



• 学会讯息 •

## 2019 年度中国古生物学十大进展评选结果及简介

按照中国古生物学会 2020 年工作计划和十二届三次常务理事会议关于开展“中国古生物学年度十大进展”评选活动的决定, 中国古生物学会于 2020 年 1 月开展了 2019 年度中国古生物学十大进展的推荐和评选工作。提名推荐阶段学会秘书处共收到理事和分支机构推荐的提名成果 22 项。其中,

科研成果 21 项, 教学成果 1 项。

经中国古生物学会第十二届理事会成员和荣誉理事(含院士)组成的评审委员会投票评选, 评委会主任和副主任审定, 学会功能型党委审核, 2019 年度中国古生物学十大进展评选结果如下(按照得票高低排序):

排名	首要完成人姓名	进展名称	主要完成单位	成果发表刊物
1	傅东静	华南早寒武世布尔吉斯页岩型化石库—清江生物群	西北大学	<i>Science</i>
2	陈 哲	埃迪卡拉纪新化石揭示动物的早期演化	中国科学院南京地质古生物研究所	<i>Nature; Geology</i>
3	王 敏	侏罗纪擅攀鸟龙类的发现和膜质翅膀在兽脚类恐龙中的演化	中国科学院古脊椎动物与古人类研究所	<i>Nature</i>
4	王海冰	热河俊兽——揭示哺乳动物中耳演化新模式	中国科学院古脊椎动物与古人类研究所	<i>Nature</i>
5	刘 武	发现具有现代人特征的 30 万年前人类头骨化石	中国科学院古脊椎动物与古人类研究所	<i>PNAS</i>
6	苏 涛	植物化石为青藏高原形成过程提供新证据	中国科学院西双版纳热带植物园	<i>Science Advances; National Science Review</i>
7	泮燕红	侏罗纪带羽毛恐龙为鸟类羽毛的分子演化提供直接证据	中国科学院南京地质古生物研究所	<i>PNAS</i>
8	赖旭龙	世界首例大熊猫古基因组	中国地质大学(武汉)	<i>Current Biology</i>
8	王 博	白垩纪缅甸琥珀揭示远古森林环境和被子植物昆虫传粉证据	中国科学院南京地质古生物研究所	<i>PNAS; PNAS</i>
10	王德明	亚洲最古老、泥盆纪面积最大的化石森林及其最早的根座型根系	北京大学	<i>Current Biology</i>
10	殷宗军	六亿年前化石揭示动物胚胎发育方式起源之谜	中国科学院南京地质古生物研究所	<i>Current Biology</i>

## 2019 年度中国古生物学十大进展成果简介

### 进展一 华南早寒武世布尔吉斯页岩型化石库——清江生物群

#### The Qingjiang biota—A Burgess Shale-type fossil Lagerstätte from the early Cambrian of South China

主要完成者：傅东静、张兴亮（西北大学）

其他完成者：童光辉、代 韬、刘 伟、杨宇宁、张 渊、崔林浩、李洛阳、负 浩、吴 雨、孙 鹭、刘 聪、裴文瑞、Robert R. Gaines

**科学意义** 西北大学早期生命与环境研究团队的张兴亮、傅东静等人在湖北长阳地区发现了一个距今 5.18 亿年的布尔吉斯页岩型特异埋藏软躯体化石库——清江生物群。团队成员经过 12 年化石采集和研究发现，清江生物群形成于寒武纪大爆发极盛时期；与其他寒武纪生物群相比，清江生物群的相对多样性最大，新属种比例最高，软躯体生物类群最多，化石保真度最好，而且保存了原生的有机质，它的发现刷新了人类对寒武纪海洋生态系统的认识。该研究成果发表于《科学》(Science)杂志。

Burgess Shale-type fossil Lagerstätten provide the best evidence for deciphering the biotic patterns and magnitude of the Cambrian explosion. Here, we report a Lagerstätte from South China, the Qingjiang biota (~518 million years old), which is dominated by soft-bodied taxa from a distal shelf setting. The Qingjiang biota is distinguished by pristine carbonaceous preservation of labile organic features, a very high proportion of new taxa (~53%), and preliminary taxonomic diversity that suggests it could rival the Chengjiang and Burgess Shale biotas. Defining aspects of the Qingjiang biota include a high abundance of cnidarians, including both medusoid and polypoid forms; new taxa resembling extant kinorhynchs; and abundant larval or juvenile forms. This distinctive composition holds promise for providing insights into the evolution of Cambrian ecosystems across environmental gradients.

**进展简介** 自从 40 亿年前有生命以来，一直由菌藻类等微生物主宰着地球。直到 5 亿多年前的寒武纪初期，绝大多数的动物门类“突然”在地球上出现，学术界称之为“寒武纪大爆发”。动物门类为何在此时爆发式出现，被列为六大自然科学难题之一。

清江生物群是在我国湖北省长阳地区寒武纪水井沱组中段地层中发现的以软躯体化石为主的特异埋藏生物群，距今约 5.18 亿年，处于动物门类爆发式出现的极盛期，标准产地位于丹水河流向清江的入口处，故命名为清江生物群。与常见的动物骨骼化石库相比，清江生物群化石不仅能够保存有骨骼动物的软体结构，比如皮肤、肌肉、内脏等。更重要的是，它还保存了大量不具有矿化骨骼的动物类型，如水母、海葵和栉水母等(图 1, 2)。因此，清江生物群代表了动物在起源演化初期较完整的组合面貌，真实再现了寒武纪时期以动物为主导的海洋生态系统生机盎然的场景，是研究动物门类起源与寒武纪大爆发最理想的“现场”。

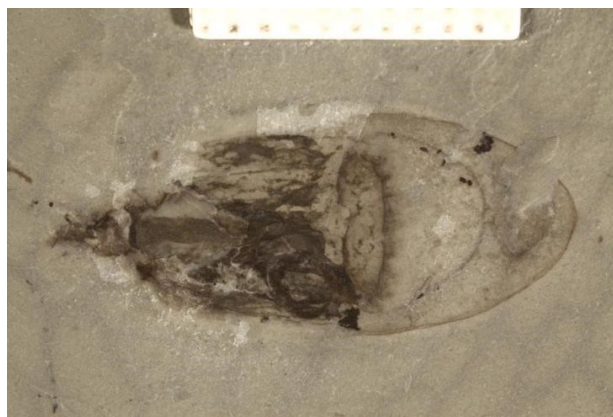


图 1 清江生物群水母状化石(傅东静 供图)

在全球范围内，目前已发现寒武纪软躯体化石产地 50 余处。根据软体生物种类的数量和保存质量的优劣，共划分为 3 个等级，只有加拿大的布尔吉斯页岩生物群和我国的澄江生物群被列为顶

级化石宝库。清江生物群被同领域科学家公认为是继 20 世纪初布尔吉斯页岩生物群和 80 年代澄江生物群发现以来,又一个全球顶级的软躯体化石生物群。清江生物群比布尔吉斯页岩生物群早一千万年,在演化时间上更加接近寒武纪大爆发的源头。与澄江生物群相比,清江生物群生活在远离海岸的较深水环境,反映的是同一时期不同地理环境中的生物组合面貌(图 3),二者具有很强的互补性。因此,清江生物群的发现与研究,不仅能够探索寒武纪大爆发时期动物门类的多样性、谱系演化关系、起源演化模式等提供关键的科学依据,而且会进一步促进寒武纪大爆发研究领域的发展。



图 2 清江生物群节肢动物化石-林乔利虫 (傅东静 供图)



图 3 清江生物群复原图 (傅东静 供图)

研究成果在学术界引起了极大的轰动,国内外重要科学媒体对这项重大科学发现进行了深度解读,并给予高度评价。《科学》(*Science*)杂志在发给媒体的通讯中写道:“揭示寒武纪秘密的新宝

藏出土了”。《科学》(*Science*)杂志还在同期刊发了评论文章,认为清江生物群是令人震惊的科学发现,化石丰度、多样性和保真度世界一流,科学价值巨大,后续研究将有可能刷新人类对动物门类起源和寒武纪大爆发的认识。《自然》(*Nature*)杂志在专题评论称:“清江生物群打开了观察壮观寒武纪的又一个窗口,各种新的生物类群前所未见,对于科学家进一步了解早期已灭绝的动物非常重要”。

此外,同行专家在接受媒体采访时也都对清江生物群发现和研究给予较高评价。加拿大布尔吉斯生物群研究团队负责人 Jean-Bernard Caron 在《科学》(*Science*)杂志“新闻”专栏和 *Discover* 杂志上发表评论,认为清江生物群化石确实不同凡响,是研究寒武纪大爆发的全新窗口。哈佛大学 Joanna Wolfe 接受《国家地理》(*National Geographic*)采访时称赞道:“清江生物群展示了早期生物最完整的解剖结构,是优中之优的软躯体化石库”。瑞士洛桑大学 Allison Daley 在接受 *BBC News* 采访时表示,“清江生物群是过去一百年来最令人震惊的古生物学发现,软躯体化石的保存质量令人难以置信”。与此同时,中央电视台、人民日报(整版)、新华社(头条)、中国人民广播电台、中新网、光明网、学习强国等中央媒体,以及 *CNN*、*BBC*、*The Times*、*Daily Mail*、*The Guardian*、*The Economist* 等媒体对清江生物群这一重大科学发现进行了专题报道。

**论文信息** Fu Dong-jing, Tong Guang-hui, Dai Tao, Liu Wei, Yang Yu-ning, Zhang Yuan, Cui Lin-hao, Li Luo-yang, Yun Hao, Wu Yu, Sun Ao, Liu Cong, Pei Wen-rui, Gaines R R, Zhang Xing-liang\*. 2019. The Qingjiang biota – An new Burgess Shale-type fossil Lagerstätte from the early Cambrian of South China. *Science*, 363: 1338–1342. DOI: 10.1126/science.aau8800. (\*corresponding author)

## 进展二 埃迪卡拉纪新化石揭示动物的早期演化 New Ediacaran fossils elucidate early animal evolution

主要完成者: 陈 哲(中国科学院南京地质古生物研究所/中国科学院生物演化与环境卓越创新



中心);肖书海(美国弗吉尼亚理工大学地球科学系)

