧菌与厌氧菌，在长期斗争中，竟有一部分从斗争走向合作，开启“互助共生”模式：需氧菌寄生于已形成核膜的古菌体内，后者为前者提供有机酸、CO<sub>2</sub> 等食物与宜居环境，而前者演变为后者的“线粒体”，提供能量和动力的同时，还发展出 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>·等称为“活性氧（ROS）”的含氧高活性物质，形成古老而经典的化学武器系统，并跨越漫长时光，一直被生命体沿用至今。



## 进 化

在漫长的生物进化历程中，原始低等生物最初主要依赖以  $\text{H}_2\text{O}_2$  为代表的 ROS 作为其 1.0 版化学武器来抵御病原体。随着物种不断演化，这一武器库也升级迭代为 2.0 版：生物体开始合成以  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、氯离子 ( $\text{Cl}^-$ ) 为原料的新型“高爆炸药” - 次氯酸 (HOCl)，其杀菌威力约为  $\text{H}_2\text{O}_2$  的 100 倍。与此同时，相应的催化酶也经历了从无到有地进化过程，形成“类髓过氧化物酶” (like-MPO) 家族，如果蝇中的双氧化酶 (DUOX) 以及哺乳动物中的 MPO 等关键酶类。

## 溯 源

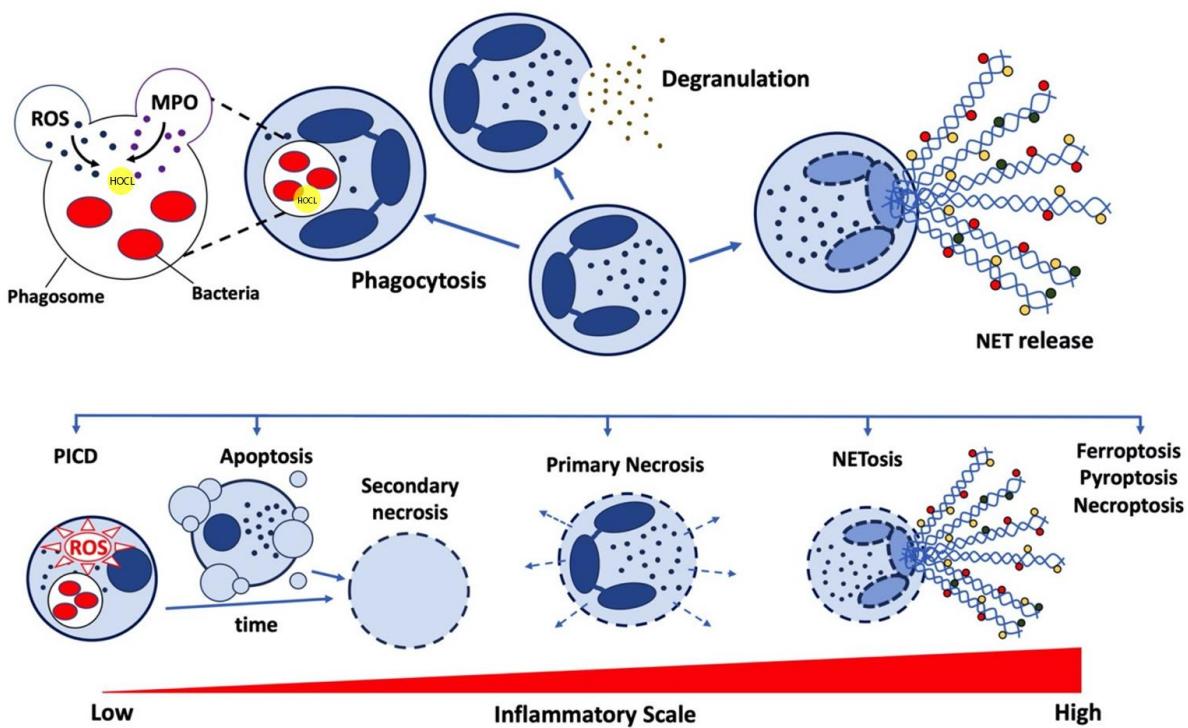
尽管无法从化石中获得 HOCl 出现的准确时间，但通过研究现存原始生物，我们仍能追溯其免疫功能的演化轨迹。低等动物已具备 HOCl 进行免疫防御的能力，说明这一机制的出现显然极为古老。在软体动物中，著名的夏威夷短尾鱿鱼 (*Euprymna scolopes*) 体内存在一种结构类似于脊椎动物 MPO 的“鱿鱼卤素过氧化物酶” (HPO) 的物质，能将体内  $\text{H}_2\text{O}_2$  转化为 HOCl，从而帮助它抵御海洋中无数细菌的侵袭。尤为神奇的是，这种鱿鱼的发光器官为“费氏弧菌”（一种发光细菌）保留了一条“VIP 通道”：能精准调控费氏弧菌的数量与昼夜节律，使其仅在夜晚发出蓝光，协助鱿鱼逃避天敌。这一发现具有重要的进化生物学意义。头足类软体动物起源于约 5 亿年前古生代时期，而它们已经拥有如此复杂的 HOCl 免疫系统，表明 HOCl 免疫防御功能在无脊椎动物中并非新生事物，而很可能是在远古时代就已广泛存在的重要免疫机制。



