

# 鸟类也要换毛？ 从它们的祖先开始就是这样

与生活在陆地、海洋的动物相比，飞翔在天空中的鸟儿有什么与众不同的特点呢？如果让我说，我首先会选羽毛。

## 羽毛的作用，不止飞行

对于鸟类来说，轻盈而精巧的羽毛是非常重要的结构。鸟类的羽毛有很多种，可根据着生部位或者特征进行分类。如按照位置，可以分为飞羽、尾羽和覆羽等。按照羽毛自身特征，又可以分为正羽、绒羽等。飞羽就是一种特化的不对称的正羽。

其中最著名的，就是分布在鸟类翅膀上面的飞羽，是鸟类能否飞上天空的关键。

除此以外，羽毛还具有更多复杂的功能。细密的羽毛可以在体表形成隔热层，保持体温，是鸟类成为重要的内温性动物（可以自主维持体温的动物）的关键。

另一方面，羽毛的颜色也是丰富多彩的，兼具结构色和色素色两种模式。羽毛颜色的多样和变化，也成为鸟类在繁殖行为、种内和种间视觉交流中的一种重要的信息传递媒介。甚至某些鸟类的部分羽毛，还承担一些触觉功能。

## 鸟类换羽的三种模式

作为一种具有复杂结构的表皮衍生物，羽毛承担了大量的功能，却同样面临一个重要的问题，就是磨损和替换。

一般来说，越是精巧的结构，就越是易碎的。对于鸟类而言，羽毛的磨损时时刻刻都在发生。因此，它们需要独特的策略去更换这些磨损的老旧羽毛。

鸟类换羽行为可以大致分为三种模式：（1）顺序换羽模式，指羽毛，尤其是飞羽，按照一定的顺序，在两翼对称而缓慢地替换；（2）同时换羽模式，指的是一次性换掉所有的飞羽；（3）随意换羽模式，指的是换羽模式很随机，没有规律地替换老旧的羽毛。这三种

不同的换羽方式在现生鸟类当中都有分布。有趣的是，系列研究发现，不同的换羽方式似乎还与鸟类的运动方式和栖息环境息息相关。

采用顺序换羽模式的鸟类，它们的羽毛，尤其是飞羽是有序替换的，这使得虽然每年都有时间会脱落一到几片羽毛，但整体飞行能力几乎不会受到影响。

非顺序性换羽的鸟类，包括同时换羽模式和随意换羽模式的鸟类。前者是指鸟类会在一年当中的某一特定时间段，把和飞行相关的羽毛统一换掉。这种行为带来的问题，就是在这个时期，这些鸟类会失去飞行能力。

随意换羽模式的鸟类，它们的换羽行为非常随机，缺少统一顺序或者统一的换羽时间，因此这种换羽模式都是发生在丧失飞行能力的鸟类当中，如加拉帕戈斯的弱翅鸬鹚。

## 远古的鸟类如何更换羽毛？

那么，鸟类身上这种非常有趣的换羽行为是怎么演化过来的呢？最早的鸟类是怎么更换它们的羽毛呢？它们是鸟类独有的吗？

近期，中国科学院古脊椎所徐星研究员团队和以色列海法大学生物学家一起合作，在著名学术期刊《当代生物学》（Current Biology）上发表了一篇研究论文。这个研究工作采用祖先状态特征分析的研究方法，基于一个由302个现生鸟类换羽行为信息构成的数据集，对鸟类换羽的演化历程，进行了宏观演化分析。

祖先状态特征分析方法是近年来新兴的一种宏观演化分析方法。形象地说，如果说经典的系统发育学研究好比给一个大家族排家谱，那祖先状态特征分析的方法，就像在家谱架构下，恢复家族每一代人的迁徙和生平。这种方法的发展，得益于日益精准的系统发育学研究和日益准确的古生物化石年代学架构。有了这些信息，就可以推算关注特征在演化过程中变化的情况，估算一类生物最早代表这些特征可能存在的状态，甚至计算特征变化速率、变化模式等等。

而鸟类的换羽行为，恰恰就非常适合进行祖先状态特征分析。祖先状态特征分析的一个重点，就是要得到某种生物的某种特征，在它们最早祖先的身上，大概率是什么样子的。比如说，最早的恐龙是两足行走还是四足行走？最早的鸟类是吃种子还是吃肉？最早的显花植物是水生还是