其他完成者:周传明、袁训来

**科学意义** 身体分节和两侧对称体制的出现是动物演化史上极为重要的革新事件。中国科学院南京地质古生物研究所早期生命团队袁训来课题组在三峡地区约 5.5 亿年前的“石板滩生物群”中发现和研究了新的动物化石(夷陵虫)和一类特殊的遗迹化石。该项研究将分节的两侧对称后生动物的出现时间提前了至少一千万年,为之后寒武纪两侧对称动物大爆发找到更为久远的“根”;动物的复杂运动也反映了当时水体中氧含量存在周期性波动;表明“寒武纪大爆发”时期以底栖动物为主体的生态系统在埃迪卡拉纪已经开始建立。相关研究成果发表在《自然》(*Nature*)和《地质学》(*Geology*)杂志上。

The origin of bilaterally symmetric animals with a segmented body plan is a monumental innovation in animal evolution. A research team, led by Xunlai Yuan, from Nanjing Institute of Geology and Palaeontology and Virginia Tech, discovered a new segmented bilaterian fossil (*Yilingia spiciformis*) and extraordinary trace fossils, preserved in ~550-million-year-old rocks in the Yangtze Gorges area, Hubei Province. The newly found fossils unravel critical evolutionary puzzles and roll back the origin of segmented and bilaterally symmetrical animals by at least 10 million years. The trace fossils record complex behaviors and reflect short-term fluctuations of dissolved oxygen levels in the bottom sea water. The appearance of motile animals in the Ediacaran Period has profound environmental and ecological impacts on the Earth surface system and ultimately led to the Cambrian substrate and agronomic revolutions. The researches were published in *Nature* and *Geology*.

**进展介绍** 前寒武纪至寒武纪过渡时期是地球生物和环境巨大变革时期。在寒武纪早期,现生动物的主要门类突然出现,并迅速占领了整个海洋生态系统。虽然一些间接证据推测它们应该有一个更古老的祖先,但是缺乏确切的化石记录。在寒武纪之前是否出现了后生动物、是什么机制触发了“寒武纪大爆发”,上百年来一直是困扰科学家的课题。石板滩生物群中新发现的

实体及其遗迹化石为解决这个问题提供了直接的化石证据。

中国科学院南京地质古生物研究所早期生命团队袁训来课题组在湖北三峡地区约 5.5 亿年前的“石板滩生物群”中发现和描述了一类新的动物化石—夷陵虫(*Yilingia*) (图 4), 并且发现夷陵虫的遗体 and 它最后行进的拖痕同时保留在一起。同时代的岩层中还发现了一类特殊的动物遗迹化石, 它钻入和钻出藻席层的复杂行为, 反映了埃迪卡拉纪水体中氧含量存在周期性波动。

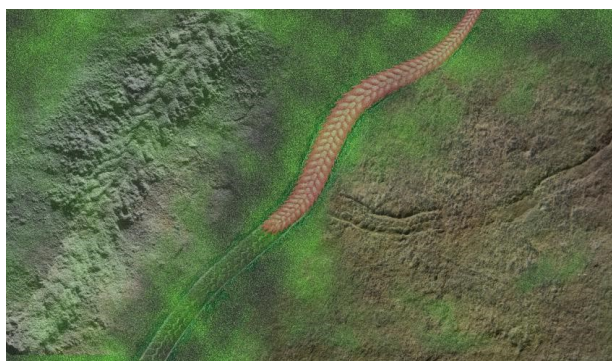


图 4 分节的两侧对称动物化石夷陵虫(*Yilingia*)  
实体化石(左)、遗迹(右)和动物复原(中)(陈哲 供图)

夷陵虫身体长条形, 两侧对称, 呈三叶形, 具有明显的身体分节, 也具有了前后和背腹的区别。更加奇特的是, 部分标本中动物的实体与它的遗迹同时保存在一起, 再现了一条行进中的虫子的“最后时刻”。这是一类全新的动物化石, 在地质历史时期和现代都没有发现形态相同的动物, 研究者以它的发现地点湖北省宜昌市夷陵区给它取了一个新名字“夷陵虫”, 推测可能是环节动物或节肢动物。夷陵虫是目前在寒武纪之前发现的唯一的身体分节, 具有运动能力, 并可以形成连续的遗迹的两侧对称动物。

埃迪卡拉纪末期海水经历了广泛的缺氧和剧烈的氧化还原条件的变化, 这一变化直接影响动物的分布和行为。在相同层位发现的遗迹化石新属种 *Yichnus levis*, 由一系列不连续的纺锤形潜穴组成。通过分析, 推测 *Yichnus levis* 代表了动物不断地钻入和钻出藻席层的行为, 这一行为可能与当时海洋底层藻席产氧有关(图 5)。虽然埃迪卡拉

纪大气中氧含量已明显增加,但氧含量水平存在着明显的短期波动。新发现的遗迹化石穿插在藻席层中,水体中与藻席层中氧含量的差异(现代藻席层中的日夜含氧量变化异常明显)可能导致了该造迹动物在藻席层和水体间进行规律的反复运动。



图5 遗迹化石反映海底氧含量的短期变化 (陈哲 供图)

新发现的系列动物实体和遗迹化石证据,证实了“寒武纪大爆发”之前动物有一个较长时间的演化历史,将两侧对称、分节或具有附肢的动物出现时间提前了至少一千万年,标志着动物在埃迪卡拉纪末期已经开始进入“步行”(用脚行走和运动的新时代;能够自由运动的底栖动物在埃迪卡拉纪已经出现,并对海底沉积物进行了改造;表明“寒武纪大爆发”时期以底栖动物为主体的生态系统在这一时期已经开始建立,并逐渐取代了前寒武纪统治地球数十亿年的微生物席基底,对地球表面系统造成了深远的环境和生态影响。

相关成果引起了广泛关注。在《自然》(*Nature*)焦点新闻中,以“虫子化石重塑动物生命的起源:五亿年前的生物挑战动物大爆发理论”为题报道了该成果;《科学通报》发表了该成果的亮点评述,认为石板滩生物群的系列成果改写了早期两侧后生动物和分节动物的演化历史。

**论文信息** Chen Zhe, Zhou Chuan-ming, Yuan Xun-lai\*, Xiao Shu-hai\*, 2019. Death march of a segmented and trilobate bilaterian elucidates early animal evolution. *Nature*, 573: 412–415. DOI: 10.1038/s41586-019-1522-7 (\*corresponding authors).

Xiao Shu-hai\*, Chen Zhe, Zhou Chuan-ming, Yuan Xun-lai\*, 2019. Surfing in and on microbial mats: Oxygen-related behavior of a terminal Ediacaran bilaterian animal. *Geology*, 47: 1054–1058. DOI: 10.1130/g46474.1. (\*corresponding authors)

### 进展三 侏罗纪擅攀鸟龙类的发现和膜质翅膀在兽脚类恐龙中的演化

#### A new Jurassic scansoriopterygid and the evolution of membranous wings in theropod dinosaurs

主要完成者: 王 敏 (中国科学院古脊椎动物与古人类研究所)

其他完成者: 周忠和、徐 星、Jingmai O'Connor (邹晶梅)

**科学意义** 由中国科学院古脊椎动物与古人类研究所王敏研究员和其同事在《自然》(*Nature*)以封面文章报道了一具有膜质翅膀的恐龙——长臂混元龙(图 6),化石发现于燕辽生物群晚侏罗世早期的海房沟组。长臂混元龙属于兽脚类恐龙中的擅攀鸟龙类,是该类群目前发现最完整的骨架,为擅攀鸟龙类中广泛存在的膜质翅膀和棒状长骨提供了支持,展示了在恐龙—鸟类演化历程中出现大量意想不到的适应飞行的尝试,与之对应演化出差异显著的骨骼—表皮衍生物组合。

A new Jurassic non-avian theropod dinosaur from 163 million-year-old fossil deposits in north-eastern China provides new information regarding the incredible richness of evolutionary experimentation that characterized the origin of flight in the Dinosauria. Published in *Nature* as cover paper, Drs. Min Wang, Jingmai K. O'Connor, Xing Xu, and Zhonghe Zhou of the Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology of the Chinese Academy of Sciences in Beijing describe and analyze the well-preserved skeleton of a new species of Jurassic scansoriopterygid dinosaur with associated feathers and membranous tissues. Dr. Wang and his colleagues investigated the eco-morphospace disparity of *Amblopteryx* relative to other non-avian coelurosaurians and Mesozoic birds. The results of this analysis capture dramatic changes in wing architecture that evolved near the split between the Scansoriopterygidae and the avian lineage, as the two clades diverged and underwent very different evolutionary paths to achieving flight.

**进展介绍** 在脊椎动物漫长的演化史中,翼龙、鸟类和蝙蝠独立演化出了形态迥异的飞行结构。相较翼龙和蝙蝠不完整的化石记录,随着不断发现的带羽毛恐龙和早期鸟类化石,尤其得益于



我国中晚侏罗世的燕辽生物群和早白垩世的热河生物群,有关鸟类飞行起源这一重要科学问题取得了重要进展,而擅攀鸟龙类的发现则揭示了“一条匪夷所思的征服蓝天之旅”。擅攀鸟龙类(*Scansoriopterygidae*)是恐龙家族中最为怪异的类群,生活在早-晚侏罗世,迄今发现的仅有三个属种:宁城树栖龙(*Epidendrosaurus ningchengensis*)、胡氏耀龙(*Epidexipteryx hui*)和奇翼龙(*Yi qi*)。擅攀鸟龙类形态特殊,如头骨高耸、四肢纤细、第三手指(最外侧的手指)加长、古老的 2-3-4 手指指式、尾骨缩短等,俨然是恐龙和鸟类的“混合体”,而它一度被认为和鸟类具有最近亲缘关系的兽脚类恐龙。但上述标本亦或不完整,亦或属于幼年个体,大量形态特征难以观察,造成它在演化树上的位置扑朔迷离。2015 年发现的奇翼龙更加为这一类群增添神秘色彩。奇翼龙的前肢附着翼膜,还具有有一根棒状长骨,这样的长骨在其他恐龙(包括鸟类)中没有对应的同源结构。因此,奇翼龙被复原成类似翼龙那样具有膜质翅膀而能够滑翔。但奇翼龙的标本仅有一件,保存不完整,因此对于棒状长骨和翼膜的结构还存有争议。



