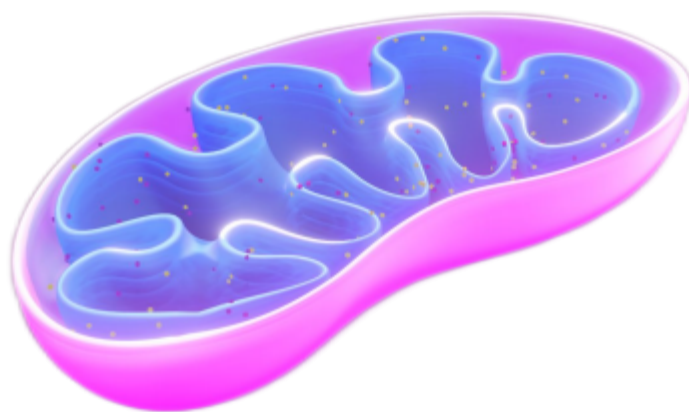


# 线粒体与细胞有氧呼吸

by 2516-toRefind

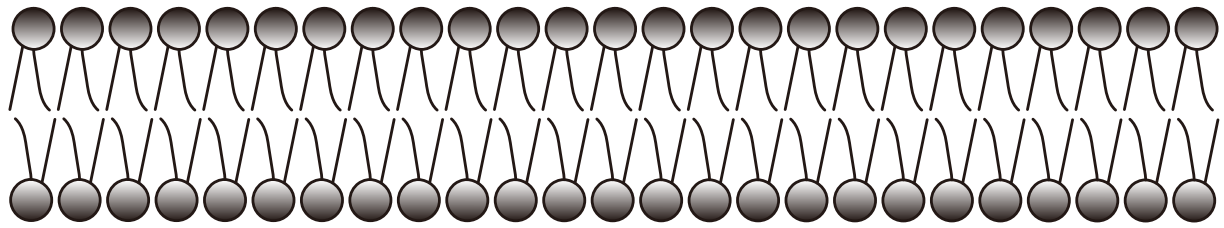


每当被问及“什么是生命”，我脑海中会浮现出两个答案“生命是物质、能量和信息的统一体”“生命是一个熵减奇迹”，前者体现了生命的组成，后者体现了生命存在的道理，这两句话在微观层面的细胞上体现得很清楚。下面就利用细胞的有氧呼吸让读者体会一下这种的观点。

