

分类号: Q6
学号: 20222106046

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于材料-结构-力学的多维分析的家鸽换羽前后飞羽物理学特性改变的研究

学位申请人

李笑宇

指导教师

刘宣 研究员

胡圣伟 研究员

潘胜凯 副研究员

申请学位类别

专业硕士

专业名称

生物与医药

研究领域

生物技术与工程

所在学院

生命科学学院

中国·新疆·石河子

2025年6月

分类号: Q6
学号: 20222106046

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于材料-结构-力学的多维分析的家鸽换羽前后飞羽物理学特性改变的研究

学位申请人	李笑宇
指导教师	刘宣 研究员 胡圣伟 研究员 潘胜凯 副研究员
申请学位类别	专业硕士
专业名称	生物与医药
研究领域	生物技术与工程
所在学院	生命科学学院

中国·新疆·石河子
2025年6月

**Research on the Changes of Physical Characteristics of Flight
Feathers of Domestic Pigeons Before and after Molting Based on
Multi-dimensional Analysis of Materials, Structure and Mechanics**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Li Xiao-yu

(Biotechnology and Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Liu Xuan, Prof. Hu Sheng-wei, Assoc. Prof.

Pan Sheng-kai

June,2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：李天宇

时间：2025 年 5 月 24 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：李天宇

时间：2025 年 5 月 24 日

导师签名：李天宇

时间：2025 年 5 月 24 日

摘要

目的：飞羽作为鸟类独有的特殊结构，在飞行、保持平衡以及掌控航向中发挥着不可或缺的作用。通过其材料、结构与力学性能的协同作用，使得鸟类能够在不同环境下生存。在大多数鸟类的生命周期中，会出现换羽现象，即有规律的更换自身的羽毛。以往关于该现象的研究，主要聚焦于生物学原理层面。然而，飞羽由于损伤、磨损、老化等问题会直接影响换羽的时间和顺序，暗示换羽行为不仅受控于生物学层面，还和羽毛的状态有着密切关联。因此，本研究从物理学的角度出发，采用“材料-结构-力学”的多维度分析模式，旨在揭示出控制鸟类飞羽更替的自然物理机制。

方法：材料学方面，首次揭示鸟类飞羽在生长与使用期间发生从非晶态向晶体化状态的转变，对比换羽时期老旧飞羽和新生羽毛的微观结构；结构学方面，选定飞羽尖端及接近根部 70% 的位置，通过环境扫描电镜分析，针对电镜图片中目标占比过小、相互遮挡和姿态各异的问题，创新优化 YOLOv8 目标检测模型以实现羽小钩自动化识别；力学性能方面，对比换羽前老化飞羽和新生飞羽的震动模式，分析飞羽材料与结构变化对力学差异的影响，以及飞行负荷较重区域的结构退化、力学性能衰减与飞行能耗增大的关系。

结果：材料学上，鸟类飞羽在生长与使用期间从非晶态转变为晶体化状态，换羽时期老旧飞羽显现明显晶化现象，微观结构为依序排列的晶管，新生羽毛处于无定形状态，晶化过程削弱羽毛柔韧性，对飞行性能产生不良影响；结构学上，换羽后的新生飞羽小钩角度比旧有显著缩减，不同功能飞羽的角度变化幅度存在鲜明对比，受高频气动载荷影响的飞羽区域调整幅度更明显，负责保持基础平衡的羽区域角度变化趋于稳定；力学性能上，换羽前老化飞羽表现出低频高振幅，新生飞羽表现出高频低振幅的震动模式，这种差异源自飞羽材料与结构变化，如长时间使用导致角蛋白晶化，使羽小钩柔弹性受损、角度不可逆增大，羽支之间啮合效果削弱，在气流影响下易大幅震动、飞行耗能增加，而新羽具备完善互锁构造，羽小钩勾连牢固，整体气密性强，飞行中实现快速振动和力的有效传递，飞行负荷较重区域结构退化更明显，力学性能衰减与飞行能耗增大直接相关。

