

细胞色素 C 氧化酶

May 2000 Molecule of the Month by David Goodsell

译者：李云雷（农科院畜牧所）

关键词： 电子载体活性，电子传递链，氧化磷酸化，有氧呼吸，呼吸链

氧气与生命

氧分子是一种不稳定的分子。在一定条件下，氧分子中的共价键断裂，氧原子与其他原子结合。这就是氧化的过程，我们生活中类似汽车和铁钉的生锈现象就是氧化作用导致的。然而，需要注意的是，氧分子中存在的特殊的电子结构使得氧化过程很缓慢。因此，纸张不会自燃——除非存在火种。

所有的动物和植物以及大多数的微生物都是通过氧分子的这种不稳定性为生命活动提供能量的。食物中的分子被氧化产生能量，这些能量用于机体的生长、运动与更新。食物的氧化过程不像燃烧那样剧烈。食物的氧化过程是需要通过多个缓慢的步骤，每一步都要经过精细的调控以产生尽可能多的机体可以利用的能量。

细胞色素 C 氧化酶调控食物分子氧化分解过程的最后一个步骤。在这一时刻，食物分子中的原子已经被去除，只剩下几个电子。此时，细胞色素 C 氧化酶捕获这些电子，并将其转移至一分子氧上。随后，在此基础上在增加两个氢离子，就形成了两分子的水。

生物电池

氢氧结合反应过程释放大量的能量。在现实生活中，氢气和氧气混合很容易爆炸，这就是飞船中填充氦气而不是氢气的原因。在细胞中，能量在细胞色素 C 氧化酶作用下为“电池”充电，或者确切点来讲是为“电容器”供电。

细胞色素 C 氧化酶是一种膜蛋白。见图 1 两绿色条带之间的区域。在膜上的分子一般都含有碳原子（白色示意）和硫原子（黄色示意）。在细胞中，这些原子通常被细胞膜包埋。请注意在图中顶部和底部区域中，布满了带电的氧原子和氮原子，着这里分别用红色和蓝色进行标注。这些区域对水分的含量要求较高，突出于细胞膜。这一形态结构使得细胞色素 C 氧化酶作为电子泵转移电子结合氧，产生水分子并释放能量的过程更加完美。随着氧的消耗，携带能量的氢离子从膜的一侧转运至另一侧，随后，这些能量用于 ATP 的生成或者转运氢离子出膜。

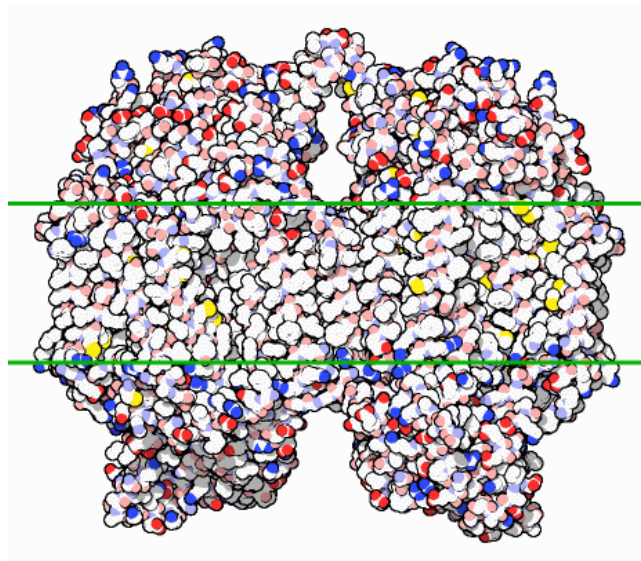


图 1

分子结构

细胞色素 C 氧化酶使用多种金属离子来转运电子至氧原子上。在图 2 的顶部绿色标注的两个铜原子被认为是反应的入口。它通常被称为“A”位点,并且十分靠近细胞色素 C(图中没有示意出)的结合区域,细胞色素 C 这一小分子蛋白能够转移电子至细胞色素 C 氧化酶。氧分子处于酶的中部,其自身结合能力很低。氧原子夹在一分子血红素铁原子(黄色示意)和一分子铜原子之间,被称为“B”位点。如图 2 中左侧所示的第二个血红素分子组合能够协助电子的转移。PDB 网站中 1oco 页面中显示的结构图中,含有一个一氧化碳活性结合位点,它能够组织酶与氧气分子的结合,从而使酶丧失功能。

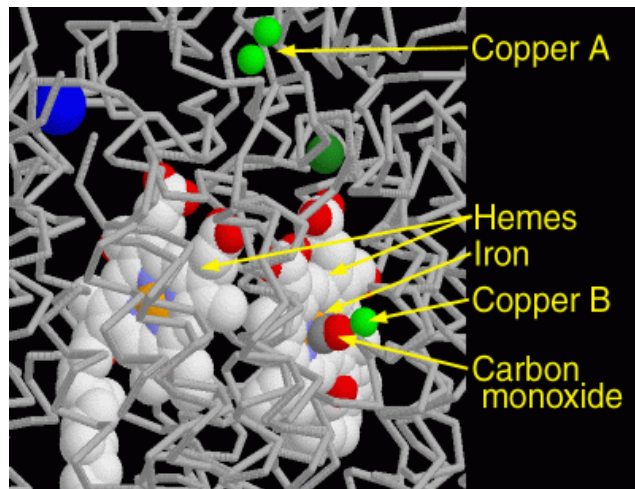


图 2

酶的演变

细胞中氧气的消耗发生在特定的区域,这一区域被叫做线粒体。在电镜下,线粒体的形态与低等细菌惊人的相似。现在,许多生物学家认为线粒体实际上是最初由细菌入侵细胞的结果。一种细菌入侵另一种细胞,但是却没有杀死这种细胞,相反,二者互利共生。当细胞分裂时,细菌也跟着复制,因此产生的两个子细胞也都含有这种细菌。随着世代的延续,二者逐渐变得谁也离不开谁。细胞内的细菌专门负责产生能量,而细胞本身主要提供保护和营养的供应。如今,这些细菌就是我们的线粒体。