图 6 长臂浑元龙 *Ambopteryx longibrachium* Wang et al., 2019, 正型标本 (王敏 供图)

2019 年中国科学院古脊椎动物与古人类研究所的王敏、Jingmai O'Connor (邹晶梅)、徐星、周忠和报道了一件发现于辽宁晚侏罗世地层的化石。经过长达一年的室内修理、实验和对比研究,研究团队认为其代表一新的擅攀鸟龙类,将其命名为长臂浑元龙(*Ambopteryx longibrachium*)。浑元龙发现于燕辽生物群晚侏罗世早期的海房沟组(距今约 1.63 亿年),其正型标本是目前已知最完整的擅攀鸟龙类化石,提供大量形态和生态学信息。浑元龙体长约 32 cm,体重约 306 g。浑元龙在肱骨近端关节面、手指和腰带形态方面明显不同于其他擅攀鸟龙类,并且具有原始鸟类那样的尾综骨,如此缩短的尾骨能进一步将身体重心前移,有利于在飞行/滑翔时保持稳定。更为重要的是,研究人员在浑元龙上发现了和奇翼龙相似的棒状长骨和翼膜(翼膜中保存有色素体),这一新发现为棒状长骨和翼膜在擅攀鸟龙类中的出现提供了确切无疑的证据。浑元龙体内保存有胃石和疑似尚未完全消化的骨质胃容物,这是在擅攀鸟龙类中首次发现的与食性相关的证据,研究人员推测其为杂食性。

浑元龙的前肢异常加长,甚至超过了中生代多数鸟类。研究人员在对比恐龙前肢时,发现擅攀鸟龙类的前肢比例构成非常奇特,而这样的差异是否与翼膜的出现有关?为了证实这一猜测,王敏等采用基于系统发育关系的主成分分析方法讨论中生代虚骨龙类(包括鸟类)四肢长度的演化,特别是在接近飞行起源时有哪些显著变化。系统发育主成分分析是在传统的主成分分析上剔除亲缘关系,最大程度保证采样点的独立性,同时复原祖先节点的特征状态,从而展现不同类群的演化趋势。研究结果显示,自副鸟类(*Paraves*,即包括所有鸟类,但不包括窃蛋龙类的最广义类群)开始,前肢开始加长,但仅有擅攀鸟龙类的加长程度接近中生代鸟类,而这一程度其他非鸟龙类恐龙从未获得。擅攀鸟龙类前肢的加长主要源自肱骨和尺骨;在鸟类、驰龙类或者伤齿龙类中,则是掌骨的加长,而这些类群的前肢具有飞羽。研究人员认为擅攀鸟龙类通过加长的肱骨和尺骨、第三手指,与棒状长骨来附着膜质的翅膀,而鸟类、驰龙类和伤齿龙类则需要较长的掌骨来附着飞羽,显示出两

种不同的飞行模式 (“膜质翅膀和短掌骨”与“羽毛翅膀和长掌骨”) 对前肢结构产生的巨大改变。

已知的擅攀鸟龙类均生活在晚侏罗世, 类似的膜质翅膀没有在白垩纪的恐龙中出现。由飞羽构成的翅膀自晚侏罗世出现就延续到白垩纪, 经过漫长的演化最终形成了鸟类的羽翼, 使后者成为了多样性最丰富的现生四足动物。擅攀鸟龙类独特的飞行结构代表了飞行演化的一次短暂尝试。

**论文信息** Wang Min\*, O'Connor J K, Xu Xing, Zhou Zhong-he, 2019. A new Jurassic scansoriopterygid and the loss of membranous wings in theropod dinosaurs. *Nature*, 569: 256–259. DOI: 10.1038/s41586-019-1137-z. (\*corresponding author)

#### 进展四 热河俊兽——揭示哺乳动物中耳演化新模式

##### Cretaceous mammal reveals a new pattern of mammalian middle ear evolution

主要完成者: 王海冰、王元青 (中国科学院古脊椎动物与古人类研究所)

其他完成者: 孟 津

**科学意义** 由中国科学院古脊椎动物与古人类研究所王元青研究员领衔的科研团队在《自然》(*Nature*)报道了早白垩世哺乳动物——盖氏热河俊兽(图 7)。研究首次揭示了多瘤齿兽类完整的中耳形态, 重塑了上隅骨的演化历史。研究认为哺乳动物的锤骨-砧骨关节(原始颌关节)与齿骨-鳞骨颌关节(次生颌关节)协同演化。结合多重证据, 研究提出一种新的哺乳动物中耳演化模式: 异兽类独特的齿骨-鳞骨颌关节及其取食方式可能为其中耳脱离下颌提供了比其他类群更大的选择压, 加速了中耳演化。《自然》(*Nature*)同期发表的“新闻&观点”文章认为这项研究为探讨早期哺乳动物耳区演化的多样性和复杂性提供了重要证据。

A research team led by Wang Yuanqing of the Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology (IVPP), Chinese Academy of Sciences, reports a fascinating new multituberculate mammal, *Jeholbaatar kielanae*, with well-preserved middle ear bones from the Cretaceous Jehol Biota of China. The new discovery reveals a transitional stage in the evolution of the surangular and a complex configura-

tion of middle ear bones in multituberculates. Scientists argue that the primary (malleus-incus) and secondary (squamosal-dentary) jaw joints co-evolved in allotherians. Detachment of the middle ear (auditory apparatus) would have gained higher selective pressure in order to increase feeding efficiency, suggesting that evolution of the middle ear was probably triggered by functional constraints of feeding apparatus in allotherians. This research digs deeply into how and why detachment of postdentary bones took place in different clades of mammals. It is viewed as essential to understand the diversity and complexity of middle ear evolution in early mammals in a News & Views paper by one of the reviewers (Anne Weil) in *Nature*.



图 7 盖氏热河俊兽正型标本 (王海冰 供图)

**进展介绍** 在脊椎动物演化历史中, 哺乳动物中耳演化通常被认为是生物重演律的经典案例: 哺乳动物中耳经历了从下颌中耳(Mandibular Mammalian Middle Ear), 过渡型中耳(Transitional Mammalian Middle Ear), 到典型哺乳动物中耳(Definitive Mammalian Middle Ear)的三个演化阶段。受限于化石证据的缺失, 不同中耳演化阶段在各哺乳动物支系中发生的时间和机制一直是研究的难点。

最新研究发表的哺乳动物化石发现于辽宁凌

源敞子沟下白垩统九佛堂组。经过长时间室内精心修理,化石标本的高精度三维扫描与重建,数据处理和对比研究,研究团队确定该化石代表了多瘤齿兽类始俊兽科的新物种,将其命名为盖氏热河俊兽,属名取自热河生物群(Jehol Biota),正型标本是首件研究报道的产自九佛堂组的多瘤齿兽类化石,种本名献给波兰古生物学家索菲娅·盖兰—娅瓦洛夫斯卡 Zofia Kielan-Jaworowska。

盖氏热河俊兽的正型标本中保存了完整的中耳结构,为研究早期哺乳动物耳区演化提供了直接证据。研究工作揭示了多瘤齿兽类中耳各个骨块的完整形态,以及相互间的接触关系,对探讨哺乳动物的齿骨后骨从下颌中耳到典型哺乳动物中耳这一演化事件补充了极具分量的拼图。基于这项研究,研究人员对于上隅骨(Surangular)在哺乳动物中的演化有了更清晰的认识。此次研究首次揭示了上隅骨在早期哺乳动物中,从一块独立的骨骼,变为逐渐与锤骨体愈合的状态,成为锤骨的后外侧部分。新标本中的锤骨、砧骨呈叠覆型(背-腹型)的接触关系。在哺乳动物中耳演化过程中,尽管中耳骨骼的形态变化很大,但锤骨-砧骨的关节方式呈现两种模式:叠覆型关节和鞍型关节。

基于系统发育分析结果,研究人员对哺乳动物中耳演化在异兽类(多瘤齿兽+贼兽类)的演化机制提出新的假说。在中生代哺乳动物中,异兽类至少在中/晚侏罗世(大约 1.6 亿年前)就已经演化出典型哺乳动物中耳;而在同一时期,其他已知的哺乳动物类群还保留了过渡型中耳。同时,异兽类的齿骨-鳞骨颌关节方式独特,关节较为开放,能够支持下颌大幅度前后向的活动,与兽类中铰链式的齿骨-鳞骨颌关节在形态和功能上区分明显。结合目前已知的异兽类中耳形态及齿骨-鳞骨颌关节的分化时间,以及现生哺乳动物的胚胎发育学证据,研究人员提出在哺乳动物中耳演化中,锤骨-砧骨的关节(原始颌关节)与齿骨-鳞骨颌关节(次生颌关节)是协同演化的;异兽类也存在一个过渡型中耳的演化阶段,但此阶段在异兽类中持续的时间很可能比其他所有哺乳动物类群短,其演化机制很可能是因为异兽类独特的齿骨-鳞骨颌关节及其取食方式对中耳脱离下颌提供了比其他类群更

为显著的选择压力,因此加速了中耳的演化,致使异兽在至少 1.6 亿年前(早于其他所有哺乳动物类群)就演化出典型哺乳动物中耳。

研究工作得到了中国科学院战略性先导科技专项(B 类),国家自然科学基金委员会基础科学中心项目,及现代古生物学与地层学国家重点实验室开放基金的支持。

**论文信息** Wang Hai-bing, Meng Jin, Wang Yuan-qing\*, 2019. Cretaceous fossil reveals a new pattern in mammalian middle ear evolution. *Nature*, 76: 102–105. DOI: 10.1038/s41586-019-1792-0. (\*corresponding author)

## 进展五 发现具有现代人特征的 30 万年前人类头骨化石

### Finding 300000 years old human skull with modern human morphology

主要完成者:刘 武、吴秀杰、裴树文、同号文(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所),蔡演军(中国科学院地球环境研究所/西安交通大学)

**科学意义** 中更新世晚期是东亚古人类演化的重要时间段。以往发现的人类化石大多破碎、年代存在不确定,古人类学界对东亚古老型人类向现代人的演化过渡一直存在争议。在安徽东至华龙洞发现的 30 万年前人类头骨化石(图 8)呈现一系列与现代人类相似的形态特征,揭示这一时期东亚古人类已经出现向早期现代人演化过渡的趋势,现代人在东亚大陆出现时间可能比以往认为的更早。此外,华龙洞人类化石为论证东亚地区人类演化区域连续性提供了新的化石证据。

Excavations in Hualong Cave, southeastern China yielded a 300000 years old human skull that exhibits morphological similarities to other East Asian Middle and Late Pleistocene archaic human remains, but also foreshadows later modern human forms. The features of the Hualong fossils complement those of other East Asian remains in indicating a continuity of form through the Middle Pleistocene and into the Late Pleistocene. In particular, the skull features a low and wide braincase with a projecting brow but a less prominent midface, as well as an incipient chin. The teeth are simple in form, con-



trasting with other archaic East Asian fossils, and its third molars are either reduced in size or absent. The Hualong Cave human fossils both add to the expected variation of these Middle Pleistocene humans, recombining features present in other individuals from the same time period, and foreshadow developments in modern humans, providing evidence for regional continuity.