结论：本研究从物理学角度揭示了鸟类换羽的机制，换羽前旧飞羽因晶化导致柔韧性下降、羽小钩角度增大，力学上呈现低频高振幅震动模式，影响飞行效率与能耗，这些变化可能是鸟类判断换羽时机的重要依据，当旧羽毛飞行性能下降威胁安全飞行时，鸟类可能开启羽替机制。未来研究可借助涵盖多样鸟类品种和不同羽类型的广泛探索，深入分析不同鸟类在换羽机制物理层面的普遍性和个别差异性。

关键词：鸟类换羽；材料特性；结构特性；力学特性；计算机视觉

Abstract

Purpose: Flight feathers, as unique and special structures of birds, play an indispensable role in flight, balance maintenance, and course control. Through the synergistic effect of their material, structural, and mechanical properties, birds can survive in different environments. In the life cycle of most birds, molting occurs, that is, the regular replacement of their own feathers. Previous studies on this phenomenon have mainly focused on the biological principle level. However, problems such as damage, wear, and aging of flight feathers directly affect the timing and sequence of molting, suggesting that molting behavior is not only controlled by the biological level but also closely related to the state of feathers. Therefore, from the perspective of physics, this study adopts a multi-dimensional analysis model of "material-structure-mechanics" to reveal the natural physical mechanism controlling the replacement of bird flight feathers.

Methods: In terms of material science, it was first revealed that bird flight feathers undergo a transformation from an amorphous state to a crystalline state during their growth and use, and the microstructures of old flight feathers and new feathers during molting were compared. In terms of structure, the tip of the flight feather and the area close to 70% of the root were selected for analysis by environmental scanning electron microscopy. Aiming at the problems of too small target proportion, mutual occlusion, and various postures in electron microscope images, the YOLOv8 target detection model was innovatively optimized to achieve automatic identification of hooklets. In terms of mechanical properties, the vibration modes of aging flight feathers before molting and new flight feathers were compared to analyze the influence of material and structural changes of flight feathers on mechanical differences, as well as the relationship between structural degradation in areas with heavy flight loads, mechanical property attenuation, and increased flight energy consumption.

Results: In material science, bird flight feathers transform from an amorphous state to a crystalline state during growth and use. Old flight feathers during molting show obvious crystallization, with the microstructure being orderly arranged crystal tubes, while new feathers are in an amorphous state. The crystallization process weakens the flexibility of feathers, having an adverse effect on flight performance. In terms of structure, the angle of hooklets of new flight feathers after molting is significantly reduced compared with that of old ones. The amplitude of angle changes in flight feathers with different functions shows a sharp contrast. The flight feather areas affected by high-frequency aerodynamic loads show more obvious adjustment amplitudes, while the feather areas responsible for maintaining basic balance tend to be stable in angle changes. In terms of mechanical properties, aging flight feathers before molting show low-frequency and high-amplitude vibration modes, while new flight feathers show high-frequency and low-amplitude vibration modes. This difference originates from the changes in the material and structure of flight feathers. For example, long-term use leads to keratin crystallization of flight feathers, resulting in damage to the flexibility of hooklets, irreversible increase in their angles, and significant weakening of the meshing effect between barbs, making them prone to large-amplitude vibration under the influence of airflow and increasing flight energy consumption. The new feathers have a perfect interlocking structure, with hooklets firmly connected, strong overall airtightness, and can achieve rapid vibration and effective

force transmission in flight. The structural degradation in areas with heavy flight loads is more obvious, and the attenuation of mechanical properties is directly related to the increase in flight energy consumption. Conclusion: This study reveals the mechanism of bird molting from the perspective of physics. The old flight feathers before molting have reduced flexibility and increased hooklet angles due to crystallization, and show low-frequency and high-amplitude vibration modes in mechanics, affecting flight efficiency and energy consumption. These changes may be an important basis for birds to judge the timing of molting. When the flight performance of old feathers declines to the extent that it threatens safe flight, birds may activate the feather replacement mechanism. Future research can use extensive exploration covering various bird species and different feather types to deeply analyze the universality and individual differences of molting mechanisms in different birds at the physical level.