节肢动物如果蝇，每日接触大量食源性细菌，它们又是如何做到防范病原体感染的？答案是其体内精妙的“HOCL 双途径调控”机制：其一，果蝇肠腔内的细菌会产生尿嘧啶，激活 DUOX 通路并生成 HOCL，对肠腔中的致病细菌进行“化学清除”；其二，HOCL能与肠道嗜铬细胞上的化学受体- TRPA1(A)10 结合，促使血清素释放，加速肠道蠕动与排泄，可对肠腔中的进行“物理清除”，就是这样的“杀-拉”组合，大大降低了病原体侵害的风险。



与低等动物对 HOCL “物尽其用”的方式不同，高等生物更倾向于丰富武器库的种类和多兵种协同的模式，实现对病原体的高效清除。以人类为例，在免疫系统在以 ROS 为核心的“先天免疫”基础上，进一步演化出能“精准识别+靶向攻击”的“获得性免疫”。其中，先天免疫是人体抵抗细菌入侵的第一道防线，核心成员是“为杀戮而生”的中性粒细胞，它们绰号“炸弹卡车”，能将捕获的病菌内化为“吞噬体”，并在其内生成以 HOCL 为主的 ROS，最终常与敌人“同归于尽”；部分中性粒细胞会在牺牲前抛出自己的 DNA 链，形成一张诱捕网将病原体牢牢“捆住”并暴露于其他免疫细胞的攻击之下。与先天免疫的广谱攻击不同，获得性免疫以 T 淋巴细胞、B 淋巴细胞等为核心，具备特异性和记忆功能。这种“精准制导”模式能针对特定病原体产生高效靶向抗体或细胞毒性反应，并在二次感染时实现快速响应。



## 选 择

当我们凝视造物主设计的生命蓝图时，一个深邃的疑问浮现：为何地球生命选择以“氯元素（CL）”为核心的 HOCL 作为我们抵御病菌入侵的重要武器？要解开这个谜题，又得回到生命起源—蓝细菌的一场“光合革命”。约 24 亿年前，蓝细菌的叶绿素捕获太阳的 1 个光子。这一瞬间，被激发的电子脱离叶绿素，转而强抢夺水分子中的电子，水分子被分解成 O<sub>2</sub>、H<sup>+</sup>、e<sup>-</sup>，这一过程不仅是光合作用的开端，更开启了光能向电化学转化的第一步。正是电子得与失的过程（氧化还原反应），开启了生命的律动，驱动了呼吸链、ATP 的合成。因此，数量庞大、易失去电子的阴离子无疑是生命活动最经济的生产资料。CL<sup>-</sup>既是海洋中最多的阴离子，也是人体内当之无愧的“阴离子冠军”，其浓度远超其他阴离子，是生命从海洋演化到陆生过程中传承下来的资源宝库。除了资源禀赋，CL<sup>-</sup>易失电子成为高氧化活性物质 HOCL (CL<sup>+</sup>) 的特性，使其在 CL<sup>-</sup> ↔ CL<sup>+</sup>循环往复的电子转移过程中，造就了一个个生命的奇迹。



## 启示

从蓝菌挑战古菌的统治世界，到需氧菌与厌氧菌长期斗争，再到互助共生形成“命运共同体”，推动了生命由低级向高级进化发展。纵观细菌世界的生存之道，人类社会何尝不是如此？