**进展介绍** 距今 30–13 万年的中更新世晚期是东亚古人类演化的重要时间段。直立人消失与古老型智人繁盛、演化多样性与不同古人类成员出现以及古老型人类向早期现代人演化等一系列重要事件都发生在这一时期。由于以往发现的中更新世晚期人类化石大多破碎、或年代存在不确定因素,古人类学界对这一时期东亚古人类演化的许多问题一直存在争议。因此,年代可靠、保存状态良好的人类化石对于研究和论证这一时期人类演化过程尤为重要。

2013 年以来,刘武、吴秀杰、裴树文、蔡演军、同号文为核心的研究团队对安徽省东至县华龙洞进行了连续 5 年的发掘,发现了 30 余件古人类化石、100 余件古人类制作使用的石器、40 余种哺乳动物化石。此外,还发现了动物骨骼表面切割、砍砸痕迹等反映古人类生存行为的多种证据。通过同位素测年、动物群组成分析及地层对比等多种方法的综合研究,人类化石的年代被确定为距今 33.1–27.5 万年之间。

在华龙洞发现的人类化石一共有 30 余件,代表大约 16 个古人类个体。其中编号为华龙洞 6 号(HLD-6)的头骨保存最为完整。这件化石发现时尚包裹在地层胶结中,仅露出眼眶和部分面部。在清理包裹化石的地层胶结后,发现了属于同一个体的 19 件头骨和下颌骨碎片。经过细致的修复、拼接、CT 扫描、手工和虚拟复原,获得较为完整的虚拟和实体头骨、下颌骨和颅内模。复原后的华龙洞头骨包含几乎完整的面部和大部分脑颅部以及一侧下颌骨,代表一个大约 14–15 岁少年个体。近两年来,该团队对华龙洞人类头骨、下颌骨和牙齿形态特征、测量数据、脑形态、脑量、颅骨内部结构等特征进行了细致的研究并与世界范围内古人类化石及数据进行了对比。



图 8 华龙洞遗址:展示含化石地层的坍塌洞穴及发现人类头骨化石(刘武 供图)

对华龙洞人类化石的研究发现:距今大约 30 万年的华龙洞人类头骨、下颌骨和牙齿呈现与东亚中更新世直立人、更新世晚期人类及现代人类相似的混合特征。华龙洞人类头骨具有一系列与周口店等东亚更新世中期人类一致的原始特征,包括低矮的颅穹窿、颅骨最大宽位置低、额骨矢状脊、发达的眶上圆枕、宽而低矮的鼻部梨状孔、缓坡型鼻腔底部结构、第三臼齿先天缺失等。这些解剖学特征与多数中国更新世人类化石特征相似,体现了东亚地区更新世人类演化的区域连续性总体趋势。同时,华龙洞人类头骨、下颌骨和牙齿化石还呈现出一些与更新世晚期人类及现代人相似的特征,表现为上面部扁平、颅穹窿部和面部形态纤细、下颌骨联合接近垂直并出现颏三角、牙齿结构简单及尺寸较小等。这些相对进步的特征揭示这一时期东亚大陆人类已经出现向早期现代人演化过渡的趋势。因而华龙洞人类化石提供了东亚地区人类演化区域连续性以及从古老型人类向早期现代人演化过渡的新证据。

近 10 余年来,该研究团队开展了大量的野外调查和发掘,先后在湖北郧西黄龙洞、湖南道县福岩洞以及安徽东至华龙洞等地发现重要古人类化石及古人类生存活动证据,并开展相关的多学科研究。华龙洞是继周口店之后,在中国发现的出土人类化石最为丰富,同时还包含石器及其他古人类生存活动证据的综合性古人类遗址。长期以来,古人类学界对支持东亚古人类连续演化以及现代

人当地起源的化石形态特征一直存在争议。华龙洞人类化石的发现和研究表明为探讨这些问题提供了新的证据。对华龙洞人类化石的研究,发现了包括第三臼齿先天缺失等一些支持东亚古人类连续演化的区域性特征。此外,华龙洞人类头骨、下颌骨、牙齿呈现一系列与现代人类相似的形态特征,暗示现代人在东亚大陆出现时间可能比以往认为的更早。这些发现也符合世界范围古人类演化的纤细化及区域连续性的总体趋势。目前对华龙洞人类化石的初步研究已经提供了论证东亚古人类演化的新的证据,标志着我国学者在人类演化研究领域取得的又一项突破性成果。

**论文信息** Wu Xiu-jie, Pei Shu-wen\*, Cai Yan-jun\*, Tong Hao-wen, Li Qiang, Dong Zhe, Sheng Jin-hao, Jin Ze-tian, Ma Dong-dong, Xing Song, Li Xiao-Li, Cheng Xing, Cheng Hai, de la Torre I, Edwards R L, Gong Xi-cheng, An Zhi-sheng, Trinkaus E\*, Liu Wu\*, 2019. Archaic human remains from Hualongdong, China, and Middle Pleistocene human continuity and variation. PNAS, 116: 9820–8924. DOI: 10.1073/pnas.1902396116. (\*corresponding authors)

#### 进展六 植物化石为青藏高原形成过程提供新证据 Plant fossils provide new insights for the evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau

主要完成者: 苏 涛、周浙昆 (中国科学院西双版纳热带植物园)

其他完成者: Spicer R A、黄 健、刘 佳、吴飞翔

**科学意义** 由中国科学院西双版纳热带植物园苏涛研究员、周浙昆研究员所带领的科研团队,于 2019 年在《科学进展》(*Science Advances*)和《国家科学评论》(*National Science Review*)相继发表了利用植物化石重建青藏高原古海拔的系列研究成果,发现青藏高原中部在 25 Ma 前还存在东西向的峡谷,而其东南缘在 33 Ma 前已经达到现在高度。由此提出,青藏高原在地质时期具有复杂的地形地貌。上述科研成果从古植物学的角度为认识青藏高原的差异性抬升历史提供了全新的视角。

The surface evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP) is one of core scientific questions for plateau research, which is still under debate even after efforts for decades. During recent years, professor SU Tao, professor ZHOU Zhekun and their colleagues have discovered around ten new Cenozoic fossil sites and collected more than 20 000 plant fossil specimens from the QTP. Paleoelevations of the plateau were quantitatively reconstructed by using these plant fossils. Results indicate that a deep paleo-valley with floor no more than 2.3 km existed in central QTP by 25 Ma; however, southeastern margin of the QTP uplifted during the Eocene-Oligocene boundary and reached to present elevation by 33.4 Ma. The diachronous uplift histories of different parts of the QTP suggested that the topography of the plateau in the geological past might be much more complex than previously thought. Therefore, increasing new paleontological evidence sheds new lights on the surface evolution of the QTP.

**进展介绍** 印度板块向北漂移与欧亚板块碰撞,形成了世界上海拔最高的高原——青藏高原。地表海拔抬升历史是认识青藏高原形成过程及其机制的重要基础,也是目前国际地学领域研究的重点和难点。植物的形态特征、地理分布等与地质时期的环境密切相关,是探讨青藏高原古海拔的重要代理指标。青藏高原的化石植物群长期以来备受关注,但是由于高原沉积地层风化剥蚀严重,加之交通不便,野外工作难度大,目前在青藏高原核心地区的新生代植物群研究较为薄弱。

中国科学院西双版纳热带植物园古生态研究组致力于青藏高原新生代植物群研究,近年来与中国科学院古脊椎动物与古人类研究所联合组建青藏高原新生代古生物科考队,并参与了第二次青藏高原综合科学考察研究,在青藏高原开展古生物与古环境研究工作,新发现多个新生代化石点,采集到大量化石标本材料。

青藏高原中部的抬升历史对于认识整个高原的形成过程尤为重要。科考队在位于青藏高原中部海拔 4800 m 的伦坡拉盆地,发现了迄今约两千万年的大型棕榈叶化石。现生棕榈科植物有两千五百余种,主要分布在全球热带地区,少数种类



可见于亚热带地区,没有任何现生棕榈科植物能够存活于伦坡拉盆地这样的高寒之地。结合现代棕榈科植物分布的关键气候要素及古气候模型模拟的方法,揭示当时青藏高原中部的海拔不超过 2300 m,远没有达到现在的海拔高度,并进一步提出了其地形地貌可能是一种东西向的峡谷。这一发现认为青藏高原有着复杂的地形地貌,高原中部在 23 Ma 以后才整体上形成,比之前认为的时间推后了至少 10 Ma。

此外,古生态研究组在青藏高原东南缘的芒康盆地开展了数年的野外工作,采集到大量保存精美的植物叶片化石(图 9),其中两个层位的化石最为丰富,无论叶片形态特征还是类群组合都存在巨大的差异。通过测定绝对地质年代,两层植物化石组合的年代分别是 34.6 Ma 和 33.4 Ma。利用热力学原理定量重建了这两层植物化石组合的古海拔,提出该地区在晚始新世的海拔已经约 3000 m,而早渐新世可能就接近或达到现在的海拔。