Key words: Bird molting; Material properties; Structural characteristics; Mechanical properties; Computer vision

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 鸟类羽毛的分类与功能	1
1.2 鸟类换羽的研究现状	3
1.2.1 鸟类换羽的意义	3
1.2.2 鸟类换羽的主要假说	5
1.2.3 鸟类换羽的机制	7
1.3 研究目的与意义	9
1.4 研究内容与技术路线	10
1.4.1 研究内容	10
1.4.2 技术路线图	10
第 2 章 换羽过程中飞羽的材料特性	12
2.1 引言	12
2.2 材料与方法	13
2.2.1 飞羽材料收集	13
2.2.2 实验仪器	14
2.2.3 电镜测量方法	15
2.3 结果	18
2.4 讨论	20
第 3 章 换羽过程中飞羽的结构特性	22
3.1 引言	22
3.2 材料与方法	23
3.2.1 实验材料	23
3.2.2 实验方法	24
3.2.3 方法优化	25
3.2.4 数据处理	39
3.3 结果	39
3.4 讨论	41
第 4 章 换羽过程中飞羽的力学特性	43
4.1 引言	43

4.2 材料与amp;方法	44
4.2.1 实验材料	44
4.2.2 实验设备	44
4.2.3 实验方法	45
4.2.4 数据处理	46
4.3 结果	48
4.4 讨论	50
第5章 结论与展望	51
5.1 结论	51
5.2 展望	51

第1章 绪论

1.1 鸟类羽毛的分类与功能

在鸟类生物学的复杂构造中，羽毛显现出不可替代的特殊性和多样性。其结构与功能的不同潜移默化地影响着鸟类适应世界及存活于自然界。从形状、位置到性能上，羽毛主要可被分为五种：提供飞行功能的飞羽、负责姿态稳定的尾羽、覆盖身体的覆羽、提供保温的绒羽、提供防水性能的轮廓羽以及体表的刚毛^[1-3]。羽毛的发育是一个受到严密遗传机制调控的过程，由众多基因交织形成的微妙进程，每个基因相互协作，决定并塑造了羽毛各自独有的外观与功能^[2,3]。每种羽毛都有属于自己的作用，彼此间紧密耦合，共同支持鸟类飞翔、防寒、防水、感知变化以及进行社交等活动。

飞羽（Flight feather）作为鸟类飞行的主要功能单元，其与飞行动力息息相关。通过于空气相互作用，产生飞行所需的升力和推力，使得鸟儿能够起飞、滑翔、悬停、变向、姿态调节以及降落^[4,6-8]，体现了飞羽的重要性。不同物种的飞羽经过层层演变契合不同飞行模式及生态需求，例如需要长途迁徙的鸟类飞羽形状更细更长^[5,6,8]，这种结构可以降低风阻以保证长时间飞行。而栖息于森林等多棱环境中的鸟则具有短而宽的飞羽^[6]，提供更高灵活度，便于快速起降和迅速调整飞行姿态。在生物进化历史长河中，飞羽逐步演变深化了鸟类飞行技巧，并迎合不断改变的空中挑战。

在鸟类的飞行过程中，尾羽（Tail feather）的主要功能是保持平衡和控制方向。它们类似于飞机上的尾舵，使得鸟类能够实现精准转向，这种特性无论是在狩猎中的有效捕捉、躲避天敌时快速反应，还是导航迁徙过程中，都显得极其关键^[9,10]。除此之外，在求偶展示中，斑斓绚丽的尾羽同样具有重要意义，比如孔雀（*Pavo cristatus*）开屏^[11]，如图 1-1 所示。



图 1-1 鸟类尾羽求偶展示示意图

Figure 1-1 Schematic diagram of tail feather

注：（图片来源：Singh et al. 2025）

覆羽 (Covert feather) 广泛分布于鸟类翅膀, 可维持翅膀的流线型、减少空气湍流, 其形态和布局有助于减少空气阻力, 提高飞行效率, 还可以保护下层羽毛, 防止飞羽受到阳光直射、风雨侵蚀以及树枝等外界因素的磨损和物理损伤, 延长羽毛的使用寿命, 以及参与体温调节和求偶和社交信号功能^[12,13], 如图 1-2 所示;



图 1-2 鸟类覆羽位置示意图

Figure 1-2 Schematic diagram of cover feather

注: SLC (secondary lesser coverts): 次级小覆羽, SMC (secondary marginal coverts): 次级缘覆羽, SGC (secondary greater coverts): 次级大覆羽

