

# 引言 生物演化和基因



地球是生命的大家园，在这里生活着几百万种生物。茂密的森林、广阔的草原、飞翔的鸟儿、遨游的鱼群，使我们的世界充满生机。人类更是地球生物中最杰出的代表，我们不仅被这个世界所产生，还能够反过来研究和理解这个世界。

生命是如此美妙，人们自然想知道生命是从哪里来的。在科学不发达、对生物的认识还很肤浅的古代，关于生物起源的故事常常充满神话色彩。宋代的百科全书《太平御览》中说，女娲于正月初一创造出鸡，初二创造出狗，初三创造出猪，初四创造出羊，初五创造出牛，初六创造出马，初七创造出人。《圣经》的《创世纪》中说，上帝在第一日将水分为上下两部分，在中间创造出空气，第二日创造青草、菜蔬、树木等植物，第三日分昼夜，第四日创造鱼鸟等动物，第五日创造牲畜、昆虫、野兽，第六日创造人。在这些故事中，创造生命被认为是一件比较容易的事情。上帝“用地上的尘土造出了一个人，往他的鼻孔里吹了一口气，有了灵，人就活了，能说话，能行走”。而女娲造人时，也是往泥做的人胚的鼻孔里“吹一口气，有了灵，人就活了”。

既然生命如此容易形成，也有人认为生命不是通过神之手，而是由其他物质在一定条件下自然产生的，即所谓的生命自然发生说。例如，成书于汉代的《礼记·月令》篇中就说“季夏之月……腐草化萤”，也就是萤火虫可以由腐烂的草变出来。类似的说法还有“腐肉生蛆”。有趣的是，西方也有人认为蛆是腐肉变来的，而且还认为脏衣服和尘土会生出虱子，脏水可以生出蚊子。在微生物被发现后，人们又发现肉汤里也可以生出微生物，而且煮沸过的肉汤过一段时间仍然会长出微生物。由于当时人们已经有了高温可以杀死生物的概念，这个结果也使人们相信，微生物可以在肉汤中自然产生。

然而科学实验的结果却否定了生命自然发生说。1755年，意大利生物学家拉扎罗·斯帕兰札尼（Lazzaro Spallanzani）发现，虽然玻璃瓶中被煮沸过的肉汤也会长出微生物，但是如果在肉汤被煮沸后把瓶口塞住，肉汤就不会腐败。1860年，法国微生物学家路易斯·巴斯德（Louis Pasteur）把玻璃瓶口变成细长的S形管子，

虽然肉汤仍然与空气相通，但由于空气中带有微生物的灰尘难以通过弯曲的细管，肉汤仍然不会腐败（图 0-1）。这些实验证明，使肉汤腐败的微生物其实来自空气中的尘埃，而不是肉汤自己产生的。“腐草生萤”“腐肉生蛆”，只不过是萤火虫和苍蝇产卵的过程很难被观察到而已。这些实验表明，生命只能来自现成的生命，不能自然地快速产生。

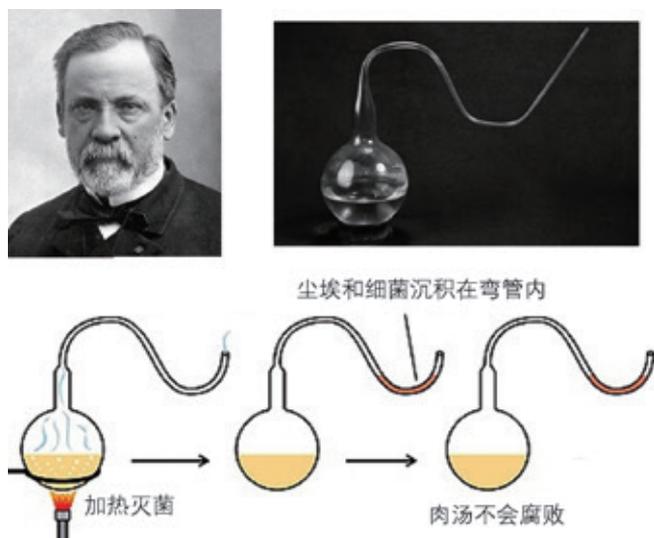


图0-1 巴斯德和他的S形管口玻璃瓶实验

不过生物之间差异极大，孔雀和菊花、蝴蝶和菠菜之间，从表面上就看不出有任何共同性。如果生命只能来自生命，那么数百万种彼此不同的生命似乎就应该有各自的起源，因为难以想象孔雀和菊花还会有共同的祖先。

人的生命一般只有几十年，绝大多数人的生活范围又有限，很难察觉到生物的物种还会改变。人老的时候看到的燕子麻雀和小时候看到的并无不同，小时候吃的萝卜白菜到自己老时还是那个样子。即使在人类有记录的几千年历史中，也看不出有物种变化的迹象。鸟兽虫鱼、花草树木，包括人自己，古代和现代好像也没有什么差别。这种情形很容易使人产生物种不变的概念：无论是神造的，还是自然发生的，各种生物自产生之日就是那个样子，不会改变。

既然物种不会改变，世界上又有那么多物种，要谈所有物种的起源就很困难。即使是主张“腐肉生蛆”的自然发生说，也很难想象什么东西腐败后会生出一只鸡，更不要说生出人了。所以在中世纪的欧洲，人们普遍认为所有的生物物种都是上

帝创造的。东方的佛教则回避了这个问题，认为这个世界是没有起始也没有结束的，只有因果循环，生命也是这样，“一切世间如众生、诸法等皆无有始”（见《佛光大辞典》），所以根本没有“生命如何产生”的问题。