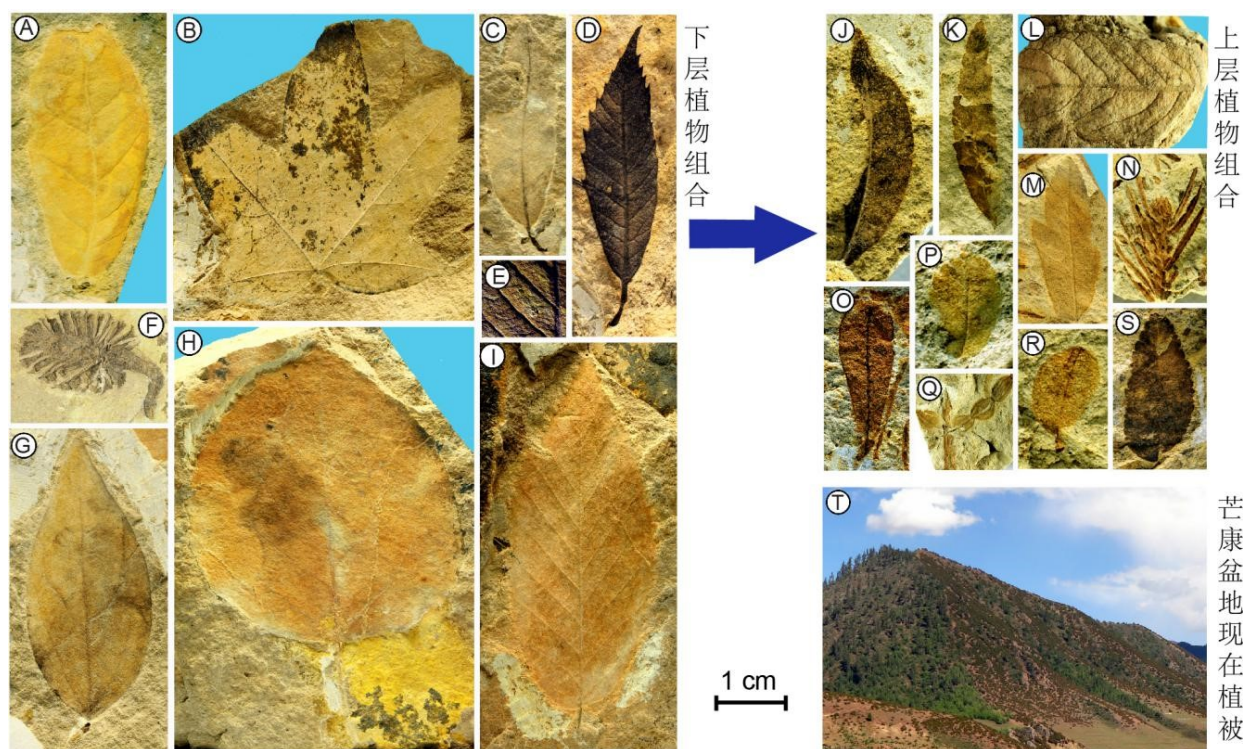


图 9 青藏高原东南缘芒康盆地不同层位的植物叶片化石组合 (苏涛 供图)

上述两项研究为认识青藏高原的形成过程提供了全新的古植物学证据,表明青藏高原并不是之前认为的整体抬升,高原不同地区的抬升过程存在差异性。自 2010 年开始,团队已经获得植物化石标本 20000 余份,这些宝贵的化石材料逐渐提升了人们对于青藏高原植物多样性演变历史与古环境变化过程的认识。

**论文信息** Su Tao\*, Farnsworth A, Spicer R A, Huang Jian, Wu Fei-xiang, Liu Jia, Li Shu-feng, Xing Yao-wu, Huang Yong-jiang, Deng Wei-yu-dong, Tang He, Xu Cong-li, Zhao Fan, Srivastava G, Valdes

P J, Deng Tao, Zhou Zhe-kun\*, 2019. No high Tibetan Plateau until the Neogene. *Science Advances*, 5: eaav2189. DOI: 10.1126/sciadv.aav2189. (\*corresponding authors)

Su Tao\*, Spicer R A, Li Shi-hu, Xu He, Huang Jian, Sherlock S, Huang Yong-jiang, Li Shu-feng, Wang Li, Jia Lin-bo, Deng Wei-yu-dong, Liu Jia, Deng Cheng-long, Zhang Shi-tao, Valdes P J, Zhou Zhe-kun\*, 2019. Uplift, climate and biotic changes at the Eocene-Oligocene transition in south-eastern Tibet. *National Science Review*, 6: 495–504. DOI: 10.1093/nsr/nwy062. (\*corresponding authors)



## 进展七 侏罗纪带羽毛恐龙——为鸟类羽毛的分子演化提供直接证据

### Jurassic feathered dinosaur providing direct evidence for the molecular evolution of feathers

主要完成者：泮燕红（中国科学院南京地质古生物研究所）

其他完成者：周忠和、胡亮、赵涛、Jingmai O'Connor (邹晶梅)、王敏、李志恒、吴飞翔、徐星、郑晓廷、王孝理、Mary Schweitzer、郑文霞

**科学意义** 鉴于不同生物大分子在深时化石中的保存潜力，研究者近年来一直尝试应用多种分析手段，利用深时化石中的分子证据来检验现代分子生物学得出的与演化相关的假说，进一步彰显形态学、发育生物学、古老和现生生物的分子生物学数据跨学科整合的可行性。其中通过多手段的结合，对恐龙和化石鸟类羽毛的分子组成进行了分析，为羽毛的演化提供了直接的分子化石证据，该项成果 2019 年发表在《美国科学院院报》(PNAS)上。论文发表后，《科学》(Science)杂志还专门撰文进行了报道，美国南卡州立大学演化生物学家 Matthew Greenwold 对这一项工作给予高度评价，认为 “This type of work is every evolutionary biologist’s dream”。

In view of the conservation potential of different biological molecules in deep time fossils, recently researchers have been trying to use multiple analytical methods to detect them to test the hypothesis related to evolution theories derived from modern molecular biology, further demonstrate the feasibility of interdisciplinary integration of morphological, developmental biology, ancient and modern biological molecular biology data. In this work, the molecular compositions of feathers of dinosaurs and fossil birds have been analyzed through multiple techniques, which provides direct molecular evidence from fossils for the evolution of feathers. This achievement was published on PNAS in 2019. After the paper was published, Science magazine also published a special report. Matthew Greenwold, an evolutionary biologist from South Carolina State University, highly praised this work and thought that “this type of work is every evolutionary biologist’s dream”。

**进展介绍** 侏罗纪近鸟龙是迄今发现的最早的带羽毛的恐龙之一，过去对其功能形态学的分析指示其具有一定的飞行能力，但是由于缺乏直接的化石证据，因此对其飞行能力的推测一直存在争议。

1 月 28 日，由中国科学院南京地质古生物研究所泮燕红博士等完成的题为“羽毛分子演化的化石直接证据”的研究成果，在线刊登在《美国科学院院报》(PNAS)上，为探讨早期羽毛的演化提供了分子生物学证据。该研究显示，以近鸟龙为代表的带毛恐龙虽然可能具备了一定的飞行能力，但其羽毛的分子构成还不足以支撑与鸟类类似的飞行。

现代鸟类的飞羽主要由  $\beta$ -角蛋白构成，这一结构蛋白赋予其特殊的生物力学属性(如柔韧性、弹性和强度)，从而能够适应飞行的需要。鸟类祖先的羽毛是否也具有同样的蛋白组成和结构呢？对这一问题的解答不仅可以揭示早期羽毛分子演化的过程，而且还能为研究带羽毛恐龙的飞行能力提供新的线索。

研究人员利用多种现代超微结构检测技术、原位元素分析和免疫学的方法，对产自我国侏罗纪地层(距今约 1.6 亿年前)的近鸟龙的羽毛化石开展了深入的研究和对比。鉴于  $\beta$ -角蛋白形成的构架纤维直径通常只有 3 nm 左右，而  $\alpha$ -角蛋白构架纤维直径通常可达 8–10 nm，他们采用高分辨率的扫描电镜和透射电镜分析，对多种化石羽毛的微细结构进行了观察和对比(图 10)。此外，他们还进一步通过化学元素和免疫学分析(包括免疫荧光和免疫电镜)进行原位检测，用以区分不同类型的角蛋白。

研究结果显示，近鸟龙的飞羽主要由  $\alpha$ -角蛋白构成，但同时还具有少量的  $\beta$ -角蛋白，不同于现代鸟类的羽毛构成。然而，我国中生代发现的鸟类如始孔子鸟、燕鸟以及一件新生代鸟类化石的羽毛，则主要由  $\beta$ -角蛋白构成，这一点已经与现代鸟类一致。这些结果表明，近鸟龙的羽毛在蛋白分子的构成上，代表了早期羽毛从不适于飞行向现生鸟类羽毛演化的过渡类型。

该项研究也进一步彰显了整合形态学、发育学和分子生物学多学科数据和研究对探讨重大生物演化事件的重要性。一般认为构成生物体的有机大

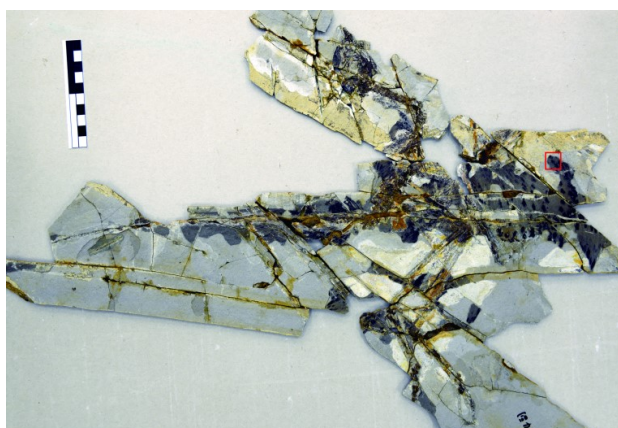


图 10 近鸟龙标本(STM0-214), 取样位置用红色框标示 (泮燕红 供图)

分子随着降解过程的发生, 原本稳定的化学键被破坏从而不复存在。但随着近年来各种分析技术的发展, 越来越多的大分子化石被发现。角蛋白比多数其他蛋白具有更好的埋藏潜力, 主要是由于其特殊的分子结构。

该研究团队前期的研究曾证实特异保存的鸟类羽毛化石中确实残留有  $\beta$ -角蛋白, 从而支持了化石鸟类和恐龙羽毛色素体的存在, 因此本项研究成果也代表了相关研究的最新进展。