注: (图片来源: Zekry et al. 2023)

绒羽 (Down feather) 主要为鸟类提供保温隔热, 其独特结构能形成了蓬松的外观, 能够捕获大量空气, 而空气作为绝热体, 被绒羽捕获后形成稳定的隔热层, 极大地减少了鸟类身体热量向外界环境的散失, 同时在雏鸟阶段, 由于雏鸟的体温调节系统尚未发育成熟, 绒羽有助于雏鸟保持相对稳定的体温, 满足雏鸟的生存需求^[14], 如图 1-3 所示;

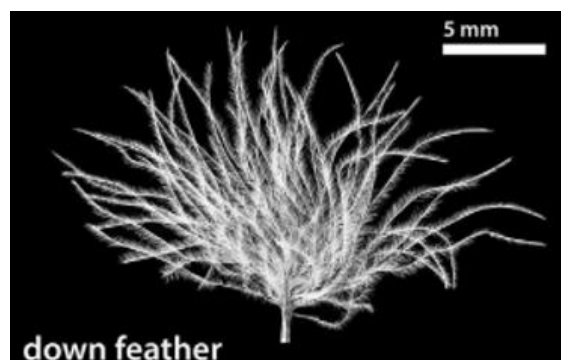


图 1-3 鸟类绒羽示意图

Figure 1-3 Schematic diagram of down feathers

注: (图片来源: Pap et al. 2020)

轮廓羽 (Contour feather) 分布于鸟类身体部分, 因其在飞行中能够保持鸟类身体的流线型形状而得名。在结构上, 轮廓羽之间相互叠形成了有效的屏障, 可以通过吸收

和反射阳光来帮助调节体温；同时该羽毛也是所有类别中防水效果最佳的，满足众多鸟类游泳或潜水的需求，如图 1-4 所示。



图 1-4 鸟类轮廓羽示意图

Figure 1-4 Schematic diagram of contour feathers

刚毛（Filoplume）多分布于鸟类头部眼和嘴周围，眼周刚毛可阻挡异物保护眼睛，喙周刚毛能防异物入呼吸道或眼睛，起到了初步的防护作用，还可辅助觅食，比如在寻找昆虫等食物时，刚毛可以通过感知周围微小的震动，来确定猎物的方位，提高觅食效率。部分情况下有防御威慑作用，例如鸟类在遇到危险时会竖起刚毛，使自己看起来更有威慑性^[15]，如图 1-5 所示。



图 1-5 鸟类刚毛示意图

Figure 1-5 Schematic diagram of filoplume feather

注：（图片来源：Rohwer et al. 2021）

1.2 鸟类换羽的研究现状

1.2.1 鸟类换羽的意义

对鸟类而言，换羽是对生存与繁衍至关重要的生理过程，在温度调控、保持飞行能力，以及迁徙和繁衍上发挥着多重关键作用^[16-20]。

关于温度调控方面，相关研究指出鸟类在应对不同环境气温时，会调整其羽毛更替的模式^[16]。在气温冷暖不同情况下，借助羽毛更换动作来实现体温平衡，在各种因素影响下，这一行为拥有多样性的表达形式。而分析进一步深入后证明，温度可改变鸟类羽毛更新的各个维度^[17]。首先，在季节变换明显的地区，换羽时间会与季节变化的时间相吻合，即在温度下降之前提前完成换羽；其次，温度也会影响鸟类换羽的速度，在温暖的环境下，鸟类的换羽速度加快，而寒冷会导致换羽速度减慢。最后，羽毛特征也会收到温度的影响，在较为寒凉的地域，羽毛更倾向于厚重且富含油脂，这无疑增强了御寒效果兼防水性能；相反，在酷暑环境里更可能轻薄、色调淡化，用以发挥散热优势。