这种观点随着人们视野的扩大而开始改变了，其中最关键的是英国地质学家和生物学家查尔斯·达尔文（Charles Darwin）的一次环球旅行（图 0-2）。1831 年，年轻的达尔文随海军探测船贝格尔号（HMS Beagle）进行远洋航行，考察地质、植物和动物。考察船从英国出发，驶过大西洋到达南美洲，访问了许多地方，然后横渡太平洋，经过澳大利亚，越过印度洋，绕过非洲的好望角，于 1836 年回到英国。



图0-2 达尔文的环球考察

考察船到达的第一站是位于大西洋中部的岛国佛得角（Cape Verde），在那里达尔文发现火山岩的上面有一层白色的岩石，里面居然有贝壳！这说明这些岩石曾经在海底，是地层上升把它们带到了现在的位置。在安第斯山（Andes）的高处，他又发现了贝壳，说明这里的地层也是在漫长的时期中上升到现在的高度的。在智利，他还经历了一次地震，亲身感受到大地震动，这更使他认识到地层不是稳定不变的，而是会随着地质活动而改变，包括抬升高度。

在南美洲西北部的厄瓜多尔附近，有个加拉帕戈斯群岛（Galapagos Islands）。岛屿之间的距离长达几十千米，因此这些岛屿上的动物基本上是彼此隔绝的。达

尔文发现，不同岛上的陆龟，尽管彼此非常相似，但是在大小和形状上又各有特点，当地人一眼就可以分辨出是哪个岛上的陆龟。这使达尔文想到，陆龟这个物种是可变的，是地理上的隔绝使他们各自发展出来的差异得以保存，并且积累到容易辨识的程度。这些岛上还居住着学舌鸟（Mockingbird，能够模仿别的鸟，甚至能模仿昆虫的叫声），它们与南美大陆上的学舌鸟相似，但是喙的大小和形状又有差别，有的短而强壮，有的却比较细长（图 0-2 右）。达尔文发现，这是为了适应这些岛上不同的食物来源：短而强壮的喙适于啄开坚果，而细长的喙则适合啄食岩缝中的食物。是岛屿之间的分隔和岛上食物来源的不同使学舌鸟喙的形状向不同的方向变化，以适应岛上的这些环境。

在阿根廷阿尔塔角（Punta Alta）的一处山岩上，达尔文发现了巨型地懒（Megatherium）的化石，旁边还有许多现代类型的贝壳，说明这种生物是最近才灭绝的。这个发现使达尔文认识到，物种不但可以产生，也可以灭绝。

在环球旅行途中，达尔文还见到过不少土著居民，他发现这些人幽默而且相处愉快。这时他已经确信，所有的人种都是彼此相关的，有共同的祖先；人和动物之间也没有不可逾越的鸿沟。

在对大量生物及其化石观察和研究的基础上，达尔文于 1859 年正式提出了生物演化的观点。在其著名的《物种原始》（*The Origin of Species*）一书中，他认为地球上的生物是由少数共同祖先经过变异和自然选择而来的。物种能够变化，能够适应环境的物种就存活下来并且得到发展，不能适应环境变化的物种则被淘汰，是环境的多样性和不断变化造就了众多的生物物种。在达尔文的年代，人们对生物的认识多限于外部观察，对生物的内部结构和工作原理还很少了解，在这种情况下他能够提出这样的思想和观点，是极具洞察力的，从此他把对生物发展的研究置于科学的基础上，其观点至今仍是生物演化理论的核心内容。

其实早在达尔文之前，生物演化导致的不同物种之间的亲缘关系就已经被人注意到了。地球上的生物尽管千差万别，但并不是杂乱无章、彼此毫不相关的，而是一些生物具有某些共同特征，另一些生物又具有其他一些共同特征，这样就可以按照共同特征对生物进行分类，大类里面还可以分小类。公元前 300 多年，希腊思想家亚里士多德（Aristotle）就将生物分为植物和动物两大类，其中动物又被分为胎生动物、四脚动物、无血动物、有血动物，有血动物还被分为冷血动物和温血动物。在中国，文字里面很早就有“禽”“兽”“草”“木”“虫”等字，说明我们的祖先也早就有生物分类的概念。在完成于 1578 年的《本草纲目》中，

明朝医药学家李时珍就将生物药材进行了分类，例如，他将动物分为虫、鳞、介、禽、兽等部，植物分为草、谷、菜、果、木等部，其中草又被分为山草、芳草、醒草、毒草、水草、蔓草、石草等类。

1735年，瑞典植物分类学家卡尔·林奈（Carl Linnaeus）发表了《自然系统》（*Natural System*）的第一版，将分类方法系统化，提出了界、纲、目、属、种的概念，并且创立了双名命名法，即属名加种名。这就把各种生物归并到不同的类别中，每种生物都有自己特定的位置，可以一眼看出生物之间的远近关系。

在林奈的分类系统中，界是最大的类别，如植物界和动物界，它们之间的差异最大，仅仅是同为生物而已。到了纲这一级，共同性就多一些，如林奈的6个动物纲（哺乳类、鸟类、两栖类、鱼类、昆虫、蠕虫）中，鱼之间彼此相似，鸟之间也彼此相似，但是鱼和鸟有显著不同。越是靠近分类的末端，生物之间的共同性就越多，如在哺乳类中，不同种的马之间非常相似，不同种的牛之间也非常相似，但是牛和马之间的差别就要大一些。把这种分类的情形画成图，就非常像树干分枝，大枝分为中枝，中枝分为小枝，其中最大的枝为界，最小的枝为种（图0-3）。