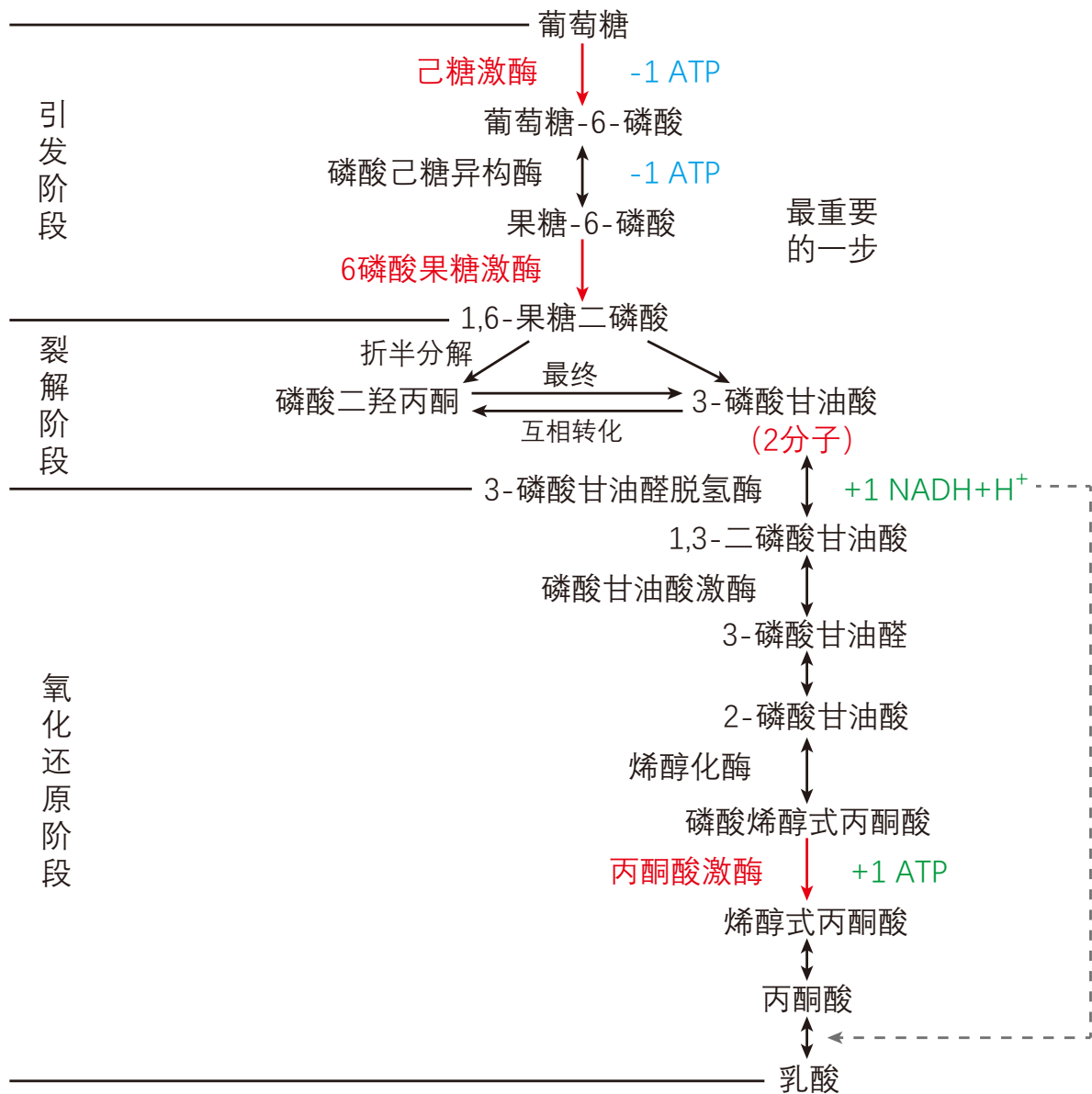
线粒体有两层膜。外膜通透性很高，所以膜间隙中的离子环境几乎与胞质相同。内膜的蛋白质/脂质质量比 $\geq 3:1$ ，且具有不透性，限制了所有分子和离子的自由通过，是质子电化学梯度的建立及 ATP 合成所必需的。内膜向内折叠形成的嵴极大地增大了内膜的膜面积，如，肝细胞线粒体内膜的表面积相当于细胞质膜的 17 倍。能量需求多的细胞中的线粒体的嵴的数量比较多，如，心肌细胞或骨骼肌细胞线粒体的嵴是肝细胞的三倍。这体现了生物“结构与功能相适应”的特点，体现了物质本身性质对生物功能的重大作用——课桌的结构与功能也相适应，但这不能说明课桌是生命体。

众所周知，有氧呼吸分三个阶段进行，分别是糖酵解，三羧酸循环，线粒体内膜上的电子传递。糖酵解把葡萄糖转化为丙酮酸，在细胞质基质进行。然后在线粒体基质中丙酮酸转化为乙酰 CoA，乙酰 CoA 转化为柠檬酸（含 3 个羧基  $-\text{CO}_2\text{H}$ ）参与三羧酸循环。三羧酸循环产生的 NADH 在脱氢酶的作用下产生氢离子与高能电子，高能电子在线粒体内膜经过一系列化合物（电子传递链）的传递，把能量转化为膜两侧的氢离子势能差，进而通过 ATP 合酶生成 ATP。

