



# 血比黄金还贵，这家伙儿凭什么？

你有没有想过，血液并不总是红色的？在地球的生命画卷上，还流淌着蓝色、绿色、紫色，甚至如冰晶般透明的血液。更奇妙的是，这些血液的颜色还会在遇到氧气时发生改变。

今天，让我们抛开对血液的固有印象，用孩童般的好奇心，去探索这些流淌在生命中的“彩虹”。它们每一种独特的色彩，都讲述着一个关于化学、演化与生存的精彩故事。

据科普中国

## 运送氧气的“分子出租车”

血液颜色的秘密，藏在一种名为呼吸色素的特殊蛋白质里，你可以把它想象成一辆辆运送氧气的“分子出租车”。我们最熟悉的血红蛋白就是其中的红色款。此外，自然界还有蓝色的“血蓝蛋白”、紫色的“蚯蚓血红蛋白”等多种型号。

这些“出租车”的核心部件是一个金属离子（通常是铁或铜），它负责抓住和释放氧气。当氧气“上车”或“下车”时，会引起整个分子结构的微小变化，从而改变它对光线的吸收方式。我们看到的颜色，正是它吸收了某些光之后，反射到我们眼中的“剩余”颜色。

## 铁锈帝国：我们熟悉的红色血液

红色血液是脊椎动物世界的通用标准，其颜色源于血红蛋白。血红蛋白的颜色主要来自血红素这个结构本身，血红素是一个天然的“发色团”，其复杂的环状结构（卟啉环）使其能够吸收特定波长的光。在脱氧状态下，中心的亚铁离子（Fe<sup>2+</sup>）处于卟啉环平面之外，此时的血红素吸收光谱使血液呈现暗红色。

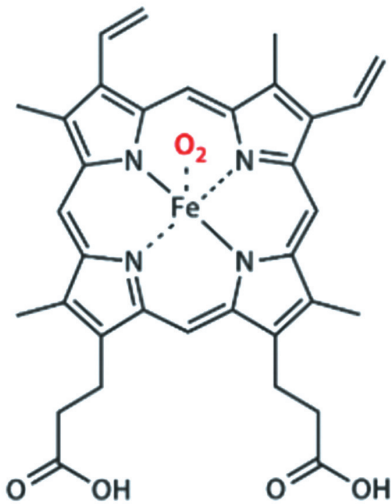
当与氧气结合后，铁离子被拉入卟啉环平面内，其电子状态也发生改变（更接近于一个 Fe(III) 离子与一个超氧根离子 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的组合）。这个细微的结构和电子变化，会“微调”卟啉环对光的吸收特性，使其吸收蓝绿光，从而反射出我们熟悉的鲜红色。

因此，氧气的结合只是调节了血红素固有的颜色，而非创造了颜色。

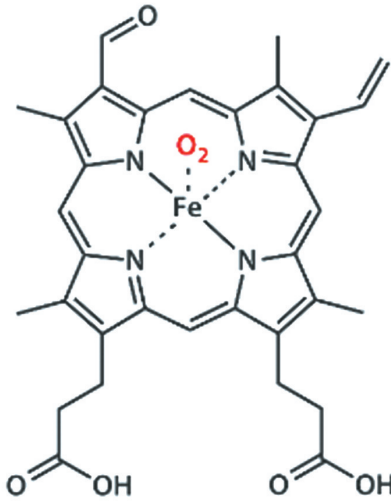
## 为什么静脉看起来是蓝色的？

这是一个经典的视觉错觉！静脉中的暗红色血液本身并非蓝色。光线穿透皮肤时，波长较长的红光能穿透得更深，被血液吸收；而波长较短的蓝光则更容易被表层皮肤反射回来。因此，我们看到的其实是皮肤反射的蓝光，而非血液的真实颜色。

值得注意的是，血红蛋白相比于其他呼吸色素更小，具有强反应活性的血红素很容易暴露，使得它具有剧毒性。因此，在人体内，血红蛋白一般被封装在红细胞中。其中，血红素对一氧化氮的亲合力比氧气还要强，而人体将一氧化氮作为信号分子控制血压。因此，过量的游离血红蛋白会夺走血液中的一氧化氮，收缩血管，可能导致高血压和血流量降低。



血红蛋白氧合后的结构



血绿蛋白氧合后的结构



血蓝蛋白

## 神秘的绿色

绿色血液在动物界极为罕见，其成因不止一种，恰好展示了演化的殊途同归。

### 故事一：血绿蛋白的“变身术”

在某些海洋蠕虫和水蛭体内，存在着一种血绿蛋白。它和血红蛋白是近亲，同样用铁来运氧。但它的血红素结构有一个微小的化学修饰（一个乙烯基被替换为醛基），这个“小改动”就足以让它的颜色变为绿色。有趣的是，它像“红绿灯”一样，在稀薄时是绿色，在高浓度下反而会显现出淡红色。