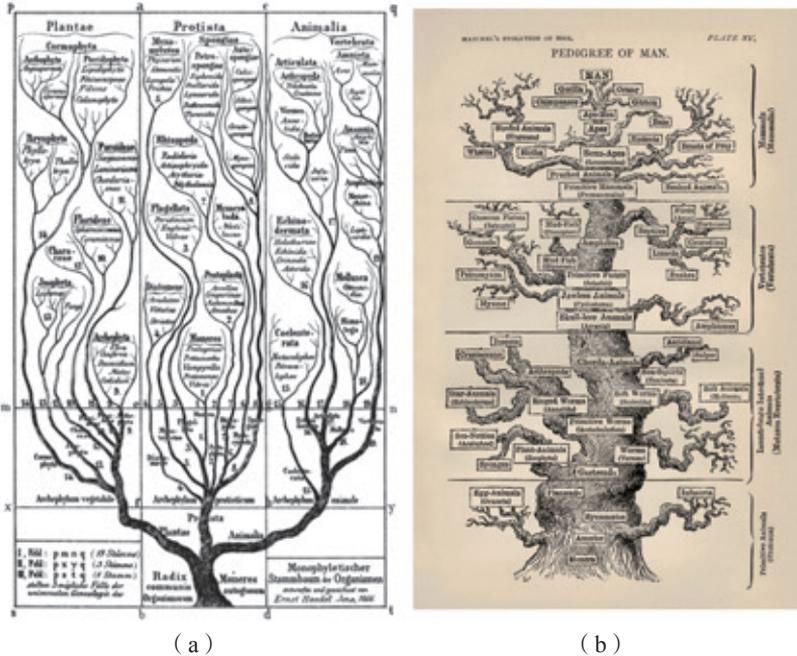


图0-3 19世纪60年代德国科学家汉克尔（Hankel）画的生物演化树（a）和人类演化途径（b）

这种分类树实际上已经在暗示，所有的生物都来自共同的祖先，就像树木上所有的小枝都来自种子发芽时的那根主干。可惜林奈认为物种是不变的，因而也意识不到分类树所包含的深意。直到 124 年后达尔文的生物演化学说出来，人们才恍然大悟，原来分类树其实就是生命演化树，并且开始从生物演化的角度来研究物种及其变化。

既然分类树就是演化树，人们除了对现有的生物进行分类外，还对生物的去进行研究，以了解生物演化的历史过程，这就是对化石的研究。化石是过去的生物死亡后留下的物质或者痕迹，早已被人类注意到。亚里士多德就发现岩石中的贝壳化石与海滩上的贝壳很相似，认识到化石是过去的生物遗留下来的。18 世纪初，首先用显微镜观察到微生物的英国科学家罗伯特·胡克（Robert Hooke）观察了已经灭绝的菊石（软体动物如乌贼和章鱼带外壳的祖先）的化石，认识到这是以前生活过的生物遗留下来的。19 世纪初，英国的古生物学家玛丽·安宁（Mary Anning）发现了相当完整的鱼龙和蛇颈龙这两种恐龙的化石，更证明有许多生物曾经在以前生活过，但是后来消失了。

在安宁发现恐龙化石的同时，准确测定岩石年龄的方法也出现了，这就是对放射性同位素的应用。放射性同位素是能够放出射线的化学元素，而且在放出射线后还会变成另一种化学元素，这个过程叫作衰变。每种放射性同位素衰变的速率是固定的，与温度和化学状态无关，因而可以用来测定岩石的年龄。例如，铀能够衰变为铅，岩石中的铅越多，铀越少，岩石形成的年代就越久远。测定岩石中铀和铅的相对数量，就可以计算出岩石的年龄。除了铀，还有多种放射性同位素可以用来测定岩石的年龄。

用这种方法，科学家计算出地球的年龄为 45.4 亿年。各种生物出现的时间也符合达尔文的预期，即地球上的生物是从简单的祖先演化而来的：40 亿年前只有单细胞的细菌；最早的多细胞动物海绵出现在约 6 亿年前；脊椎动物（身体中有脊柱的生物）出现在约 4 亿年前；哺乳动物出现的时间还不到 2 亿年；而人类最古老的化石则只有几百万年的历史。最早的陆上植物（苔藓）出现在大约 4.7 亿年前，能够结种子的植物出现在大约 3.5 亿年前，而开花植物要到大约 1.3 亿年前才出现。

除了化石，科学家也对地球过去的各个历史时期做了大量的研究，发现在 40 多亿年的时间内，地球发生过许多重大变化。大陆并不是固定不动的，而是在不断漂移，不同的大陆之间分分合合，相撞时形成高原山脉，分开时形成新的海洋。火山爆发喷出的气体会造成气候变化，地球表面温度也剧烈变化过多次，最热时

海水温度曾经达到 40 摄氏度，最冷时整个地球都被冰雪包裹。再加上地震和陨石撞击，地球上的生物经历过一场又一场的浩劫。环境适合时生物大繁荣，蕨类植物长到 40 多米高，蜻蜓的翅展达到过 65 厘米，恐龙统治地球，而灾难来临时又有成批的物种灭绝。据估计，在地球上曾经存在过的物种中，超过 99% 已经灭绝。大量原有的物种消失，新的物种不断出现，这才是地球上生物发展的情形。将这个过程写出来，就是第一种生命史。