细胞膜

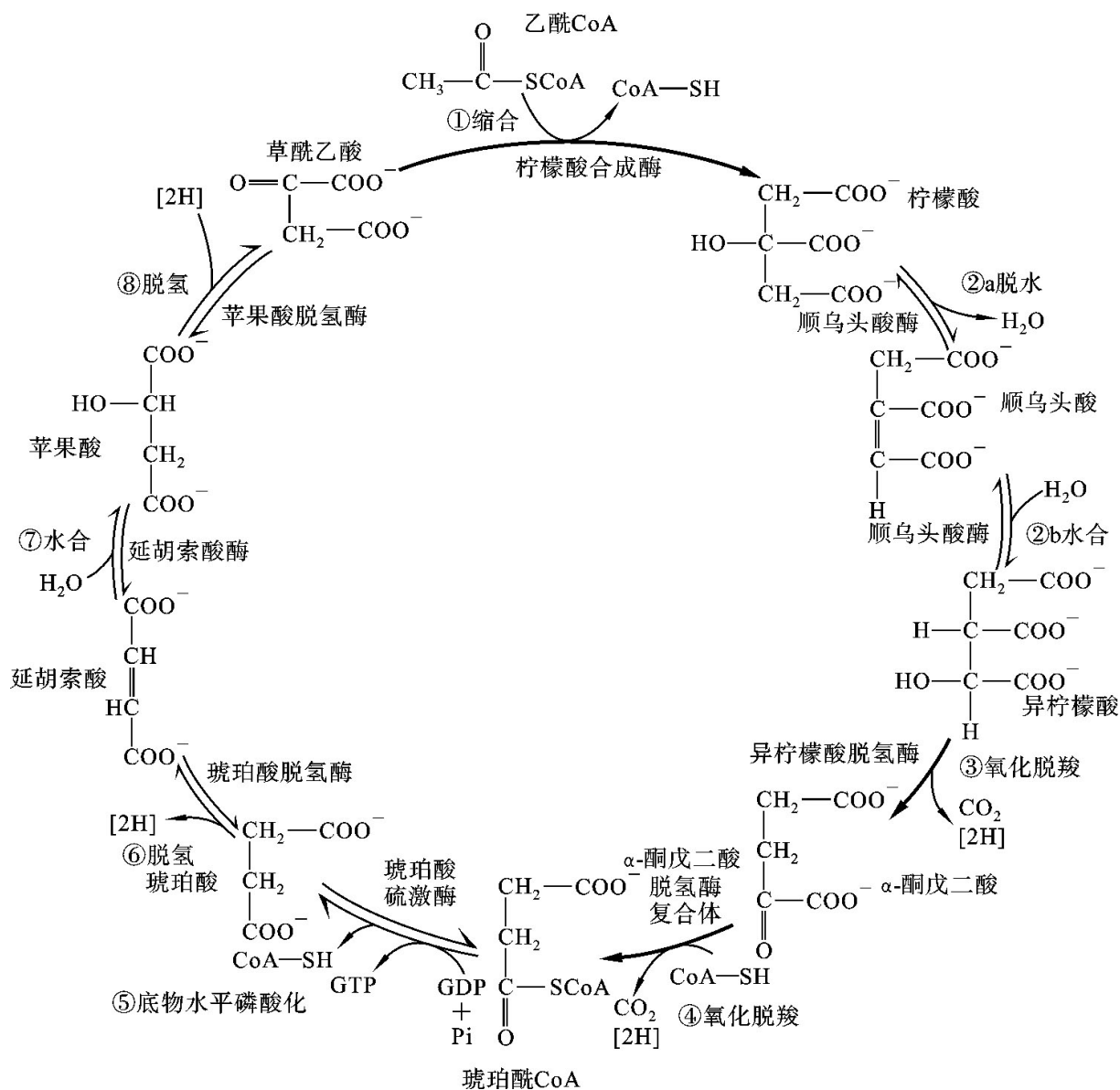


胞浆



糖酵解。糖酵解在细胞质基质进行，完全不需要氧气，一分子葡萄糖在一系列磷酸化与异构化之后，生成一分子果糖-1,6-二磷酸，一分子果糖-1,6-二磷酸又可生成两分子 3-磷酸甘油醛，3-磷

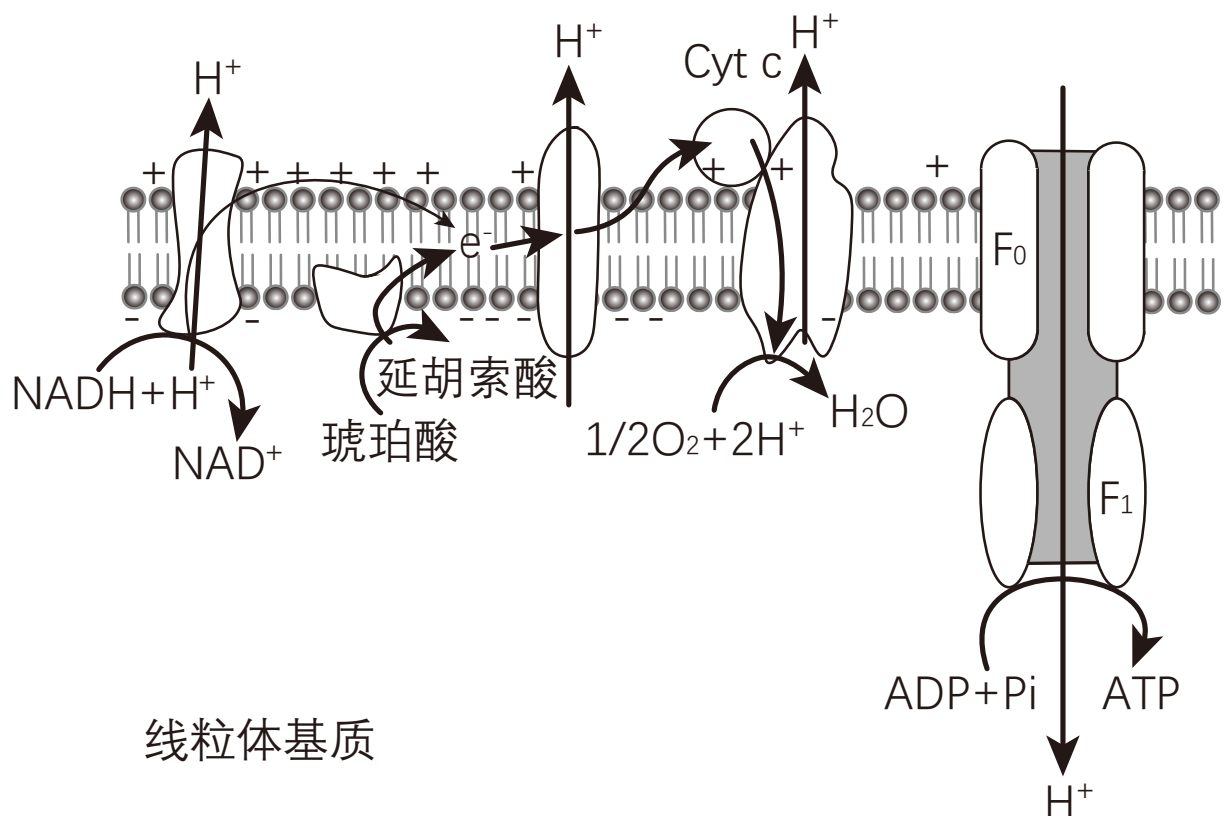
酸甘油醛经过一系列反应生成丙酮酸。全过程产生2个 ATP、2个 NADH。若为无氧呼吸，则丙酮酸在细胞质基质消耗 NADH 生成乳酸或乙醇和 CO<sub>2</sub>。