### 故事二：绿血石龙子的“毒血”策略

生活在新几内亚的一种石龙子（蜥蜴），血液、骨骼和肌肉都是鲜绿色，但它用的仍然是红色的血红蛋白！

这种绿色来源于一种名为胆绿素的物质，胆绿素是血红蛋白分解后的有毒产物（我们皮肤上的淤青变绿就是因为它），大多数动物会迅速将其代谢掉。而这种蜥蜴却反其道而行，在体内大量积累高浓度的胆绿素，其浓度足以致死人类，但它却安然无恙。这种强烈的绿色完全盖住了血红蛋白的红色，科学家推测这可能是一种抵御寄生虫的生存策略。

## 蓝与紫：“从无到有”的色彩魔法

与血红蛋白不同，一些海洋生物的血液上演着“从无到有”的色彩魔法。

### 血蓝蛋白的“铜芯”方案

章鱼、鱿鱼、龙虾和鲎（hòu）等生物拥有蓝色的血液，这要归功于血蓝蛋白，它的核心金属是铜。

与血红蛋白不同，脱氧状态的血蓝蛋白是无色的。因为其活性中心的两个铜离子处于一价（Cu(I)），其 d 电子层是全满的（d<sup>10</sup> 构型），这种状态的离子无法有效吸收可见光。

当氧气结合时，会发生一次真正的化学反应。两个 Cu(I) 离子被氧化为 Cu(II)，同时氧分子被还原为过氧根离子（O<sub>2</sub><sup>2-</sup>）。这个新形成的复合物从无到有地创造了一个发色团。

### 血蓝蛋白

在这个新结构中，电子可以从过氧根“跳跃”到铜离子上，这个过程被称为配体到金属的电荷转移（LMCT）。这种电荷转移跃迁强烈地吸收了光谱中的红橙光部分，因此血液呈现出鲜明的蓝色。血蓝蛋白虽然携氧效率不如血红蛋白，但在低温、低氧的深海环境中表现得更稳定，是这些“蓝色贵族”的完美选择。

鲎就是珍贵的蓝色血液，鲎的蓝色血液远不止“好看”这么简单，它还是守护现代医学安全的一道至关重要的防线。这种看似不起眼的生物，是名副其实的“活化石”，在地球上已存在超过 4 亿年。

在鲎的蓝色血液中，有一种特殊的变形细胞。一旦遇到细菌释放的内毒素（一种能引发人体致命感染的剧毒物质），这些细胞就会迅速将毒素包裹、凝固，形成一道物理屏障。

科学家利用这一特性，从鲎的血液中提取出一种名为“鲎试剂”的物质。在制药领域，任何需要注入人体的产品，从疫苗、注射剂到植入体内的医疗器械（如心脏支架、人工关节），在出厂前都必须通过鲎试剂的检测，以确保其绝对无菌。也正因此，鲎的蓝色血液比黄金还要昂贵，被称为“蓝金”。这也引发了对鲎的过度捕捞和生存困境的担忧。

## 低调紫：蚯蚓血红蛋白的独特铁键

在一些穴居的海洋蠕虫和腕足动物体内，流淌着紫色的血液，它们的“出租车”是蚯蚓血红蛋白。

它虽然也用铁，但结构非常独特：用两个铁原子直接与蛋白质侧链结合来捕获氧气。与血蓝蛋白类似，脱氧状态的蚯蚓血红蛋白也是无色的。其活性中心由两个亚铁离子（Fe<sup>2+</sup>）构成，但没有血红素的卟啉环，无法有效吸收可见光。

与氧气的结合同样是一次化学反应。两个 Fe<sup>2+</sup> 离子被氧化为三价铁（Fe<sup>3+</sup>），而氧分子被还原并获得一个质子，形成一个氢过氧根配体（-OOH）。这个新形成的结构也通过 LMCT 跃迁产生颜色：电子从氢过氧根跃迁至铁离子，导致分子吸收特定波长的光，最终呈现出柔和的紫红色或粉红色。

它的效率不高，更像一个“氧气储存罐”，非常适合氧气浓度稳定但偏低的穴居生活。

## 幽灵血：南极冰鱼的生存极限

演化的想象力远超于此，最极端的例子莫过于南极冰鱼。它是已知唯一完全没有呼吸色素的脊椎动物，血液像水一样透明。这种“放弃治疗”的策略在别处是致命的，但在南大洋的极端环境中却成为可能。这里的海水常年接近冰点，溶解了大量的氧气，同时低温也让冰鱼的新陈代谢变得极为缓慢。

为了在没有“出租车”的情况下生存，冰鱼演化出了一套惊人的补偿机制：

一颗异常巨大的心脏和超高的血流量。

一个庞大、密集的血管网络，将血液送到身体的每个角落。

一身无鳞的皮肤，可以直接从富氧海水中吸收氧气。

血液中含有高效的“抗冻蛋白”，防止自身结冰。

冰鱼的无色血液，是一场在极端环境下的演化豪赌。它告诉我们，演化并非总是在追求完美，有时它会容忍一个“意外”，并围绕这个意外，构建出一套全新的、令人叹为观止的生存法则。

从我们熟悉的红色，到海洋中的蓝与紫，再到南极的透明，血液的每一种色彩，都是生命为适应这个星球多样的环境而精心调配的“化学配方”。它们共同绘成了一道绚丽的生命彩虹，展示着演化的无穷创造力。