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所周忠和院士、临沂大学郑晓廷教授、美国北卡罗来纳州立大学 Mary Schweitzer 教授及其团队成员参加了本项研究。相关研究工作得到了中国科学院、国家自然科学基金委等的支持。

**论文信息** Pan Yan-hong, Zheng Wen-xia, Sawyer R H, Pennington M W, Zheng Xiao-ting, Wang Xiao-li, Wang Min, Hu Liang, O'Connor J, Zhao Tao, Li Zhi-heng, Schroeter E R, Wu Fei-xiang, Xu Xing, Zhou Zhong-he\*, Schweitzer M H\*. 2019. The molecular evolution of feathers with direct evidence from fossils. PNAS, 116: 3018–3023. (\*corresponding author)

#### 并列进展八 世界首例大熊猫古基因组

##### First paleo-genome of ancient giant panda

主要完成者: 赖旭龙、盛桂莲 [中国地质大学(武汉)]

其他完成者: 吉学平, 袁俊霞, Michael Hofreiter, Axel Barlow

**科学意义** 由中国地质大学(武汉)赖旭龙教授领导的研究团队及合作者在《当代生物学》(*Current Biology*)杂志上报道了世界首例大熊猫古基因组, 该基因组从发现于云南腾冲约 5000 年前全新世大熊猫化石(图 11)中获得。运用古 DNA 方法及新一代测序技术得到的大熊猫古基因组信息, 显示该个体属于大熊猫已绝灭遗传谱系, 该谱系与现生大熊猫的祖先种群存在基因交流, 古代大熊猫的部分基因存在于现生大熊猫基因库中。该成果对于研究现代大熊猫的起源、进化和保护具有重要意义。该成果受到了国内外媒体的广泛报道, 《自然》(*Nature*)杂志网站研究亮点专栏对其进行了报道。

The ancient DNA group from China University of Geosciences (Wuhan) led by Professor Xulong Lai and collaborators reported the first genome of an ancient giant panda in *Current Biology* on May 9<sup>th</sup>, 2019. By using ancient DNA experimental method and next-generation-sequencing technology, the researchers reconstructed the paleo-genome from a 5000 years old panda individual that was found in a sinkhole in Yunnan Province. The ancient genome revealed that the 5000-year-old panda belonged to a previously undiscovered and genetically distinct population of panda. Molecular evidence has been found that some individuals from the lost population had interbred with the ancestors of today's pandas before they went extinct. As a result, parts of the extinct gene-pool still survives in living pandas, which may help them to evolve and adapt to changing environments in the future. This study provides unique scientific evidence for understanding the origin, evolution and the improvement of the protection strategies of giant panda. It has widely attracted interests of public and academic communities. Among nearly 50 related reports, the column of *Research Highlights* in *Nature* released an article of "Long-extinct pandas left a living legacy" at the same day.



图 11 云南腾冲江东山全新世大熊猫骨骼遗存 (吉学平 供图)

**进展介绍** 现生大熊猫的栖息地, 零星分布于我国四川、甘肃、陕西三省交界的青藏高原东部山区。然而, 化石记录显示, 大熊猫曾经广泛分布于北起我国周口店、南至华南大部乃至越南、缅甸的东南亚广阔区域。在大熊猫栖息地的缩减过程中, 曾经在现生种群分布区域之外留下过生活足迹和化石记录的大熊猫古代种群, 经历了怎样的种群迁移和本土绝灭过程? 它们与现生大熊猫的祖先有无遗传信息的交换和传承? 它们的消失, 对于大熊猫的演化历史而言, 带来的效应是否只是个体数目的减少(量变)、而非遗传多样性的降低(质变)? 回答上述问题, 不仅需要对现生大熊猫进行种群遗传学研究, 而且需要追踪古代个体或种群的实时分子信息。

中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室赖旭龙教授领导的古 DNA 研究组, 与德国波兹坦大学迈克尔·霍夫瑞特(Michael Hofreiter)教授研究组、云南省文物考古所吉学平研究员等单位研究人员合作, 测定了首例古代大熊猫全基因组。该基因组来自 2005 年发现于云南腾冲江东山一处天然竖井中的全新世大熊猫个体, 测年结果显示其生存年代为距今  $5025 \pm 35$  年, 是迄今发现的该地区最晚的大熊猫化石记录。

该大熊猫个体的骨骼遗存中积存了大量微生物外源 DNA。研究人员用一定浓度的去污剂浸泡样品, 提高了提取物中大熊猫内源古 DNA 的含量,

从仅 300 mg 股骨骨粉中, 运用古 DNA 实验方法和新一代测序技术, 得到了 1.2 倍覆盖度的大熊猫全基因组。

对该基因组的分析发现, 该全新世样品代表一个不同于现生大熊猫、现已绝灭的大熊猫遗传谱系; 该谱系与现生大熊猫共同祖先种群的分化, 早于现生大熊猫不同地理种群的形成。对全新世大熊猫与现生大熊猫种群是否存在遗传交流进行分析, 结果表明其代表的古代种群在现生大熊猫的各祖先种群中留下了多少不一的基因成分。由此说明, 在大熊猫物种演化过程中, 伴随着其栖息地的退缩, 其遗传多样性也有所丧失; 通过与现生大熊猫祖先种群的基因交流, 云南腾冲江东山的古代大熊猫绝灭谱系, 部分基因得以在现生大熊猫基因库中幸存。

鉴于大熊猫种群现状, 世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)于 2016 年在其编制的濒危物种红色名录中, 将大熊猫物种的保护级别从“濒危”变为“易危”。公众可能会因此产生错觉, 认为可以放缓对大熊猫及其栖息地的保护工作。然而, 对于物种保护而言, 除了种群大小这一参数, 物种的遗传多样性是影响其演化存亡的另一个关键因素。本研究通过对古代大熊猫全基因组的重建和分析, 确定大熊猫在从古至今的演化过程中, 丧失了特定的遗传谱系, 付出过遗传多样性降低的代价。本研究提供的古代大熊猫实时分子数据, 将为科学制定大熊猫保护方案提供科学依据和借鉴。另外, 绝灭遗传谱系中通过种群杂交渗透到现生大熊猫基因库中的少量基因, 可能有助于大熊猫在将来的演化过程中更好地适应不断变化的环境。

该研究是中国地质大学(武汉)古 DNA 研究组与合作方十余年来的最新研究成果。此前, 各合作方曾就包含本研究样品在内的两个全新世大熊猫样品的线粒体基因组部分基因进行了系统发育分析, 结果显示: 本研究中约 5000 年的全新世大熊猫个体, 在线粒体基因水平与现生大熊猫并未发生分化以形成独特的遗传谱系(Sheng *et al.*, 2018 Genes)。由此可见, 古代大熊猫全基因组测序及分析, 能够避免线粒体单分子标记的局限及其母系



遗传方式的干扰,反映父本及母本双方的核 DNA 经基因重组后在世代繁衍中留下的印记,为全面系统地构建大熊猫种群迁移演化历史提供更值得信赖的微观分子数据。

相关成果于 2019 年 5 月 9 日在线发表于《当代生物学》(*Current Biology*)。成果发表后,随即被《自然》(*Nature*)杂志网站“研究亮点”专栏、中国科学报、科学网等四十余家国内外报刊及网络媒体报道。

**论文信息** Sheng Gui-lian\*, Basler N, Ji Xue-ping, Pajmans J L A, Alberti F, Preick M, Hartmann S, Westbury M V, Yuan Jun-xia, Jablonski N G, Xenikoudakis G, Hou Xin-dong, Xiao Bo, Liu Jian-hui, Hofreiter M, Lai Xu-long, Barlow A\*. 2019. Paleogenome reveals genetic contribution of extinct giant panda to extant populations. *Current Biology*, 29: 1695–1700. DOI: 10.1016/j.cub.2019.04.021. (\*corresponding authors)

**并列进展八 白垩纪缅甸琥珀揭示远古森林环境和被子植物昆虫传粉证据**

**Cretaceous Burmese amber reveals ancient forest environment and insect pollination of angiosperms**

主要完成者: 王 博 (中国科学院南京地质古生物研究所)

其他完成者: David Dilcher、俞婷婷、牟 林、包 童、李建国、张海春

**科学意义** 由中国科学院南京地质古生物研究所王博研究员带领的研究团队,对一亿年前的缅甸琥珀生物群开展了长期研究,于 2019 年在《美国科学院院刊》(*PNAS*)分别报道了琥珀中的菊石等海生和陆生动物化石集群和最古老的被子植物传粉甲虫。琥珀菊石的研究表明该琥珀森林位于热带海滨地区,为琥珀埋藏学和白垩纪森林生态环境分析提供了新见解,并为缅甸琥珀年龄提供了直接证据;传粉甲虫的研究表明真双子叶植物的虫媒传粉机制已经于 1 亿年前出现,填补了早期被子植物虫媒授粉证据的空白,为解答达尔文的“讨厌之谜”提供了一个关键证据。

An international research group led by Prof. Bo

Wang of the Nanjing Institute of Geology and Palaeontology reported an ammonite alongside a mixed assemblage of terrestrial organisms and a pollinating beetle respectively in mid-Cretaceous Burmese amber (100 million years old). The first discovery indicates that the Burmese amber forest was growing near a dynamic and shifting coastal environment. The amber ammonite also provides supporting evidence for the age of the amber, which is still debated, and represents a rare example of dating using fossils present inside the amber. The second discovery provides multiple lines of evidence, including pollen-feeding mouthparts, pollen-carrying hairs on the body, and zoophilous pollination attributes of the tricolpate pollen, which strongly supports a specialized beetle-angiosperm pollination mode. It shows early evidence of insect pollination of flowering plants and demonstrates that insect pollination of flowering plants was established at least 100 million years ago.