三羧酸循环。关于三羧酸循环，朱子鵬同学曾给我们提供过一个有趣的顺口溜：“乙酰草酰成柠檬，柠檬又成 α-酮，虎酰虎酸延胡索，苹果落在草丛中。”一个葡萄糖分子在三羧酸循环中要产生 2 个 ATP、6 个 NADH、2 个 FADH<sub>2</sub>（一种高能化合物）。

封面图片来自 Bilibili @BioCraft 上传的视频 [BV1E64y1t7X5](https://www.bilibili.com/video/BV1E64y1t7X5)；

文中插图由作者提供，编者重新绘制 (1 & 3) 或使用图像处理工具提高分辨率 (2)。



电子传递链。呼吸链中的电子载体有严格的排列顺序和方向，按氧化还原电位从低到高排列。排在越前面的还原性越强，这样它在得到电子后可以传递给后一个电子载体，氧化还原反应放出的能量用于把  $\text{H}^+$  泵出线粒体内膜，形成了  $\text{H}^+$  浓度梯度， $\text{H}^+$  通过 ATP 合酶进入线粒体基质，其减少的势能用于合成 ATP。

在体外氧化葡萄糖（如燃烧）所需条件较剧烈，且能量大部分都会作为热量散失。而在细胞内，葡萄糖的彻底氧化是分为许多步进行的，每一步都有专门的酶催化，使得原本葡萄糖氧化的反应活化能被拆成许多小截，而且酶本身就有降低活化能的本领，这使得细胞内的葡萄糖氧化反应条件十分温和，而且使葡萄糖的化学能得以逐渐储存入 ATP 中。这些生化过程应该就不用多说了：每一步反应都有信息的指导，包括反应物自带的信息，也包括调控分子携带的信息。

人类的线粒体基因组只编码 13 种蛋白质，约为线粒体生命活动所需蛋白质总数的 1%。但已知的线粒体病大多源于线粒体基因组编码的蛋白质缺失或缺陷，可见线粒体 DNA 突变的频率远高于细胞核 DNA。出现这种现象可能与呼吸链产生的自由基相关。正常情况下氧自由基可被线粒体中的  $\text{Mn}^{2+}$ -SOD（超氧化物歧化酶）清除，但机体衰老及退行性疾病时  $\text{Mn}^{2+}$ -SOD 活性降低，线粒体内氧自由基积累导致线粒体 DNA 损伤或突变。由此可见正确的（遗传）信息对于生物的正常生命活动有多重要，又可见适宜的的物质环境对生物的正常生命活动有多重要。

物质的结构决定了它具有怎么样的能量，决定了它携带什么信息。物质是能量与信息的载体。在信息的指导下，生命利用能量维持自身低熵状态，以此区别于非生命事物。这些观点应该是在任何生命现象中都有体现的，读者可以尝试着留心一下。