在保持飞行性能方面，鸟类的飞羽和尾羽作为关键结构，在长久使用后可能因磨损或老化而削弱原有的飞行能力，导致飞行过程中会出现气流紊乱、飞行稳定性降低等现象^[6-11,25]。在这种情况下，通过换羽可以在某种程度上维持飞行动力表现^[22,23]。一些研究表明，鸟类在换羽阶段会尽量减少对飞行能力的不利影响，新生羽毛形整规则、坚韧非凡，提供稳定的升力与推力，对于提高整体飞行效率意义重大。此外，这一过程有助于保持飞行中所需的空气动力特征，进而减少能量消耗^[23]，这点对长期迁徙的鸟类尤其重要^[18,19]。同时，换羽也能帮助鸟类在行走、飞行、栖息等活动中保持稳定姿态。通过对欧洲椋鸟（*Sturnus vulgaris*）在换羽期的飞行性能的研究发现，换羽行为直接影响了鸟类的飞行效果，如起飞角度、飞行速度、灵活性等^[26,27]。另外，换羽还会对鸟类紧急起飞逃避效能造成显著影响，包括起飞加速度与爬升速度等主要参数^[24]，表明面临危险时，正在换羽的鸟类逃生能力会收到一定约束，充分强调换羽对于飞翔及存续的深远意义。鸟类新旧飞羽的对比如图 1-6 所示。

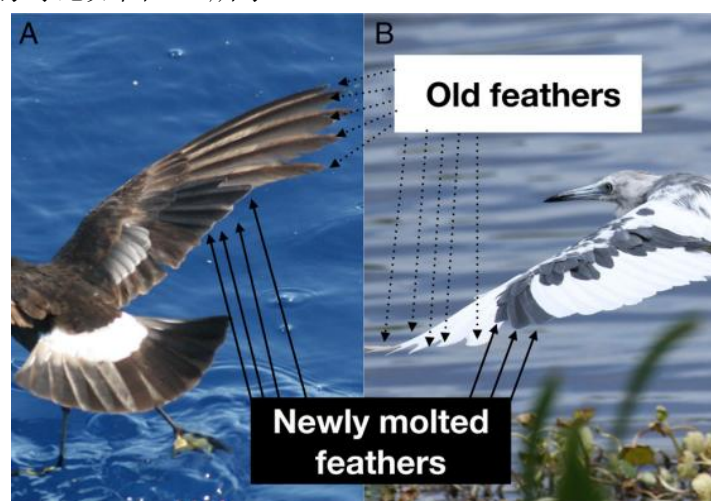


图 1-6 鸟类新旧飞羽对比示意图

Figure 1-6 Comparison of old and new flight feathers

（图片来源：Terrill et al. 2023）

鸟类的迁徙活动堪称其生命周期中的一大关键，而换羽过程与之有着密切的关联。换羽行为的时间与顺序，制约着鸟类迁徙是否能够成功，可见合理的换羽时间使鸟类能在迁徙出发之前拥有完备且功能优异的飞羽，以至于迁徙达成率显著提高^[18,20]。研究表明，迁徙鸟类需要在换羽所需时间和能量与迁徙紧迫性之间找到平衡点，形成最佳的换羽计划^[20]。例如，为了保持最佳飞行状态，一些需要长途迁徙的品种更倾向在繁殖地或越冬地完成换羽。而环境元素，例如食物资源供应程度以及气候背景，对此转变过程也据有直接影响力，促使鸟类相应调适自身行为模式，寻求符合实际条件下的理想解决方案^[18]。比如在食物丰富的地方，其换羽速度会相对加快；反之，在食物匮乏的地方则可能延迟换羽，控制整体能耗。

繁殖也是鸟类换羽的影响因素之一。有些鸟类会繁殖季到来之前换上鲜艳且美丽的羽毛，由此捕获异性的目光，以提升生育的成功机会。同时，换羽速度会影响其毛发装饰的完整度，而完整的羽毛在求偶阶段也具重要性，其整体的色彩亮度与光泽反映个体的健康与营养状况，显示吸引对象选择的关键因素。此外，其羽饰还隐含遗传优越性，可在求偶战中占得先机^[21]。例如雄性蓝冠山雀（*Cyanistes caeruleus*）通过展现羽毛颜色和完整度，向雌鸟透露潜移默化适应自然及基因良缘的信息。这一研究发现表明换羽对于鸟类交配策略的重要地位，并不仅止于生理需求，更是复杂演化的途径之一。

