

动物所等揭示球金龟成球行为的功能形态机制与演化历程

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/19531.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

自然界中部分动物具有成球行为（Conglobation），可在遇到危险时将身体卷曲成球，如犰狳、穿山甲、刺猬、球马陆、球鼠妇等。这些动物均是依赖多个体节的卷曲形成紧密球形，保护身体腹面、足等脆弱部位。昆虫的身体躯干只有头胸腹三个体节，因而具有成球行为的昆虫通常无法形成紧密的球形，身体腹面、足等部位不可避免的会有外露。然而，昆虫中也有特例。例如，球金龟是一类能够形成紧密球形的昆虫，其特殊技能受到科学界和科普界的关注。然而，球金龟成球行为仍存在谜团。近日，中国科学院动物研究所牵头，中意德科学家参与的研究揭示了球金龟成球行为的起

源、演化及功能形态学机制。相关研究成果发表在《通讯生物学》（Communications Biology）上。

球金龟是生活于白蚁巢、枯枝落叶层和朽木中等隐秘生境的一类罕见甲虫，是金龟总科、驼金龟科、球金龟亚科的统称，世界已知44属449种，分布在泛热带区。虽然都被称为球金龟，但不是全部球金龟都可以形成紧密球形，还有一些球金龟只能形成松散球形，或者完全不能成球（图1）。不成球形种类与普通甲虫的形态相似，松散球形的个体其头部和胸部有一定程度的弯曲，紧密球形的个体进一步特化，各结构之间互相嵌合形成完整的球形。

本研究要弄清楚哪些表型结构参与成球行为？这三类行为类型有哪些形态区别？研究发现，球金龟的头、前胸背板、鞘翅和足等结构在三种成球类型中均有稳定差异。研究通过几何形态学定量分析全球74种球金龟的形态特征发现，在比较形态学中难以呈现的细微形态变化趋势，如松散球形和紧密球形种类的头和前胸背板差异更明显，鞘翅的主要差别体现在不成球形和球形之间。进一步结合显微CT和三维重建技术，研究首次发现了紧密型球金龟在体壁厚度上存在异速生长现象，也就是球外侧（前胸背板和鞘翅）的体壁厚度显著厚于内侧体壁（胸部和腹部腹面），同时与不具成球能力的金龟体壁厚度具有显著差异，推测这或是在能量有限情况下的一种权衡策略（trade-offs）。

球金龟的成球行为演化历史尚不清晰，仅有的一块化石记录表明，松散球形种类可能最早出现在新生代（约1500万至2500万年前）。在详细调查不同产地和地质时间的化石后，研究在克钦琥珀和多米尼加琥珀中均发现了球金龟的存在，且首次在中生代（约1亿年前）记录了松散球形的新属种以及新生代完整球形的新种。这些发现将球金龟成球行为的起源提前了约8000万年，且是昆虫中成球行为的最早记录之一。

结合发现的化石及现生种类的形态特征，本研究构建了球金龟及近缘类群的系统发育树，揭示了

球金龟成球行为的演化历史。研究表明，成球行为在球金龟中是单次起源的，即从不成球到松散球形，然后到紧密球形的演化顺序，其中伴随着在少量节点上的反转。

在成球行为的演化历程中，与球形相关的表型结构是不是同时出现特化以及如何演化？为探究这一问题，研究根据获得的几何形态数据，重建了球金龟祖先的头、前胸背板和鞘翅等结构的几何形态，进而检验了这些祖先的可能行为类型，从而定量刻画出球形相关表型结构的演化历史，结果表明三个形态表型演化过程不同，其中中生代球金龟鞘翅首先经历了快速的适应演化，为成球行为形成奠定了基础，前胸背板紧随其后，最后在新生球金龟头部的快速演化，为紧密球形的形成补上了关键一环。

动物为什么会演化出如此复杂的行为？以往研究猜测，成球行为可能具有防御和生理功能，例如保水能力和温度调节能力。比较典型的例子是甲壳纲中最大的陆生类群——鼠妇，由于缺乏陆生节肢动物的气门系统，它们的成球行为减缓了体内水分的散失，从而适应了登陆后的生活。对于球金龟这样的陆生昆虫而言，结合其生境，研究曾提出多种假说，包括防御功能以及滚动逃跑等可能性。本研究选择金龟子中球金龟、驼金龟及鳃金龟开展了机械力学分析，针对昆虫被天敌直接攻击的特定场景，单轴压力实验发现球金龟在卷曲成球时可以抵抗更大的咬合力而不变形，进而证实了球金龟在成球状态下具有较高的防御力。为了进一步揭示防御力提高的原因，研究结合材料力学的基本知识，提出了适用于生物材料的中心假说即防御力来源于形状、材料厚度和材料强度三方面。结合显微CT、三维重建技术以及纳米压痕实验，研究证实了球金龟具有较大的外侧体壁厚度，且体壁本身的机械强度较高。因此，球金龟的整体防御力来源于球形形状、体壁厚度及体壁本身的机械强度，说明体壁在球金龟成球能力的演化过程中至关重要。