**进展介绍** 琥珀是远古植物的树脂经过长久的地质作用形成的化石。琥珀常常含有保存很好的陆地生物,例如花、微生物、昆虫甚至蜥蜴和鸟类。由于产生条件和保存环境的限制,琥珀很少保存水生生物,海洋生物更是凤毛麟角,而水生生物化石常常能提供关键的生态环境信息。这些远古的生态环境信息为我们了解未来陆地生态系统的变化提供了重要参考。

王博等报道了保存在一枚缅甸琥珀中的菊石、螺类、节肢动物等化石集群,包括 1 个菊石、4 个螺类、4 个等足类、23 个螨虫、1 个蜘蛛、1 个马陆和至少 12 个昆虫成虫标本(蟑螂、甲虫、蠼和蜂)。形态分析表明该菊石是一个幼体标本,归入 *Puzosia* 属。该菊石类群的分布时限为白垩纪晚阿尔必期到塞诺曼期(约 105–93 百万年前),进一步支持了先前的同位素地质年代学研究结果。

研究发现琥珀中的菊石和螺类的软体都已经丢失,并且壳体都有破损,表明这些壳体在被琥珀包裹前经历了一定的搬运作用。菊石内部充填细砂粒,而琥珀珀体也包裹了类似的砂粒,表明菊石可能在沙滩或靠近沙滩位置被树脂包裹。因此,螺类和菊石在被包裹前已经死亡,并被海浪搬运

到岸边,与一些地栖生物遗体和砂粒混杂在一起。综合化石生物群和埋藏学分析结果,可以做如下推断:缅甸琥珀森林生长于海滨地带,紧靠海滩;树脂分泌后,在树干上包裹了一些树栖的昆虫,然后顺着树干流到地面后包裹了菊石、螺类和地栖的一些动物;这枚树脂很快被埋藏起来,经历复杂的地质作用形成了琥珀。本研究也表明西缅甸板块在白垩纪中期是沿海的热带雨林环境,因此孕育了丰富的海陆相动植物类群。

缅甸琥珀的时代处于白垩纪的中期。该时期的化石记录显示被子植物(当今最繁盛的植物类群)

突然大量出现。达尔文将这一“反常现象”称为“讨厌之谜”。昆虫传粉被认为是白垩纪中期被子植物大爆发的一个关键因素。尽管白垩纪中期昆虫和被子植物的种类已经较为丰富,但此时期被子植物虫媒传粉的直接证据却一直缺失。

王博等报道了缅甸琥珀中一个身体携带大量花粉的花蚤科甲虫。综合花蚤身体构型、口器形态、体毛特征、花粉形态等一系列证据,本研究确定此琥珀标本展现了白垩纪中期花蚤类甲虫对被子植物的传粉行为,并揭示了早期真双子叶植物的虫媒传粉机制(图 12)。

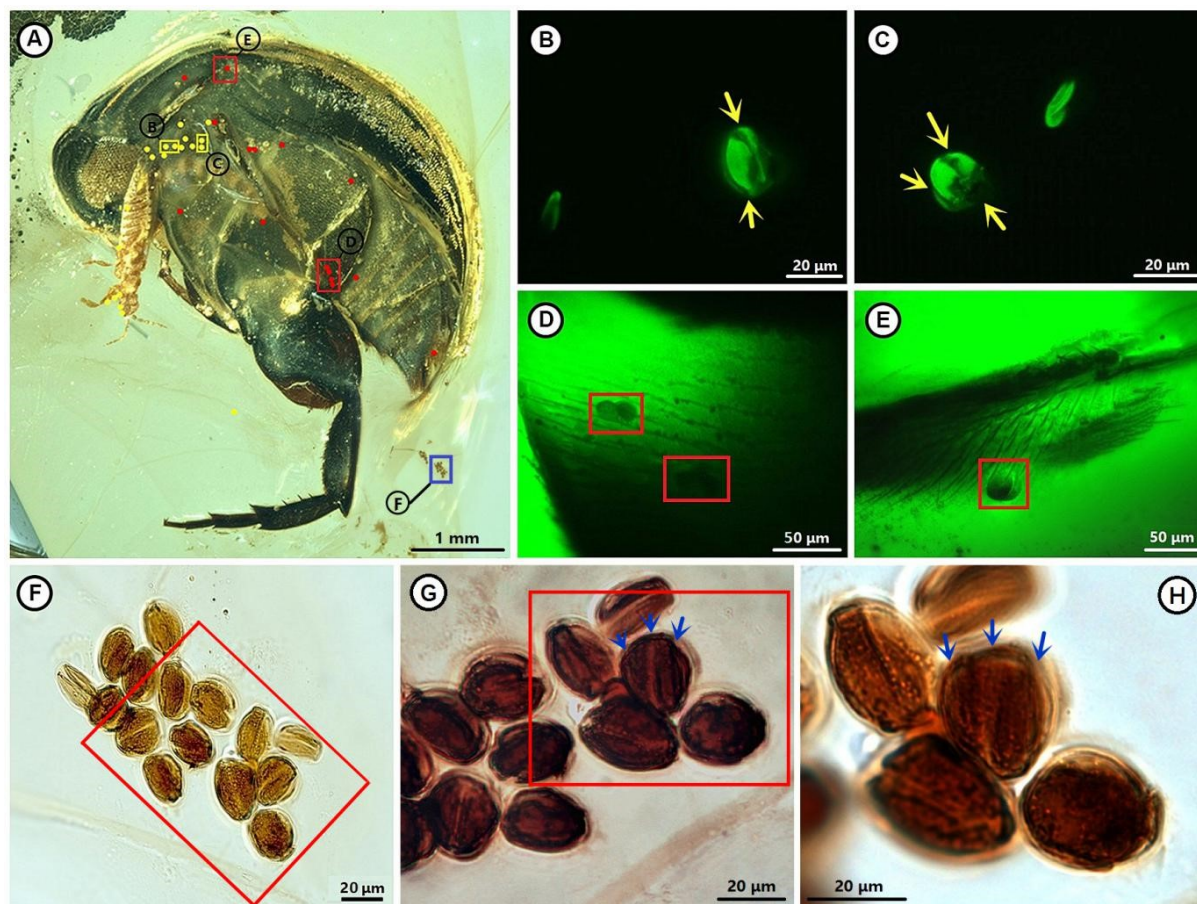


图 12 缅甸琥珀中的传粉花蚤和花粉(王博 供图)

甲虫是现今自然界中物种最丰富的昆虫类群,真双子叶植物也占据被子植物中的主体。甲虫等昆虫对真双子叶植物的传粉行为是维持现今陆地生态系统和人类农业生产正常运转的基础。该研究提供的证据表明真双子叶植物的虫媒传粉机制已经

于 1 亿年前出现。该研究结果证实了许久以来学者们关于白垩纪甲虫是早期被子植物传粉者的猜想,填补了早期被子植物虫媒授粉证据的空白,为解答达尔文的“讨厌之谜”提供了一个关键证据。

相关成果分别于 2019 年 6 月 4 日和 12 月 3

日发表在《美国科学院院刊》(PNAS)。琥珀菊石的成果被选为封面论文,传粉甲虫成果入选当期 PNAS 杂志的四篇推荐论文。

**论文信息** Yu Ting-ting, Kelly R, Mu Lin, Ross A, Kennedy J, Broly P, Xia Fang-yuan, Zhang Hai-chun, Wang Bo\*, Dilcher D\*, 2019. An ammonite trapped in Burmese amber. PNAS, 116: 11345–11350. DOI: 10.1073/pnas.1821292116.

Bao Tong, Wang Bo\*, Li Jian-guo, Dilcher D\*, 2019. Pollination of Cretaceous flowers. PNAS, 116: 24707–24711. DOI: 10.1073/pnas.1916186116. (\*corresponding authors)

**并列进展十 亚洲最古老、泥盆纪面积最大的化石森林及其最早的根座型根系**

**The most extensive Devonian fossil forest (also the oldest forest of Asia) with trees bearing the earliest stigmarian roots**

主要完成者: 王德明 (北京大学)、秦 敏 (临沂大学)、刘 乐 [中国矿业大学(北京)]

其他完成者: 刘 璐、周 易、张迎迎、黄 璞、薛进庄、张世辉、孟美琴

**科学意义** 森林最早出现在泥盆纪,但泥盆纪森林的化石记录罕见。北京大学王德明教授所在的学术团队从安徽省广德市新杭镇发现并研究了我国乃至亚洲最早、泥盆纪出露面积最大(至少 250000 m<sup>2</sup>)的森林。论文于 2019 年发表在《当代生物学》(Current Biology)。新杭森林的石松类植物演化出最早的根座型(stigmarian)根系,这是石炭纪全球广布的沼泽森林的主体植物(高大石松类植物)特有的根系。该研究还解释了早期森林与大气 CO<sub>2</sub> 浓度下降、海岸带水土保持之间的关系。

The forests first appeared in the Devonian, but such fossil record is globally rare. From Xinhang Town, Guangde City of Anhui Province, China, Prof. De-Ming Wang from Peking University and his colleagues reported a fossil forest, which is the oldest one (372–359 million years ago) in Asia and largest in the Devonian (with the exposed surface area 250000 m<sup>2</sup>). The article was published by Current Biology in 2019. The small lycopsid trees of Xinhang forest evolved the earliest stigmarian type

rooting system, which is typical of giant lycopsid trees dominating Carboniferous swamp forests distributed worldwide. The research also contributes to our understanding of atmospheric CO<sub>2</sub> decline and coastal consolidation.