综上所述，在温度调节上，鸟类依据环境温度调整换羽模式，温度影响换羽时间、速度及新生羽毛特征，助力其在不同温度环境下维持体温稳定。飞行性能维持方面，换羽及时更新磨损老化的飞羽和尾羽，保障飞行效率，减少能耗，维持飞行姿态稳定，且换羽状态对飞行性能指标及起飞逃生性能影响显著。换羽与迁徙紧密相连，合理的换羽时间和策略，以及对迁徙途中环境因素的适应性调整，影响着鸟类的迁徙能力与成功率。繁殖季节，换羽关乎鸟类求偶，色彩鲜艳、具装饰性的羽毛能吸引异性，羽毛的装饰结构完整性、颜色光泽等反映其健康和遗传优势，在求偶竞争中至关重要。总之，换羽在鸟类生活中从生理到行为，全方位保障其生存与繁衍。

1.2.2 鸟类换羽的主要假说

鸟类换羽可分为损伤型换羽、季节型换羽、性选择换羽、前替换羽等。

损伤型换羽包含了由机械损伤以及寄生虫侵害所引发的换羽这两种情况。对于机械损伤导致的换羽，有研究深入探讨了鸟类飞羽换羽持续时间的异速生长规律^[28]。羽毛损伤作为一种异常因素，会对原有的换羽时间规律造成干扰。当飞羽受损程度较为严重时，为了确保新生长出的飞羽能够满足鸟类飞行的需求，鸟类的换羽时间或者换羽模式就会受到影响并做出相应改变，以此来适应飞羽受损的实际情况，重新生长出适宜飞行的羽

毛状态。例如，针对仓鸮翅膀以及羽片的完整性与损伤情况进行了详细研究^[29]，结果表明羽毛一旦出现损伤，必然会对其正常功能产生影响。而这种功能的缺失会刺激鸟类启动自身的换羽机制，促使它们尽快更换受损的羽毛，从而维持基本的生存以及飞行能力^[41]。

对于寄生虫侵害引发的换羽现象，研究者对信天翁展开探讨^[30]，发现鸟类换羽现象会受到寄生体的影响，表明鸟类体内正常调节机制可能受到干扰。这种影响体现在换羽时间、速度及形态等各个方面。与之同时，鸟类当其遭遇寄生虫攻击时，大部分鸟类会羽毛更替的形式作为防范措施^[31]。然而，在这一过程里，寄生物也展现出自己的适应本领，通过特定适应模式进化，以应对来自于鸟类羽毛变化所带来的挑战。

季节性羽毛更替的现象比较直观。关于非迁徙鸟类与迁徙鸟类在一年之中的生活规律及其最佳的换羽策略，研究者进行了详实细致的分析。研究结果表明，在季节变化时，非迁徙鸟类根据季度更替，在温度、食物供应等环境变量出现变化情况下，调整自身的换羽方式，其目的是确保个体生存和繁育的前提下，完成高效率的羽毛更新。而迁徙候鸟则在迁徙活动与季节之间表现出紧密相联，它们会协调自身的换羽行为和迁徙计划。在长途迁徙之前，这些候鸟通过羽毛更换以获得适合远距离飞翔的新羽毛，也会根据四季的变化安排合理的更换时间与形式^[32,33]。例如在秋天到来之际，更换为加厚保暖且适合飞行的羽毛。同时，在不同季节间，部分鸟类会更换与环境类似的颜色，以更好地与环境融于一体，提高了它们的生存概率^[34]。然而，全球气候逐渐变暖破坏了这个原本稳定的体系结构。例如，异常气候可能引发生态循环不规则，使得鸟类无法准确根据这些信号调整羽毛的周期性更替。此外，还有研究通过模拟不同纬度日照时长探究黄道眉鹀 (*Emberiza cirulus*) 换羽、质量以及繁殖情况等随时间的变化，揭示日照时长也是换羽的影响因素之一^[35]。