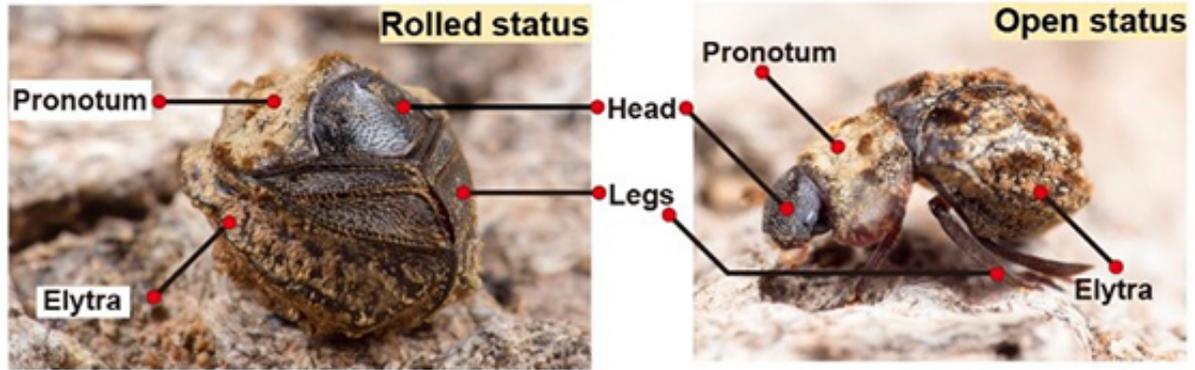
那么，在进化历史中球金龟的防御能力如何变化？通过最大程度的还原化石的内部结构，研究在三维模型中测量了其体壁厚度，证实中生代和新生代的球金龟化石均具有较高的外体壁厚度，且新生代的种类厚度更高。鉴于无法对灭绝的物种开展力学实验，研究采用有限元模拟的方法，结合重建出的鞘翅三维模型，分析了球金龟祖先鞘翅结构的防御能力，结果表明伴随历史进程，鞘翅的防御力逐渐提升。

结合球金龟的生活习性，研究提出了“攻击者压力”假说来解释球金龟的进化驱动因素。球金龟大多数种类生活在密闭环境中，例如前文提到的枯枝落叶层、白蚁巢穴等。松散球形种类主要生活在枯枝落叶层，紧密球形主要生活在白蚁巢穴中，环境的特化驱动了球金龟的成球行为演化，且白蚁的进化历史中真社会性行为更加复杂，其兵蚁攻击方式也多样化，这一过程中攻击者的压力驱动球金龟成球行为的复杂化。现生部分松散球形个体活动在白蚁废弃巢穴中的记录也从侧面佐证了这一观点。对一些生活在开放环境生活的球金龟而言，球形行为还有另一种好处，即通过滚动快速逃脱，而这更可能是紧密球形个体在适应开放环境中成球行为的二次适应性演化。

该研究对球金龟全球样本、现生和绝灭种类开展了全面系统总结，综合运用几何形态学、显微CT和三维重建、系统发育学、有限元、单轴压力测定、纳米压痕和材料性质测定等交叉学科方法，结合定量形态学和材料力学的实验测试和计算机模拟分析，高精度刻画了球金龟球形行为起源和适应性进化历程，为动物行为的表型演化及功能形态学研究提供了范例。

[论文链接](#)

pill scarab beetles (Ceratocanthinae)