**进展介绍** 森林最早出现在泥盆纪,之后遍布陆地并极大地改变了地球环境。然而,泥盆纪森林的记录极其罕见,直到最近几年,研究人员才从欧美发现了个别化石产地。相比而言,石炭纪晚期的热带沼泽森林全球广布,有数百个产地,主体植物是石松类的高大乔木。根座型(stigmarian)根系(或称为根状体)是这些树木的典型特征,但在泥盆纪还未得到证实,导致它的早期演化情况长期以来都不清楚。另外,泥盆纪森林与环境的关系还需要得到更多认识。

通过 20 多次的野外工作,我们从安徽省广德市新杭镇的上泥盆统法门阶(距今 3.72–3.59 亿年)五通组地层发现并研究了一个出露面积至少 250000 m<sup>2</sup> 的原位森林(图 13)。新杭森林由多个世代的小型石松类植物 *Guangdedendron* (广德木)的单一物种组成,局部密集排列,密度达 38 株/m<sup>2</sup>; 树木主干细长而无侧枝,顶端二分叉后形成一个简单树冠,悬挂成对或者单独的大孢子叶球。广德木具有根座型根系,即:树干基部四等分,每一部分均延伸形成二分枝的根状体,着生螺旋排列的小根。

新杭森林中的广德木的营养和繁殖器官表明它很可能是雌雄异株和单次结实的植物,它的简单柱状结构和小型树冠有助于接收光线和缓解拥挤。根系体积小,且小根向周边浅层展布,反映所处生境水源充足。埋藏学和沉积学的初步证据表明,新杭森林生活在热带碎屑岩基底的滨岸湿地并受到波浪的影响。

新杭森林是我国乃至亚洲最早、泥盆纪出露面积最大的森林,它的发现拓展了早期森林的地理分布范围,证明 stigmarian 根系首现于泥盆纪,增进了人们对早期石松类植物生活习性的认识。新杭森林的研究说明,泥盆纪森林具有巨大的生物量,通过光合作用和后续的泥炭埋藏,促进了晚古生代大气 CO<sub>2</sub> 浓度的明显下降。广德木的高分布密度、气生茎的构型、密集根系表明它适应动荡的



滨海环境,像现代的红树林那样有利于海岸地带的水土保持。

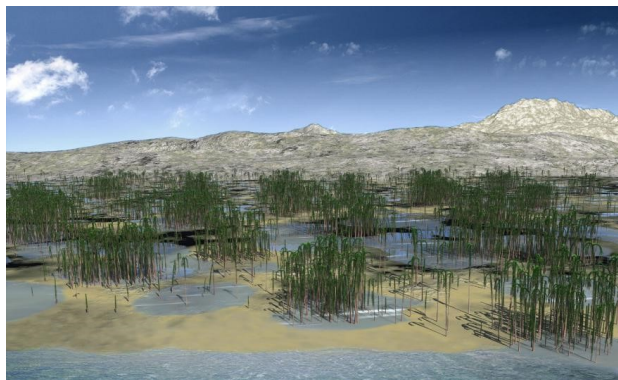


图 13 泥盆纪新杭森林景观复原图  
森林由小型石松树木——广德木(*Guangdedendron*)组成,分布在晚泥盆世热带的滨海岸边(邓珍珍等 绘制)

此项研究得到国家自然科学基金项目(41672007, 41802015)资助。相关研究结果以 article 形式于 2019 年 8 月 19 日发表在 Cell 集团期刊《当代生物学》(*Current Biology*)。该刊同期的评论文章(Berry C M)认为:我们研究的森林“令人惊叹、异常广阔,阐明了关键根系的演化”(spectacular, remarkably extensive, sheds light on the evolution of key rooting systems),“极其罕见”(incredibly rare),“揭秘森林生态系统的全球分布、生态特征和湿地植物的发育”(sheds light on the global spread of forest ecosystems, their ecology, and the development of wetland plants),“无疑具有最早的根座型根系”(has the earliest known attached unequivocal stigmarian rooting system)。《美国国家地理》*National Geographic* 认为我们研究的植物“根系异常发达,为石炭纪沼泽森林的形成奠定了基础,并逐渐演化成为今天开采的大部分煤炭”,这些煤炭“就是引发工业革命的原因”,“是我们现代文明的基础;我们第一次在这片森林中看到的这样的根状结构”。

论文信息 Wang De-ming\*, Qin Min, Liu Le\*, Liu Lu, Zhou Yi, Zhang Ying-ying, Huang Pu, Xue Jin-zhuang, Zhang Shi-hui, Meng Mei-cen, 2019. The most extensive Devonian fossil forest with small lycopsid trees bearing the earliest stigmarian roots. *Current Biology*, 29: 2604–2615. DOI: 10.1016/j.cub.2019.06.053. (\*corresponding authors)

## 并列进展十 六亿年前化石揭示动物胚胎发育方式起源之谜

### The Early Ediacaran Caveasphaera Foreshadows the Evolutionary Origin of Animal-like Embryology

主要完成者:殷宗军(中国科学院南京地质古生物研究所)、Donoghue P(英国布里斯托大学地球科学系)

其他完成者:Vargas K、Cunningham J、Bengtson S、朱茂炎、Marone F

**科学意义** 动物是如何从单细胞祖先演化成多细胞生命的呢?这一直是演化生物学领域悬而未决之谜。中国科学院南京地质古生物研究所殷宗军等人研究了我国贵州瓮安生物群中一类名叫“脊笼球”的疑难化石,为回答这一问题提供了重要线索。研究人员采用同步辐射和显微 CT 等三维无损成像技术,扫描了数百个标本,重建了脊笼球的发育序列。结果显示其发育过程中出现了有规律的细胞迁移和重组,和动物原肠胚期的细胞迁移重组行为非常一致,表明动物胚胎特有的一些发育机制在寒武纪大爆发之前至少 7 千万年就已经起源,为真正有细胞和组织分化的动物成体的出现奠定了基础。

Animals evolved from single-celled ancestors, before diversifying into 30 or 40 distinct phyla. When and how animal ancestors made the transition from single-celled microbes to complex multicellular organisms has been the focus of intense debate. Until recently, this question could only be addressed by studying living animals and their relatives, but now an international research team led by Zongjun Yin from Nanjing and Philip CJ Donoghue from Bristol has found evidence that a key step in this major evolutionary transition occurred long before complex animals appear in the fossil record. The team investigated the fossils named *Caveasphaera* in 609 million-year-old rocks in the Guizhou Province of South China, using X-ray microtomography. The results show that *Caveasphaera* develops within an envelope by cell division, ingression, detachment, and polar aggregation in a manner analogous to gastrulation of animal embryos. Together with evidence of functional cell adhesion and development within an envelope, this is suggestive of a holozoan affinity. The discov-

ery of gastrulation-like development occurring in an extinct Ediacaran holozoan suggests the evolutionary origin of animal-like embryology.

**进展介绍** 动物何时以及如何起源既让科学家痴迷,又备受民众关注。现代动物界有三十多个门类,包括了从最简单的海绵动物到最复杂的脊椎动物在内的所有多细胞动物。已有研究表明,它们拥有一个距今大约 6–7 亿多年的共同祖先。这一共同祖先是具有细胞分化的多细胞生物,它是由更古老的单细胞生命演化而来。然而,动物究竟是如何从单细胞祖先演化成多细胞生命的呢?作为动物界的成员,人们对这一问题抱有天然的好奇心,然而研究该课题的难度巨大,直到今天,它仍然是演化生物学和古生物学领域悬而未决的重大科学问题。

由于在起源时期动物个体微小而柔软,保存为化石的潜力极低,因此长久以来,人们对动物起源过程的理解主要来源于对现生动物及其单细胞近亲的演化发育生物学研究,生物学家提出了诸多理论模型和假说,但一直缺乏古生物学的实证检验。为此,中国科学院南京地质古生物研究所殷宗军和朱茂炎与英国布里斯托大学、瑞典自然历史博物馆以及瑞士光源的同行合作,研究了一类距今 6.1 亿年名叫“脊笼球”(Caveasphaera costata)的特异埋藏微体化石,为回答这一问题提供了重要线索。

脊笼球化石来自我国贵州埃迪卡拉纪陡山沱组瓮安生物群,整体呈球形,直径不到 1 mm,通过磷酸盐化作用保存了精美的多细胞结构(图 14)。研究人员采用最先进的超高分辨率同步辐射三维无损成像技术,像医生给患者做 CT 扫描一样,重构了数百个标本的立体结构,发现它们在一个充满母源营养物质的厚壁囊包中发育,不同标本代表了不同的发育阶段。在解剖学观察的基础上,研究人员结合三维数据定量统计分析,重建了脊笼球的个体发育序列,结果显示其发育过程尽管类似动物的单细胞近亲,比如中生黏菌虫(ichthyosporeans),但比现今所有动物的单细胞近亲更为复杂的是,它们在胚胎发育过程中出现了有规律的细胞迁移和重组,包括细胞黏着、分离、内移和定向聚集等。这些细

胞行为及其表现出来的复杂发育过程和动物胚胎在原肠胚期的细胞迁移重组行为非常类似,表明现代动物的一些胚胎发育机制在寒武纪大爆发之前至少 7 千多万年就已经起源。

脊笼球化石记录了动物从单细胞向多细胞演化的关键一步,填补了相关化石记录的空白,为理解动物起源的完整过程,检验已有的发育生物学模型提供了重要实证信息。该发现也进一步表明,动物的胚胎发育方式在身体模式出现之前就已经起源,为真正有细胞和组织分化的动物成体的出现奠定了基础。非常有意思的是,现今一些动物,比如部分水母和海胆,它们的胚胎在原肠胚期仍然展示了与脊笼球之间的高度相似性。

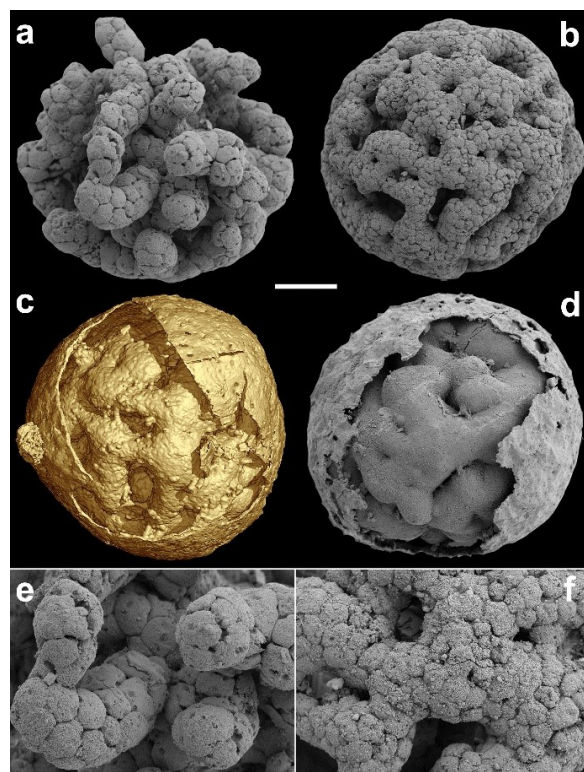


图 14 贵州瓮安生物群中的脊笼球化石

**论文信息** Yin Zong-jun\*, Vargas K, Cunningham J, Bengtson S, Zhu Mao-yan, Marone F, Donoghue P\*, 2019. The early Ediacaran *Caveasphaera* foreshadows the evolutionary origin of animal-like embryology. *Current Biology*, 29: 4307–4314. DOI: 10.1016/j.cub.2019.10.057(\*corresponding authors)