这一共生关系的演化的证据在细胞色素 C 氧化酶中可以找到。哺乳动物的细胞色素 C 氧化酶十分复杂,包含有 13 条多肽链, (the cow enzyme is shown here, from PDB entry 1oco). 酶的轴心的三条核心肽链分别标注为黄色、橙色和红色,它们行使酶的主要功能,在它们周围是 10 条短肽链,标注为绿色和蓝色(如图 3)。

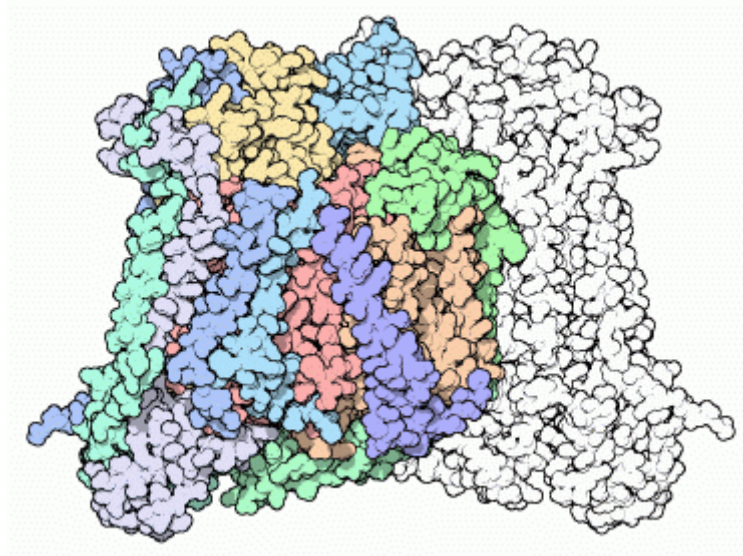


图 3

如果我们观察细菌的细胞色素 C 氧化酶（图 4），就会发现酶要简单得多。细菌的细胞色素 C 氧化酶仅由 4 条肽链组成，其中的三条与人类的非常相似，分别用黄色、橙色和红色进行了标注。另一条短链突出于酶的底部，并用蓝色标注。请注意，这种酶与哺乳动物酶的核心结构（图 3 中左侧）是多么的相似啊！

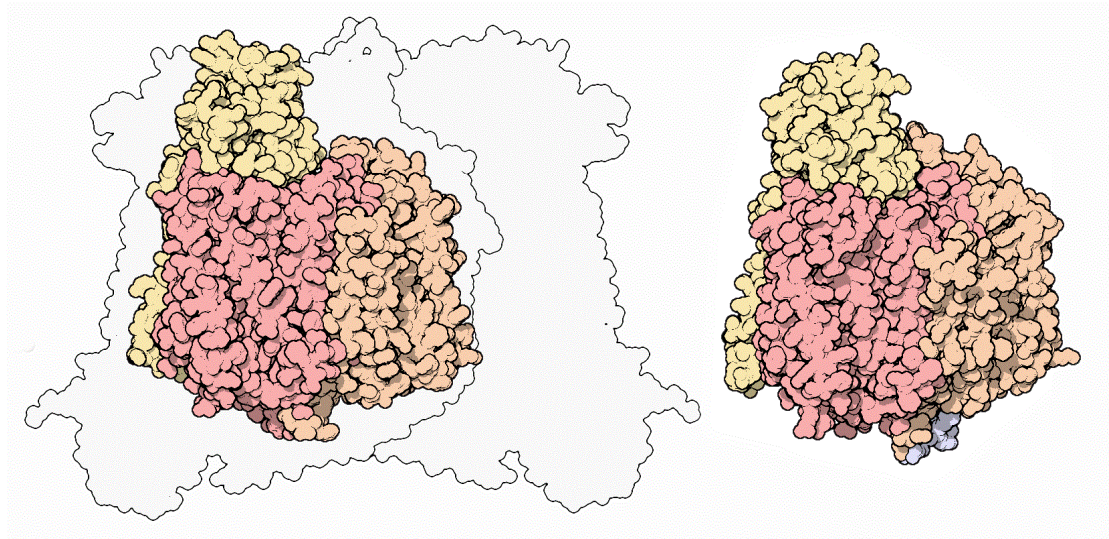


图 4

这种相似性竟是如此的惊人，但有趣的远远不止于此。人类的线粒体实际上具有合成它所需要的所有蛋白质的能力——线粒体中含有 DNA、核糖体以及合成蛋白质所需要的所有元件。在人体细胞中，三条核心肽链均在线粒体中合成，而其余的十条短链则是在细胞质中合成，然后转运至线粒体中。因此，人体的线粒体能够形成类细菌细胞色素 C 氧化酶，随后由人体细胞用其他多肽链对酶进行修饰以调控酶的功能。