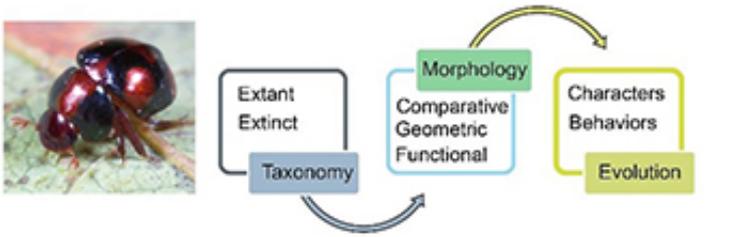


Incomplete conglobation

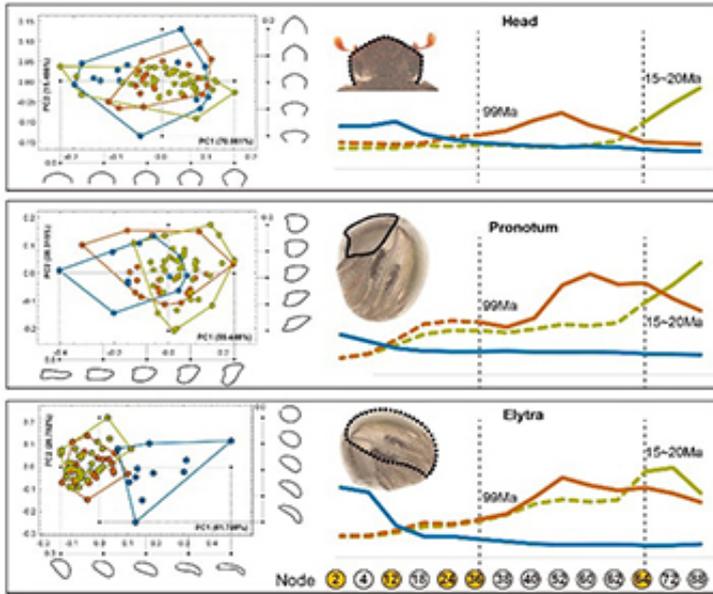
Complete conglobation

图1.球金龟的成球行为

The evolution of conglobation in Ceratocanthinae

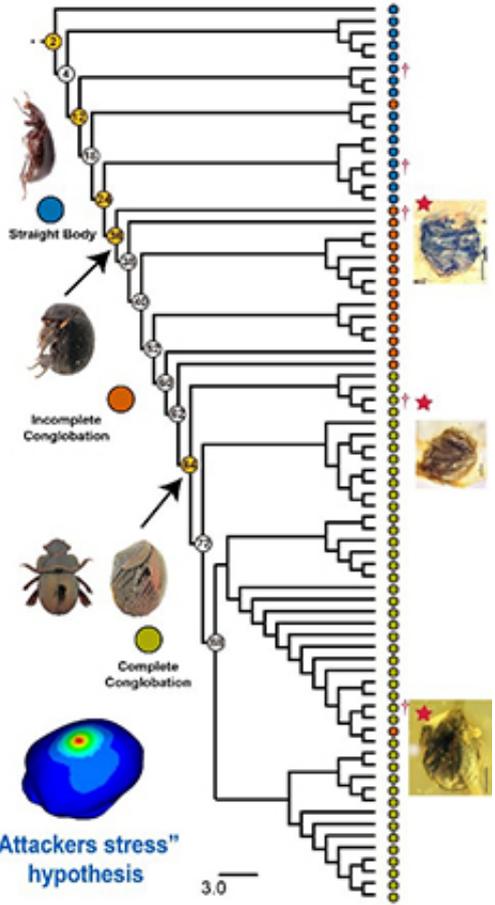


Morphology Evolution Evolutionary process of adaptive characters



Taxonomy Evolution

Conglobation evolves with a single origin



Functional Morphology Ceratocanthinae with higher defensive strength

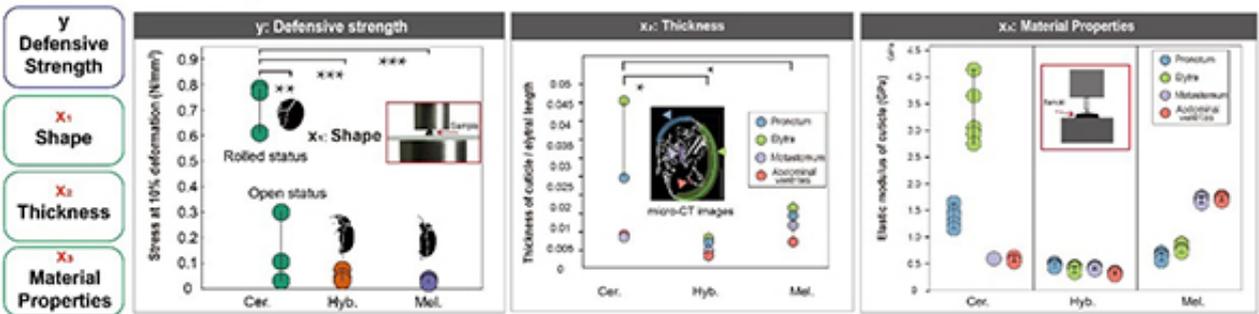


图2.球金龟成球行为进化主要研究内容

研究团队单位：动物研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发