生物的细胞结构也支持达尔文关于地球上所有的生物都来自少数共同祖先的观点，不过细胞很小，只有一微米到几十微米，而在近距离观察时，人眼的分辨率在 100 微米左右，自然看不见细胞。显微镜的发明使人能够看见人眼不能直接看到的东 西，包括生物的细胞结构。1837 年，德国的生理学家西奥多·施旺（Theodor Schwann）和植物学家马蒂亚斯·施莱登（Matthias Schleiden），在他们各自对生物结构观察的基础上，共同发表了生物结构的细胞学说（图 0-4）。这个学说认为，地球上所有的生物，无论是动物还是植物，也无论大小形状、简单还是复杂，都是由细胞组成的，而且细胞只能来自细胞，即新的细胞只能由已有的细胞分裂而来。如果各种生物都有自己的祖先，那么所有这些祖先也就必须不约而同地发展出类似的细胞结构，而这种可能性是非常小的，因此地球上的各种生物应该来自共同的、细胞形式的祖先。

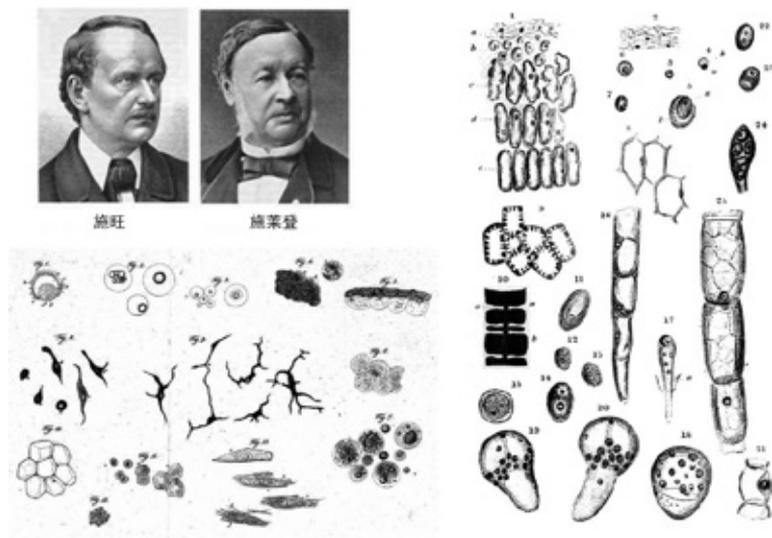


图0-4 施旺、施莱登和他们观察到的细胞

所有这些资料都支持达尔文的物种可变、自然选择的观点，但是有一个重要问题没有回答，就是这种现象背后的机制：是什么原因使物种发生变化，而变化一旦发生，又能够在相当长的时期内保持这些性状，形成相对稳定的物种，以至于在短期之内会被人们认为是不变的？换句话说，要理解达尔文提出的生物演化现象，就必须解释生物在大时间尺度上的变化和在小时间尺度上的稳定。要了解这个机制，仅凭观察已经不够了，必须进行科学实验。而关于这个机制的第一条线索，是由与达尔文同时代的奥地利生物学家格雷戈尔·孟德尔（Gregor Mendel）提供的。

孟德尔出生于一个农民家庭，从小就在家里的农庄中干活，对植物栽培非常熟悉，后来又在大学里接受过物理学、数学和生物学的教育，所以也是受过训练的科学家。在当时，许多农民已经懂得用杂交来改善作物的性状，但是缺乏理论研究。孟德尔决定利用自己的科学知识，对杂交进行系统的研究。他发现，同为豌豆，不同品种之间却在许多性状上有明显差别。他选择了7种容易鉴别的差异来进行研究，分别是植株的高矮、种子的形状、花的颜色、种皮颜色、豆荚的形状、未成熟豆荚的颜色，以及花在植株中的位置。其中植株的高和矮、花色的红和白、种子形状的圆和皱最为人所知，其实用其他性状所做实验的结论也是相同的。

例如，他把开红花和开白花的豌豆进行杂交，产生的杂交种（杂交第一代）都开红花，好像控制开白花的机制消失了。但是当他用这些杂交种培育下一代（杂交第二代）时，却有一些植株开出白花，说明控制开白花的机制并未消失，只是被暂时掩藏起来了。然而在杂交第二代中，开红花的植株数是开白花的植株数的3倍，这个现象又该如何解释呢（图0-5）？

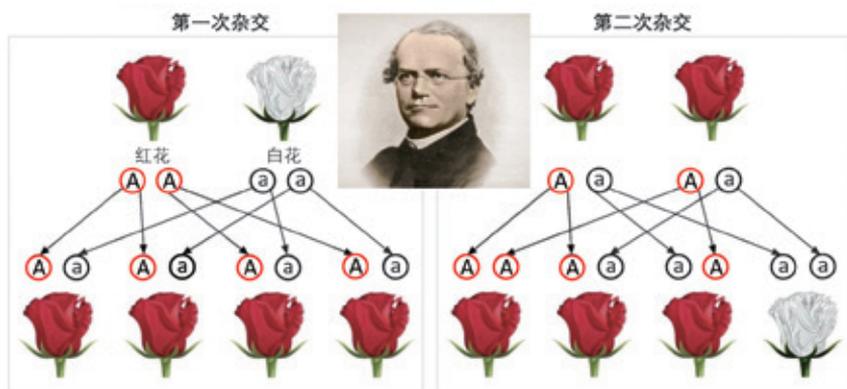


图0-5 孟德尔的豌豆遗传实验

经过思考，孟德尔认为，控制豌豆这些性状的是某种物质单位，这些单位可以把生物的性状传递给后代，所以又叫作遗传单位。每种豌豆都有双份遗传单位，一份来自父本植物，一份来自母本植物。豌豆繁殖时，花粉（能够提供精子）和胚珠（含有卵）都只含一份遗传单位，二者结合（受精），又形成含有两份遗传物质的细胞，进而发育成为植株。