在性选择及换羽这一领域，性选择理论构建了研究鸟类通过更换羽毛进行求偶展示这一行为的坚固理论根基^[36]。此理论暗示生物体能透过配对选择或在内部竞争中获取优势，使生物特征朝向有利于繁育的方向转变，进而为鸟类换羽现象提供深入观察框架。后续诸多学者通过广泛的探索揭示出两者之间的密切联系。比如，一些调查表明蓝冠山雀 (*Cyanistes caeruleus*) 的羽饰结构可能因换羽速度影响很大，既然这些装饰在交配寻觅之际起到了尤为紧要的作用，这指示着换羽过程或许和性选择息息相关^[21]。在雀形目鸟群当中，性选择对于换羽期胜场的羽毛性状具有显著效应^[37]。大量鸟类羽毛转换至极具观赏性的羽色，在繁殖季节占得性选择争斗中的优先机会^[37,38]。例如，某些雄禽在调情阶段悄然更新羽色艳丽、纹理纷繁复杂的羽饰，此装备吸引雌鸟关注，并灵敏地提高配对概率^[40]。

在鸟类换羽的现象里，前替换羽 (pre-alternate molt) 是部分雀形目在某些时间段内经历的羽毛更替过程^[39]。绝大多数温带鸟类在繁殖完成后进入前基本换羽 (夏至秋)，

形成常见羽色，而前替换羽则发生冬到春期间，该过程与多种因素密切相关。换羽影响鸟类飞行觅食的能力，因此空中觅食的鸟类只能缓慢换羽，导致基本羽前换羽来不及在迁徙前更换完全，只能在越冬地进行替换羽前换羽；另一方面，冬季具有领域性的鸟类，需要提早到达越冬地占领高质量领地，可能迁徙前的时间不足以完成完全的换羽，只能在越冬地进行替换羽前换羽。对欧洲雀形目的研究表明，部分鸟类会有前替换羽现象，其中包括完全换羽和部分换羽之分，这一现象在不同物种中存在差异，受到多种生态与进化因素的多重影响^[42]。

鸟类换羽类型多样，各有特点与影响因素。损伤型换羽包括机械损伤和寄生虫侵害引发的换羽，机械损伤会干扰换羽时间规律，促使鸟类调整换羽模式以适应飞羽受损情况；寄生虫侵害会影响鸟类换羽的时间、速度和模式，鸟类也会通过换羽抵御寄生虫，而寄生虫也会进化适应。季节型换羽中，非候鸟依据季节环境变化调整换羽策略以完成羽毛更新，候鸟的换羽与迁徙协调，在迁徙前换羽获得适合飞行的羽毛，季节变化是换羽的重要触发因素，光照时长也显著影响换羽，且全球气候变暖对季节与换羽的关系带来挑战。性选择换羽方面，性选择理论为研究提供框架，换羽速度影响鸟类羽毛装饰结构，在性展示和配偶选择中起重要作用，许多鸟类在繁殖期通过换羽获得更具吸引力的羽毛以增加繁殖机会。前替换羽是部分鸟类特定时期的换羽过程，其演化与性选择、羽毛磨损、时间限制等多种因素相关，欧洲雀形目鸟类部分物种存在前替换羽且有完全和部分换羽之分，受多种生态和进化因素影响。

各种换羽理论并非独立存在，而是相互之间具有密切联系。换羽过程中，鸟类利用季节型换羽在适应环境方面奠定基础，性选择型进一步推动繁殖特征进化，使得通过换羽获得更利于繁殖的羽毛特征。损伤换羽则是鸟类处理外界不利因素（例如机械损伤或寄生虫侵害）的对策，此机制可能改变它们原有基于自然或繁殖条件的传统换羽模式。前替换羽既与性选择相关，又牵涉磨损和时间因素介入影响，与其他换羽类型共同构成了鸟类多元化的换羽体系。这些理论展示了探索隐藏在鸟类换羽背后的原因、过程和意义，帮助我们全面理解这种复杂生理现象。通过对这些假说的探讨，能够更加透彻地了解鸟类在如何应对环境变迁以及进行繁殖竞争方面潜移默化的对策。对于探索其生态适应特性、演化路径以及生物多样性之保护含义重大。同时，也为进一步研究鸟类的生理、行为和进化提供了丰富的理论基础和研究方向。

1.2.3 鸟类换羽的机制

鸟类换羽是一个受多种因素调控的复杂生理过程，涉及激素、遗传机制、光周期和神经调控等多个层面，这些因素相互协作，确保换羽顺利进行。