陆生？这都是祖先状态特征分析希望探索的问题。

对于鸟类换羽行为的祖先状态特征分析，首要解决的问题，就是去推算“最早的鸟类是顺序换羽还是非顺序换羽”这个问题。

此次研究结果发现，无论是对现生鸟类（新鸟类）还是包括已经灭绝的反鸟类等类群的全部鸟类来说，它们祖先都是以顺序性换羽模式进行换羽的。也就是说，至少在距今七千万年前，伴随着最早的鸟类，换羽行为就已经出现了。当今鸟类中几个独立的非顺序性换羽的演化支，可能是后来独立演化出来的。

同时，基于这个最大的换羽行为数据集，我们可以发现，确实如前人基于对现生鸟类观察而得到的理论所说的，顺序性换羽模式是所有鸟类在换羽季节能正常飞行的保障；而非顺序性换羽模式的鸟类，要么是本身已经不会飞行，例如企鹅和鸵鸟，要么是在换羽季部分或者全部丧失飞行能力。

另一方面，这项研究也发现，鸟类的换羽模式也与鸟类的栖息地选择有关。顺序换羽模式的鸟类可以保持全年稳定的飞行能力，因此不需要在换羽期寻找特别的栖息地进行自我保护。而非顺序换羽模式的鸟类，在每年重要的换羽时期，由于飞行能力丧失，往往需要生活在特殊的栖息地。这些特殊的栖息地可以一定程度上缓解一些鸟类因为换羽而面临的危险情况，比如更难获取食物，以及更容易被捕猎者捕食等。

## 会飞的非鸟恐龙，怎么换羽？

我们知道，鸟类是一种最终飞上蓝天的恐龙。来自中国等地大量的化石指出，鸟类的近亲，大量的非鸟恐龙当中，科学家们也发现了它们同样具有羽毛。对于这些可能会飞的非鸟恐龙来说，换羽行为是什么样子的呢？

对于这个问题，中以科学家对中国科学院古脊椎动物与古人类研究所收集的大量带羽毛恐龙进行了详细的观察。果不其然，他们在一些著名的四翼恐龙——小盗龙的一件化石标本当中，观察到了明显的顺序换羽现象。虽然在此之前，科学家们已经在一具早白垩世的原始鸟类（属于反鸟类）化石当中也发现了换羽的化石证据，但毕竟反鸟类仍属于鸟类。而此次在小盗龙标本上发现的顺序换羽行为的证据，是首次在非鸟恐龙中发现这种行为。

至此，顺序性换羽行为这个以往被认为是鸟类独有的能力，

正式“出圈”了。

由于小盗龙的生存年代更早，距今约一亿两千万年。这个发现又将顺序换羽行为可能出现的最早时间向前推进了一大步，范围当然也理所应当也扩大到了非鸟恐龙当中。保守得说，至少在距今一亿两千万年前的早白垩世，鸟类或者它们的近亲，一些非鸟兽脚类恐龙，已经具有顺序换羽的换羽行为了。

顺序性换羽行为在小盗龙化石中的发现，也让科学家们对这个恐龙明星有了全新的认识。正如前文所说，顺序换羽行为一般都与可以维持全年的稳定飞行能力紧密相关。因此，在小盗龙中发现了顺序换羽行为的证据，也反过来指示了它们可能具有相当强的、可以维持全年稳定的飞行能力。同时，顺序换羽行为的生态学指示意义也可能说明，小盗龙所生活的环境可能缺少给它们提供换羽期保护的必要条件：也许在小盗龙生活的环境当中，食物资源不够丰富；或者它们面临全年的、较大的被捕食压力。这恰恰与小盗龙所生活的热河生物群的生态环境非常吻合。

除了在具体发现上的进展，这项工作对学科发展也颇有意义。它给古生物学和现代生物学，尤其是与现代生物学当中那些“冷门”方向，比如运动学、生物力学、生物节律、生理学等，进行未来的合作提供了非常大的借鉴和启示意义。

对于古生物学和现代生物学来说，研究生物首要的问题是分类，但解决了分类问题以后呢？分类问题之外的问题，比如，对体型演化、新陈代谢、食性和运动能力的演化研究，都可以找到一个或多个沟通古生物和现代生物的“桥梁”，把“古”和“今”的生物放在一个量化的体系里面进行后续工作，这也将会是古生物学进一步发展的一大趋势。而且，这一方向已经有了良好的基础。毕竟，过去两三百年以来，随着经典生物学的发展，基于对现生生物的持续观察、实验，同时背靠当代统计学等学科发展，科学家们积攒了非常多的现生物的数据，比如它们的体重、体温、特殊行为、繁育方式等等。

随着研究技术的进步和多学科融合的发展，也许在未来的某一天，我们可以真正地多角度去回答那些小学自然课里一直在问的问题：鸟儿为什么会飞？鱼儿为什么会游？花儿为什么这么红？

据蝌蚪五线谱