如果把控制开红花的遗传单位用  $A$  表示，控制开白花的遗传单位用  $a$  表示，杂交第一代遗传单位的组成就是  $Aa$ 、 $aA$ 。由于当时还不知道的原因， $A$  能够发挥作用，开出红花，叫作显性的， $a$  在  $A$  存在时不能发挥作用，被称为是隐性的，所以杂交第一代都开红花。

在从杂交第一代繁殖出第二代时， $A$  和  $a$  彼此分开，分别进入精子和卵，并且在受精时再结合，这样就有 4 种结合方式， $AA$ 、 $Aa$ 、 $aA$  和  $aa$ 。由于  $A$  和  $a$  进入精子和卵的过程，以及不同精子与不同卵结合的过程都是随机的，每种结合方式的概率应该相同。但由于  $A$  是显性， $a$  是隐性， $AA$ 、 $Aa$  和  $aA$  都开红花，只有  $aa$  没有  $A$  的掩盖作用，所以开白花，红花植株和白花植株的数目比应该是 3 : 1，这就完美地解释了豌豆杂交的实验结果。无论是用 6 种性状中的哪一种做实验，结果都一样。

这是极为重要的结果，表明生物的性状是被由物质组成的单位控制的，而且这些单位还能够传给后代。而且从这样的实验结果，孟德尔能推断出豌豆有两份遗传物质（现在所说的二倍体），精子和卵只有一份遗传物质（现在所说的单倍体）。

1865 年，孟德尔在自然史学术会议上报告了他的研究成果，题目是《植物的杂交实验》。由于题目过于普通，这些结果并没有立即引起科学界的重视，但是在不久之后就有人认识到这些结果的重要性，并且用各种方式重复孟德尔的实验，其中最成功的就是美国遗传学家和生物学家托马斯·摩尔根（Thomas Morgan）的实验。

1908 年，摩尔根用实验来检验孟德尔结论的正确性，不过他没有重复豌豆杂交实验，而是采用果蝇这种主要靠腐烂的水果为食的昆虫。但是果蝇的体形比较小，性状不好观察，于是摩尔根用多种方法来使果蝇产生容易观察的变种，包括强光和黑暗、加温和降温、用 X 射线照射，甚至用离心机来增加重力等，但是在两年的时间内一无所获。直到 1910 年，摩尔根的实验室终于产生一只白眼睛的雄果蝇，而正常果蝇的眼睛是红色的。用这只白眼的雄果蝇与红眼的雌果蝇交配，产生的杂交第一代全是红眼睛。当用这些杂交第一代的雌果蝇与正常的红眼雄果

蝇交配，产生杂交第二代果蝇时，白眼果蝇又出现了，而且红眼果蝇与白眼果蝇的比例也是 3 : 1，和孟德尔豌豆杂交实验的结果完全一致（图 0-6）。

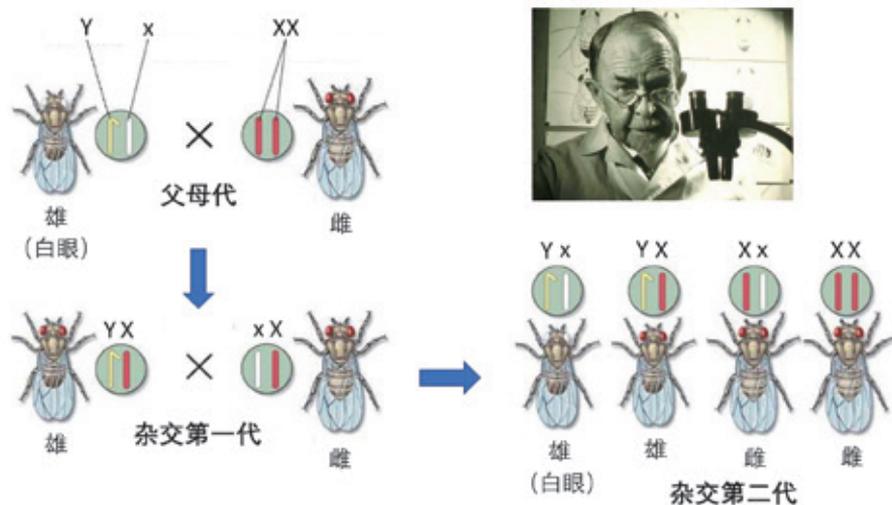


图0-6 摩尔根和他的果蝇杂交实验

不仅如此，杂交第二代中的 782 只白眼果蝇还全都是雄性的。在当时，细胞中的染色体已经被发现，因为它易于被染料染色而被看见。果蝇有 4 对染色体，其中 3 对彼此相同，而第 4 对在不同性别的果蝇中不同。在雌性果蝇中这两条染色体的长度和结构都相同，叫作  $XX$  染色体对；而在雄性果蝇中，这一对染色体大小形状不同，其中的一条和雌性果蝇中的  $X$  染色体相同，另一条只存在于雄性果蝇中，叫作  $Y$  染色体，因此  $X$  和  $Y$  是和果蝇性别有关的染色体，叫性染色体。杂交第二代的白眼果蝇全部为雄性，说明控制红眼生成的遗传单位与性染色体有关。

摩尔根的解释是，控制红眼生成的遗传单位在  $X$  染色体上。在最初的白眼雄果蝇中，这个遗传单位的变化（现在看来很可能是由  $X$  射线照射引起的）使生成红眼的功能丧失。由于雄果蝇只有一条  $X$  染色体，这条染色体中该遗传单位的改变使这只雄果蝇丧失正常的生成红眼的遗传单位，只能生成白色的眼睛。当这只雄果蝇与正常的雌果蝇交配时，在杂交第一代中，雌性的两条  $X$  染色体中的一条来自白眼雄果蝇，不能生成红眼，但是另一条  $X$  染色体却来自正常的雌果蝇，遗传单位没有变化，所以仍然可以产生红眼。而雄性果蝇的  $X$  染色体只能来自正常

雌果蝇，因此眼睛应该是红色的。如果用 X 表示能够正常产生红眼的 X 染色体，用 x 表示不能产生红眼的 X 染色体，在雌性中就有 X1 和 X2，在白眼雄性中就是 x 和 Y。分别含 X1 和 X2 的卵与分别含 x 和 Y 的精子结合，就有 X1x、X2x、X1Y、X2Y 这 4 种结合方式，它们都含有 X，因此杂交第一代都是红眼睛的。在这里 X 就相当于豌豆实验中的显性，x 相当于隐性。

杂交第一代的雌果蝇产生分别带 X 和 x 的卵（这里的 X 是 X1 还是 X2，效果都一样），而正常雄果蝇产生分别含有 X 和 Y 的精子，它们之间的随机结合也有 4 种方式，XX、XY、xX 和 xY。其中 XX、XY、xX 都含有 X，因此是红眼睛，只有 xY 表现出白眼睛，红眼睛果蝇的数量与白眼睛果蝇的数量比也是 3 : 1。

摩尔根的实验结果不仅证实了孟德尔的遗传单位理论，还证明遗传单位存在于染色体上，这是另一个重要的进展。摩尔根采用了当时已经提出的“基因”(gene) 这个名称，来取代孟德尔的遗传单位，而且把基因的改变称为突变 (mutation)，这两个名称后来就成为分子生物学中的标准术语。

尽管在当时还没有人知道基因具体是什么，突变又是什么，但是基因和突变的概念，已经可以解释达尔文的物种变化理论。基因控制生物的性状，基因不变，物种的性状也不会改变，这就解释了平时我们看到的物种稳定。基因的突变又能改变生物的性状，这就为达尔文提出的物种变化理论提供了物质基础，即物种变化是由基因的变化引起的。这种变化的频率不高，因此在平时不容易被发觉，但是在大的时间尺度上可以被发现。

1928 年，英国细菌学家弗雷德里克·格里菲斯 (Frederick Griffith) 发现，往小鼠体内单独注射不致病的肺炎双球菌，或者注射被加热杀死的致病性肺炎双球菌，小鼠都不会患病，然而把不致病的肺炎双球菌和被热杀死的致病性肺炎双球菌一起注射到小鼠体内，小鼠就会患肺炎而亡。从死亡的小鼠身上提取出来的肺炎双球菌也是致病的，说明在被热杀死的致病性肺炎双球菌中含有某种物质，能够把不致病的肺炎双球菌转化成为致病的 (图 0-7)。由于这种物质改变了不致病肺炎双球菌的性状 (从不致病到致病，从细菌表面没有荚膜到长出荚膜)，所以它应该含有基因。但是这种物质到底是什么，仍然是个谜。

以上这些宏观规模的实验为基因研究提供了重要的物质线索和思想框架，同时也到了它们能力的极限。要真正了解基因究竟是什么，就必须在分子水平上对生物进行研究，具体了解生物体中有哪些分子，它们的结构是什么，什么样的分子可以成为基因。基因要把生物众多的性状传给后代，一定也是比较复杂的分子，

这样才能包含每一种性状的信息。就像人类用文字来记录信息，基因也可能是由某种“单词”写成的“文字”。由于基因还必须把信息传递给后代，所以基因还必须能够复制自己。

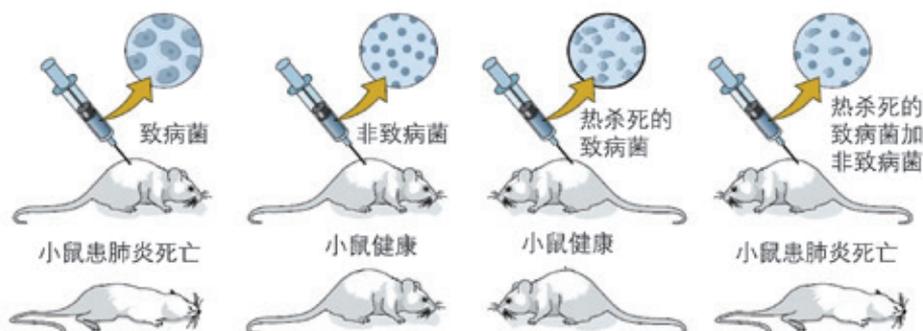


图0-7 格里菲斯的肺炎菌实验

幸运的是，在这个时期，生物化学已经登场了，并且发现了两类可能与基因有关的大分子：核酸和蛋白质。脱氧核糖核酸（DNA）就是一种核酸，由4种脱氧核苷酸相连而成；蛋白质则是由不同的氨基酸相连而成。这些组成单位就像字母，可以拼写出“单词”，进而组成“句子”，可以储存信息，因此基因既可能是核酸，也有可能是蛋白质。

1944年，美国科学家奥斯瓦尔德·埃弗雷（Oswald Avery）及其同事发表了他们对格里菲斯实验研究的新成果。他们分离了致病性肺炎链球菌的各种成分，并且测试这些成分把不致病的肺炎链球菌转化为致病性肺炎链球菌的能力，发现只有DNA具有这种能力，说明基因是由DNA组成的。细胞中的DNA几乎全部存在于染色体内，也与摩尔根发现的基因存在于染色体中的实验结果相符。

1953年，美国生物学家詹姆斯·沃森（James Watson）和英国生物学家弗兰西斯·克里克（Francis Crick）发表了著名的DNA双螺旋结构模型。4种脱氧核苷酸线性相连，成为长链，两条这样的链再彼此交缠，形成像麻花一样的形状（图0-8）。这4种脱氧核苷酸分别用A、G、C、T这4个字母代表。在两条链的接触处，A和T、C和G由于形状互补匹配，就像拼图中相邻的两片，能够彼此配对，这样就把两条链结合到一起了。一条链上的A对应另一条链上的T，一条链上的C对应另一条链上的G，因此两条链的序列是互补的，可以作为对方序列的模板。DNA要复制自己时，两条链分开，分别合成与自己互补的另一条链，就可以形成两个与原来相同的DNA分子，这样就解决了遗传物质在生物繁殖时复

制自己的问题。可是 DNA 很少参与细胞的生命活动，如果基因存在于 DNA 中，它们又是如何控制生物性状的呢？

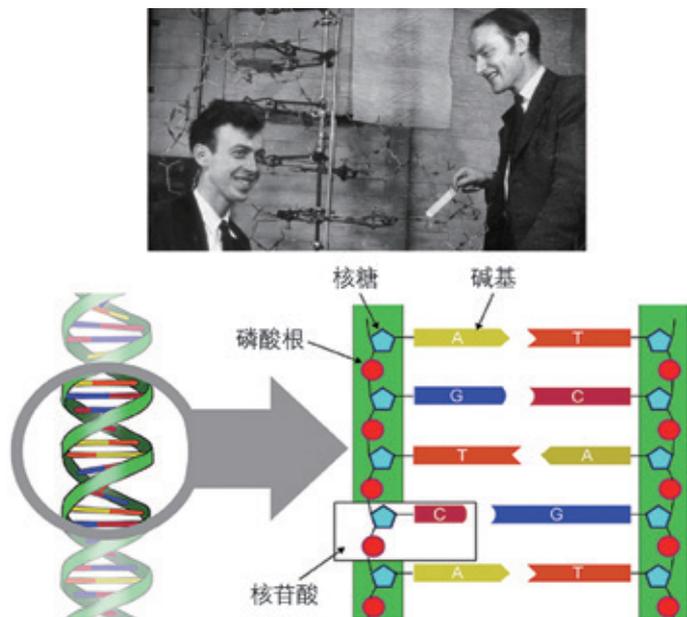


图0-8 沃森（左）和克里克（右）与他们的 DNA 双螺旋模型  
核苷酸由 3 个部分组成：碱基、核糖和磷酸根。碱基 A 和 T、C 和 G 通过形状配对。

蛋白质是细胞中最丰富的物质之一，每个细胞都含有数千种蛋白质，而且几乎所有的生命活动都是由蛋白质来执行的，包括催化（即帮助和加速）生命活动所需要的数千种化学反应，所以蛋白质直接控制生物的性状。蛋白质是由 20 种氨基酸相连而成的，相当于有 20 个字母，按理说蛋白质“书写文字”的能力比 DNA 强得多，但是它却不能组成基因，因为蛋白质有一项致命缺陷，就是无法复制自己。氨基酸之间没有 DNA 中“字母”所具有的那种对应关系，因此蛋白质无法成为复制自己的模板。

DNA 上面的基因不能直接参与生物性状的控制，而直接控制生物性状的蛋白质又不能成为基因，基因又如何实现对生物性状的控制呢？从逻辑上推断，应该是 DNA 中的基因控制蛋白质的生成，即 DNA 链中 A、G、C、T 这 4 个字母排列的顺序（专业名称叫作序列）储存了蛋白质分子中氨基酸序列的信息。

这个推断完全正确，世界上的多个实验室用不同的方式证明了这一点。例如，科学家发现，无论何种细胞，蛋白质的合成都是在细胞质中的一种叫作核糖体的

颗粒上进行的。把核糖体提取出来，放在试管中，加入各种氨基酸，也可以合成蛋白质，但同时还需要细胞中的另一类物质，这类物质也是核酸，但是与 DNA 稍有不同，叫作 RNA，是核糖核酸（ribonucleic acid）英文名称的缩写。与 DNA 类似，RNA 是由 4 种叫作核苷酸的单位相连组成的，组成 RNA 的核苷酸与组成 DNA 的脱氧核苷酸极为相似，只是在分子中多一个氧原子（脱氧核苷酸中“脱氧”两个字就由此而来），这些核苷酸也可以用 A、C、G 这样的字母来代表，只是对应于 DNA 中 T 的核苷酸，除了分子中多一个氧原子外，在其他部分还有一些不同，改用字母 U 代表。虽然有这些不同，U 还是与 T 一样，可以和 A 配对。问题是，这些 RNA 分子是从哪里来的？它们和 DNA 的关系是什么？

把核糖体合成所需要的 RNA 和 DNA 分子放在一起加热，使 DNA 中的两条链彼此分开，再缓慢冷却，发现 RNA 可以像 DNA 中两条链彼此结合那样，与其中一条 DNA 链结合。这说明 RNA 中核苷酸的序列与 DNA 中的一部分序列是互补的，也和另一条 DNA 链上对应的序列相同，因此这些 RNA 的序列必然来自 DNA。DNA 先以自身为模板，合成 RNA 分子，RNA 分子再进入核糖体，指导蛋白质分子的合成。

用人工合成的全由 U 组成的 RNA，也可以在核糖体中指导蛋白合成，这样合成出来的蛋白质全由苯丙氨酸（氨基酸中的一种）组成，说明由 U 这个“字母”拼成的“词”代表苯丙氨酸。进一步的研究表明，3 个字母即可代表一种氨基酸，叫作三联码，例如，上面说的完全由 U 组成的三联码 UUU 代表苯丙氨酸，而 UCU 则代表丝氨酸，GAA 又代表谷氨酸等（图 0-9）。用这种方式，DNA 的序列就可以为蛋白中氨基酸的序列编码。每一种蛋白质都有自己特殊的氨基酸序列，也就需要不同的 DNA 区段为它们编码，这些 DNA 区段就是被它们编码的蛋白质的基因，基因的实质和工作方式，也终于被揭露出来。

基因规定了蛋白中氨基酸的序列，决定由它编码的是哪种蛋白质。基因不变，蛋白质就不会改变。而 DNA 是非常稳定的分子，在几万年前灭绝的尼安德特人遗留下来的骨头化石中，DNA 仍然基本完整，这就解释了为什么各种生物能够在相当长的时间内保持稳定，形成似乎不改变的物种。但在同时，DNA 序列又是可以改变的，每次 DNA 复制都不是 100% 准确的，而是会有一些误差；DNA 也会由于各种原因而受到损伤，如紫外线照射、X 射线照射、一些化学物质的攻击等。生物虽然都有修复受损 DNA 的机制，但是这些修复过程也不全是完美的。基因中 DNA 序列的改变就有可能导致蛋白质中氨基酸序列的变化，从而改变它们的

功能，导致物种性状的改变。这种过程发生的速度一般很慢，常常需要成千上万年的时间。这样，生物在较短时期内的稳定和在较长时期中的改变，都可以从基因的角度得到解释。

		第二个字母				
		U	C	A	G	
第一个字母	U	UUU } 苯丙 UUC } UUA } 亮 UUG }	UCU } UCC } 丝 UCA } UCG }	UAU } 酪 UAC } UAA } 终止 UAG } 终止	UGU } 半胱 UGC } UGA } 终止 UGG } 色	U C A G
	C	CUU } CUC } 亮 CUA } CUG }	CCU } CCC } 脯 CCA } CCG }	CAU } 组 CAC } CAA } 谷酰胺 CAG }	CGU } CGC } 精 CGA } CGG }	U C A G
	A	AUU } AUC } 异亮 AUA } AUG } 蛋	ACU } ACC } 苏 ACA } ACG }	AAU } 天酰胺 AAC } AAA } 赖 AAG }	AGU } 丝 AGC } AGA } 精 AGG }	U C A G
	G	GUU } GUC } 缬 GUA } GUG }	GCU } GCC } 丙 GCA } GCG }	GAU } 天冬 GAC } GAA } 谷 GAG }	GGU } GGC } 甘 GGA } GGG }	U C A G

图0-9 RNA分子中核苷酸序列为蛋白质分子中氨基酸序列编码的“三联码”

其中氨基酸名称中的“基酸”二字略去。AUG代表转译开始的第一个氨基酸(蛋氨酸)，UAA、UAG和UGA不为氨基酸编码，而是转译终止的信号。由于三联码有64种组合方式，而蛋白质分子中的氨基酸只有20种，所以多数氨基酸被多个三联码编码。

对各种生物的研究发现，无论是微生物、植物还是动物，遗传物质都是DNA，这些DNA都用A、G、C、T这4种脱氧核苷酸组成，都用DNA中的基因为蛋白质编码，编码所使用的三联码也彼此相同，都用RNA传递信息，在核糖体中指导蛋白质的合成，蛋白质也都由同样的20种氨基酸组成，这是地球上所有的生物都来自同一个祖先最强有力的证据，支持达尔文关于生物由少数祖先演化而来的观点。无论孔雀与菊花看上去有多么不同，它们在分子水平上却是高度一致的，也真的有共同的祖先。

在生物演化的过程中，新基因不断出现，单个基因还可以增殖出多份复制品并且进行分化，成为基因家族。基因之间可以发生融合，在不需要的时候又可以

失效，变为伪基因。这些变化存留于生物的 DNA 中，成为生物演化的分子化石。比较各种生物的 DNA 和其中的基因，就可以看出生物之间的传承关系和不同生物之间的亲缘关系。就像用化石资料可以建造出生物演化的宏观历史，用分子化石的资料也可以构建出生物的分子演化树。

在这些知识的基础上，我们已经可以写出与第一种生命史视角不同的第二种生命史，即通过基因演化和基因所编码的蛋白质在各种生物功能中作用的变化，叙述地球上生命发展的整个历程，从简单细胞到复杂细胞，再由复杂细胞演变为动物、植物、真菌等不同门类的生物，每一类生物又不断演化，形成地球上千千万万的物种。

由于生命是由化学元素组成的，为了寻根溯源，我们从宇宙诞生谈起，依次叙述组成生命的化学元素的产生，生命前期分子在太空环境中的形成，原初生命的出现，各种生物功能的产生和发展及在此基础上各种类型生物的出现，直至我们人类的诞生。